



CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TRABAJO PRÁCTICO

DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DE INTERFACE COMPUTACIONAL PARA LA
CONFIGURACIÓN DE ELEMENTOS DE ACERO DE LÁMINA DELGADA ROLADO EN

FRÍO

PRESENTA

Carlos Ramírez Torija

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

CON SALIDA EN ESTRUCTURAS

TUTOR

Dr. José Ángel Ortiz Lozano

Aguascalientes, Ags., 15 de Noviembre del 2013



ASUNTO: CARTA DE VOTO APROBATORIO

DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS
DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **CARLOS RAMÍREZ TORIJA** con ID 147890 quien realizó el trabajo práctico titulado: **DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DE INTERFACE COMPUTACIONAL PARA LA CONFIGURACIÓN DE ELEMENTOS DE ACERO DE LÁMINA DELGADA ROLADO EN FRÍO** y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirlo, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 7 de Octubre de 2013.



Dr. José Ángel Ortiz Lozano.
Tutor de trabajo práctico.



c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretario de Investigación y Posgrado de las Ciencias del Diseño y de la Construcción
c.c.p.- Jefatura del Depto. De Construcción y Estructuras
c.c.p.- Consejero Académico Área Estructuras
c.c.p.- Minuta Secretario Técnico

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por no dejarme solo en esta empresa y concederme lo necesario para agregar esta página al libro de mi vida profesional.

Gracias al Fondo de Desarrollo Científico y Tecnológico para el Fomento de la Producción y Financiamiento de Vivienda y el Crecimiento del Sector Habitacional CONAVI-CONACYT por el financiamiento del proyecto de investigación (clave 105212) titulado "ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DE SISTEMAS CONSTRUCTIVO-ESTRUCTURALES A BASE DE ACERO ROLADO EN FRÍO (LIGHT GAUGE STEEL FRAMING) PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS EN ZONAS AFECTADAS POR AGRIETAMIENTOS ASOCIADOS AL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA", en el cual se enmarcó este Trabajo Práctico de Maestría.

Gracias al Dr. José Ángel Ortiz Lozano por haberme dado la oportunidad de pertenecer al equipo que ejecutó el estudio de la aplicación del sistema LGSF para viviendas afectadas por agrietamientos asociados a la subsidencia y por darme la asesoría necesaria para la terminación de este trabajo práctico.

Gracias a la Familia Vargas, a la Familia Ramírez y a los muchos amigos que me alentaron y ayudaron a culminar este proyecto de vida, y en especial... gracias a mi esposa Gaby, que me dio su ayuda incondicional cuando más la necesité.

ÍNDICE GENERAL

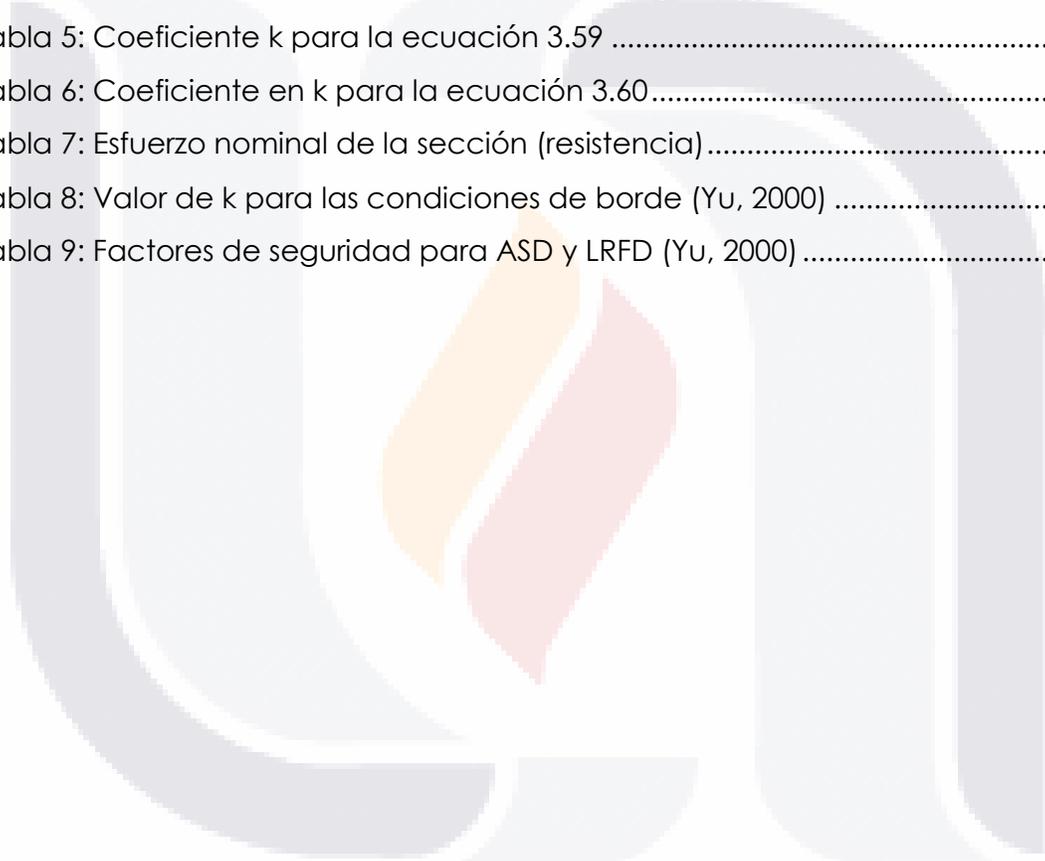
ÍNDICE GENERAL	1
ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ACRÓNIMOS	7
RESUMEN	9
ABSTRACT.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
CAPITULO 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.1 ANTECEDENTES	12
1.2 JUSTIFICACIÓN	15
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	18
CAPITULO 2 ANÁLISIS DEL SISTEMA LGSF.....	19
2.1 RESEÑA GENERAL.....	19
2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA LGSF	19
2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS PERFILES (STUDS).....	25
2.3.1 Tipo de acero	25
2.3.2 Tipo de galvanizado.....	27
2.3.4 Dimensiones comerciales	28
2.4 PROPIEDADES DEL ACERO PARA LOS PERFILES (STUDS).....	29
2.4.1 Esfuerzo de fluencia, resistencia última y curva esfuerzo-deformación....	29
2.4.2 Módulo de elasticidad y módulo tangente	30
2.4.3 Ductilidad.....	31

2.4.4 Resistencia a la fatiga y tenacidad.....	31
2.4.5 La facilidad de formado y durabilidad.....	32
2.4.6 Los efectos de la temperatura en las propiedades mecánicas del acero	32
2.4.7 Los efectos del laminado en frío en las propiedades mecánicas del acero.....	33
2.4.8 Esfuerzos residuales debidos al proceso de laminado en frío.....	34
CAPITULO 3 EL DISEÑO A FLEXIÓN DE PERFILES DE ACERO GALVANIZADO FORMADOS EN FRÍO.....	35
3.1 RESEÑA GENERAL.....	35
3.2 RESISTENCIA A FLEXIÓN Y DEFLEXIÓN.....	36
3.2.1 Introducción.....	36
3.2.2 Sección fuerza o momento flector de la sección transversal.....	37
3.2.3 Resistencia al pandeo lateral-torsional.....	43
CAPÍTULO 4 EL DISEÑO A COMPRESIÓN DE PERFILES DE ACERO GALVANIZADO FORMADOS EN FRÍO.....	53
4.1 RESEÑA GENERAL.....	53
4.2 FLUENCIA.....	54
4.3 PANDEO POR FLEXIÓN.....	54
4.3.1 Pandeo elástico.....	54
4.3.2 Pandeo inelástico.....	55
4.4 PANDEO TORSIONAL Y PANDEO POR TORSIÓN Y FLEXIÓN.....	58
4.4.1 Formas doblemente simétricas.....	60
4.4.2 Formas simetría simple.....	61
4.4.3 Secciones no simétricas.....	64

CAPÍTULO 5 EL DISEÑO A FLEJO COMPRESIÓN DE PERFILES DE ACERO GALVANIZADO FORMADOS EN FRÍO	66
5.1 RESEÑA GENERAL.....	66
5.2 COMBINACIÓN DE TENSIÓN AXIAL Y DE FLEXIÓN	66
5.2.1 Miembros a tensión	66
5.2.2 Los elementos sometidos a carga axial de tensión y flexión combinadas	68
5.3 CARGA COMBINADA COMPRESIÓN AXIAL Y DE FLEXIÓN (VIGA - COLUMNA)	70
5.3.1 Formas no sometidas a torsión o pandeo flexo torsional	70
CAPITULO 6 DISEÑO DE LA INTERFACE COMPUTACIONAL	74
6.1 OBJETIVO	74
6.2 ALCANCES	75
6.3 METODOLOGÍA.....	75
6.4 DIAGRAMAS DE FLUJO PARA RUTINAS DE PROGRAMACIÓN	76
6.4.1 Diagrama de flujo para Flexión	76
6.4.2 Diagrama de flujo para flexo compresión.....	78
6.5 MANUALES DE OPERACIÓN.....	83
6.5.1 Manual para flexión	83
6.5.2 Manual para flexo compresión	91
CONCLUSIONES	98
GLOSARIO.....	99
BIBLIOGRAFÍA	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características importantes del sistema LGSF (GBS, 2011).	23
Tabla 2: Descripción y propiedades mecánicas relevantes del acero ASTM A653 reconocido por el AISI (ASTM, 2007).	26
Tabla 3: Pesos por unidad de área y espesor del recubrimiento (CFSEI 2007).	27
Tabla 4: propiedades de los postes comerciales (studs)(GBS, 2011).	28
Tabla 5: Coeficiente k para la ecuación 3.59	51
Tabla 6: Coeficiente en k para la ecuación 3.60.....	52
Tabla 7: Esfuerzo nominal de la sección (resistencia).....	83
Tabla 8: Valor de k para las condiciones de borde (Yu, 2000)	93
Tabla 9: Factores de seguridad para ASD y LRFD (Yu, 2000)	96



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fenómeno de subsidencia (www.fopae.gov.co).....	12
Figura 2: Explotación del agua subterránea (www.fing.edu.uy/imfia/ghs/subterraguas/temas/interferencias/interf.htm).	13
Figura 3: Agrietamiento en el oriente de la Ciudad de Aguascalientes.....	14
Figura 4: Viviendas afectadas por el agrietamiento en Valle de Chalco Estado de México (www.http://vivirmexico.com/2011/07/chalco-y-el-oriente-del-df-se-hunde-cada-ano-40-centimetros).....	16
Figura 5: Sistema constructivo LGSF.....	17
Figura 6: Componentes del Sistema LGSF (GBS, 2011).	20
Figura 7: Doblado de la lámina mediante rodillos para obtener los perfiles.....	21
Figura 8: Ajuste del poste con el poliestireno (GBS, 2011).....	22
Figura 9: Cinta de acero galvanizado G60.....	22
Figura 10: Dimensiones de los postes comerciales (studs).	28
Figura 11: Curvas esfuerzo-deformación de acero laminado en caliente (Soporte Uson).....	29
Figura 12: Curvas esfuerzo-deformación de acero laminado en frío (Soporte Uson).	30
Figura 13: Vista oriente de la estructura de la vivienda a escala real.....	75
Figura 14: Vista Sur de la estructura de la vivienda a escala real.....	76
Figura 15: Diagrama de flujo para rutina de flexión.	77
Figura 16: Diagrama de flujo para rutina de flexo compresión.	78
Figura 17: Diagrama de flujo para rutina de flexo compresión (continuación).....	79
Figura 18: Diagrama de flujo para rutina de flexo compresión (continuación).....	80
Figura 19: Diagrama de flujo para rutina de flexo compresión (continuación).....	81
Figura 20: Diagrama de flujo para rutina de flexo compresión (continuación).....	82
Figura 21: Ubicación de la ejecución de las instrucciones 1-5.....	84
Figura 22: Caratula del Software libre CUFSM.....	84
Figura 23: Ubicación de la pestaña Input.....	85
Figura 24: Ubicación del botón C/Z Template.....	85

Figura 25: Ubicación del botón Submit to input	86
Figura 26: Ubicación de la pestaña Properties.....	86
Figura 27: Presentación de las propiedades de la sección.....	87
Figura 28: Ubicación de la instrucción 7	87
Figura 29: Ubicación de la instrucción 8.....	88
Figura 30: Valores de K (Yu 2000)	88
Figura 31: Ubicación instrucción 9	89
Figura 32: Ubicación de la instrucción 10.....	89
Figura 33: Ubicación de la instrucción 11	90
Figura 34: Ubicación de la instrucción 12.....	90
Figura 35: Ubicación de la instrucción 2.....	91
Figura 36: Ubicación de la instrucción 4.....	92
Figura 37: Ubicación de la instrucción 5.....	92
Figura 38: Ubicación de la instrucción 6.....	93
Figura 39: Ubicación de la instrucción 7	94
Figura 40: Ubicación de la instrucción 8.....	94
Figura 41: Ubicación de la instrucción 9	95
Figura 42: Ubicación para activar el Solver	96
Figura 43: Ubicación de la instrucción 11	97
Figura 44: Ubicación de la instrucción 12.....	97

ACRÓNIMOS

A

AISI: American Iron and Steel Institute

ASCE: American Society of Civil Engineers

ASD: Allowable Stress Design

ASTM: American Society for Testing and Materials

C

CFSEI: Cold-Formed Steel Engineers Institute

cm: centímetro

E

E: Modulo de elasticidad

Et: Modulo de elasticidad tangencial

F

fpr: Límite de proporcionalidad

Fu: Resistencia ultima

Fy: Límite de fluencia

H

HSLA: High Strength Low Alloy

K

kg: kilogramo

ksi: kilo square inched

L

LGSF: Light Gauge Steel Framing.

LRFD: Load and Resistance Factor Design

M

mm: Milímetro

Mpa: Mega pascal

N

N: Norte

P

psi: Pounds square inched

R

R: Radio interior en la esquina

S

S: Sur

SS: Structural Steel

T

t: espesor de la lamina

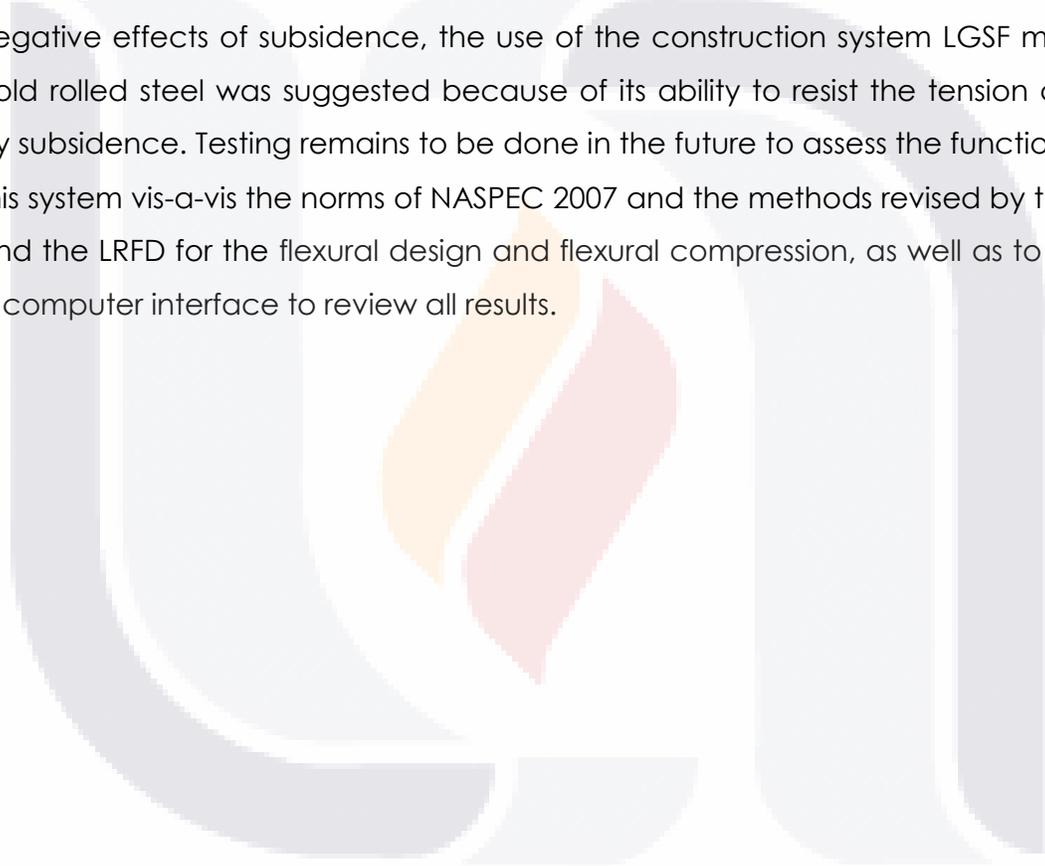


RESUMEN

En las regiones centrales del país se presentan fenómenos de subsidencia los cuales son causados principalmente por la extracción excesiva de agua subterránea provocando la afectación en zonas urbanas que tiene como consecuencia el deterioro de la infraestructura urbana, ya que los sistemas constructivos utilizados son muy sensibles a los esfuerzos de tensión provocados por suelos afectados por la subsidencia, a fin de utilizar estos espacios y poder minimizar esta problemática que afecta sobre todo a las casas habitación, por lo anterior, se propuso un sistema constructivo LGSF, el cual está compuesto por perfiles de acero rolado en frío, ya que sus propiedades son muy ventajosas ante los esfuerzos de tensión provocados por la subsidencia, por lo que será necesario comprobar el buen funcionamiento de este sistema, dicha verificación se hará con la norma NASPEC mediante los métodos de revisión por el ASD y LRFD para diseño por flexión y flexo compresión, por lo que se generará una interface computacional para la revisión de un sinfín de elementos.

ABSTRACT

In the central region of Mexico, there are many incidences of subsidence primarily caused by the excessive extraction of groundwater. This has led to the deterioration of urban infrastructure because much of the construction is sensitive to the stresses and tension caused by the settling of the soil. With the goal of creating residential developments in the affected areas and minimizing the negative effects of subsidence, the use of the construction system LGSF made of cold rolled steel was suggested because of its ability to resist the tension caused by subsidence. Testing remains to be done in the future to assess the functioning of this system vis-a-vis the norms of NASPEC 2007 and the methods revised by the ASD and the LRFD for the flexural design and flexural compression, as well as to create a computer interface to review all results.



INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la subsidencia del suelo ha comenzado a afectar en gran escala a la infraestructura residencial e industrial de las zonas urbanas, causando daños a la estabilidad estructural de estas edificaciones y por consiguiente las pérdidas económicas al momento de hacer las reparaciones para tratar de rescatar estos edificios llegan a ser muy costosas y a veces imposibles de realizar generando la pérdida total del inmueble.

Buscando una solución para la problemática antes mencionada, se optó por analizar el sistema constructivo LGSF, ya que presenta grandes ventajas para poder solucionar los problemas que genera la subsidencia sobre la infraestructura residencial principalmente y así, poder comprobar la efectividad de este sistema constructivo.

El sistema LGSF será analizado en laboratorio con la ayuda de una casa habitación a escala real, la cual estará desplantada sobre una plataforma especial en la que se simularan hundimientos como los generados por la subsidencia, llevando a este sistema constructivo a su máxima capacidad de resistencia ante estos hundimientos, por lo que resulta necesaria una herramienta computacional que analice el comportamiento de los miembros sujetos a flexión y a flexo compresión y que a la vez sea adecuada a las necesidades del proyecto y así ajustar la presentación de resultados, por lo que ésta herramienta está programada en hojas de cálculo en base a la normatividad vigente para el diseño de elementos de acero rolado en frío.

CAPITULO 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

La dinámica de la subsidencia es un mecanismo que ha existido siempre, pero no se había tomado en cuenta hasta hace pocos años, gracias al considerable aumento de la población, se ha generado mayor demanda de suelo urbano para uso habitacional e industrial y por consecuencia las afectaciones que este fenómeno ha causado son mucho más perceptibles.

La forma en que el fenómeno de la subsidencia se manifiesta, es por el proceso del hundimiento vertical de una masa de suelo con muy poco desplazamiento horizontal en la superficie de la corteza terrestre, este fenómeno es generado por la extracción de alguno de los componentes que forman el subsuelo, al haber vacíos provocados por el material que ya no existe, el material de subsuelo que rodea estos vacíos, tiende a reacomodarse principalmente en forma de re compactación lo que ocasiona la subsidencia del suelo (Figura 1).



Figura 1: Fenómeno de subsidencia (www.fopae.gov.co).

Por lo tanto la subsidencia es el deslizamiento descendente de la superficie de la corteza terrestre y los factores que generan esta subsidencia suelen ser por procesos naturales físicos y químicos o por acciones realizadas por el hombre en la naturaleza. Entre los procesos naturales que generan la subsidencia se tienen los afines con plegamientos, disolución de rocas calizas, inducción por fallas geológicas activas, etc. En lo que respecta a causas provocadas por el hombre está lo relacionado con obras de infraestructura, aprovechamiento minero, extracción de gases, líquidos o sólidos del subsuelo, pero la principal causa de la subsidencia en varias ciudades de la parte central de nuestro país es la provocada por la extracción excesiva de agua subterránea.

Dichos depósitos sedimentarios pueden ser alterados al descender los niveles del manto freático como resultado de una sobreexplotación del agua subterránea y como ya es sabido, al extraer el agua del manto freático se generan vacíos entre las partículas del suelo los cuales alguna vez estuvieron saturados de agua, con lo que se provoca un incremento en los esfuerzos efectivos en la masa de suelo sobre el nivel freático, provocando un reacomodo de estas partículas del suelo y por consiguiente la consolidación de estos estratos a diferentes profundidades y en diferentes condiciones, produciendo así, varias irregularidades como son los hundimientos, los cuales provocan esfuerzos de tensión que determinan la aparición de grietas en la superficie de la corteza terrestre (Zermeño, 2004) (Figura 2).

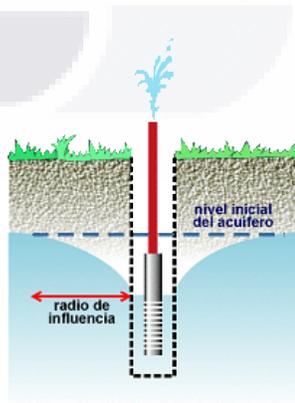


Figura 2: Explotación del agua subterránea
 (www.fing.edu.uy/imfia/ghs/subterraguas/temas/interferencias/interf.htm).

En la Ciudad de Aguascalientes, por los años ochenta comenzó a estudiarse el fenómeno del agrietamiento y sobre todo cuando se observó el mismo evento en diversos lugares cercanos a la ciudad como en Jesús María, Puertecito de la Virgen, Paso blanco, Ciudad de los Niños y El Chicalote, donde la aparición de las primeras incipientes fisuras sobre la superficie del valle era con casi ningún desfase entre ambos lados de la grieta (Zermeño, 2004).

Durante el año de 1985 se realizaron los primeros registros cartografiados de las grietas existentes en aquella época, contándose solo unas cuantas grietas de poca longitud. (Aranda y Aranda 1985).

La subsidencia y el agrietamiento del suelo son un problema que también está afectando a otras ciudades del país, y por mencionar algunas tenemos a Querétaro, Celaya, Morelia, Silao, San Luis Potosí, Irapuato, etc. Algo característico que es común de estas zonas urbanas es que están localizadas sobre cuencas tectónicas rellenas de sedimentos terciarios y cuaternarios delimitadas por fallas geológicas de carácter regional donde se puede encontrar la formación de agrietamientos (Figura 3) (Zermeño, 2004).



Figura 3: Agrietamiento en el oriente de la Ciudad de Aguascalientes.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Las estructuras generales del subsuelo, como son el relieve del basamento rocoso, aunado al agrietamiento del suelo, que este último, es resultado del fenómeno de subsidencia, están afectando una gran cantidad de infraestructura urbana, industrial, de servicios y habitacional.

Las fracturas y desniveles en la superficie de la corteza terrestre están generando grandes daños a las construcciones y de acuerdo con los levantamientos físicos que realizan las autoridades, involucran en la actualidad alrededor de 3000 viviendas dañadas. (Ortiz 2010).

El proceso constructivo de la mayoría de las viviendas de la región, utilizan sistemas estructurales basados en un cimiento corrido de piedra braza sobre el cual se desplantan los muros de carga que generalmente son a base de mamposterías de tabique de barro hecho a mano, block de concreto, tabicón, tabique extruido, etc., dichas mamposterías son confinadas con refuerzos verticales (castillos) y refuerzos horizontales (cadenas), y si el tipo de mampostería lo permite estas son también reforzadas interiormente y sobre esto son construidas las losas de concreto reforzado o sistemas de vigueta y bovedilla para formar los sistemas de piso.

Ahora, las mampostería antes mencionadas para la construcción de muros sea reforzada o no, tienen un buen desempeño ante las solicitudes que exigen las cargas que generan esfuerzos de compresión, el problema se presenta cuando estas mamposterías son afectadas por los esfuerzos de tensión generados indirectamente por los hundimientos o agrietamientos del suelo, ya que ante estos esfuerzos de tensión el comportamiento mecánico de estas mamposterías para resistir estas condiciones de esfuerzo se traduce en una nula resistencia, por lo cual estos sistemas constructivos llegan a la falla, provocando una inestabilidad en las construcciones afectadas por este fenómeno de subsidencia. En el caso de los elementos estructurales como son los refuerzos horizontales y verticales, así

como las losas, al ser reforzados con acero, están en condiciones de absorber parte de los esfuerzos de tensión generados por los hundimientos diferenciales que se generen en la estructura, pero debido a la rigidez de estos elementos y al hundimiento continuo del suelo, invariablemente llegan a la falla, lo que también implica realizar alguna reparación para su rescate y por consiguiente se genera la necesidad de hacer algún tipo de reparación siempre y cuando la gravedad de la falla en la estructura lo permita, la cual puede ser costoso o llegar al punto de que sea totalmente incosteable(Figura 4).



Figura 4: Viviendas afectadas por el agrietamiento en Valle de Chalco Estado de México (www.http//vivirmexico.com/2011/07/chalco-y-el-oriente-del-df-se-hunde-cada-ano-40-centimetros).

Como puede apreciarse el daño que sufre la infraestructura urbana es inevitable e impredecible y las reparaciones generadas por esta situación y que deben hacerse a los edificios o casas habitación son constantes por lo que repercuten directamente en el patrimonio y economía de los dueños de las estructuras afectadas por este fenómeno de subsidencia.

Una posible solución para esta problemática es la búsqueda y uso de nuevos sistemas constructivos, los cuales deben contener técnicas de construcción que ayuden a que las edificaciones tengan un mejor comportamiento ante los

hundimientos diferenciales que se generan en la proximidad de las grietas y las fallas generadas en la corteza terrestre por motivo de la subsidencia.

El sistema que se propone para tratar de hacer frente a la problemática antes mencionada, es el denominado como LGSF, que tiene como base el utilizar elementos de acero rolado en frío en combinación con un alma de material ligero para formar paneles, dichos paneles pueden ser prefabricados (Figura 5).



Figura 5: Sistema constructivo LGSF.

El comportamiento mecánico de la estructura mediante el sistema LGSF es muy apropiado para resolver la problemática antes citada, ya que el acero es uno de los materiales de construcción que tiene la mejor relación resistencia/peso lo que favorece la construcción con elementos esbeltos con gran resistencia, además, este material permite grandes deformaciones sin llegar al colapso inmediato. Finalmente, al ser materiales prefabricados, sus propiedades se mantienen estables y la resistencia de la estructura dependerá directamente de la calidad de las conexiones entre los elementos (Steel Framing Alliance, 2007).

El sistema estructural LGSF al estar compuesto por elementos de acero galvanizado rolado en frío, experimenta un desempeño mucho más eficiente ante los efectos de asentamientos diferenciales en la base de la estructura,

provocados por subsidencia, este sistema tiene la cualidad de aceptar deformaciones mucho mayores sin fallar a diferencial de los sistemas tradicionales de construcción utilizados en la región, por lo que las posibles reparaciones en estructuras construidas con este sistema, pueden realizarse de una manera más preventiva, rápida y mucho menos complicada.

En el caso de poder utilizar este sistema constructivo, se puede generar la gran ventaja de utilizar espacios que se encuentran cercanos a hundimientos y agrietamientos del suelo, dando como resultado, en el mejor de los casos el aprovechamiento de los espacios urbanos que están sin uso ya que están afectados por esta problemática.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Es necesario revisar la viabilidad del uso del sistema constructivo estructural LGSF basado en perfiles de acero galvanizado rolado en frío y paneles estructurales aligerados como una alternativa para la construcción de viviendas localizadas sobre zonas inestables afectadas por los agrietamientos y hundimientos del suelo.

Para comprobar la posible efectividad del sistema LGSF se simulará un hundimiento sobre una estructura a escala real fabricada con este sistema, por lo tanto, los comportamientos estructurales de los perfiles de acero tendrán que ser calculados en un sin fin de repeticiones, siendo necesaria la aplicación de una interface computacional para la configuración de elementos de acero de lámina delgada rolada en frío en base a la norma NASPEC 2007, para poder revisar los elementos por esfuerzos de flexión y flexo compresión, utilizando los métodos de cálculo basados en esfuerzos permisibles ASD y por factores de carga LRFD, dicha interface computacional deberá ser de fácil entendimiento para el usuario y que la presentación de los resultados cumpla con una compatibilidad con otros software para poder compartir información entre estos. Esta herramienta estará resuelta en base a las necesidades específicas que exige el proyecto al que pertenece este estudio para así poder agilizar el manejo de los datos.

CAPITULO 2 ANÁLISIS DEL SISTEMA LGSF

2.1 RESEÑA GENERAL

El acero es uno de los principales materiales en la industria de la construcción ya que se desempeña como una muy buena alternativa para su uso en esta industria debido a las ventajas que ofrece ante los requerimientos estructurales como es su alta resistencia a los esfuerzos de tensión, buen comportamiento a los esfuerzos de compresión, su eficiencia debida a su relación peso-resistencia entre otras. El uso de los perfiles de acero rolado en frío ya era conocido y recientemente ha tenido un aumento en su oferta por lo que se ha extendido su aplicación, principalmente en construcción de viviendas, y en menor demanda en infraestructura comercial e industrial. Una de las características importantes de este tipo de perfiles de acero rolado en frío de pared delgada, es su comportamiento mecánico ante cargas de compresión axial ya que por su condición de esbeltez, y su alta relación ancho-espesor son propensos a sufrir los efectos del pandeo, el cual puede presentarse de diferentes formas o tipos (Young, 2006).

2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA LGSF

El sistema LGSF incorpora un sistema constructivo Steel-Framing, integrando una sólida estructura de Acero Galvanizado y Poliestireno Expandido de alta densidad. Ambos son materiales durables, resistentes y totalmente reciclables. El sistema es ideal para aplicaciones de muro fachada, así como para muro de carga (GBS 2011).

El sistema LGSF se basa en el diseño y construcción de un bastidor hecho con secciones tipo canal de metal galvanizado ligero rolado en frío (1 y 2)

conectados con tornillería (8), dicho bastidor da sustento a un alma compuesta por otros materiales como son el poliestireno expandido (3) en conjunto con placas de panel de yeso (7) con el fin de adicionar aislamiento térmico y acústico, además es reforzado con una película de fibra de vidrio de alto impacto (5), todo esto, detallado con un recubrimiento base (4 y 5) para dar un terminado a la apariencia y así recibir el acabado final (Figura 6).

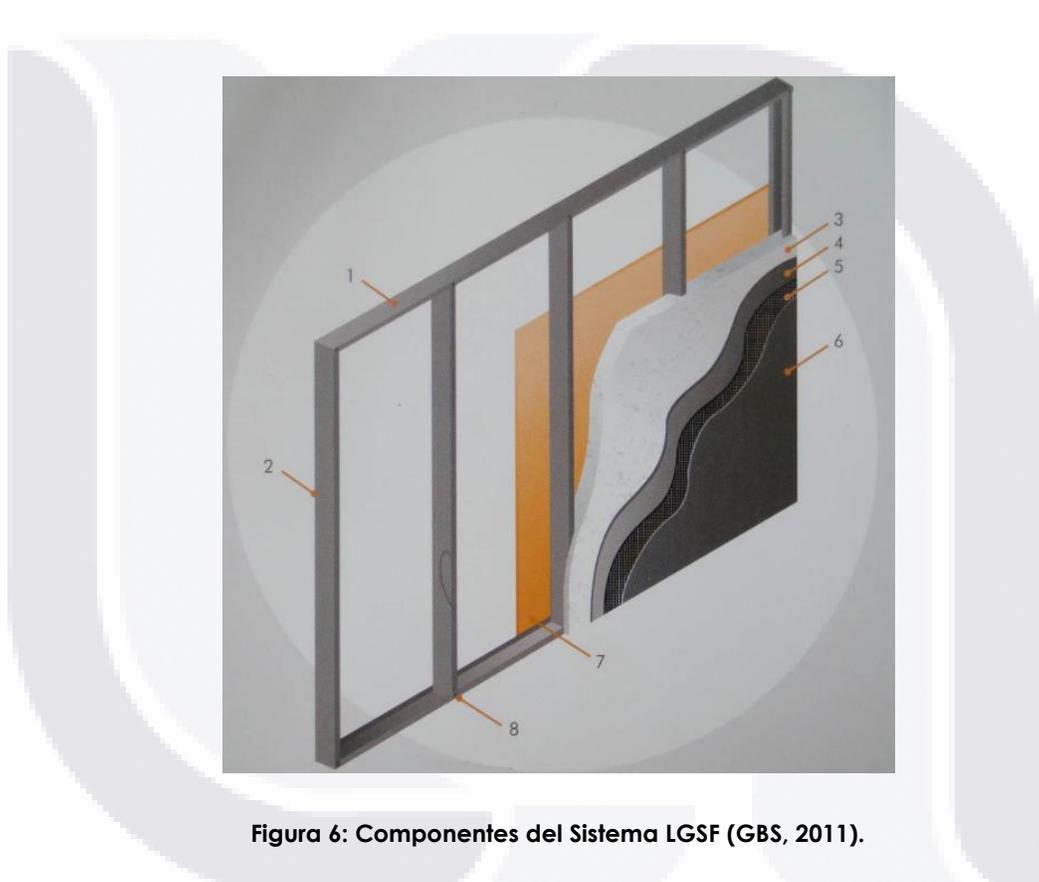


Figura 6: Componentes del Sistema LGSF (GBS, 2011).

El sistema LGSF tiene una estructuración de marcos modulares construidos con perfiles delgados de acero galvanizado, cuyas conexiones entre estos y los demás elementos de la estructura, se hacen generalmente con tornillos especialmente diseñados para este tipo de construcción.

Los perfiles de acero galvanizado formados en frío, son obtenidos a partir de hojas de acero galvanizada previamente cortadas a las dimensiones necesarias, las cuales se hacen pasar por una serie de rodillos para determinar la forma final de los perfiles, dando por consecuencia elementos muy ligeros, ya que tienen

apenas unos cuantos milímetros en su espesor. (Y. Sakumoto; T. Hirakawa; H. Masuda; and K. Nakamura, 2003) (Figura 7).

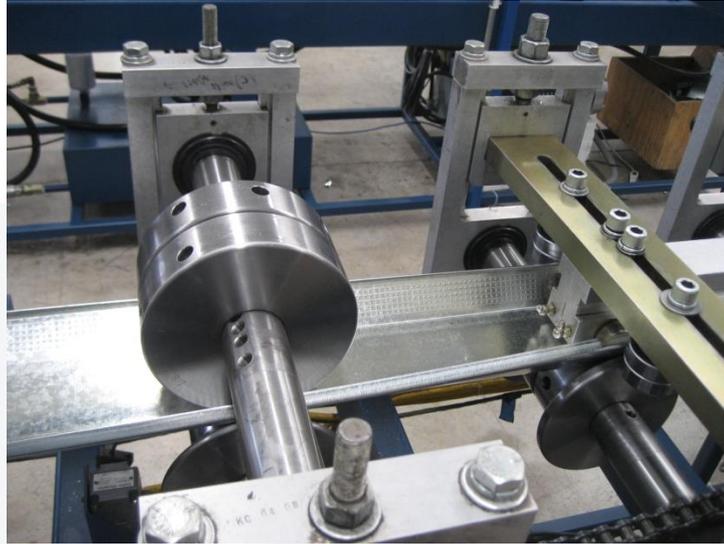


Figura 7: Doblado de la lámina mediante rodillos para obtener los perfiles

Entonces el panel se compone de postes y canales rolados que han sido diseñados de acuerdo con los códigos y normas aplicables (ASTM 446 y ASTM A-653 CS). Los postes y canales se producen con longitudes variables de acuerdo a las necesidades del proyecto. Los postes están espaciados a 16" o 24" al centro según lo requiera el diseño. Las placas de poliestireno expandido que completan el panel, también son procesadas a partir de bloques de poliestireno de alta densidad y son ajustadas entre y en medio de cada poste y canal para proporcionar aislamiento e integridad al panel (Figura 8).



Figura 8: Ajuste del poste con el poliestireno (GBS, 2011).

Los materiales del sistema LGSF con que se fabrican los miembros de acero es a partir de cintas de acero galvanizado G60 de alta resistencia (mínimo de 37,000 psi). Las cintas son certificadas por el fabricante y su espesor se adecua al calibre especificado. Dicho espesor (calibre) no puede ser inferior al 95% del espesor nominal de diseño (Figura 9).



Figura 9: Cinta de acero galvanizado G60

El poliestireno de alta densidad de las placas embebidas en los paneles, se fabrica a partir de bloques de poliestireno, sin componentes reciclados (100% virgen), con 0% de humedad, con densidad de 16 kg/m³ como mínimo. Dicha densidad no podrá variar +/- 10%. Los bloques se fabrican con perla y son del grado I auto-extinguible cumpliendo con la Norma ASTM E-84-98, por lo que el material utilizado en este panel, no alimenta o sostiene el fuego gracias a un agente ignífugo (Bromuro de Hidrógeno). Los elementos de fijación como son los tornillos utilizados en el ensamble de este panel, son del tipo TXP-12 de cabeza extraplana, autorroscantes, zincados. El largo del tornillo permite una penetración mínima de 3 líneas a través del último material atornillado. Las conexiones realizadas con estos tornillos se insertan del calibre más pesado (GBS, 2011).

Algunas características del sistema LGSF se presentan en la (tabla 1)

Concepto	Valor
Espesor Panel 3.5_20	11.4 cm
Espesor Muro terminado	13.0 cm
Altura Max de Panel permitida	5.0 cm
Ancho Max de Panel permitido	3.66 cm
Rapidez de Colocación	60 m ² /jornada
Peso de Diseño del Panel	6.5 kg/m ²
Resistencia a la Compresión Simple ²	5 kg/cm ²
Resistencia Carga Lateral ²	1.5 t/ml
Resistencia Carga Perpendicular ²	100 kg/m ²
Resistencia Térmica (ft ² h °F/Btu)	R 12.5
Absorción de Agua (% vol. Max)	4.0

Tabla 1: Características importantes del sistema LGSF (GBS, 2011).

El sistema LGSF tiene una rápida instalación pues se construye hasta un 50% más rápido que con sistemas tradicionales. Es un sistema económico pues su precio es competitivo en la optimización de indirectos y costos de financiamiento. Tiene

una resistencia que garantiza su total integridad estructural gracias a una óptima repartición de cargas y al uso de calibres por arriba del estándar en la industria.

Es ligero ya que su peso promedio es de 20 kg/m² en el sistema integral. Es un sistema durable ya que está compuesto por acero galvanizado G-60 de alta resistencia y poliestireno expandido de alta densidad de 16 kg/m³ a 24 kg/m³ y 3" de espesor. Su instalación es sencilla ya que es fácil de erigir y con troqueles para instalaciones hidrosanitarias, eléctricas y especiales. Puede ser un sistema flexible ya que su diseño y manufactura es en base a proyecto y a cálculo estructural. Tiene una racionalización buena ya que el panel estructural no requiere substrato adicional en cubiertas o fachadas. También es un sistema limpio pues genera menos escombros, polvo y basura en la obra. Por lo tanto ofrece claras ventajas en costo, velocidad de ejecución de obra y control de calidad. En este sistema se troquelan pasos en los postes (Figura 8), para las instalaciones por lo que los paneles son preparados con cortes de acuerdo a proyecto para alojar las instalaciones eléctricas e hidrosanitarias (GBS, 2011).

Durante los últimos años este tipo de sistema de construcción se ha desarrollado en diferentes partes del mundo, aplicado principalmente en la construcción de viviendas de una o dos plantas. Las principales causas que han propiciado esta situación son las ventajas que presenta este tipo de acero galvanizado entre las que se pueden mencionar las siguientes: Permite la industrialización de la construcción al efectuar la producción en serie de los elementos, reduce los tiempos de construcción, permite la prefabricación de los módulos y la mecanización al tiempo de construir, impactando favorablemente en el aspecto económico. (Taranilla García, 2009).

Este sistema representa una opción para la construcción de viviendas en zonas de subsidencia y agrietamientos, principalmente por su alta resistencia mecánica, por su capacidad para absorber deformaciones, por ser una estructura ligera comparada con la construcción tradicional y por su mejor comportamiento ante modificaciones o reparaciones.

Los bastidores de acero rolado en frío pueden ser fabricadas en longitudes de hasta más de 15 metros, pero esto puede ser muy impráctico en algunos sitios donde no hay mucho margen de maniobra, por lo que es recomendable reducir el tamaño de los bastidores y entonces diseñar una conexión para unirlos.

La fabricación de los bastidores con secciones de acero galvanizado rolado en frío, pueden ser en las instalaciones del fabricante, para solamente transportarlos al lugar de su colocación. Los bastidores también pueden ser pre ensamblados por el fabricante hasta un máximo permitido por la leyes de vialidad con respecto al transporte de carga.

El diseño de este panel cumple con la siguiente reglamentación (GBS, 2011):

- 2003 International Building Code
- 2003 International Residential Code
- American Iron & Steel Institute (AISI)
- Norma Mexicana NMX-405-1997 (en propiedades estructurales)

El sistema LGSF ayuda a un sinnfín de soluciones estructurales, ofreciendo una alta calidad y una amplia gama de perfiles de acero galvanizado de calibre ligero así como para otras aplicaciones donde hay esfuerzos estructurales que requieren ser resueltos con el diseño de estructuras ligeras.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS PERFILES (STUDS)

2.3.1 Tipo de acero

El acero ASTM A653/A653M es un tipo de acero que se utiliza comúnmente para la elaboración de perfiles estructurales. (SS, Grados 33, 37, 40 y 50 Clase 1 y Clase 3; Alta Resistencia y Baja Aleación Tipos A y B, Grados 50, 60, 70 y 80), Láminas de

Acero con Recubrimiento de Zinc (Galvanizado) o con Recubrimiento de Aleación Zinc-Hierro realizado por medio del Proceso de Inmersión en Caliente (Galvanizado y Endurecido) (Tabla 2)(ASTM, 2007).

Designación del ASTM Descripción	ASTM Designation	Minimum Yield Point or Yeld Strenght F_y (ksi)	Minimum Tensil Strenght F_u (ksi)	F_u/F_y	Minimum Elongation (%) in 2-in. Gage Lenght	
A653 / A653M-95 Ésta especificaión cubre a láminas de acero con recubrimiento de zinc (galvanizado y endurecido) en longitudes cortadas o carretes. El galvanizado se realiza por el proceso de inmersión a caliente. Se incluyen varios grados basados en la resistencia por fluencia en acero estructural (SS) y en alta resistencia y baja aleación (HSLA). Las láminas HSLA están disponibles en tipo I y II. HSLA Tipo I se recomienda cuando se requiere formabilidad mejorada en comparación con SS. El tipo II tiene aún mayor formabilidad que el tipo I. Los productos bajo la especificación A653/A653M-95 deben cumplir con las últimas modificaciones de A924/A924M, excepto cuando se indique lo contrario en la aplicación.	A653 SS					
	33	33	45	1.36	20	
	37	37	52	1.41	18	
	40	40	55	1.38	16	
	50 class 1	50	65	1.30	12	
	50 class 3	50	70	1.40	12	
	HSLAS Type A					
	50	50	60	1.20	20	
	60	60	70	1.17	16	
	70	70	80	1.14	12	
	80	80	90	1.13	10	
	HSLAS Type B					
	50	50	60	1.20	22	
	60	60	70	1.17	18	
	70	70	80	1.14	14	
	80	80	90	1.13	12	

Tabla 2: Descripción y propiedades mecánicas relevantes del acero ASTM A653 reconocido por el AISI (ASTM, 2007).

La sección A 2.31 (AISI-NASPEC 2007) establece los requisitos de resistencia y ductilidad que debe cumplir el tipo de acero a utilizar, en donde se indica que debe ser un acero ASTM A-653 de grado 33 donde el esfuerzo de fluencia debe ser por lo menos de 33 ksi (227 MPa), el esfuerzo último a la tensión debe ser por lo menos de 45 ksi (310 MPa). La relación entre el esfuerzo último y el esfuerzo de fluencia no debe ser menor que 1.08 y la elongación total, no debe de ser menor del 20% para una longitud calibrada de 2" (50 mm). Lo anterior en concordancia con la norma ASTM A370, (ASCE, 2010).

El espesor de la lámina utilizada para la fabricación de los elementos estructurales conformados en frío, consiste en una lámina de acero de calibre 20 de aproximadamente 0.95 mm de espesor nominal.

2.3.2 Tipo de galvanizado

De acuerdo con el AISI se establecen 2 tipos principales de recubrimiento: uno es el recubrimiento de zinc, mejor conocido como galvanizado, al cual se le añade alrededor de 0.2% de aluminio, que mejora la adherencia con el metal asegurando la formación de un recubrimiento de zinc puro. El otro tipo de recubrimiento es una aleación 55% aluminio-zinc, el cual está formado por 55% de Aluminio, 43.5% de Zinc y 1.5 % de silicón, que genera una mejor barrera de protección contra la corrosión, en comparación con el galvanizado con zinc puro. (CFSEI, 2007).

El proceso de galvanizado realizado por Inmersión en Caliente, es mediante el cual el material a galvanizar se pasa a través de un baño de zinc fundido a una temperatura promedio de 865°C/460°F y el zinc se adhiere al metal logrando la capa protectora. La capa de protección contiene aluminio, entre un 0.2% y 0.3% el cual ayuda en el proceso de galvanizado ya que mejora considerablemente la adherencia del recubrimiento con el acero.

La lámina utilizada presenta un recubrimiento de zinc de grado G90. El grado representa la cantidad de recubrimiento y se mide considerando su peso en g/m², o su espesor en micras (Tabla 3).

RECUBRIMIENTO		Mínimo total en ambos lados		Espesor nominal a cada lado	
		(oz/ft ²)	(g/m ²)	(in ⁻³)	(micras)
Zinc Galvanizado	G40/Z120	0.4	120	0.34	8.5
	G60/Z180	0.6	180	0.51	12.7
	G90/Z275	0.9	275	0.77	19.4
55% Aluminio-Zinc	AZ50/AZM150	0.5	150	0.8	20

Tabla 3: Pesos por unidad de área y espesor del recubrimiento (CFSEI 2007).

2.3.4 Dimensiones comerciales

Se utilizaron perfiles en sección canal con borde rígido (Figura 10), con dimensiones de 3.5" de peralte por 1 5/8" de ancho (Tabla 4).

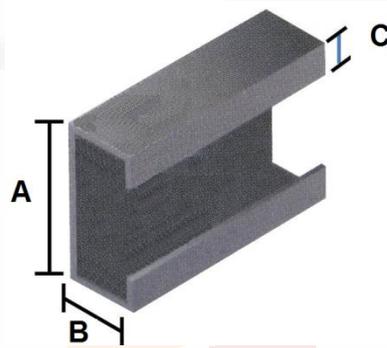


Figura 10: Dimensiones de los postes comerciales (studs).

Producto	Calibre	"A"		"B"		"C"		Longitud Sugerida	Área (cm ²)	I _{xx} (cm ⁴)	I _{yy} (cm ⁴)	S _{xx} (cm ³)	S _{yy} (cm ³)	F _y kg/cm ²	C _c	Peso kg/ml
		Pulg.	Cm.	Pulg.	Cm.	Pulg.	Cm.									
Poste Metálico	25	3.50	8.89	1 5/8	4.13	1/2"	1.27	2.44 - 3.05	0.89	11.52	2.27	2.59	1.1	2320	132	0.6853
Poste Viga	20	3.50	8.89	1 5/8	4.13	1/2"	1.27	3.05	1.63	19.36	3.35	3.56	2.2	2320	132	1.2551
Poste Viga	18	3.50	8.89	1 5/8	4.13	1/2"	1.27	3.05	2.33	29.77	5.74	6.7	2.78	2320	132	1.7947
Poste Viga	16	3.50	8.89	1 5/8	4.13	1/2"	1.27	3.05	2.75	34.95	6.69	7.86	3.24	2320	132	2.1175
Poste Viga	20	5.50	13.97	1 5/8	4.13	1/2"	1.27	3.05	2.4	78.41	5.27	7.98	2.55	2320	132	1.84415
Poste Viga	16	6.00	15.24	2.00	5.08	5/8"	1.59	6.00	4.25	150	14.7	19.7	9.4	2320	132	3.2725
Poste Viga	16	8.00	20.32	2.00	5.08	5/8"	1.59	6.00 - 8.00	4.76	281.4	15.5	27.7	6.09	2320	132	3.6652

Tabla 4: propiedades de los postes comerciales (studs)(GBS, 2011).

2.4 PROPIEDADES DEL ACERO PARA LOS PERFILES (STUDS)

2.4.1 Esfuerzo de fluencia, resistencia última y curva esfuerzo-deformación

El esfuerzo de fluencia es un factor determinante en la capacidad resistente de las secciones laminadas en frío a excepción de las conexiones y en situaciones donde el pandeo global o local sería crítico.

La grafica esfuerzo-deformación de un acero laminado en caliente (figura 11) es muy diferente a la gráfica que genera un acero laminado en frío (figura 12). El valor representado en la figura 11 para el esfuerzo de fluencia se calcula a partir del esfuerzo donde la curva hace un quiebre y toma una geometría plana en sentido horizontal, este quiebre no se manifiesta en la curva de la figura 12, ya que en esta se genera una curva suavizada, entonces no se puede calcular directamente el valor del esfuerzo de fluencia por lo que se necesita hacer uso de métodos alternativos para calcular dicho esfuerzo, como es el método de compensación o el de deformación unitaria bajo cargas.

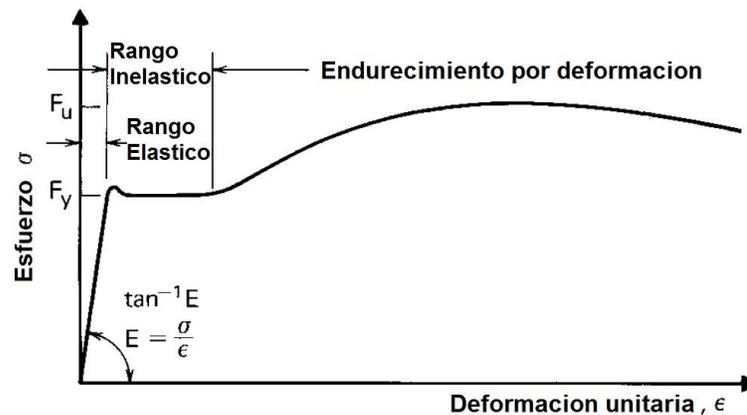


Figura 11: Curvas esfuerzo-deformación de acero laminado en caliente (Soporte Uson).

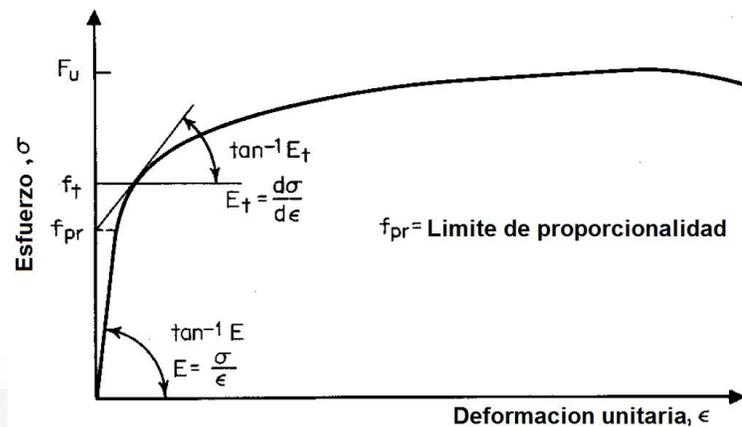


Figura 12: Curvas esfuerzo-deformación de acero laminado en frío (Soporte Uson).

Gracias a la curva esfuerzo deformación también pueden obtenerse los parámetros del límite de proporcionalidad (f_{pr}) y el de resistencia última (F_u).

El máximo esfuerzo al que puede llegar un elemento antes de que el acero ceda es conocido como la resistencia última, esta no tiene uso en el diseño de estos elementos, ya que las secciones son gobernadas por los esfuerzos de fluencia o de pandeo, sobretodo en elementos de poco espesor sujetos a sollicitaciones de compresión y que tienen relaciones de ancho con espesor grandes así como para columnas a compresión con relaciones grandes de esbeltez.

El límite de proporcionalidad es el valor máximo de esfuerzo para el cual las deformaciones son directamente proporcionales a los esfuerzos, es decir, dónde termina la parte recta de la curva (Figura 10). El límite de proporcionalidad puede ser obtenido por el método de compensación usando un desalineamiento del 0.1%.

2.4.2 Módulo de elasticidad y módulo tangente

El módulo de elasticidad (E) y el módulo tangente (E_t) son factores por lo cual se ve afectada la resistencia de elementos debido a su inestabilidad ya que el

pandeo elástico depende del primero y el pandeo inelástico del segundo. En la curva esfuerzo deformación, existe una pendiente en la parte donde la recta inicia y tiene una pendiente, dicha pendiente define el módulo de elasticidad.

Los valores comúnmente utilizados del módulo de elasticidad E para el acero se encuentran dentro del rango de 2.038×10^6 a 2.108×10^6 kg/cm² (Soporte Uson).

La pendiente presentada en cualquier punto de la curva esfuerzo deformación, es conocida como el módulo de tangente (E_t) (Figura 12).

Para las curvas con fluencia pronunciada, E_t es igual a E hasta el punto de fluencia, pero para el caso de curvas con fluencia gradual, E_t es igual a E hasta el límite de proporcionalidad. Una vez que el esfuerzo excede el límite de proporcionalidad, el valor de E_t se reduce progresivamente con respecto al valor de E . Esta es la razón del porque los aceros con fluencia pronunciada con relaciones de esbeltez moderadas tienen una mayor resistencia al pandeo que los aceros con fluencia gradual (Soporte Uson).

2.4.3 Ductilidad

Si un material puede absorber considerables deformaciones plásticas sin fracturarse se dice que es dúctil. Esta propiedad del acero permite el proceso de rolar en frío para la fabricación de perfiles y también repercute en la seguridad estructural debido a que se redistribuyen inelásticamente los esfuerzos en las conexiones.

2.4.4 Resistencia a la fatiga y tenacidad

La capacidad del acero para resistir una gran repetición de ciclos de carga y descarga antes de fallar es conocida como su resistencia a la fatiga, las posibles acciones que podrían exigir esta propiedad sería en situaciones de viento, sismo u

otros impactos de muy corta duración, por lo que AISI no toma en cuenta esta revisión ya que no tiene mucha ocurrencia, a menos de que se trate de estructuras como puentes o estructuras que tengan que soportar vibraciones.

La tenacidad es la capacidad de absorber energía sin presentar fracturamiento en el acero y esta puede ser medida con ayuda de la gráfica esfuerzo deformación pues el área debajo de esta, es el parámetro que la representa.

2.4.5 La facilidad de formado y durabilidad

El acero proporciona la facilidad de producir cualquier tipo de forma sin sufrir fallas o desgarres, lo cual denota la capacidad de este material para ser moldeado, esto es una cualidad muy importante ya que de esta forma el acero proporciona una facilidad para formar los perfiles sin sufrir daños, ya que el acero al doblarse se afectan sus propiedades mecánicas sin alterar la eficiencia estructural de los perfiles.

Gracias a la resistencia que tiene el acero a la intemperie se considera que este material es durable sobre todo cuando es afectado por el proceso de galvanizado, lo cual aumenta la vida útil de dicho material.

2.4.6 Los efectos de la temperatura en las propiedades mecánicas del acero

A temperaturas mayores de 500 °F (260 °C) las propiedades del acero como son F_y , F_u y E se ven reducidas, por lo que este factor no es tomado en cuenta ya que no existen estas alteraciones de temperatura en el clima a menos que se presente un incendio. Con temperatura menores que los 17 grados centígrados estas mismas propiedades son beneficiadas, el problema es que la tenacidad y la ductilidad del acero son reducidas por lo que se convierte en un material frágil, entonces se debe tener cuidado cuando estas estructuras son utilizadas en este

tipo de clima. Es importante tener presente que el acero sufre de cambios en su volumen lo cual crea la necesidad de tener en cuenta sistemas que absorban este tipo de deformaciones o al menos ser considerados en el análisis este tipo de esfuerzos.

2.4.7 Los efectos del laminado en frío en las propiedades mecánicas del acero

El rolado en frío del acero, aumenta el valor de F_u y de F_y los cuales reducen la ductilidad del acero y como las esquinas de las secciones fabricadas con este procedimiento necesitan más trabajo de doblado, produce que el perfil tenga diferentes propiedades mecánicas. Por lo tanto, en estas esquinas se incrementa el valor del F_y , lo cual explica el por qué se presenta el pandeo primeramente en las almas y patines de los perfiles y así las cargas extras son después de la fluencia o pandeo redirigidas a las esquinas de estos, lo cual provoca una distribución irregular de esfuerzos a compresión haciendo que las secciones sean parcialmente efectivas, esta situación es la base del diseño por anchos efectivos.

El efecto del laminado en frío sobre las propiedades mecánicas de las esquinas, depende normalmente de (Soporte U_{son}):

- el tipo de acero
- el tipo de esfuerzo (compresión o tensión)
- la dirección del esfuerzo con respecto a la dirección de laminado en frío (longitudinal o transversal), la relación F_u/F_y .
- la relación del radio interior al espesor (R/t) y la cantidad de trabajo de laminado en frío.

De todos éstos factores los más importantes son las relaciones F_u/F_y y R/t .

Los materiales vírgenes con relaciones F_u/F_y grandes, tienen un mayor potencial para el endurecimiento por deformación. Por consiguiente, al incrementar la relación F_u/F_y se incrementa el efecto del laminado en frío sobre el incremento en F_y . Valores pequeños de la relación R/t corresponden a un mayor trabajo de laminado en frío en las esquinas. Por consiguiente, mientras más pequeña sea la

relación R/t para un material dado, mayor será el incremento en F_y (Soporte Uson).

2.4.8 Esfuerzos residuales debidos al proceso de laminado en frío

Debido al rolado en frío del acero, se generan esfuerzos residuales en las secciones obtenidas por este proceso, dando como consecuencia la disminución del límite de proporcionalidad, de ahí que el AISI utilice un valor reducido de este límite con respecto al valor del F_y de un acero virgen.



CAPITULO 3 EL DISEÑO A FLEXIÓN DE PERFILES DE ACERO GALVANIZADO FORMADOS EN FRÍO

3.1 RESEÑA GENERAL

Los perfiles de acero rolado en frío como son los canales, pueden ser implementados como elementos que trabajan a flexión para que trabajen como una viga y así resistan flexión o cargas transversales.

Para poder cumplir con este propósito se debe obtener el momento resistente a flexión y la rigidez de la sección de acero rolado en frío.

Como estos elementos son de poco espesor el momento de inercia deja de ser constante y por ende varia en la longitud.

El pandeo por distorsión suele ser crítico en cierto tipo de secciones. El arriostamiento adecuado según el AISI, ayuda a soportar la flexión a la que se somete el perfil pues es el pandeo lateral y la separación grande de apoyos los que ayudan a llegar a la falla.

El subcapítulo 3.2, ha sido tomado del libro de Yu Wei Wen del año 2000 "*Cold formed steel design*" de la tercera edición publicado por John Wiley and Sons en E.U.A. debido a que la estructuración para resolver el algoritmo de programación para el diseño a flexión no puede ser modificado.

3.2 RESISTENCIA A FLEXIÓN Y DEFLEXIÓN

3.2.1 Introducción

En el diseño de miembros a flexión, debe existir suficiente resistencia a la flexión y al mismo tiempo a la deflexión del miembro bajo cargas de servicio, no debe exceder las limitaciones especificadas.

Método ASD

Se tiene como requisito de seguridad estructural para la flexión o resistencia a la flexión que:

$$M \leq M_a \tag{3.1}$$

M es la resistencia a la flexión requerida o momento flexionante para calcular a partir de las cargas nominales o cargas de trabajo

M_a es la resistencia a la flexión permisible de diseño o momento flexionante determinada por:

$$M_a = \frac{M_n}{\Omega_b} \tag{3.2}$$

Ω_b es el factor de seguridad para flexión o resistencia a la flexión y es igual a 1.67 según la especificación AISI

M_n resistencia nominal a la flexión o momento determinado por las siguientes cuatro consideraciones de diseño:

1. Resistencia de la sección o momento flexionante de la sección transversal calculado de conformidad con 3.2.2

2. Resistencia al pandeo lateral-torsional calculado de acuerdo con 3.2.3

Método LRFD

El requisito de seguridad estructural para la resistencia a la flexión se expresa

$$M_u \leq \phi_b M_n \tag{3.3}$$

M_u = resistencia a la flexión requerida o momento de flexión para LRFD

ϕ_b = factor de resistencia para reducir la resistencia a la flexión o momento flexionante y es igual a 0,95 para la resistencia nominal de la sección de los miembros a flexión, también es igual a 0,90 para la resistencia nominal de la sección de los miembros a flexión con compresión sin rigidizar.

$\phi_b M_n$ = diseño de resistencia a la flexión o momento de flexión M_n se definió en el el método para ASD.

3.2.2 Sección fuerza o momento flector de la sección transversal

La sección C3.1.1 de la edición de la Especificación AISI 1996 incluye dos procedimientos de diseño para el cálculo de la fuerza en los miembros con sección a flexión. El procedimiento I se basa en la iniciación de la fluencia y el procedimiento II se basa en la capacidad de reserva inelástica.

3.2.2.1 Iniciación de la fluencia

En el procedimiento I de la especificación del AISI, el momento nominal M_n , de la sección transversal, es el momento del rendimiento efectivo de fluencia M_y , determinado sobre la base de las áreas efectivas de los atiesadores y el alma de la viga. Al igual que el diseño de los perfiles de acero laminado en caliente, el momento M_y de una viga de acero formado en frío se define como el momento en el que una fibra externa (tensión, compresión, o ambos) primero alcanza el

punto de fluencia del acero. Esto es la capacidad de flexión máxima para ser utilizado en el diseño elástico.

En base a la discusión anterior, la resistencia nominal de la sección para la iniciación de la fluencia se calcula usando la ecuación (3.4):

$$M_n = M_y = S_e F_y \tag{3.4}$$

F_y = límite elástico de diseño

S_e = módulo de sección elástico de la sección efectiva calculada con la fibra extrema a compresión o tensión a F_y .

En el diseño de acero conformado en frío, S_e suele calcularse mediante el uso de una de los siguientes dos casos:

1. Si el eje neutro está más cerca de la tensión que del atiesador de compresión, el esfuerzo máximo se produce en el atiesador de compresión, por lo tanto la relación de esbeltez de placa λ y el ancho efectivo del atiesador de compresión, se determinan por la relación w / t y $f = F_y$. Por supuesto, este procedimiento también es aplicable a esas vigas para los que el eje neutro se encuentra en la mitad de profundidad.
2. Si el eje neutro está más cerca a la compresión que el atiesador a tensión como la tensión máxima F_y , se produce en el atiesador la tensión. La tensión en el atiesador a compresión, depende de la ubicación del eje neutro, que se determina por el área efectiva de la sección.

Este último no puede ser calculado, a menos que se conozca el esfuerzo de compresión.

La solución de forma cerrada de este tipo de diseño es posible, mediante un procedimiento muy tedioso y complejo. Por lo tanto, es costumbre determinar las propiedades de la sección por aproximación sucesiva.

3.2.2.2 Efectos del trabajo en frío sobre resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión de secciones de acero conformado en frío discutida anteriormente, se basa en la mecánica de las propiedades del material virgen.

Cuando se utilizan los efectos de trabajo en frío en la determinación de la fuerza de flexión, el cálculo puede ser realizado por uno de las siguientes dos enfoques de diseño.

1. Considerar el aumento de los puntos de rendimiento en esquinas debido al trabajo en frío y descuidar los efectos del trabajo en frío en todas partes planas de la sección.
2. Tener en cuenta los efectos del trabajo en frío para las esquinas y todos los elementos planos. En cualquier enfoque de diseño, los procedimientos siguientes se pueden usar:
 - a. Se subdividirá la sección en una cantidad de elementos. Asumir una posición del eje neutro y la tensión en la fibra superior. Calcular las tensiones en diferentes elementos basados en la fibra neutra asumida y la fibra superior.
 - b. Determinar las tensiones de la relación tensión-deformación del material en diversos elementos para las capas calculadas. Localizar el eje neutro por interacción hasta estar satisfecha la siguiente expresión.

$$\sum \sigma \Delta A = 0 \tag{3.5 a}$$

Entonces, el momento de flexión se puede aproximar por

$$M = \sum \sigma y \Delta A \tag{3.5 b}$$

σ es el esfuerzo

ΔA es el área del elemento y es la distancia entre el centro de gravedad de cada elemento y el eje neutro.

Para los aceros comúnmente utilizados en la construcción, para el acero conformado en frío de pared delgada y teniendo en cuenta los efectos de trabajo en frío sólo en las esquinas de las secciones formadas, el momento resistente se puede aumentar en un 4 a un 22% en comparación con los obtenidos cuando se descuida el trabajo en frío.

Si se consideran los efectos del trabajo en frío, tanto en los patines y las esquinas, el aumento de los rangos de resistencia a la flexión es de un 17 a 41% por encima del valor de un material virgen.

Se puede observar que una ventaja sustancial se puede obtener mediante el uso del aumento de la resistencia del material.

Cabe señalar que los efectos de trabajo en frío, no se puede aplicar directamente a otras configuraciones debido a que la relación de fluencia de las esquinas o pisos en el aumento de la resistencia a la flexión depende principalmente de la configuración de la sección, y el diferencial entre la resistencia a la tensión y el rendimiento de un material virgen. Se debe prestar atención a las limitaciones de la Sección. A7.2 de la especificación AISI cuando los efectos del trabajo en frío son utilizados en el diseño.

3.2.2.3 Capacidad de reserva inelástica

Antes de 1980, la capacidad inelástica de reserva de las vigas no se incluyó en la Especificación AISI porque la mayoría de los perfiles de acero conformados en frío tienen considerablemente una relación ancho-espesor que excede los límites requeridos por el diseño plástico. Debido a la utilización de una gran relación anchura-espesor del patín de la viga y el alma, tales miembros son por lo general incapaces de desarrollar rótulas plásticas sin pandeo local.

La fuerza de reserva inelástica de vigas de acero debido a la plastificación parcial de la sección transversal y en la redistribución de momentos de vigas estáticamente indeterminadas puede ser significativo para ciertas formas prácticas. Con el cuidado adecuado, esta fuerza de reserva se puede utilizar para lograr un diseño más económico de tales miembros.

El momento nominal M_n es la capacidad máxima de flexión de la viga teniendo en cuenta la fuerza de reserva inelástica a través de la plastificación parcial de la sección transversal. La distribución de la tensión elástica en la sección transversal depende de la deformación máxima en el atiesador de compresión (ϵ_{cu}). Basado en el trabajo de investigación de Cornell sobre las secciones sombrero con atiesadores a compresión (Reck , Pekoz , Winter. 1975) el AISI incluye en la sección C3.1.1 que el límite del diseño de la especificación limita el esfuerzo máximo de compresión a $C_y \epsilon_y$, es decir:

$$\epsilon_{cu} = C_y \epsilon_y \tag{3.5}$$

ϵ_y es el esfuerzo de fluencia = F_y/E

E es el modulo de elasticidad del acero = 29.5×10^3 ksi

F_y es el punto de fluencia del acero

C_y es un factor determinado de la siguiente manera:

1. Elementos arriostrados en compresión con atiesadores intermedios

a) Cuando $w / t \leq \lambda_1$

$$C_y = 3.0 \tag{3.6}$$

b) Cuando $\lambda_1 < w / t < \lambda_2$

$$C_y = 3 - 2 \left(\frac{w/t - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \tag{3.7}$$

c) cuando $w/t \geq \lambda_2$

$$C_y = 1.0 \tag{3.8}$$

Donde

$$\lambda_1 = \frac{1.11}{\sqrt{F_y/E}}$$

$$\lambda_2 = \frac{1.28}{\sqrt{F_y/E}}$$

(3.8 a y b)

2. Elementos de compresión sin rigidizar

$$C_y = 1.0 \tag{3.9}$$

3. Elementos a compresión con múltiples arriostramientos y elementos a compresión con refuerzos de borde

$$C_y = 1.0 \tag{3.10}$$

3.2.3 Resistencia al pandeo lateral-torsional

3.2.3.1 Doble y Simple secciones simétricas

Cuando una viga simplemente apoyada, localmente estable en forma de I está sujeta a un momento puro M , las siguientes ecuaciones diferenciales para el pandeo lateral ayudan a la solución.

$$EI_y u^{iv} + M\phi'' = 0 \tag{3.23}$$

$$EC_w \phi^{1v} - GJ\phi'' + Mu'' = 0 \tag{3.24}$$

M es momento puro de flexión

E es el módulo de elasticidad

G es el módulo cortante = $E / 2 (1 + \mu)$

I_y es el momento de inercia alrededor del eje y

C_w es la constante de torsión de la sección transversal a alabeo

J es la constante de St. Venant para torsión de la sección transversal aproximadamente determinada por

$$\frac{1}{3} \sum b_i t_i^3 \tag{3.24 a}$$

u es la deflexión al centro de cortante en dirección x

ϕ es el ángulo de giro.

Los primeros indican diferencias con respecto a z . Teniendo en cuenta la condición simplemente apoyada, las secciones de extremo no pueden desviarse o girar, ya que son libres de moverse, y no existe momento final sobre el eje y .

Las condiciones de contorno son

$$u(0) = u(L) = \phi(0) = \phi(L) = 0 \tag{3.25}$$

$$u''(0) = u''(L) = \phi''(0) = \phi''(L) = 0 \tag{3.26}$$

De la solución de las ecuaciones (3.23) y (3.24) se obtiene la siguiente ecuación para el momento crítico de pandeo lateral:

$$M_{cr} = \frac{n\pi}{L} \sqrt{EI_y GJ \left(1 + \frac{n^2 \pi^2 EC_w}{GJL^2} \right)} \tag{3.27}$$

L es la longitud del tramo y n= 1, 2, 3,

La forma abombada de la viga es

$$\phi = C \sin \left(\frac{n\pi z}{L} \right) \tag{3.28}$$

y la u deflexión lateral se puede determinar por

$$u = \frac{CML^2 \sin(n\pi z/L)}{n^2 \pi^2 EI_y} \tag{3.29}$$

Cuando $M < M_{cr}$ y $M = M_{cr}$ pero el pandeo lateral aún no ha ocurrido, la viga se desvía en la dirección y. La deflexión vertical u puede obtenerse a partir de la siguiente ecuación para un plano de flexión,

$$EI_x v'' = -M \tag{3.30}$$

Resolviendo la ecuación (3.30) y usando las condiciones de contorno $v(0)=v(L)= 0$, la ecuación de deflexión es

$$v = \frac{ML^2}{2EI_x} \left[\left(\frac{z}{L} \right) - \left(\frac{z}{L} \right)^2 \right] \tag{3.31}$$

Cuando las vigas se pandean lateralmente, la sección gira alrededor del centro de rotación C_{LB} . Este punto se encuentra a una distancia de Y_{LB} por debajo del centro de corte de la sección, tal como se determina por la siguiente ecuación.

$$y_{LB} \approx \frac{u}{\phi} = \frac{ML^2}{n^2 \pi^2 EI_y} \tag{3.32}$$

De la ecuación (3.27), para n=1, el momento crítico más bajo para pandeo lateral de una viga es igual a

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y GJ \left(1 + \frac{\pi^2 EC_w}{GJL^2} \right)} \tag{3.33}$$

Y como para las vigas I tenemos que

$$C_w \approx \frac{b^3 t d^2}{24} \tag{3.34}$$

$$I_y \approx \frac{b^3 t}{6} \tag{3.35}$$

La ecuación (3.33), entonces se puede reescribir de la siguiente manera:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y GJ + \frac{E^2 I_y^2 d^2}{4} \left(\frac{\pi}{L} \right)^2} \tag{3.36}$$

En consecuencia, la tensión crítica de pandeo lateral de una viga I sometida a flexión pura está dada por

$$\begin{aligned} \sigma_{cr} &= \frac{M_{cr}}{S_x} = \frac{M_{cr} d}{2I_x} \\ &= \frac{\pi^2 E}{2(L/d)^2} \sqrt{\left(\frac{I_y}{2I_x} \right)^2 + \left(\frac{J I_y}{2(1 + \mu) I_x^2} \right) \left(\frac{L}{\pi d} \right)^2} \end{aligned} \tag{3.37}$$

Sx es el módulo de sección y Ix es el momento de inercia de la sección completa alrededor del eje x, esta ecuación se aplica a los perfiles de acero conformados en frío con razonable eficacia.

En la ecuación (3.37) el primer término bajo la raíz cuadrada, representa la fuerza debida a la rigidez a la flexión lateral de la viga y el segundo término representa la constante St. Venant de rigidez torsional.

Para vigas I con alas desiguales, la siguiente ecuación han sido derivadas de Winter por el pandeo elástico del esfuerzo lateral de pandeo

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E d}{2L^2 S_{xc}} \left(I_{yc} - I_{yt} + I_y \sqrt{1 + \frac{4GJL^2}{\pi^2 I_y E d^2}} \right) \quad (3.38)$$

S_{xc} es el módulo de la sección relativa a la fibra de compresión y I_{yc} y I_{yt} son los momentos de inercia de las partes de compresión y la tensión de la sección completa respectivamente, sobre el eje centroide paralelo al alma, el segundo término en la raíz representa la rigidez a la torsión de St. Venant, que puede ser descuidada sin mucha pérdida en la economía. Por lo tanto la ecuación (3.38) se puede simplificar como se muestra, considerando $I_y = I_{yc} + I_{yt}$ y despreciando el término de $4GJL^2 / \pi^2 I_y E d^2$:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E d I_{yc}}{L^2 S_{xc}} \quad (3.39)$$

La ecuación (3.39) se deriva sobre la base de un momento de flexión uniforme, es más bien conservadora para el caso de momentos en los extremos desiguales, por esta razón se puede modificar multiplicando el lado derecho por un coeficiente de plegado C_b

$$\sigma_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{L^2 S_{xc} / d I_{yc}} \quad (3.40)$$

C_b es el coeficiente de plegado, que de manera conservadora se puede tomar como la unidad.

La ecuación para C_b de la Especificación AISI es:

$$C_b = \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \quad (3.40 a)$$

Mmax es el valor absoluto del momento máximo en el segmento no arriostrado
 MA es el valor absoluto del momento en el punto de segmento no arriostrado
 MB es el valor absoluto del momento en el eje del segmento no arriostrado
 MC es el valor absoluto del momento en el punto de no arriostrada a tres cuartos del segmento.

Por lo tanto, el momento crítico simplificado elástico para pandeo lateral de doble simetría en vigas I, se puede calcular a partir de la carga crítica de pandeo elástico a la tensión dada en la ecuación (3.40) y el módulo de la sección relativo a la fibra a compresión de la siguiente manera:

$$(M_{cr})_e = \sigma_{cr} S_{xc} = \frac{C_b \pi^2 E d_{yc}}{L^2} \tag{3.41}$$

Debe tenerse en cuenta que la ecuación (3.40) se aplica al pandeo elástico de vigas conformadas en frío de acero, cuando la tensión de pandeo teórico calculado es menor o igual al límite proporcional pr. Sin embargo, cuando la tensión calculada excede el límite proporcional, el comportamiento del perfil se regirá por pandeo inelástico. Para vigas extremadamente cortas, la capacidad máxima que puede alcanzar el momento plástico Mp para las secciones compactas.

$$M_p = (10/9)M_y = (10/9)F_y S_x \tag{3.42}$$

Esto significa que la tensión en las fibras extremas puede llegar a un valor hipotético de (10/9) Fy cuando L²Sxc / dlyc sea aproximado a cero si utilizamos el módulo resistente elástico calculando el momento.

Al igual que en el método anterior de diseño de elementos a compresión, el límite proporcional efectivo (límite superior del pandeo elástico) puede suponerse que es igual a la mitad de la tensión máxima

$$\sigma_{pr} = \frac{1}{2} (10/9)F_y = 0.56F_y \tag{3.43}$$

Cuando la tensión crítica teórica supera σ_{Pr} , la tensión crítica inelástica al pandeo se puede representar por la siguiente ecuación parabólica:

$$(\sigma_{cr})_I = F_y \left[A - \frac{1}{B} \left(\frac{F_y}{\sigma_{cr}} \right) \right] \tag{3.44}$$

Donde A y B son constantes que se pueden determinar por la siguiente condición:

Cuando $L=0$

$$(\sigma_{cr})_I = (10/9)F_y \tag{3.45}$$

Cuando

$$\frac{L^2 S_{xc}}{dI_{yc}} = \frac{1.8\pi^2 EC_b}{F_y}, \tag{3.46}$$

$$(\sigma_{cr})_I = 0.56F_y \tag{3.46}$$

Al resolver la ecuación (3.44), A y B se encuentran las siguientes:

$$A = 10/9 \tag{3.47}$$

$$B = 3.24 \tag{3.48}$$

Por lo tanto la ecuación (3.44) se puede escribir como

$$\begin{aligned} (\sigma_{cr})_I &= F_y \left\{ \frac{10}{9} - \frac{1}{3.24} \left[\frac{F_y(L^2 S_{xc}/dI_{yc})}{C_b \pi^2 E} \right] \right\} \\ &= \frac{10}{9} F_y \left\{ 1 - \frac{10}{36} \left[\frac{F_y(L^2 S_{xc}/dI_{yc})}{C_b \pi^2 E} \right] \right\} \end{aligned} \tag{3.49}$$

Ésta es la ecuación teórica para pandeo lateral en el rango inelástico.

Mediante el uso de la tensión crítica de pandeo inelástico dada en la ecuación (3.49) y el módulo de sección con respecto a la fibra de compresión, el momento crítico elástico para pandeo lateral de vigas I se puede calcular de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 (M_{cr})_I &= (\sigma_{cr})_I S_{xc} \leq M_y \\
 &= \frac{10}{9} M_y \left[1 - \frac{10}{36} \frac{M_y}{(M_{cr})_e} \right] \leq M_y
 \end{aligned}
 \tag{3.50}$$

M_y es el momento de fluencia y $(M_{cr})_e$ es el momento crítico elástico definido en la ecuación (3.41), las ecuaciones derivadas de perfiles en I pueden utilizarse para canales.

Se utiliza para calcular el momento crítico elástico en base a la torsión y flexión teórica y para secciones sencillas y doblemente simétricas a flexión alrededor del eje de simetría perpendicular al alma

$$(M_{cr})_e = C_b r_0 A \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t}
 \tag{3.51}$$

A es el área de la sección

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2}
 \tag{3.52 a}$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A r_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right]
 \tag{3.52 b}$$

K_y, K_t son los factores de longitud efectiva para el pandeo alrededor del eje y L_y, L_t la longitud del brazo de pandeo alrededor del eje y

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2}
 \tag{3.53}$$

r_x, r_y es el radio de giro de la sección alrededor del eje centroidal principal

x_0 es la distancia para el centro de esfuerzos alrededor del eje x tomado como negativo.

Para las secciones de simetría simple de flexión alrededor del eje centroidal perpendiculares al eje de simetría, el momento crítico elástico se basa en la teoría de pandeo torsional por flexión y se puede calcular mediante el uso de

$$(M_{cr})_e = C_s A \sigma_{ex} [j + C_s \sqrt{j^2 + r_0^2 (\sigma_t / \sigma_{ex})}] / C_{TF} \tag{3.54}$$

Cs es +1 para momento causado por compresión sobre el centro de cortante o es -1 para momento causado por tensión sobre el centro de cortante

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2} \tag{3.55}$$

CTF= 0.6 - 0,4 (M1 / M2), en donde M1 es el más pequeño y M2 es el más grande momento de flexión en los extremos de la longitud no soportada, y donde M1 / M2, la relación de momentos en los extremos, es positivo cuando M1 y M2 tienen el mismo signo (curvatura inversa de flexión) y negativo cuando son de signo opuesto (curvatura simple flexión). Cuando el momento de flexión en cualquier punto dentro de una longitud arriostrada es mayor que en los dos extremos de esta longitud, y para miembros sujetos a carga axial combinado y momento de flexión, C_{TF} se tomará como la unidad.

Kx es el factor de longitud efectiva para flexión alrededor del eje x

Lx es la longitud no soportada de la flexión alrededor del eje x

$$j = \frac{1}{2I_y} \left[\int_A x^3 dA + \int_A xy^2 dA \right] - x_0 \tag{3.56}$$

$$= \beta_y / 2.$$

Para las vigas localmente inestables, la interacción del pandeo local de elementos de compresión y el pandeo lateral general de las vigas puede resultar en una reducción de la resistencia al pandeo lateral del elemento. En el que la resistencia nominal lateral al pandeo se determina como sigue:

$$M_n = M_c \left(\frac{S_c}{S_f} \right) \tag{3.58}$$

Mc es el momento crítico elástico o inelástico que corresponda

Sc es el módulo de sección elástico eficaz calculado a un esfuerzo Mc / Sf en la fibra más comprimida

Sf es el módulo de sección elástico no reducido completo para la fibra extrema comprimida.

En la ecuación (3.58), la relación de Sc / Sf se utiliza para tener en cuenta el efecto del pandeo local sobre la resistencia al pandeo lateral de las vigas.

Las ecuaciones desarrolladas anteriormente para el momento de flexión uniforme también se pueden utilizar para otras condiciones de carga con razonable confiabilidad el valor teórico crítico para una carga concentrada en el centro de una viga simplemente apoyada, se puede calcular con

$$P_{cr} = K \frac{\sqrt{EI_y GJ}}{L^2} \tag{3.59}$$

K es un coeficiente que puede ser tomado de la tabla 5 en función del parámetro

$\frac{GJ}{E_c w} L^2$	Cargas que actúan		
	Centroide	Patin superior	Patin inferior
0.4	86.4	51.3	145.6
4	31.9	20.2	50
8	25.6	17	38.2
16	21.8	15.4	30.4
24	20.3	15	27.2
32	19.6	14.8	26.3
48	19	14.8	23.5
64	18.3	14.9	22.4
80	18.1	14.9	21.7
96	17.9	15.1	21.1
160	17.5	15.3	20
240	17.4	15.6	19.3
320	17.2	15.7	18.9
400	17.2	15.8	18.7

Tabla 5: Coeficiente k para la ecuación 3.59

GJL^2 / EC_w . Para secciones simétricas I, C_w es aproximado a $lyd^2/4$, donde d es la profundidad de la sección. Para una carga uniformemente distribuida, la carga crítica es

$$w_{cr} = K \frac{\sqrt{EI_y GJ}}{L^3} \tag{3.60}$$

K es tomado de la tabla 6:

$\frac{GJ}{E_c w}$	L^2	Cargas que actuan		
		Centroide	Patin superior	Patin inferior
0.4	143	92.9	222	
4	53	36.3	77.3	
8	42.6	30.4	59.4	
16	36.3	27.4	48	
24	33.8	26.6	43.4	
32	32.6	26.1	40.4	
48	31.5	25.8	37.6	
64	30.5	25.7	36.2	
80	30.1	25.7	35.1	
96	29	26	33.3	
160	29	26.4	32.1	
240	28.8	26.5	31.4	
320	28.7	26.6	31	
400	28.6	26.6	30.7	

Tabla 6: Coeficiente en k para la ecuación 3.60

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO 4 EL DISEÑO A COMPRESIÓN DE PERFILES DE ACERO GALVANIZADO FORMADOS EN FRÍO

4.1 RESEÑA GENERAL

Las secciones para columnas de acero puede rigidizarse de cualquier forma, para poder llevar cargas de compresión actuando en el centro de la sección transversal.

El centro de cortante en secciones de acero rolado en frío no está ubicado en el mismo lugar que el centro de la sección.

Por lo tanto en el diseño de este tipo de elementos de compresión, debe considerarse la posibilidad de los siguientes estados límite en función de la configuración de la sección, el grosor del material y la longitud de la columna utilizada (Yu, 2000):

1. Fluencia.
2. La columna total de pandeo.
3. Pandeo por flexión: flexión alrededor de un eje principal.
4. Pandeo torsional: girando alrededor del centro de cortante.
5. Pandeo por torsión y flexión: flexión y torsión simultáneamente.
6. Pandeo local de elementos individuales.

Las disposiciones de diseño para la flexión por pandeo global y el efecto de pandeo en la columna se han incluido en la especificación AISI. Este enfoque consiste en los siguientes pasos para el diseño de los miembros de compresión cargados axialmente:

1. Calcular la columna elástica por pandeo a tensión (flexión, torsión, o de torsión-flexión) para la sección no reducida.

2. Determinar la tensión nominal de falla (pandeo elástico, pandeo inelástico, o rendimiento).
3. Calcular la carga de la columna nominal en base a la tensión de rotura de gobierno y el área efectiva.
4. Determinar la carga de diseño de la columna por carga nominal con el coeficiente de seguridad indicado para el TEA o el factor de resistencia para LRFD.

Los subcapítulos 4.2, 4.3 y 4.4, han sido tomados del libro de Yu Wei Wen del año 2000 "*Cold formed steel design*" de la tercera edición publicado por John Wiley and Sons en E.U.A. debido a que la estructuración para resolver el algoritmo de programación para el diseño a flexo compresión no puede ser modificado.

4.2 FLUENCIA

Es bien sabido que una columna muy corta de sección compacta bajo carga axial puede fallar cediendo. Para este caso, la carga de fluencia es simplemente

$$P_y = A F_y \quad (4.1)$$

A= área de sección transversal total de la columna

F_y= punto de fluencia del acero

4.3 PANDEO POR FLEXIÓN

4.3.1 Pandeo elástico

Una columna esbelta con carga axial puede fallar por pandeo a flexión global si la sección transversal de la columna es de forma doblemente simétrica (sección

l), forma cerrada (tubo, cuadrado o rectangular), forma cilíndrica, forma simétrica (sección Z o cruciforme). En las formas de simetría simple, el pandeo por flexión es uno de los posibles modos de falla. Si una columna tiene una sección transversal distinta de las formas discutidas más arriba, pero está conectado a otras partes de la estructura, el miembro puede fallar por pandeo a flexión. La carga crítica de pandeo elástico para una columna larga puede ser determinada por la fórmula de Euler:

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \tag{4.2}$$

Pe= carga de pandeo

E= módulo de elasticidad

I= momento de inercia

L= longitud de la columna

K = factor de longitud efectiva

Sustituyendo $I = Ar^2$ en la ecuación (4.2), el siguiente esfuerzo de Euler para una columna con pandeo elástico se puede obtener con:

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \tag{4.3}$$

KL / r es la relación de esbeltez efectiva y r es el radio de giro.

4.3.2 Pandeo inelástico

Para el análisis de la columna de pandeo por flexión en el rango inelástico, dos conceptos se han utilizado en el pasado. Estos son el método módulo tangente y el método del módulo reducido.

El método del módulo tangente fue propuesto por Engesser en 1889, la carga del módulo tangente es

$$P_T = \frac{\pi^2 E_t I}{(KL)^2} \tag{4.4}$$

y la tensión crítica de pandeo es

$$\sigma_T = \frac{\pi^2 E_t}{(KL/r)^2} \tag{4.5}$$

E_t es el módulo tangente.

En 1895 Jasinky señaló que el concepto de módulo tangente no lo hizo incluir el efecto de descarga elástica. Engesser luego corrigió su teoría y desarrolló el módulo reducido o concepto de doble módulo, en el que:

$$P_r = \frac{\pi^2 E_r I}{(KL)^2} \quad \text{o} \quad \sigma_R = \frac{\pi^2 E_r}{(KL/r)^2} \tag{4.6}$$

E_r = módulo reducido, $E (I_1 / I) + E_t (I_2 / I)$

I_1 = momento de inercia sobre el eje neutro de la zona de descarga dado después del pandeo.

I_2 = momento de inercia sobre el eje neutro de la zona en el lado de carga después del pandeo, cada vez que el módulo calculado con Euler y la tensión está por encima del límite proporcional, el módulo tangente debe ser utilizado para calcular la tensión de pandeo.

La ecuación (4.5) se puede aproximar de forma conservadora por la siguiente fórmula, si se considera el efecto de la tensión residual y el límite efectivo de proporcionalidad, se supone que es igual a la mitad del rendimiento.

$$\begin{aligned} \sigma_T &= F_y \left(1 - \frac{F_y}{4\sigma_e} \right) \\ &= F_y - \left(\frac{F_y^2}{4\pi^2 E} \right) \left(\frac{KL}{r} \right)^2 \end{aligned} \tag{4.7}$$

F_y es el límite mínimo.

La fórmula anterior también se puede utilizar para las secciones de formado en frío. Si la tensión residual inducida por la conformación de la sección rolada en frío y las características de tensión-deformación de las láminas de acero y la tira, se considera el valor de $\sqrt{2\pi^2 E / F_y}$ que es la limitación de KL / r correspondiente a una tensión igual a $F_y / 2$. Cuando la relación de KL / r es mayor que esta relación limitante, se supone que la columna se regirá por pandeo elástico, y cuando la relación de KL / r es menor que este ratio de limitar, la columna se regirá por pandeo inelástico. En la edición de la Especificación AISI, el cálculo de la inelástica nominal y las tensiones elásticas de pandeo por flexión fueron cambiando a los utilizados en la Especificación AISC LRFD como sigue:

$$(F_n)_I = \left(0.658\lambda_c^2\right) F_y, \quad \text{when } \lambda_c \leq 1.5 \quad (4.7a)$$

$$(F_n)_e = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right] F_y, \quad \text{when } \lambda_c > 1.5 \quad (4.7b)$$

$(F_n)_I$ es la tensión de pandeo inelástico nominal $(F_n)_e$ es el esfuerzo elástico nominal por pandeo λ_c es el parámetro de esbeltez de la columna $= \sqrt{F_y / \sigma_e}$ en el que σ_e es el esfuerzo de pandeo elástico a la flexión teórica de la columna determinada por la ecuación (4.3). Las ecuaciones revisadas permiten el uso de un solo factor de seguridad para todas las ecuaciones λ_c . Los valores de la resistencia axial nominal de columnas, disminuye a medida que aumenta la esbeltez. Con el uso del factor seleccionado de la seguridad y el factor de resistencia a la que figura en el pliego de condiciones, los resultados obtenidos a partir de los enfoques de ASD y LRFD sería de aproximadamente el mismo para una relación de carga viva y muerta de 5.

4.4 PANDEO TORSIONAL Y PANDEO POR TORSIÓN Y FLEXIÓN

Cuando en una sección abierta de columna y se produce torsión y flexión simultáneamente, la sección produce u y v en las direcciones x y y y hace girar un ángulo ϕ sobre el centro de cortante. El equilibrio de una columna sometida a una carga axial P es:

$$EI_x v^{iv} + Pv'' - Px_0 \phi'' = 0 \tag{4.8}$$

$$EI_y u^{iv} + Pu'' + Py_0 \phi'' = 0 \tag{4.9}$$

$$EC_w \phi^{iv} - (GJ - Pr_0^2) \phi'' + Py_0 u'' - Px_0 v'' = 0 \tag{4.10}$$

I_x = momento de inercia alrededor del eje x , cm^4

I_y = momento de inercia alrededor del eje y , cm^4

u = desplazamiento lateral en la dirección x , plg

v = desplazamiento lateral en la dirección y , plg

ϕ = ángulo de rotación, rad

x_0 = coordenada x del centro de corte, mm

y_0 = coordenada del centro de corte, mm

E = módulo de elasticidad = 29.5×10^3 ksi (203 GPa)

G = módulo de corte = 11.3×10^3 ksi (78 GPa)

J = constante de torsión de St Venant para la sección, cm^4 , $= \frac{1}{3} \sum I_i^3$

C_w = constante deformación por torsión de la sección transversal.

EC_w = rigidez deformación

GJ = rigidez torsional

r_0 = radio polar de giro de la sección transversal sobre el centro de corte,

$$= \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2}$$

r_x, r_y = radio de giro de la sección transversal sobre el eje x - y y, mm

Todos los derivados son con respecto a z , la dirección a lo largo del eje del miembro.

Teniendo en cuenta las condiciones de contorno para un miembro completamente fijo en los extremos, es decir, en $z= 0, L$,

$$\begin{aligned} u &= v = \phi = 0 \\ u' &= v' = \phi' = 0 \end{aligned} \tag{4.11}$$

y para un miembro arriostrado en los extremos, es decir, en $z= 0, L$,

$$\begin{aligned} u &= v = \phi = 0 \\ u'' &= v'' = \phi'' = 0 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Las ecuaciones (4.8) a (4.10) son resultado de la siguiente ecuación característica:

$$\begin{aligned} r_0^2(P_{cr} - P_y)(P_{cr} - P_y)(P_{cr} - P_z) - (P_{cr})^2(y_0)^2(P_{cr} - P_x) \\ - (P_{cr})^2(x_0)^2(P_{cr} - P_y) = 0 \end{aligned} \tag{4.13}$$

P_x = carga de Euler para pandeo por flexión sobre el eje x ,

$$= \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \tag{4.14}$$

P_y = carga de Euler para pandeo por flexión sobre el eje y ,

$$= \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \tag{4.15}$$

P_z = carga de pandeo sobre el eje z ,

$$= \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} + GJ \right] \left(\frac{1}{r_0^2} \right) \tag{4.16}$$

KL = longitud efectiva de la columna teórica para arriostramientos, $K= 1$ y para los extremos fijos, $K= 0.5$. El modo de pandeo de la columna se puede determinar por la ecuación (4,13). La carga crítica de pandeo es el valor más pequeño que resulte de las tres raíces de P_{cr} .

4.4.1 Formas doblemente simétricas

Para una forma doblemente simétrica, tal como una sección en I o una cruciforme, el centro de cortante coincide con el centro de gravedad de la sección, es decir

$$x_0 = y_0 = 0 \quad (4.17)$$

Para este caso, la ecuación característica (4.13), se convierte

$$(P_{cr} - P_x)(P_{cr} - P_y)(P_{cr} - P_z) = 0 \quad (4.18)$$

La carga crítica de pandeo es el valor más bajo de las tres soluciones siguientes:

$$(P_{cr})_1 = P_x \quad (4.19)$$

$$(P_{cr})_2 = P_y \quad (4.20)$$

$$(P_{cr})_3 = P_z \quad (4.21)$$

Una inspección del posible pandeo local indica que para secciones simétricas, la columna no esté en flexión pura o en torsión pura, dependiendo de la longitud de la columna y la forma de la sección. En general los miembros a compresión son proporcionados de tal forma que no estén sujetos al pandeo por torsión. Sin embargo, si el diseñador desea evaluar el esfuerzo de pandeo por torsión = t , la siguiente fórmula basada en la ecuación (4.16) se puede utilizar:

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L)^2} \right] \quad (4.22)$$

4.4.2 Formas simetría simple

Ángulos, canales, secciones sombrero, secciones en T, secciones I con desigual arriostamiento, son formas simétricas simples. Si el eje x es el eje de simetría, y_0 la distancia entre el centro de cortante y el centro de gravedad en la dirección del eje y es igual a cero, la ecuación (4.13) se reduce entonces a

$$(P_{cr} - P_y)[r_0^2(P_{cr} - P_x)(P_{cr} - P_z) - (P_{cr}x_0)^2] = 0 \tag{4.23}$$

Para este caso, una de las soluciones es

$$(P_{cr})_1 = P_y = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \tag{4.24}$$

que es la carga de pandeo crítica a la flexión alrededor del eje y. Las otras dos soluciones para la carga de pandeo por torsión y flexión pueden obtenerse a través de la solución de la siguiente ecuación cuadrática:

$$r_0^2(P_{cr} - P_x)(P_{cr} - P_z) - (P_{cr}x_0)^2 = 0$$

$$\text{Let } \beta = 1 - (x_0/r_0)^2, \tag{4.25}$$

$$(P_{cr})_2 = \frac{1}{2\beta} [(P_x + P_z) + \sqrt{(P_x + P_z)^2 - 4\beta P_x P_z}] \tag{4.26}$$

$$(P_{cr})_3 = \frac{1}{2\beta} [(P_x + P_z) - \sqrt{(P_x + P_z)^2 - 4\beta P_x P_z}] \tag{4.27}$$

Debido a que $(P_{cr})_3$ es menor que $(P_{cr})_2$, la ecuación 4.27 se puede utilizar como la carga crítica de pandeo por torsión y flexión, que siempre es más pequeña que P_x y P_z , pero puede ser más pequeña o más grande que P_y de la ecuación 4.24.

Dividiendo la ecuación 4.27 por el área de sección transversal total de A, la siguiente ecuación puede ser obtenida para la tensión de pandeo elástico torsionante y flexionante:

$$\sigma_{TFO} = \frac{1}{2\beta} [(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t}] \quad (4.28)$$

Dónde σ_{TFO} es el esfuerzo al pandeo elástico torsional en Ksi, y

$$\sigma_{ex} = \frac{P_x}{A} \quad (4.29)$$

$$\sigma_t = \frac{P_z}{A} \quad (4.30)$$

En resumen, se puede ver que una sección simétrica por separado se puede doblar ya sea en flexión alrededor del eje y o en el pandeo por torsión y flexión (es decir, flexión alrededor del eje x y la torsión sobre el centro de cortante), dependiendo de las dimensiones de la sección y la longitud efectiva de la columna. La longitud crítica L_{cr} , que divide el modo de flexión y el modo de pandeo por torsión y flexión, se puede determinar mediante la resolución de $P_y = (P_{cr})_3$. Esto significa que si la longitud efectiva es más corta que su longitud crítica, la carga de pandeo por torsión y flexión $(P_{cr})_3$, gobernará el diseño. De lo contrario, si la longitud efectiva es más larga de la longitud crítica, la capacidad de carga del miembro dado es limitada por la carga de pandeo a flexión P_y . Si la sección de la columna esta en proporciones que la torsión y flexión no pueden ocurrir por la longitud dada, el diseño de un miembro de dicha compresión puede entonces limitarse a considerar sólo la flexión y pandeo local. De lo contrario, el pandeo por torsión y flexión también deben ser considerados.

La posibilidad de pandeo de la columna en general de una sección simétrica sencilla sobre el eje x y, puede ser considerada para tres diferentes casos. Caso 1 es para pandeo por torsión y flexión solamente. Este caso particular se caracteriza por secciones para las que $I_y > I_x$. Cuando $I_y < I_x$, en la sección se producirá un error, ya sea en el caso 2, o en el caso 3. En el caso 2, el canal arriostrado ya sea la flexión o en el modo de torsión y flexión, dependiendo de la específica relación de b / a y el parámetro tL/a^2 , donde b es la anchura del arriostramiento, a es la profundidad del alma, t es el espesor, y L es la longitud efectiva.

Para una sección canal dada y longitud de la columna, si el valor de tL/a^2 está por encima de la $(tL/a^2)_{lim}$ curva, la sección fallará en el modo de pandeo por flexión. De otra manera, se producirá un error en el modo de pandeo por torsión y flexión. En el caso 3, la sección siempre fallará en el modo de flexión, independientemente del valor de tL/a^2 .

$$K_x L_x = K_y L_y = K_t L_t = L \tag{4.30.1}$$

Al igual que en el caso de pandeo por flexión, la carga de pandeo inelástico por torsión y flexión puede obtenerse a partir de las ecuaciones elásticas mediante la sustitución de E con E_t , y G con G (E_t / E), donde E_t es el módulo tangente, que depende de la relación tensión-deformación efectiva de toda la sección transversal, es decir, para pandeo inelástico por torsión y flexión.

$$(P_x)_T = \left(\frac{E_t}{E}\right) P_x \tag{4.31}$$

$$(P_z)_T = \left(\frac{E_t}{E}\right) P_z \tag{4.32}$$

$$(P_{cr})_T = \left(\frac{E_t}{E}\right) P_{cr} \tag{4.33}$$

Con respecto a la determinación de E_t indica que

$$E_t = CE \left[\frac{\sigma}{F_y} \left(1 - \frac{\sigma}{F_y} \right) \right] \tag{4.34}$$

donde

$$C = \frac{1}{(\sigma_{pr}/F_y)(1 - \sigma_{pr}/F_y)} \tag{4.35}$$

F_y y σ_{pr} son el punto de fluencia y el límite proporcional del acero, respectivamente.

Los valores de C varían desde 3.7 a 5.1. Basándose en la ecuación (4.35) y el uso

de $C = 4$ (suponiendo $\sigma_{pr} = \frac{1}{2}F_y$), El módulo tangente E_t para la tensión de pandeo inelástico está dado por

$$E_t = 4E \frac{\sigma_{TFT}}{F_y} \left(1 - \frac{\sigma_{TFT}}{F_y} \right) \quad (4.36)$$

Dónde σ_{TFT} es el esfuerzo de tensión para el pandeo inelástico por torsión y flexión. Sustituyéndola por encima de la relación en la ecuación (4.33), la siguiente ecuación para pandeo inelástico por flexo torsión se puede obtener:

$$\sigma_{TFT} = F_y \left(1 - \frac{F_y}{4\sigma_{TFO}} \right) \quad (4.37)$$

Donde σ_{TFO} , es la tensión de pandeo elástico por torsión y flexión determinado por la ecuación (4.28).

4.4.3 Secciones no simétricas

Si la sección abierta no tiene simetría sea alrededor de un eje o alrededor de un punto, las tres posibles cargas de pandeo de P_{CR} son del tipo de torsión y flexión. El valor más bajo de la P_{CR} es siempre menor que el más bajo de los tres valores P_x , P_y , y P_z .

En el diseño de las secciones no simétricas compactas, el esfuerzo de pandeo elástico de flexo torsión σ_{TFO} puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación por ensayo y error:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\sigma_{TFO}^3}{\sigma_{ex}\sigma_{ey}\sigma_t} \right) \alpha - \left(\frac{\sigma_{TFO}^2}{\sigma_{ey}\sigma_t} \right) \gamma - \left(\frac{\sigma_{TFO}^2}{\sigma_{ex}\sigma_t} \right) \beta - \left(\frac{\sigma_{TFO}^2}{\sigma_{ex}\sigma_{ey}} \right) \\ & + \frac{\sigma_{TFO}}{\sigma_{ex}} + \frac{\sigma_{TFO}}{\sigma_{ey}} + \frac{\sigma_{TFO}}{\sigma_t} = 1 \end{aligned} \quad (4.39)$$

En el cálculo, la siguiente ecuación se puede usar para la primera aproximación:

$$\begin{aligned} \sigma_{TFO} = & [(\sigma_{ex}\sigma_{ey} + \sigma_{ex}\sigma_t + \sigma_{ey}\sigma_t) \\ & - \sqrt{(\sigma_{ex}\sigma_{ey} + \sigma_{ex}\sigma_t + \sigma_{ey}\sigma_t)^2 - 4(\sigma_{ex}\sigma_{ey}\sigma_t)(\gamma\sigma_{ex} + \beta\sigma_{ey} + \sigma_t)}] \\ & \times \left[\frac{1}{2(\gamma\sigma_{ex} + \beta\sigma_{ey} + \sigma_t)} \right] \end{aligned} \tag{4.40}$$

Donde

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2} \quad \text{ksi} \tag{4.41}$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2} \quad \text{ksi} \tag{4.42}$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A r_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad \text{ksi} \tag{4.43}$$

E es el módulo de elasticidad = 29.5x10³ ksi (203 GPa)

KL es la longitud efectiva del elemento de compresión, cm

r_x es el radio de giro de la sección transversal sobre el eje x pulg

r_y es el radio de giro de la sección transversal sobre el eje y, pulg

A es el área de la sección transversal, cm²

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2}$$

G es el módulo de corte = 11.3x10³ ksi (78 GPa)

J es la constante St. Venant de torsión de la sección, in⁴

$$\alpha = 1 - (x_0/r_0)^2 - (y_0/r_0)^2$$

$$\beta = 1 - (x_0/r_0)^2$$

$$\gamma = 1 - (y_0/r_0)^2$$

x₀ es la distancia del centro de corte a lo largo de centroide director eje-x, mm

y₀ es la distancia del centro de corte a lo largo de centroide director eje, mm

C_w es la constante de deformación por torsión de la sección transversal.

CAPÍTULO 5 EL DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN DE PERFILES DE ACERO GALVANIZADO FORMADOS EN FRÍO

5.1 RESEÑA GENERAL

La flexión en un perfil que trabaja como viga columna, puede darse por acciones de carga excéntrica transversales o por momentos flexionantes.

La forma y dimensión en la sección transversal de una viga columna, son factores para el comportamiento de la misma, es por esto que se han dividido las disposiciones de diseño atendiendo a la sección transversal y el modo de pandeo.

Los subcapítulos 5.2 y 5.3, han sido tomados del libro de Yu Wei Wen del año 2000 "*Cold formed steel design*" de la tercera edición publicado por John Wiley and Sons en E.U.A. debido a que la estructuración para resolver el algoritmo de programación para el diseño a flexo compresión no puede ser modificado.

5.2 COMBINACIÓN DE TENSIÓN AXIAL Y DE FLEXIÓN

5.2.1 Miembros a tensión

Para el diseño de acero conformado en frío, el cálculo de la resistencia a la tensión con un factor de seguridad para el método ASD y un factor de resistencia para el método LRFD se tiene que:

$$\begin{aligned}
 T_n &= A_n F_y \\
 \Omega_t &= 1.67 \text{ (for ASD)} \\
 \phi_t &= 0.95 \text{ (for LRFD)}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

T_n = resistencia a la tensión nominal

A_n = área neta de la sección transversal

F_y = diseñar límite elástico

Cuando un miembro de tensión tiene agujeros, la concentración de tensión puede resultar en un mayor esfuerzo de tracción al lado de un agujero que es alrededor de tres veces el promedio de la tensión. Con el aumento de la carga y la redistribución de tensiones plásticas, la tensión en todas las fibras sobre la superficie neta llegará a la tensión de fluencia.

C2 Miembros a tensión

Para los miembros cargados axialmente a tensión, la resistencia a la tensión nominal, T_n , será el valor más pequeño obtenido de acuerdo con los estados límite de (a), produciendo fluencia en la sección gruesa, (b) fractura en la sección neta alejados de las conexiones, y (c) en la fractura la sección neta efectiva en las conexiones:

(a) para la obtención de:

$$\begin{aligned}
 T_n &= A_g F_y \\
 \Omega_t &= 1.67 \text{ (ASD)} \\
 \phi_t &= 0.90 \text{ (LRFD)}
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

(b) para la fractura de distancia de la conexión:

$$\begin{aligned}
 T_n &= A_n F_u \\
 \Omega_t &= 2.00 \text{ (ASD)} \\
 \phi_t &= 0.75 \text{ (LRFD)}
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

T_n es la resistencia nominal de los miembros cuando se carga en la tensión

A_g es el área bruta de la sección transversal

An es el área neta de la sección transversal

Fy es el límite elástico

Fu es la resistencia a la tracción

5.2.2 Los elementos sometidos a carga axial de tensión y flexión combinadas

Cuando los miembros de acero conformado en frío están sujetos a la flexión y a la tensión axial simultánea, el miembro deberá cumplir las siguientes ecuaciones de interacción AISI prescrito en la sección. C5.1 de los métodos de especificación de la ASD y LRFD:

C5.1 combinación de carga axial en tensión y flexión

C5.1.1 ASD Método

Las resistencias requeridas T, M_x y M_y deberán cumplir las siguientes interacciones

$$\frac{\Omega_b M_x}{M_{nxt}} + \frac{\Omega_b M_y}{M_{nyt}} + \frac{\Omega_t T}{T_n} \leq 1.0 \tag{5.4a}$$

Y

$$\frac{\Omega_b M_x}{M_{nx}} + \frac{\Omega_b M_y}{M_{ny}} - \frac{\Omega_t T}{T_n} \leq 1.0 \tag{5.4b}$$

T es la fuerza de tracción axial

T_n es la fuerza de tracción axial nominal determinada

M_x, M_y es la resistencia a la flexión requeridas con respecto a los ejes centroidales de la sección

M_{nx}, M_{ny} es la resistencia a la flexión nominal alrededor de los ejes centroidales

M_{nxt}, M_{nyt} = S_{ff}F_y

S_{ff} es el módulo de la sección completa de la fibra extrema a tensión alrededor del eje apropiado

$\Omega_b = 1.67$ por resistencia a la flexión (Sec. C3.1.1) o no arriostrada lateralmente para vigas (Sec. C3.1.2.1)

$$\Omega_t = 1.67$$

C5.1.2 Método LRFD

Las resistencias requeridas T_u , M_{ux} y M_{uy} deberán cumplir las siguientes interacciones

$$\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nxt}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{nyt}} + \frac{T_u}{\phi_t T_n} \leq 1.0$$

$$\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} - \frac{T_u}{\phi_t T_n} \leq 1.0 \tag{5.5a} \tag{5.5b}$$

T_u es la fuerza de tracción axial

M_{ux} , M_{uy} es la resistencia a la flexión requeridas con respecto a los ejes centroidales

$\phi_b = 0.90$ o 0.95 para resistencia a la flexión (Sec. C3.1.1), o 0.90 para arriostramiento lateral (Sec. C3.1.2.1)

$$\phi_t = 0.95$$

5.3 CARGA COMBINADA COMPRESIÓN AXIAL Y DE FLEXIÓN (VIGA - COLUMNA)

5.3.1 Formas no sometidas a torsión o pandeo flexo torsional

Cuando una sección abierta doblemente simétrica está sujeta a la compresión axial y flexión alrededor de su eje menor, el miembro puede fallar por flexión en el lugar del máximo momento por pandeo local. Sin embargo, cuando la sección está sujeta a una carga excéntrica que produce un momento de flexión alrededor de su eje mayor, el miembro puede fallar a la flexión o por torsión y flexión debido a que el modo de carga excéntrica no pasa a través del centro de cortante.

Si una sección doblemente simétrica que está sujeta a una carga axial P y momentos M , la tensión axial y de flexión combinada en la compresión da la siguiente ecuación siempre y cuando el miembro permanezca recto:

$$\begin{aligned} f &= \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I} = \frac{P}{A} + \frac{M}{S} \\ &= f_a + f_b \end{aligned} \tag{5.6}$$

f es el estrés combinado en compresión

f_a es la tensión de compresión axial

f_b es el esfuerzo en compresión al doblar

P es la carga axial aplicada

A es el área de la sección transversal

M es el momento de flexión

c es la distancia del eje neutro a la fibra extrema

I es el momento de inercia

S es el módulo de la sección

Cabe señalar que en el diseño de viga-columna al utilizar el método del ASD, el estrés combinado debe estar limitado por cierto esfuerzo permisible F , es decir,

$$f_a + f_b \leq F \tag{5.7 a}$$

o

$$\frac{f_a}{F} + \frac{f_b}{F} \leq 1.0 \tag{5.7 b}$$

El factor de seguridad para el diseño de miembros de compresión es diferente del factor de seguridad para el diseño de vigas.

Por lo tanto la ecuación (5.7 b) se puede modificar de la siguiente manera:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1.0 \tag{5.8}$$

F_a = esfuerzo admisible para el diseño de elementos de compresión

F_b = esfuerzo admisible para el diseño de vigas

Si se utiliza la relación de resistencia en lugar de la relación de tensiones, la ecuación (5.8) puede ser reescrita como sigue:

$$\frac{P}{P_a} + \frac{M}{M_a} \leq 1.0 \tag{5.9}$$

P = carga axial aplicada = $A f_a$

P_a = carga axial permisible = $A F_a$

M = momento aplicado = $S f_b$

M_a = momento admisible = $S F_b$

La ecuación (5.9) es una fórmula de interacción. Que se puede utilizar con una precisión razonable para los miembros cortos y los miembros sometidos a una relativa pequeña carga axial. El máximo momento de flexión de la mitad de la longitud (punto C) puede ser representado por

$$M_{max} = \Phi M \tag{5.10}$$

M_{max} = momento de flexión máximo en la longitud media

M = momentos finales aplicados

Φ = factor de amplificación.

Se puede demostrar que el factor de amplificación Φ puede ser calculado por

$$\Phi = \frac{1}{1 - P/P_e} \tag{5.11}$$

P_e = carga de columna para pandeo elástico (carga de Euler), $= \pi^2 EI / (KLb)^2$.

La aplicación de un factor de seguridad Ω_c a P_e , se puede escribir como

$$\Phi = \frac{1}{1 - \Omega_c P/P_e} \tag{5.12}$$

Si utilizamos el momento máximo de flexión M_{max} para sustituir M, la siguiente fórmula de interacción se obtiene a partir de las Ecuaciones (5.9) y (5.12):

$$\frac{P}{P_a} + \frac{\Phi M}{M_a} \leq 1.0$$

o

$$\frac{P}{P_a} + \frac{M}{(1 - \Omega_c P/P_e) M_a} \leq 1.0 \tag{5.13}$$

Se ha encontrado que la ecuación (5.13), desarrollada para un miembro sometido a una carga de compresión axial y los momentos finales iguales, se pueden utilizar con razonable exactitud de los miembros arriostrados sometidos a una carga axial y una carga transversal uniformemente distribuida. Sin embargo, podría ser conservadora para los miembros de compresión en los marcos arriostrados (con desplazamiento lateral) y para los miembros doblados en curvatura inversa. Por esta razón, la fórmula de interacción dada en la ecuación (5.13) debe ser modificada además por un coeficiente de C_m , como se muestra en la ecuación (5.14), para tener en cuenta el efecto de momentos en los extremos:

$$\frac{P}{P_a} + \frac{C_m M}{(1 - \Omega_c P/P_c) M_a} \leq 1.0 \tag{5.14}$$

En la ecuación (5.4) C_m se puede calcular por la ecuación (5.15) para la compresión restringida en miembros apoyados y que no está sujeto a cargas transversales:

$$C_m = 0.6 - 0.4 \frac{M_1}{M_2} \tag{5.15}$$

M_1 / M_2 es la relación más pequeña de los momentos en los extremos más grandes.

Cuando el momento máximo se produce en los puntos arriostrados, la ecuación (5.16) debe ser utilizada para verificar el miembro en los extremos arriostrados.

$$\frac{P}{P_{a0}} + \frac{M}{M_a} \leq 1.0 \tag{5.16}$$

P_{a0} es la carga axial permisible para $KL / r = 0$.

CAPITULO 6 DISEÑO DE LA INTERFACE COMPUTACIONAL

6.1 OBJETIVO

La programación de esta interface se realizó en base a la norma NASPEC 2007 para garantizar un sistema de diseño vigente, para el cálculo de elementos de acero de lámina delgada rolados en frío.



La interface revisará los elementos cuando estos se encuentren bajo solicitaciones de esfuerzos de flexión y flexo compresión. Por lo tanto, los comportamientos estructurales de los perfiles de acero, pueden ser calculados en un sin fin de repeticiones.

Las rutinas de revisión se harán en base a los métodos de cálculo por:

- Esfuerzos permisibles ASD (Allowable Stress Design)
- Factores de carga LRFD (Load and Resistance Factor Design)

6.2 ALCANCES

Se desarrolló una interface computacional mediante un software con licencia llamado Microsoft Office Excel, el cual trabaja mediante hojas de cálculo, lo que permite al usuario tener un sistema de fácil manejo y con ello obtener resultados compatibles con diversos software para así poder hacer uso de la información sin complicación alguna.

6.3 METODOLOGÍA

En base a la teoría presentada en los capítulos 3 y 5, se programaron las rutinas de revisión de los elementos para un sistema constructivo estructural a base de perfiles de acero galvanizado rolado en frío.

Estas rutinas serán aplicadas para comprobar la efectividad del sistema LGSF, simulando un hundimiento sobre una estructura a escala real, fabricada con este sistema. (Figura 13 y 14)



Figura 13: Vista oriente de la estructura de la vivienda a escala real



Figura 14: Vista Sur de la estructura de la vivienda a escala real

6.4 DIAGRAMAS DE FLUJO PARA RUTINAS DE PROGRAMACIÓN

6.4.1 Diagrama de flujo para Flexión

En las Figura 15 se representa el diagrama de flujo, el cual muestra la secuencia lógica de programación para la rutina del cálculo por flexión de los elementos de acero en lámina delgada rolados en frío.

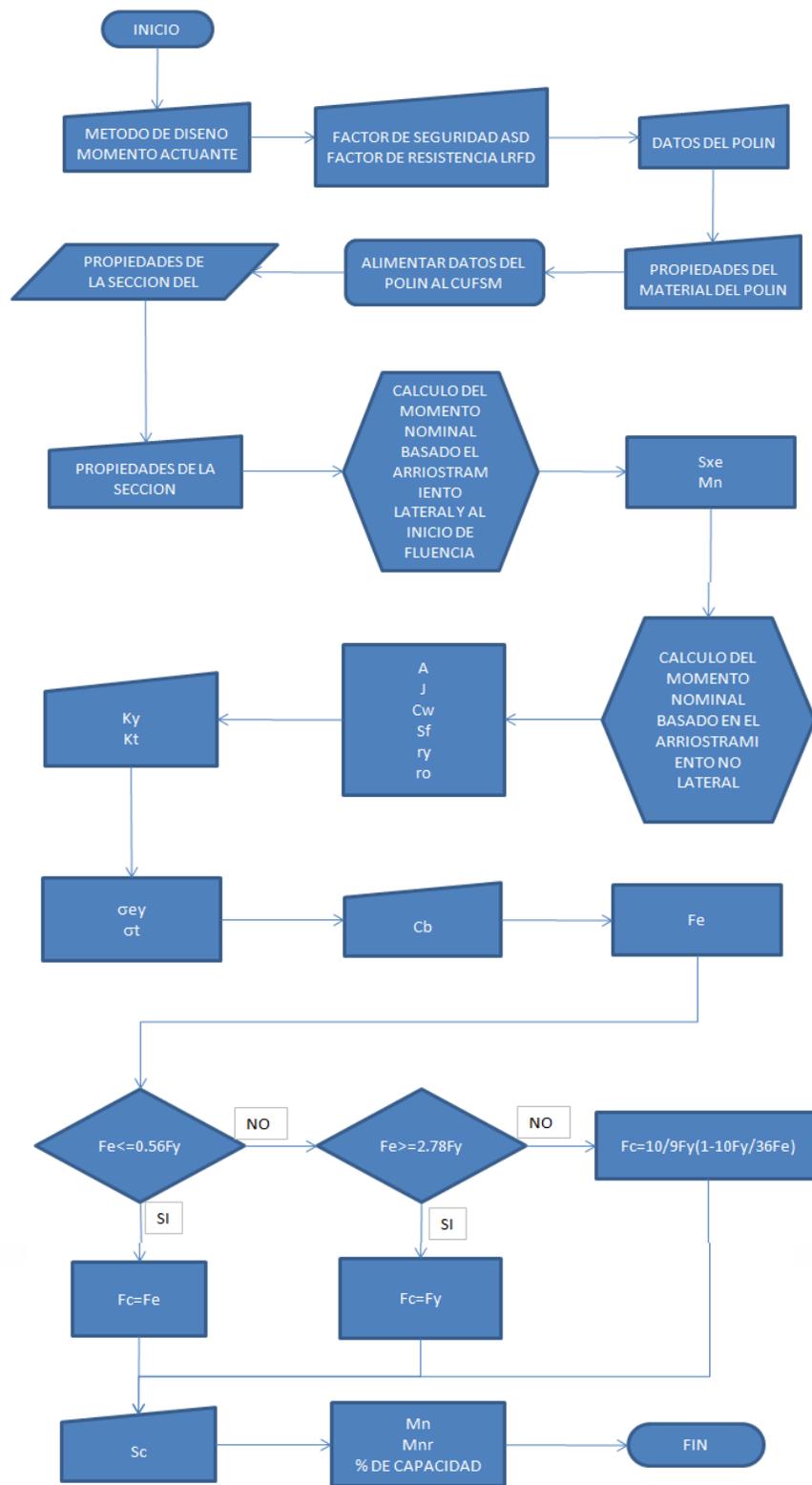


Figura 15: Diagrama de flujo para rutina de flexión.

6.4.2 Diagrama de flujo para flexo compresión

De la Figura 16 a la 20 se representa el diagrama de flujo, el cual se muestra la secuencia lógica de programación para la rutina del cálculo por flexo compresión de los elementos de acero en lámina delgada rolados en frío.

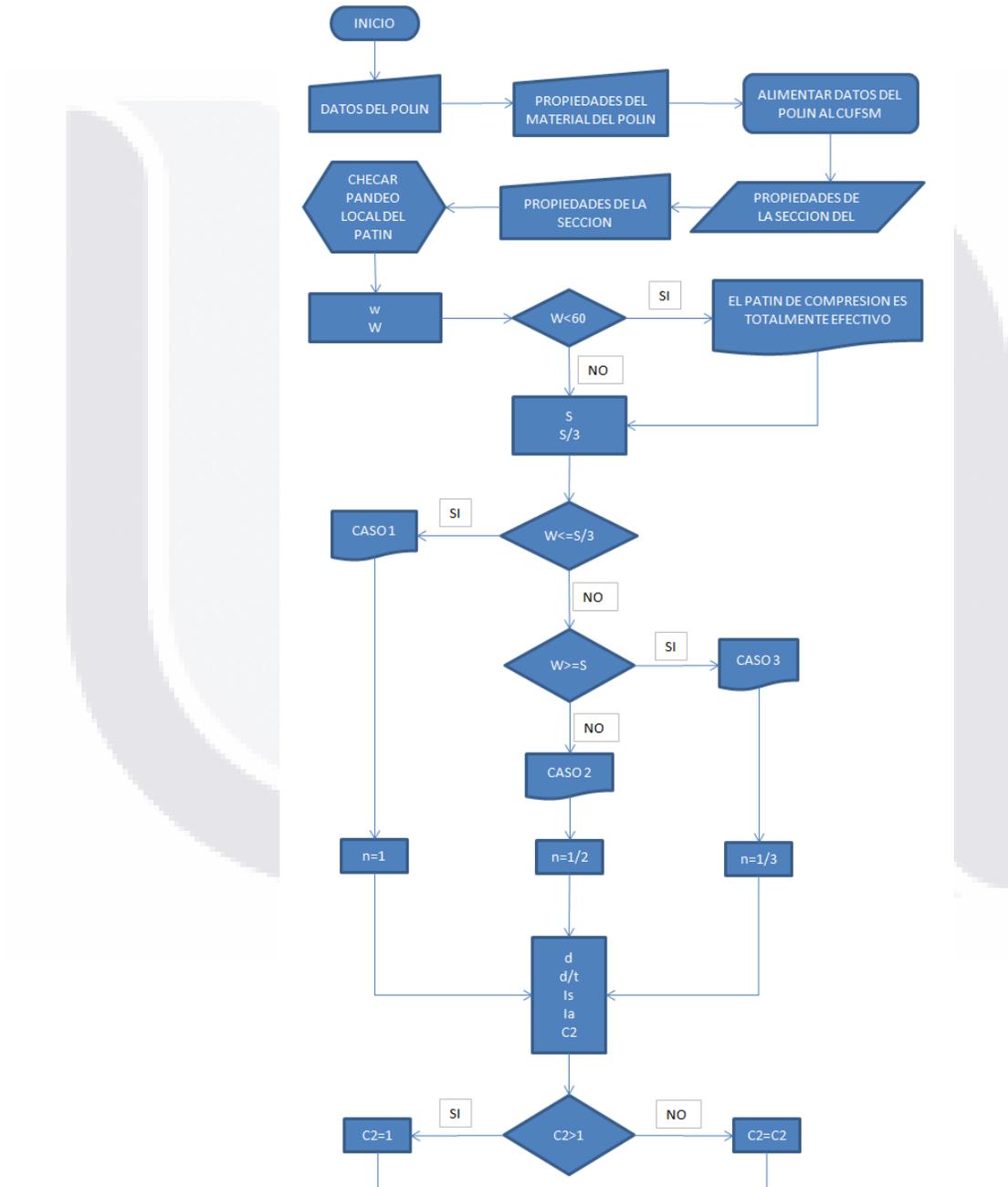


Figura 16: Diagrama de flujo para rutina de flexo compresión.

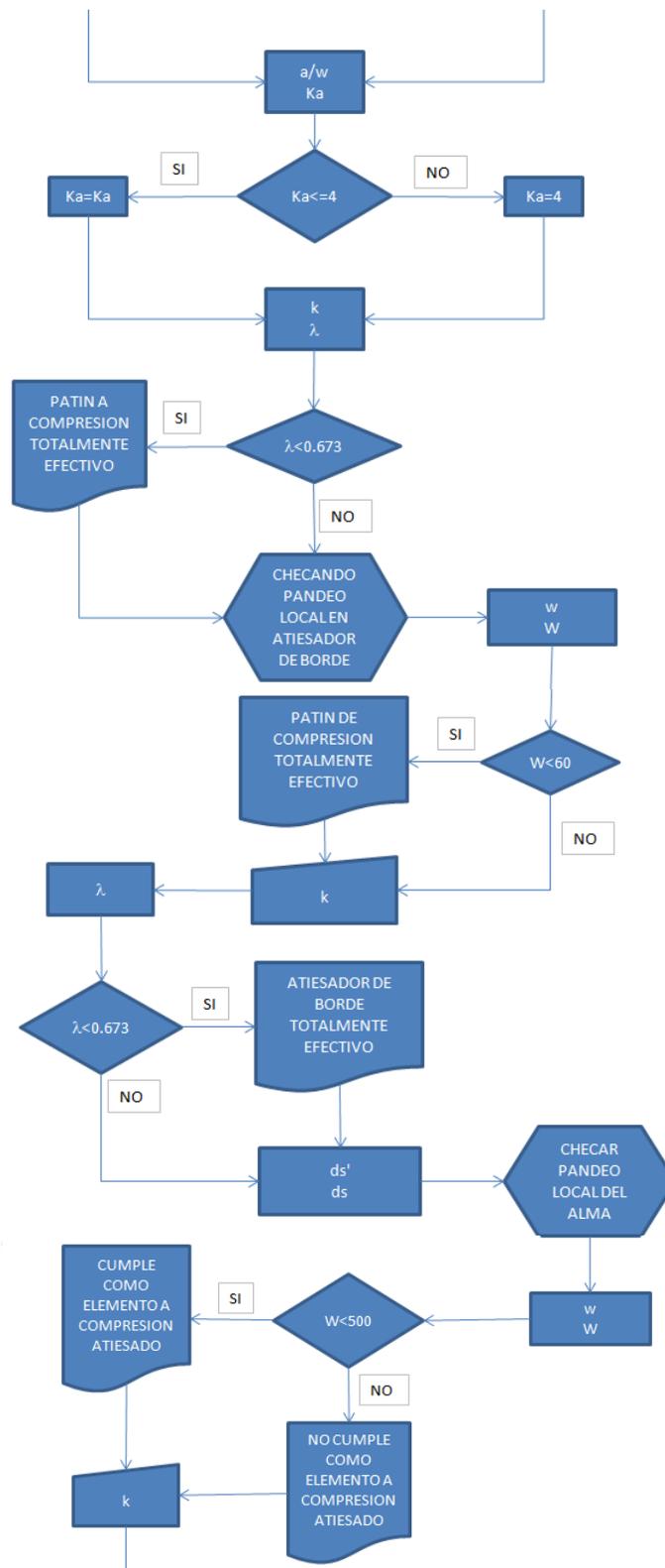


Figura 17: Diagrama de flujo para rutina de flexo compresión (continuación).

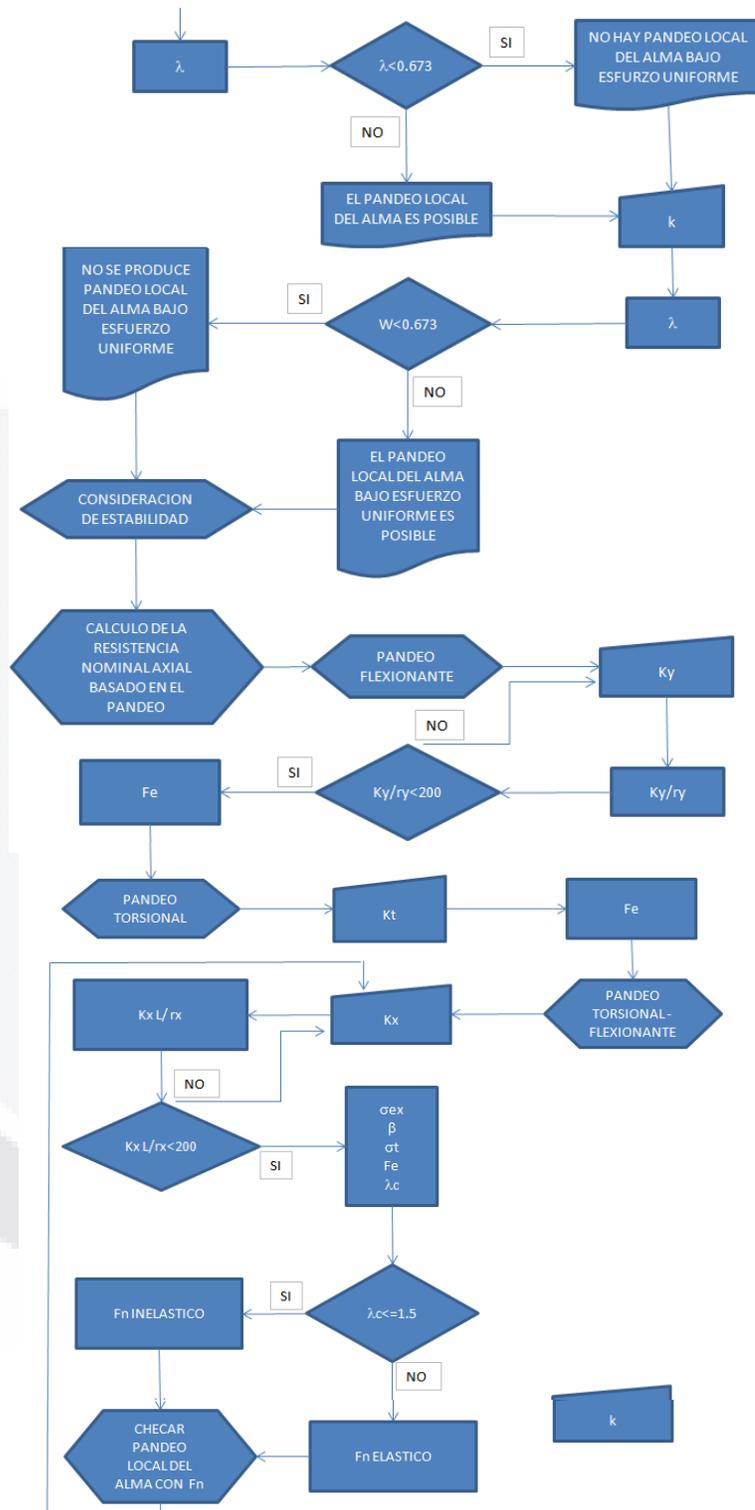


Figura 18: Diagrama de flujo para rutina de flexo compresión (continuación).

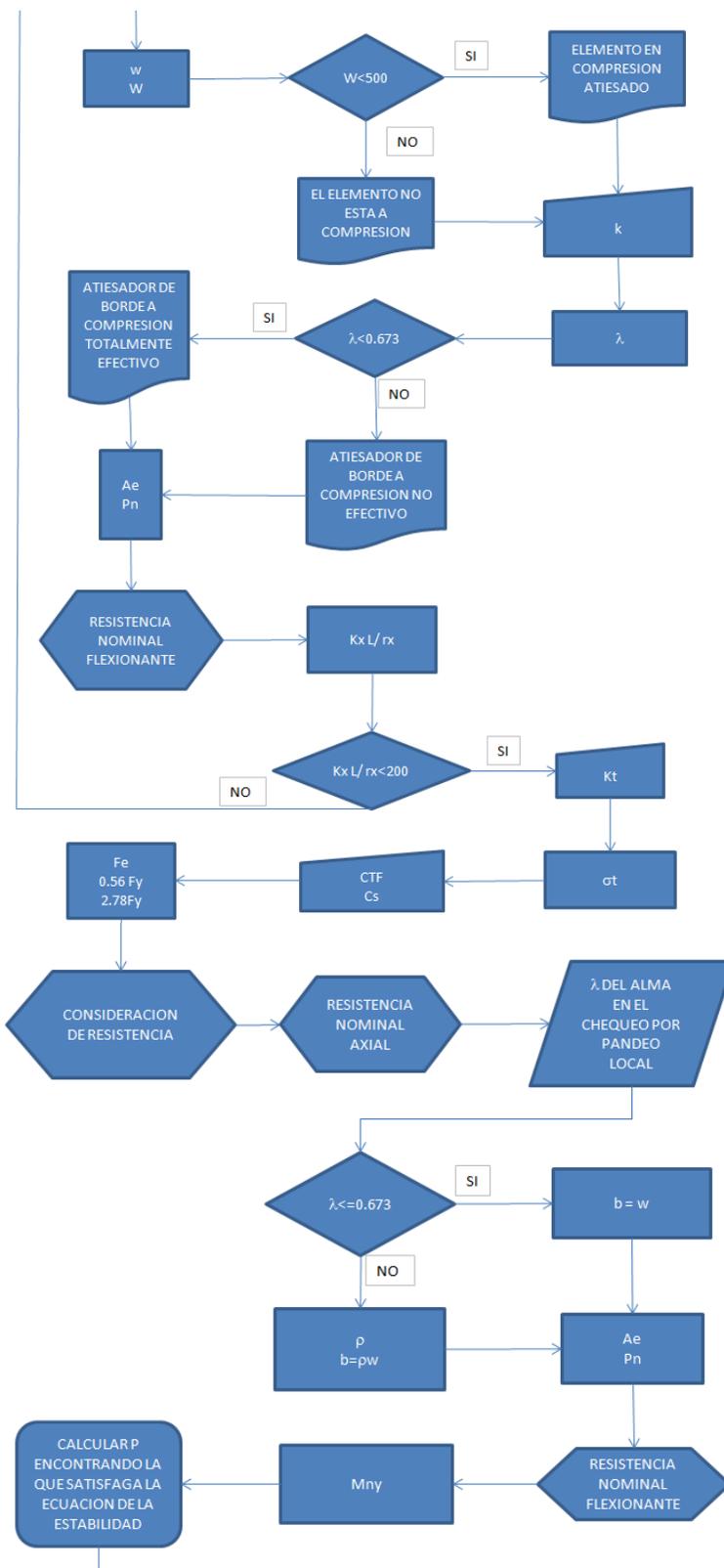


Figura 19: Diagrama de flujo para rutina de flexo compresión (continuación).

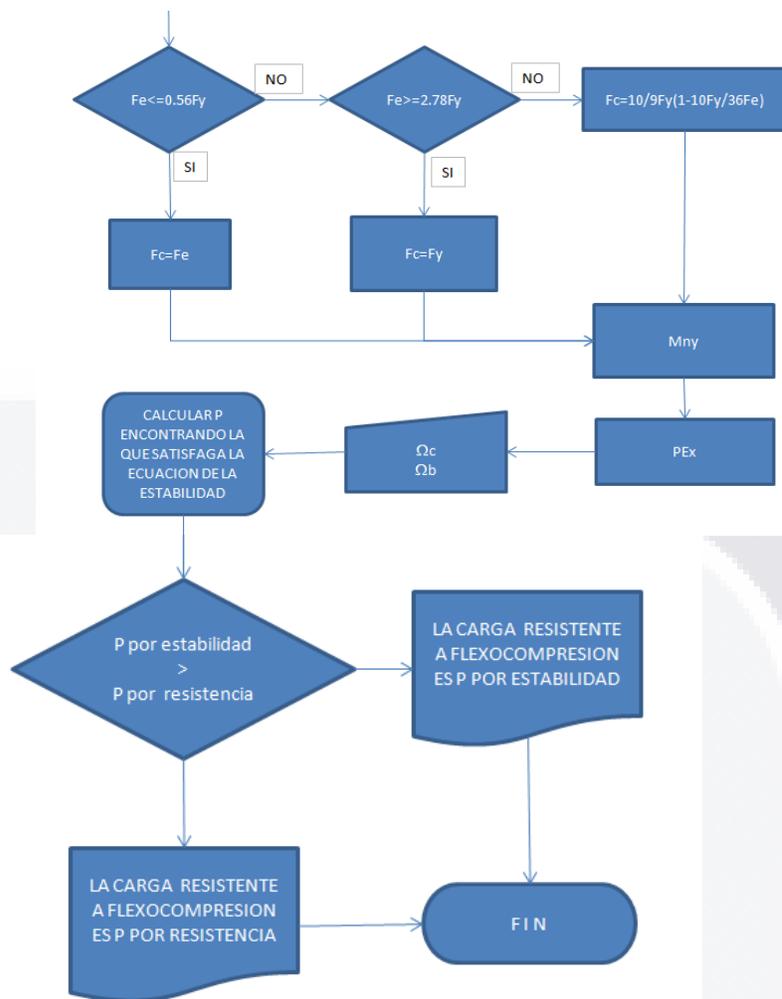


Figura 20: Diagrama de flujo para rutina de flexo compresión (continuación).

6.5 MANUALES DE OPERACIÓN

6.5.1 Manual para flexión

Mediante este manual obtendremos el momento nominal resistente para miembros de flexión.

Pasos:

- 1.- Seleccionar el método con el cual se diseñara el elemento.
- 2.- Alimentar el momento actuante sobre el elemento.
- 3.- Alimentar el factor de seguridad para el diseño con ASD o el factor de resistencia para el LRFD según la tabla siguiente (Tabla7).

Esfuerzo nominal de la sección (resistencia)			
Para secciones con arriestramiento o parcialmente arriestrado el patin a compresion			
Ω_b	1.67	ASD	
ϕ_b	0.95	LRFD	
	0.90	LSD	
Para secciones sin arriestramiento de patin a compresion			
Ω_b	1.67	ASD	
ϕ_b	0.90	LRFD	
	0.90	LSD	

Tabla 7: Esfuerzo nominal de la sección (resistencia)

- 4.- Alimentar los datos del polín.
- 5.- Alimentar las propiedades del material del polín (figura 21).

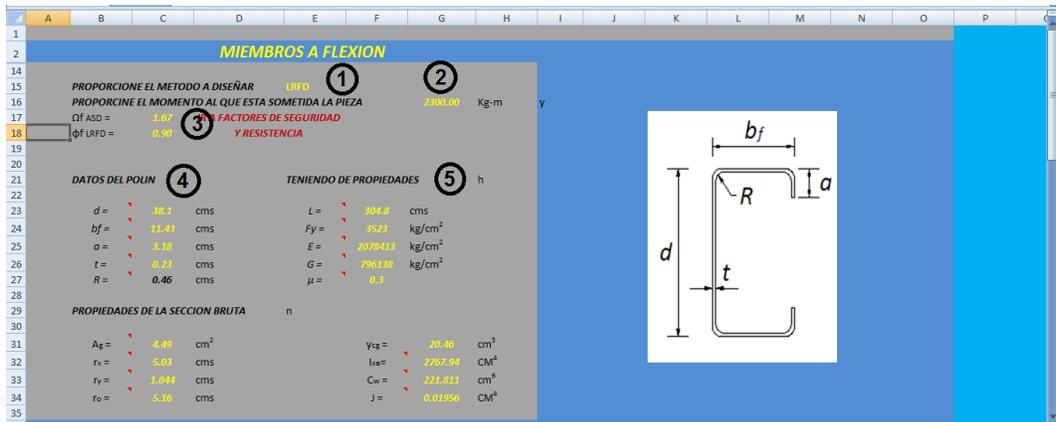


Figura 21: Ubicación de la ejecución de las instrucciones 1-5

6.- Obtener las propiedades de la sección bruta del perfil con la ayuda del software CUFSM versión 3.1 (Schafer, 2006), como se muestra a continuación:

a) iniciamos CUFSM (Figura 22)

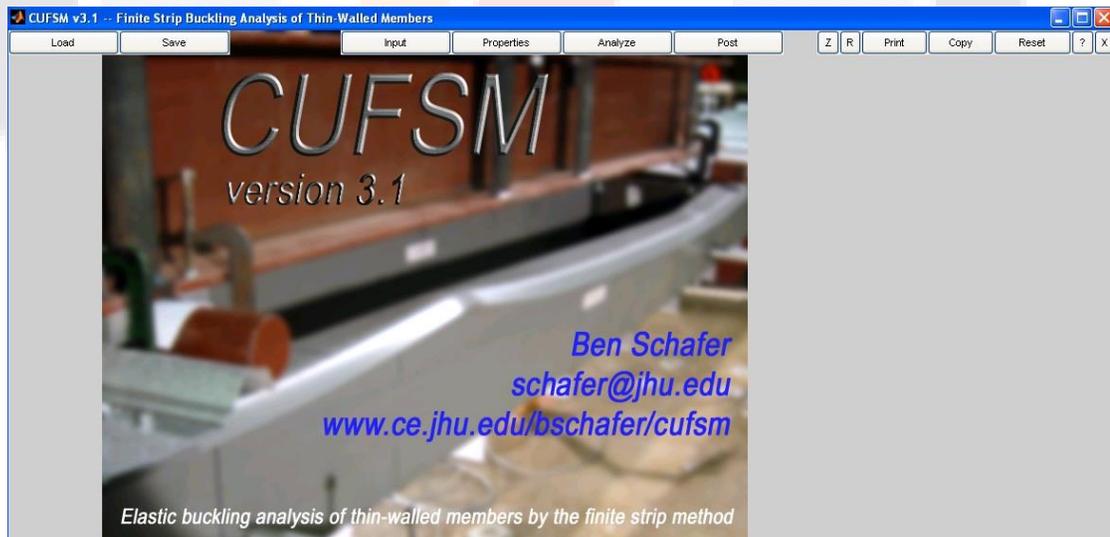


Figura 22: Caratula del Software libre CUFSM

b) entraremos a la pestaña *INPUT* (Figura 23)

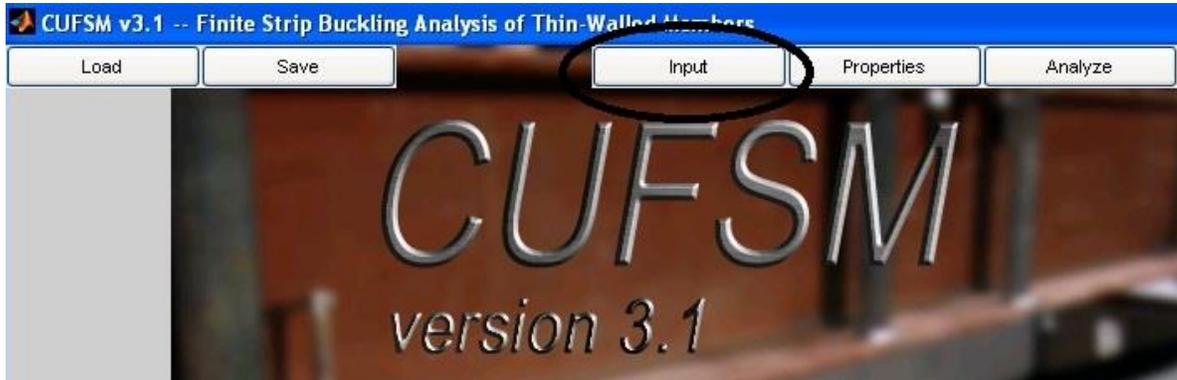


Figura 23: Ubicación de la pestaña *Input*

c) Al desplegarse la siguiente ventana se selecciona el botón de *C/Z Template* (Figura 24):

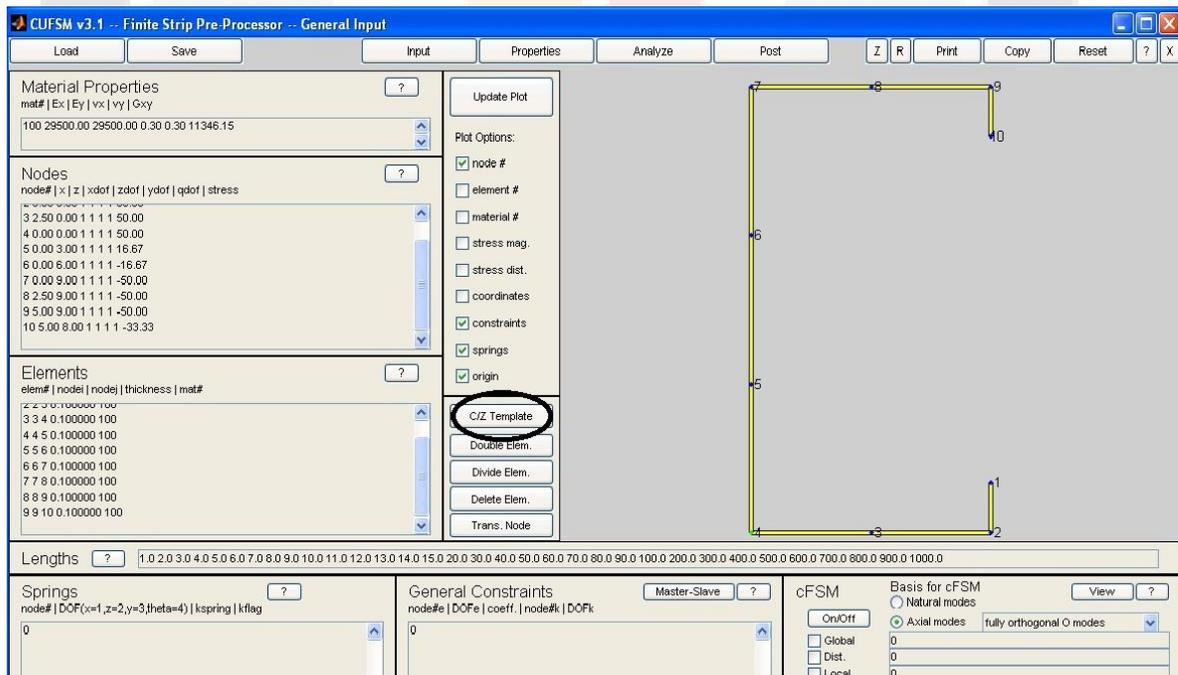


Figura 24: Ubicación del botón *C/Z Template*

d) Se configura la geometría del perfil que vamos a utilizar y se activa el botón *Submit to Input* (Figura 25):

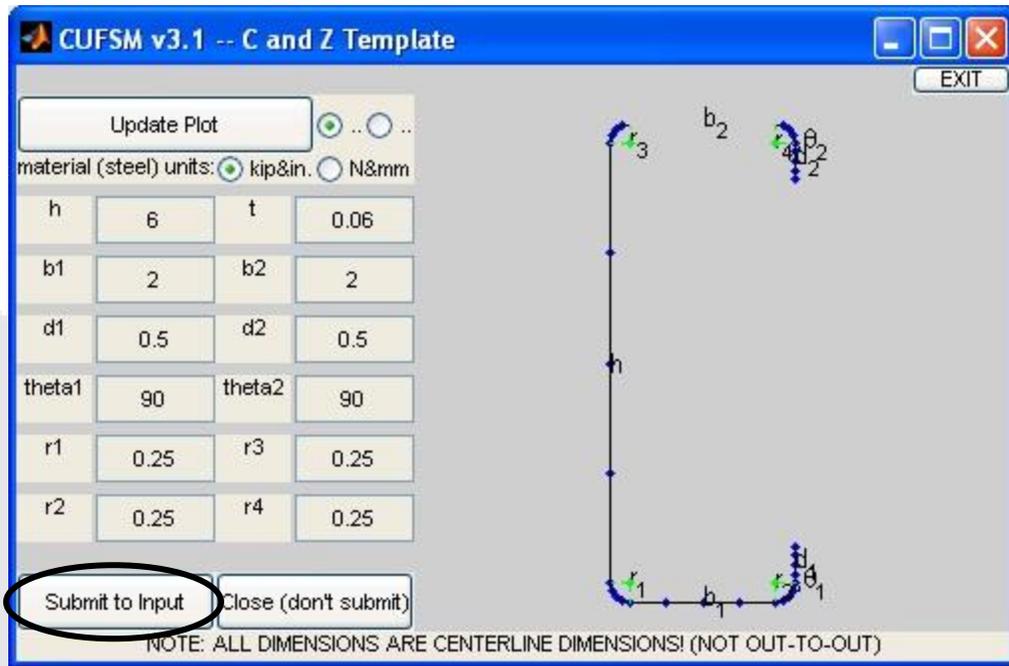


Figura 25: Ubicación del botón *Submit to input*

e) Se selecciona la pestaña de *Properties* (Figura 26):

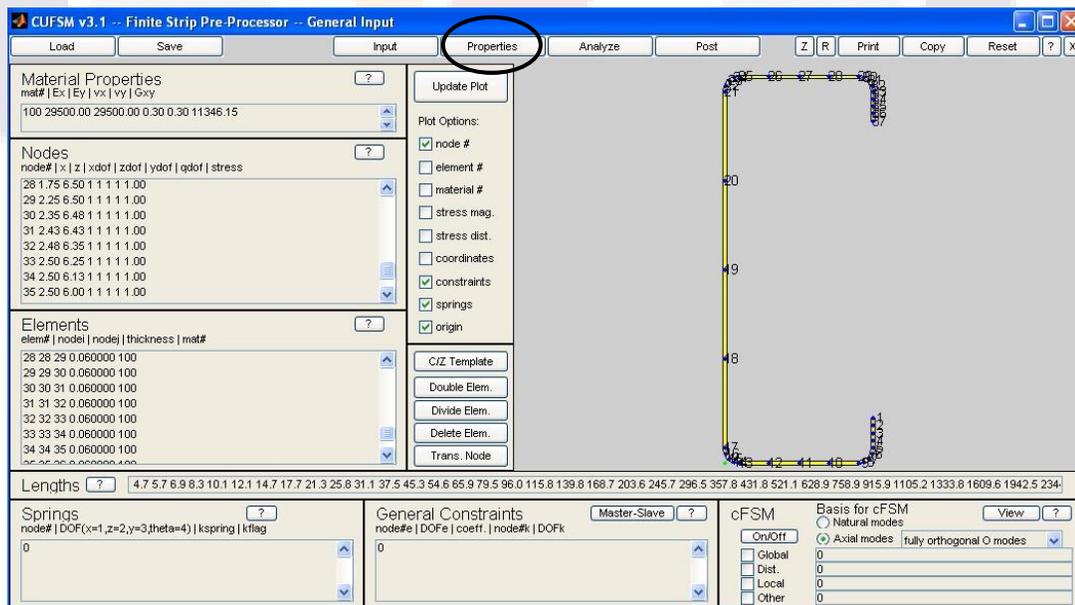


Figura 26: Ubicación de la pestaña *Properties*

f) Al desplegarse la siguiente ventana se obtienen las propiedades de la sección (Figura 27).

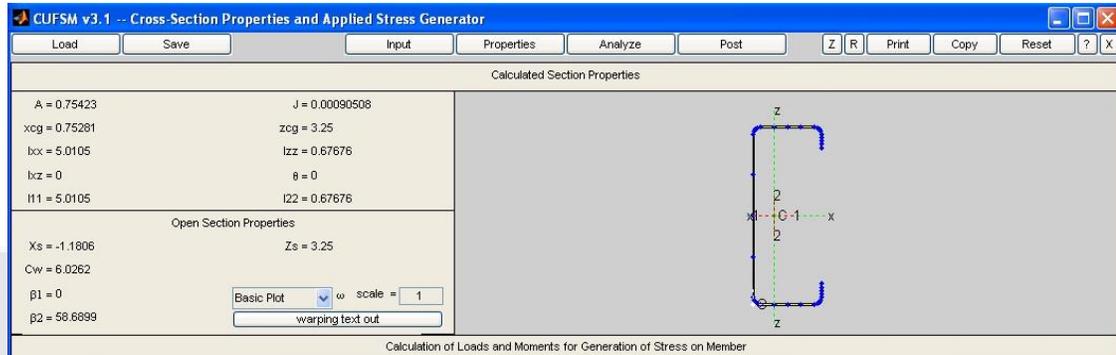


Figura 27: Presentación de las propiedades de la sección

7.- Se introducen las propiedades de la sección que se calcularon en el CUFSM. (Figura 28)

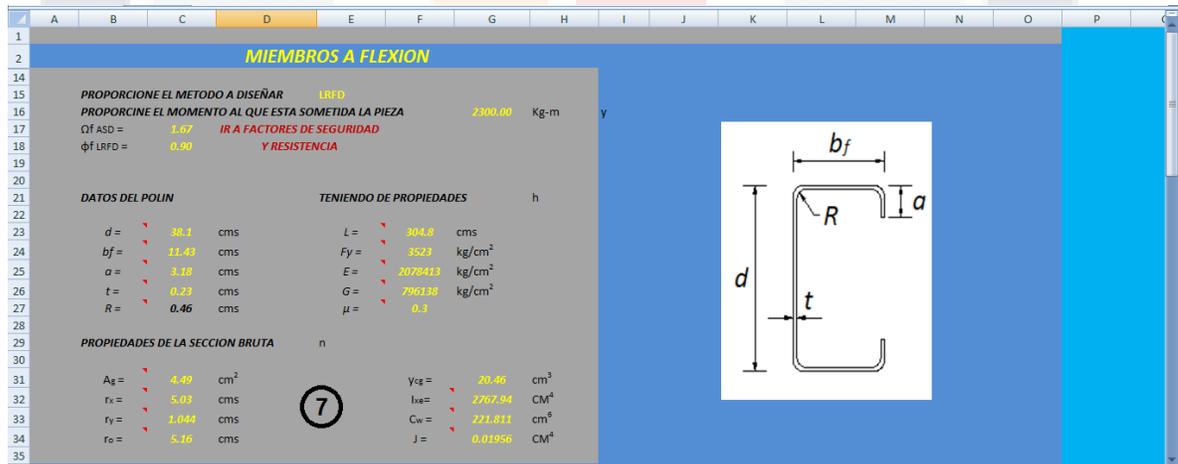


Figura 28: Ubicación de la instrucción 7

8.- Para determinar el momento nominal basado en el arriostamiento no lateral para la longitud del elemento dada se introducen los datos. (Figura 29)

DETERMINANDO EL MOMENTO NOMINAL BASADO EN EL ARRIOSTRAMIENTO NO LATERAL PARA

$L = 304.8$ CMS

PROPORCIONE LOS DATOS SIGUIENTES:

A = 14.97 CM²

J = 0.26056 CM⁴

Cw = 74115.9 CMS

Sf = 168.79 CMS

ry = 4.09 CMS

ro = 17.07 CMS

ASUMIENDO QUE: Ky Y Kt = 1.00

PANDEO LATERAL - TORSIONAL

$\sigma_{ey} = 3693.59$ kg/cm²

$\sigma_t = 3799.22$ kg/cm²

SI SUPONEMOS QUE Cb = 1.00

El perfil pandeado de columna es mostrada por la línea a rayas

Valor teórico k	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Valor K recomendado cuando las condiciones ideales son aproximadas	0.65	0.80	1.2	1.0	2.1	2.0
Código de condición final		Rotación, translación				
		Rotación libre, translación				
		Rotación, translación libre				
		Rotación libre, translación libre				

(Eq. C3.1.2.1-8)

(Eq. C3.1.2.1-9)

Figura 29: Ubicación de la instrucción 8

9.- Se selecciona el valor de K (Figura 30) para la condición de apoyo del elemento según la siguiente tabla y se introduce en la hoja de cálculo. (Figura 31)

El perfil pandeado de columna es mostrada por la línea a rayas

Valor teórico k	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Valor K recomendado cuando las condiciones ideales son aproximadas	0.65	0.80	1.2	1.0	2.1	2.0
Código de condición final		Rotación, translación				
		Rotación libre, translación				
		Rotación, translación libre				
		Rotación libre, translación libre				

Figura 30: Valores de K (Yu 2000)

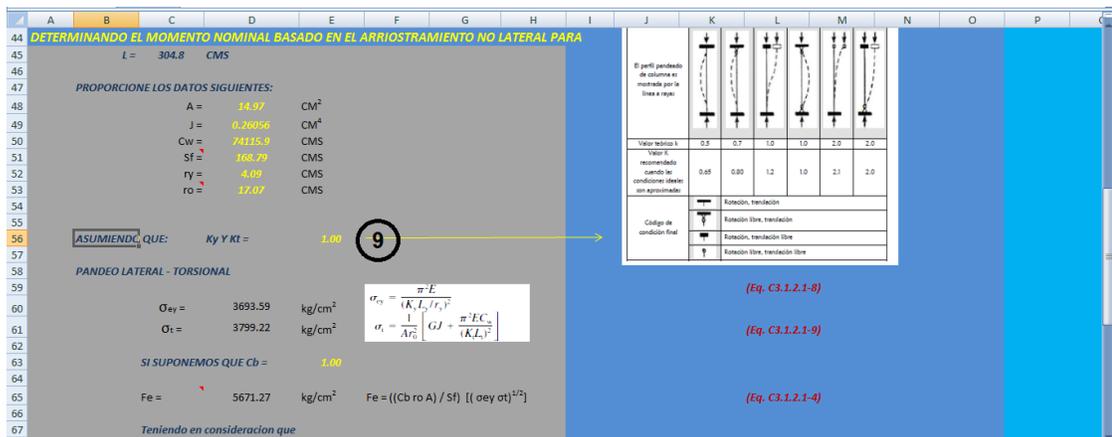


Figura 31: Ubicación instrucción 9

10.- Se calcula el coeficiente de flexión, que conservadoramente puede ser tomado con un valor de 1.00, en la edición del AISI de 1996 la ecuación para calcularlo es: (Figura 32)

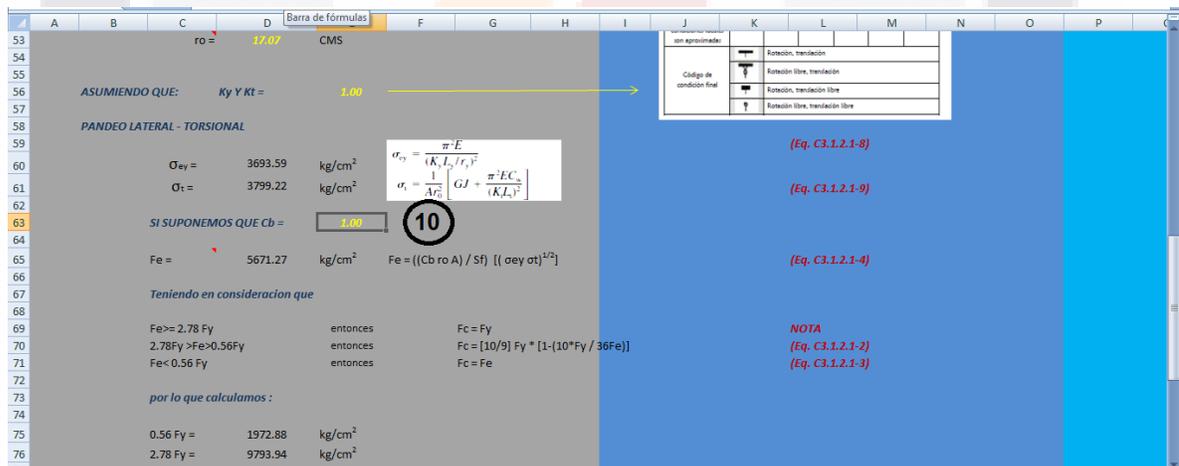


Figura 32: Ubicación de la instrucción 10

11.- El módulo de sección elástico de la sección efectiva calculado a un esfuerzo M_c/S_f en la fibra extrema a compresión: (Figura 33)

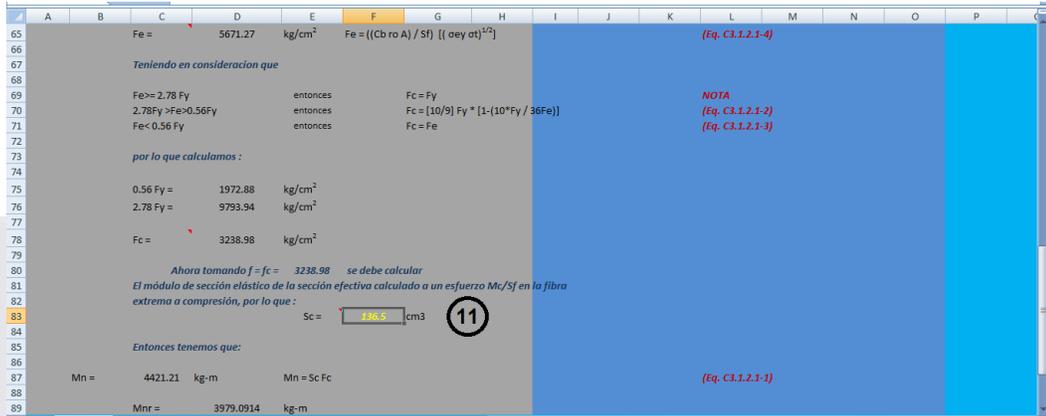


Figura 33: Ubicación de la instrucción 11

12.- Finalmente se reporta si el elemento es capaz de soportar el momento flexionante al que está expuesto. (Figura 34)

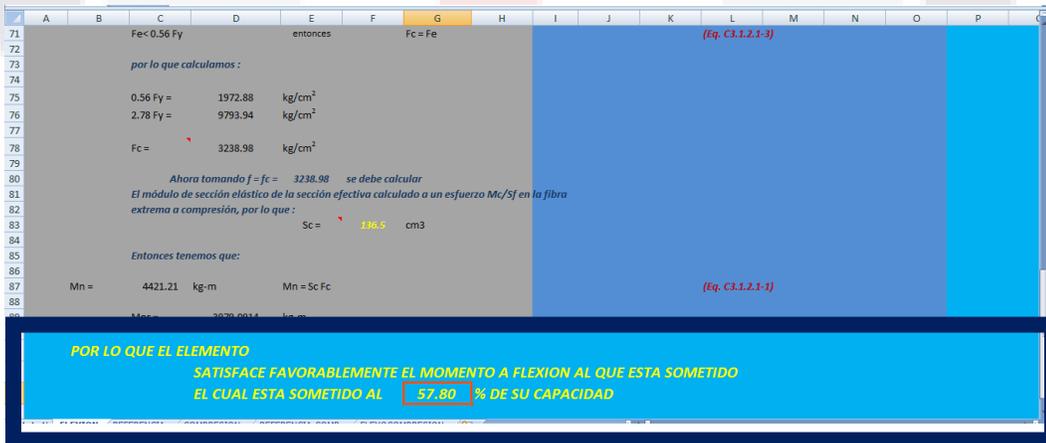


Figura 34: Ubicación de la instrucción 12

6.5.2 Manual para flexo compresión

Mediante este manual obtendremos el momento nominal resistente para miembros con carga axial y flexión combinados.

Pasos:

- 1.- Alimentar los datos del polín.
- 2.- Alimentar las propiedades del material del polín. (Figura 35)

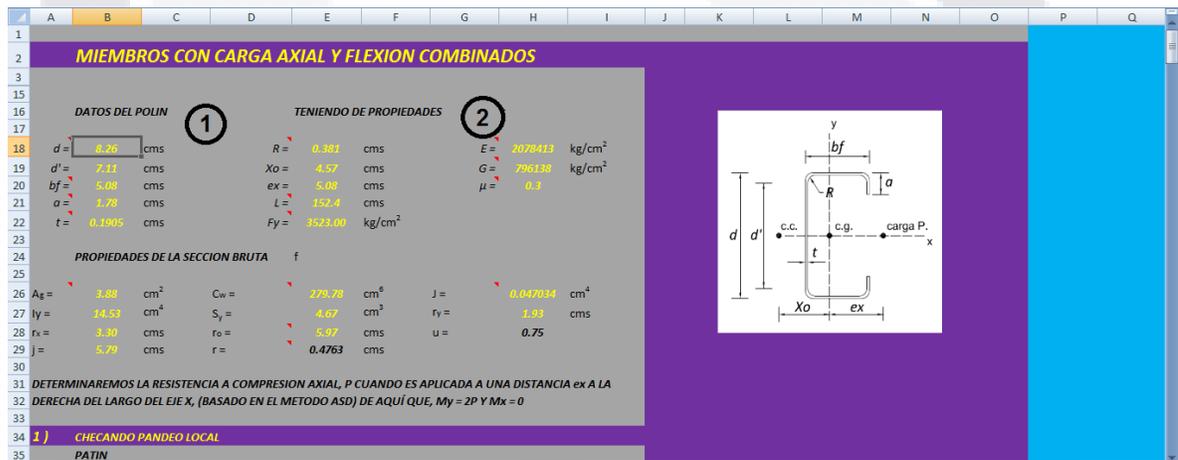


Figura 35: Ubicación de la instrucción 2

3.- Obtener las propiedades de la sección bruta del perfil con la ayuda del software CUF3M versión 3.1 como se muestra a continuación:

a) iniciamos CUF3M (Figura 22)



b) entraremos a la pestaña INPUT (Figura 23)

- c) Al desplegarse la siguiente ventana se selecciona el botón de *C/Z Template*: (Figura 24)
- d) Se configura la geometría del perfil que vamos a utilizar y se activa el botón *Submit to Input*. (Figura 25)
- e) Se selecciona la pestaña de *Properties*(Figura 26)
- f) Al desplegarse la siguiente ventana se obtienen las propiedades de la sección. (Figura 27)

4.- Se introducen las propiedades de la sección que se calcularon en el CUFSM. (Figura 36)

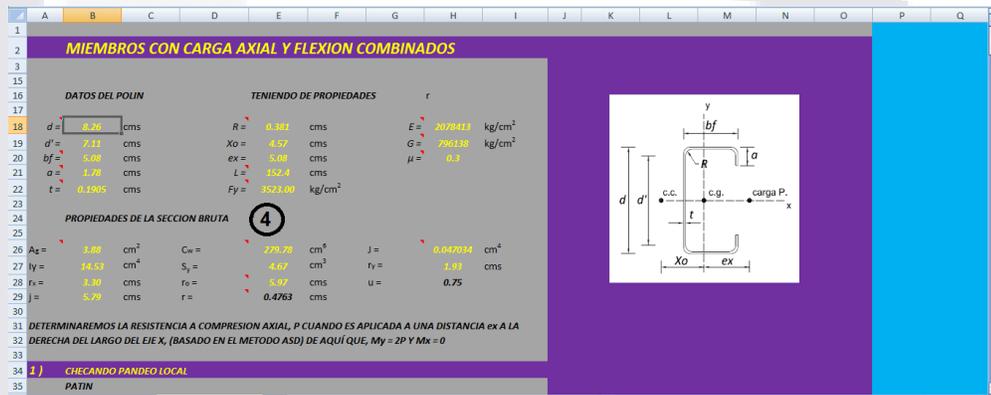


Figura 36: Ubicación de la instrucción 4

5.- En la resistencia a la compresión axial en el chequeo del pandeo local del patín, si $W < 60$ la hoja reporta que el patín es totalmente efectivo lo cual es confirmado con que $\lambda < 0.673$. (Figura 37)

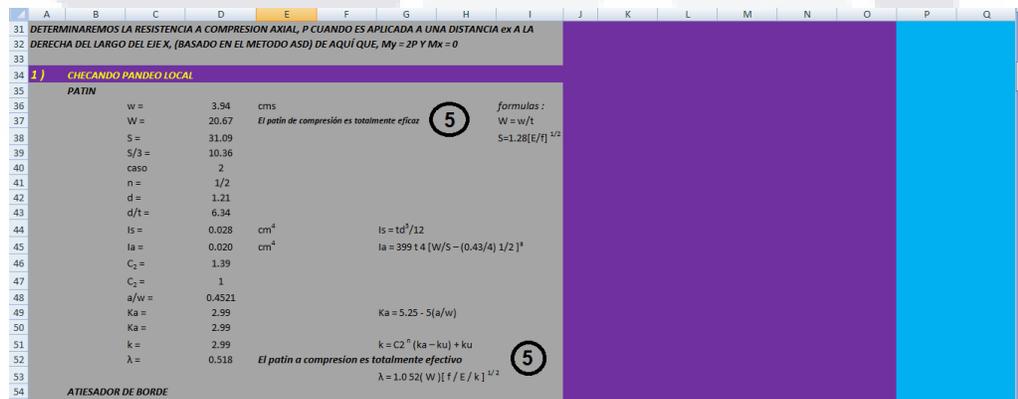


Figura 37: Ubicación de la instrucción 5

6.- En la resistencia a la compresión axial en el chequeo del pandeo local del atiesado de borde, si $W < 60$ la hoja reporta que el atiesado de borde es totalmente efectivo, en el chequeo del pandeo local del atiesado de borde el valor de k depende de la condición de borde del mismo en base a la siguiente tabla: (Tabla 8)

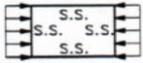
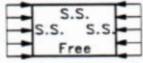
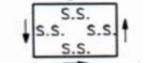
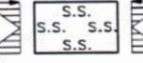
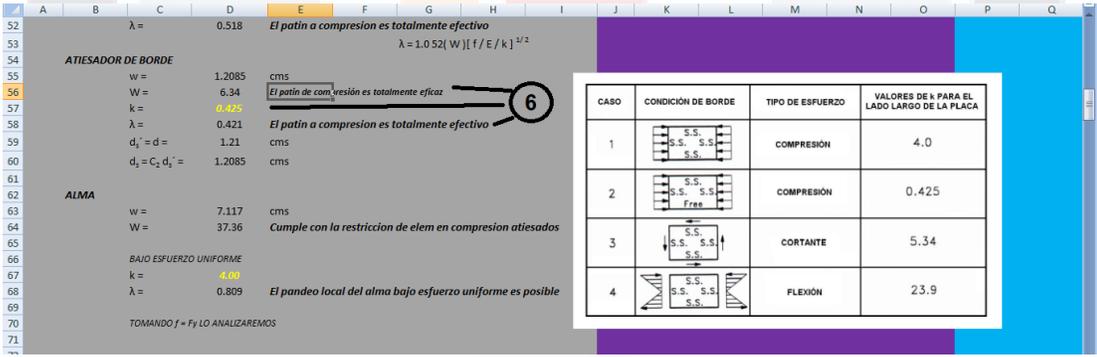
CASO	CONDICIÓN DE BORDE	TIPO DE ESFUERZO	VALORES DE k PARA EL LADO LARGO DE LA PLACA
1		COMPRESIÓN	4.0
2		COMPRESIÓN	0.425
3		CORTANTE	5.34
4		FLEXIÓN	23.9

Tabla 8: Valor de k para las condiciones de borde (Yu, 2000)

Y si el valor de $\lambda < 0.673$ confirma que el atiesado de borde es totalmente efectivo. (Figura 38)



El patin a compresión es totalmente efectivo

$\lambda = 1.052(w) \sqrt{f/E/k}$

El patin a compresión es totalmente eficaz

El patin a compresión es totalmente efectivo

ALMA

Cumple con la restricción de elem en compresión atiesados

BAJO ESFUERZO UNIFORME

El pandeo local del alma bajo esfuerzo uniforme es posible

TOMANDO $f = F_y$ LO ANALIZAREMOS

Figura 38: Ubicación de la instrucción 6

7.- En la resistencia a la compresión axial en el chequeo del pandeo local del alma, si $W < 500$ la hoja reporta que el alma cumple con la restricción de elementos en compresión atiesados, en el chequeo del pandeo local del alma el valor de k depende de la condición de borde de la misma en base a la (Tabla 8)

Y si el valor de $\lambda < 0.673$ confirma que no se produce pandeo local del alma bajo esfuerzo uniforme. (Figura 39)

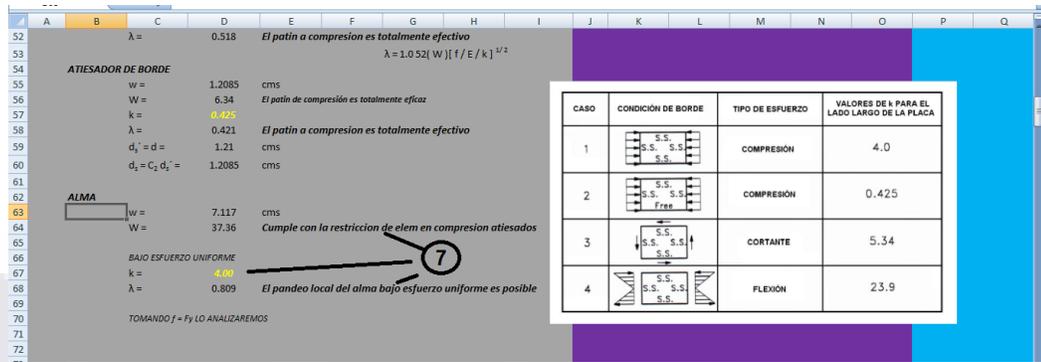


Figura 39: Ubicación de la instrucción 7

8.- En la consideración de estabilidad al checar el pandeo flexionante, el pandeo torsional y el torsional flexionante, K_y , K_t y K_x se seleccionan en base a la condición de apoyo (Figura 30)

En el pandeo flexionante si $K_y L / r_y < 200$ será correcto el valor y la hoja lo reportara, en el pandeo torsional flexionante si $K_x L / r_x < 200$ será correcto el valor y la hoja lo reportara. (Figura 40)

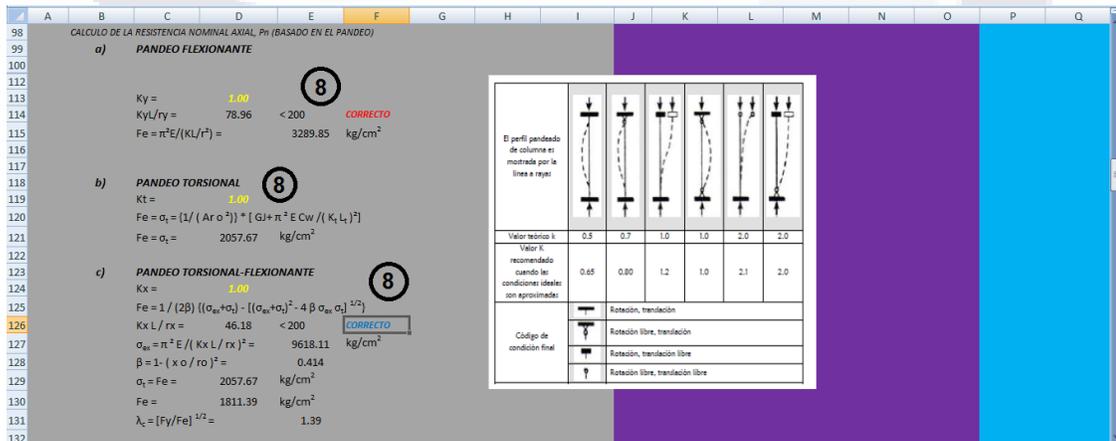


Figura 40: Ubicación de la instrucción 8

9.- En la consideración de estabilidad (Figura 41) al checar el pandeo local en el alma cuando $f = F_n / K$, se seleccionan en base a la condición de borde (Tabla 8)

$F_n = (0.658^{1.5}) F_y$ (Pandeo inelástico)
 Para $\lambda_c > 1.5$
 $F_n = (0.877 / \lambda_c^2) F_y$ (Pandeo elástico)
 $F_n = 1560.91 \text{ kg/cm}^2$
 d) CHEGANDO EL PANDEO LOCAL EN EL ALMA, CUANDO $f = 1560.91 \text{ kg/cm}^2$
 $w = 7.117 \text{ cms}$
 $W = 37.36 < 500$ ELEMENTO EN COMPRESION ATIESADO $W = w/t$
 $k = 4.0$
 $\lambda = 1.052[W](f/E/k)^{1/2}$
 $\lambda = 0.539$ EL ATIESADOR DE BORDE A COMPRESION ES TOTALMENTE EFECTIVO
 $A_e = A_g = 3.88 \text{ cm}^2$
 $P_n = A_e F_n = 6056.32 \text{ kgs}$
 e) CALCULO DE LA RESISTENCIA NOMINAL FLEXIONANTE, M_{ny}
 $M_{ny} = S_c M_c / S_f$ $S_f = \text{Módulo de sección elástico de la sección total no reducida para la fibra extrema en compresión}$
 PARA FLEXIÓN ALREDEDOR DEL EJE CENTROIDAL PERPENDICULAR AL EJE DE SIMETRÍA PARA SECCIONES SIMPLEMENTE SIMÉTRICAS, M_e PUEDE SER CALCULADA AL USAR LA SIGUIENTE EXPRESIÓN:

CASO	CONDICIÓN DE BORDE	TIPO DE ESFUERZO	VALORES DE k PARA EL LADO LARGO DE LA PLACA
1	S.S. S.S. S.S. S.S. S.S.	COMPRESIÓN	4.0
2	S.S. S.S. S.S. S.S. Free	COMPRESIÓN	0.425
3	S.S. S.S. S.S. S.S.	CORTANTE	5.34
4	S.S. S.S. S.S. S.S.	FLEXIÓN	23.9

Figura 41: Ubicación de la instrucción 9

10.- En la consideración de estabilidad para calcular la resistencia nominal flexionante el valor de $C_{TF} = 0.6 - 0.4 (M1 / M2)$, en donde $M1$ es el más pequeño y $M2$ es el más grande momento de flexión en los extremos de la longitud no soportada, y donde $M1 / M2$, la relación de momentos en los extremos, es positivo cuando $M1$ y $M2$ tienen el mismo signo (curvatura inversa de flexión) y negativo cuando son de signo opuesto (curvatura simple flexión). Cuando el momento de flexión en cualquier punto dentro de una longitud arriostrada es mayor que en los dos extremos de esta longitud, y para miembros sujetos a carga axial combinado y momento de flexión, C_{TF} se tomará como la unidad.

Entonces si $KxL/r_x < 200$ será correcto el valor y la hoja lo reportara, el valor de K_t se selecciona según la condición de apoyo del elemento de la Figura 30.

Para el valor de C_s tenemos que es igual a +1 para momento causado por compresión sobre el centro de cortante o es -1 para momento causado por tensión sobre el centro de cortante

Revisando con el método del ASD los valores de Ω_c y Ω_b serán los mostrados en la tabla 9:

Tipo de fuerza		Factor de seguridad ASD, Ω	Factor de Resistencia LRFD, ϕ
Miembros Flexionados	Flexion fuerza		
	Para secciones con arriostramiento o parcialmente arriostradas en el atiesador a compresión	1.67	0.95
	Para secciones sin arriostramiento en atiesador a compresión	1.67	0.90
	Vigas arriostradas lateralmente	1.67	0.90
	Diseño de almas		
	Esfuerzo cortante	1.67	0.90
	Para almas simples sin reforzar	1.85	0.75
	Para secciones I	2.00	0.80
	Para dos secciones Z unidas	1.80	0.85
Miembros a tensión	Para fluencia	1.67	0.90
	Por fractura de alguna conexión	2.00	0.75

Tabla 9: Factores de seguridad para ASD y LRFD (Yu, 2000)

Ya establecidas las variables anteriores se puede aplicar la ecuación de la estabilidad buscando el balance de esta, lo cual se logra dándole click al botón del solver: (Figura 42)

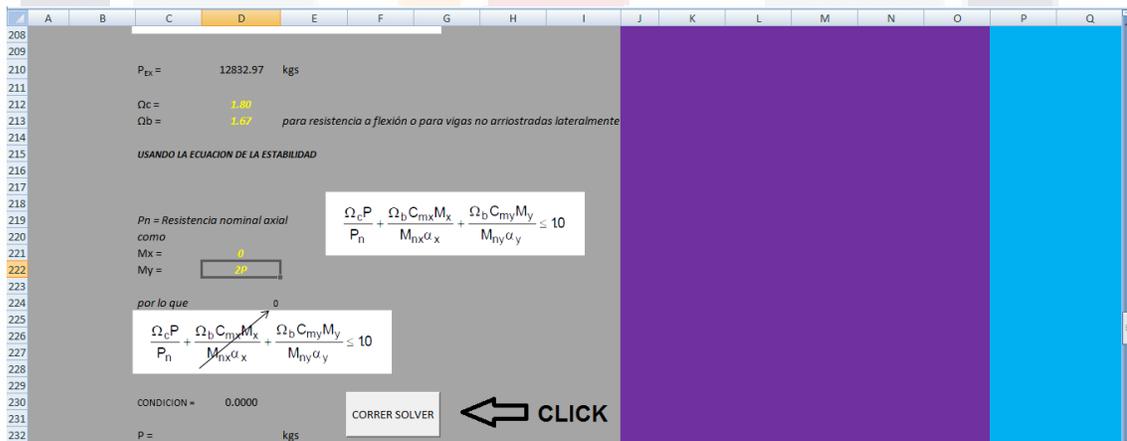


Figura 42: Ubicación para activar el Solver

11.- Por último se corre el solver para las consideraciones de resistencia del elemento en base a la resistencia axial nominal y al momento flexionante nominal (Figura 43)

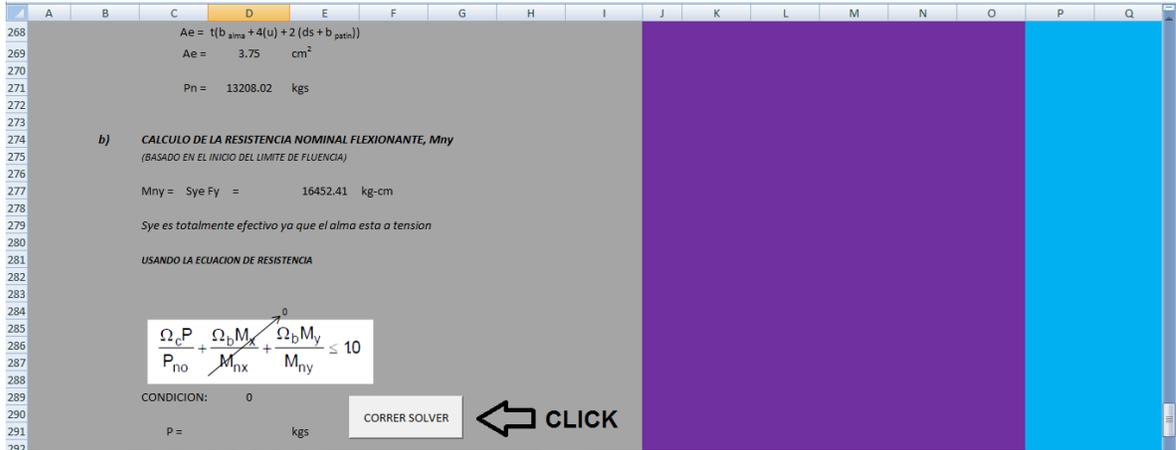


Figura 43: Ubicación de la instrucción 11

12.- Los resultados del análisis se muestran en base a la carga favorecida por la estabilidad en términos de la resistencia o estabilidad del elemento: (Figura 44)

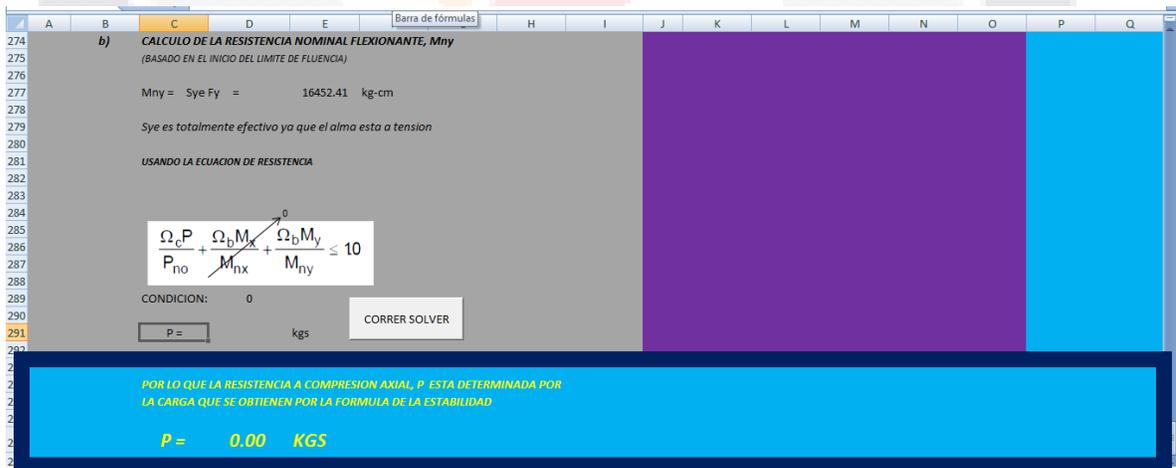


Figura 44: Ubicación de la instrucción 12

CONCLUSIONES

Se logró el objetivo de programar una hoja de cálculo con el software de Microsoft Excel para poder analizar perfiles de acero galvanizado de lámina delgada rolada en frío, dicha hoja de cálculo revisa las solicitaciones de carga para la revisión de estos elementos en condiciones de flexión y flexo compresión, respetando la normatividad establecida por Naspec y AISI con la revisión de los métodos de cálculo en cuanto a la normativa descrita por el ASD y LRFD.

El material generado para lograr una buena presentación de esta herramienta computacional, consta de un archivo electrónico de la hoja de cálculo en plataforma Microsoft Excel completamente editada y configurada para un fácil entendimiento. También cuenta con una interface programada para mostrar ayudas en la toma de decisión de los datos con que se alimenta la hoja y así garantizar que sean entradas de datos confiables y congruentes con el proceso teórico de la programación de la hoja de cálculo. La hoja de cálculo también cuenta con un manual del usuario para futuras referencias en cuanto al manejo de la hoja y por último se tiene los diagramas de flujo del algoritmo de programación para poder hacer modificaciones futuras y así poder actualizar, corregir, mejorar o adicionar rutinas de programación a la hoja de cálculo.

Se pudo comprobar la confianza de los resultados solo con ejemplos que ya se tenían resueltos de una manera teórica. En forma práctica, no se pudo comparar la certeza de los resultados, ya que no se tuvo el tiempo necesario para cotejar los resultados obtenidos con las pruebas realizadas en laboratorio a la casa que se construyó a escala real con el sistema constructivo LGSF. Esto genera la imposibilidad de retroalimentar el confiable funcionamiento del algoritmo de programación de dicha hoja de cálculo.

GLOSARIO

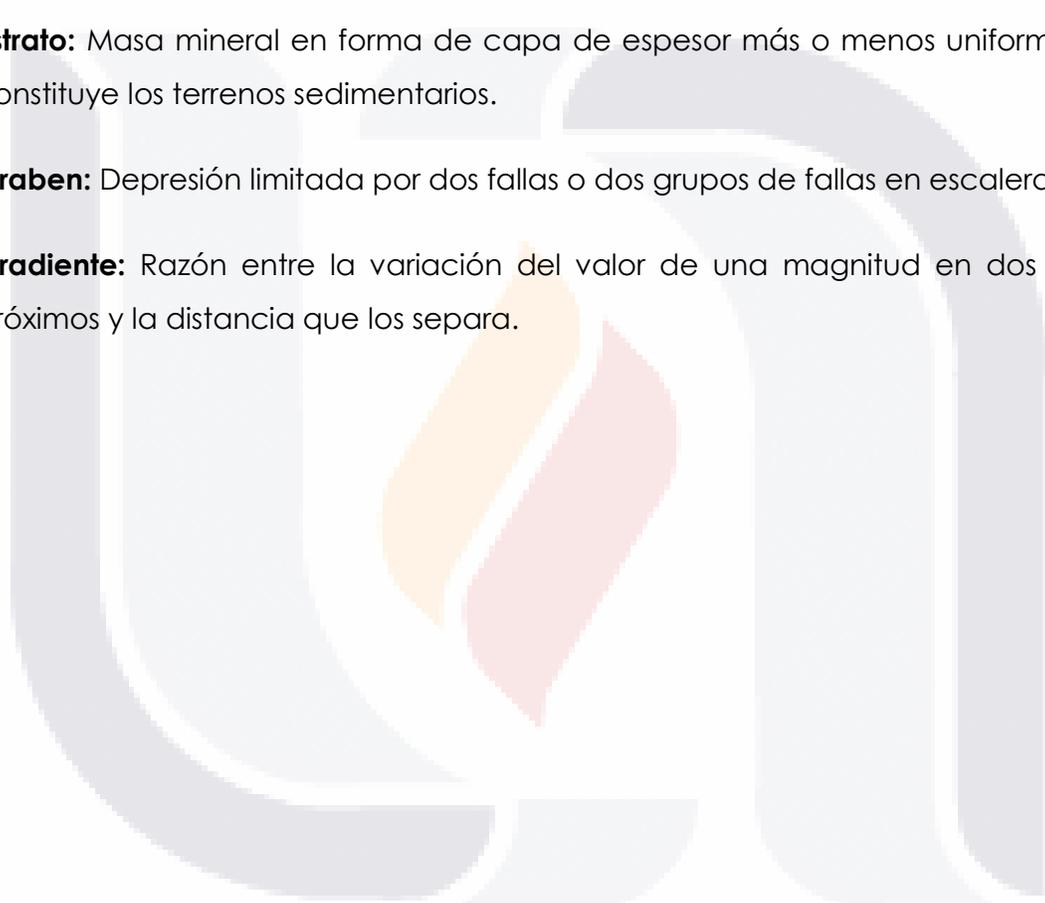
Basamento: Conjunto pétreo, que dentro de sus intensas deformaciones, metamorfismos e intrusiones, presenta una gran unidad.

Elongación: Alargamiento accidental de un miembro o un nervio.

Estrato: Masa mineral en forma de capa de espesor más o menos uniforme, que constituye los terrenos sedimentarios.

Graben: Depresión limitada por dos fallas o dos grupos de fallas en escalera.

Gradiente: Razón entre la variación del valor de una magnitud en dos puntos próximos y la distancia que los separa.



BIBLIOGRAFÍA

Arroyo M.G., Zermeño E. y Castañeda J.A. (2004). *El agrietamiento en Aguascalientes, causas y efectos*. ISBN 968 5073 90 2 Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Zermeño, M.E., Mendoza, E. y Hernández, L.A. (2004). *Identificación y Monitoreo de Grietas Geológicas en la Ciudad de Aguascalientes*. INAGUA, Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Aranda, J. J. y Aranda M. (1985). *Análisis del Agrietamiento en la ciudad de Aguascalientes*. Reporte técnico preparado para el Centro Tecnológico de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, México.

Steel Framing Alliance (2007). *A builders guide to steel frame construction*. www.steel framing.org.

Young Ben (2006), "Local Buckling and Shift of Effective Centroid of Slender Sections", Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Polfulam, Hong Kong.

GBS México (2011). Folleto informativo.

Y. Sakumoto; T Hiraakawa; H. Masuda y K. Nakamura. (2003). *Fire Resistance of Walls and Floors Using Light Gauge Steel Shapes*. Journal of Structural Engineer. ASCE 0733-9445 (2003) 129:11 (1522).

ASTM (American Society for Testing and Materials) (2007), *Standard Test Method and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*.

ASTM (American Society for Testing and Materials) (2007), "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials" (2000).

American Iron and Steel Institute, (2007), *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*

ASCE (American Society of Civil Engineers) (2010). *Design of Cold formed Steel Structures*.

AISI (American Iron and Steel Institute) (1997), "Manual para el diseño de acero conformado en frío", Edición 1996, Junio.

CFSEI (Cold-Formed Steel Engineers Institute) (2007). *Durability of Cold-Formed Steel Framing Members*. Technical Note D001-07.

Soporte Uson (s.f.). Recuperado en Enero de 2013 de ftp://soporte.uson.mx/FTP/PUBLICO/04_INGENIERIA%20CIVIL/ACERO%202/Texto%20Laminados%20en%20Frio/CAPITULO2.PDF

Yu Wei Wen (2000). *Cold formed steel design*. Third Edition, John Wiley and Sons. E.U.A. Electronic book .ISBN 0-471-34809-0.

Schafer, B.W. (2006), Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, FL. Recuperado en Diciembre de 2012 en http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm/cufsm312/#Referencing_CUFSM