



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TRABAJO PRÁCTICO

HERRAMIENTA DE AYUDA PARA REVISIÓN Y DISEÑO DE ELEMENTOS DE ACERO
ROLADO EN FRÍO Y CURVAS MOMENTO ROTACIÓN

PRESENTA

Roberto Fernández Pacheco

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

CON SALIDA EN ESTRUCTURAS

TUTOR

Dr. José Ángel Ortiz Lozano

COMITÉ TUTORAL

M. en I. Luis Alfredo Hernández Castillo

Dr. Mario Eduardo Zermeño de León

Aguascalientes, Ags, 14 de noviembre del 2013



SOLICITUD DE INTEGRACIÓN DEL COMITÉ TUTORAL

Consejo Académico del: Maestría en Ingeniería Civil

Por medio de la presente propongo a Uds. **tema tentativo del Trabajo Recepcional, objetivo y nombre de posibles asesores** que considero podamos dirigir el trabajo del estudiante a mi cargo, con la finalidad de someterlo a su evaluación y se me designe el Comité Tutorial.

DATOS DEL ESTUDIANTE	
NOMBRE: <u>Roberto Fernández Pacheco</u>	ID (No. de Registro): <u>53501</u>
	AREA: <u>Estructuras</u>
DATOS DE PROYECTO RECEPCIONAL	
TÍTULO: <u>Herramienta de ayuda para revisión y diseño de elementos de acero rolado</u>	
TESIS ()	TRABAJO PRÁCTICO (X) <u>en frío de acuerdo a</u>
OBJETIVO: <u>Desarrollar herramienta informática capaz de realizar revisiones</u>	
PALABRAS CLAVE: <u>a compresión, tensión, flexión y flexo-compresión a criterio de</u>	
PROPUESTA (POR ORDEN DE PREFERENCIA) DEL TUTOR RELACIONADO CON EL TEMA DE INTERÉS	
1º COTUTOR (puede ser externo): <u>M. en I. Luis Alberto Hernández Castillo</u>	
2º INTEGRACIÓN DEL COMITÉ TUTORAL (interno de la uaa):	
3º INTEGRACIÓN DEL COMITÉ TUTORAL (si es externo, anexas CV):	

norma Nospes 2007 de acuerdo a la norma Nospes 2007

Aguascalientes, Ags. a 30 de Mayo de 2012

NOMBRE DEL TUTOR Y ASESOR ACADÉMICO
 (del núcleo académico básico)

ÁREA EXCLUSIVA PARA SER LLENADA POR EL CONSEJO ACADÉMICO DEL POSGRADO EN:	
CUERPO ACADÉMICO:	LÍNEA DE GENERACIÓN Y APLICACIÓN DEL CONOCIMIENTO (LGAC):
OBSERVACIONES:	

Recibido 30-05-2012

Código: FD-040200-26
 Revisión: 02
 Emisión: 04/01/11



SOLICITUD DE REGISTRO DE PROYECTO RECEPTACIONAL

No. de expediente:

DATOS DEL ESTUDIANTE	
NOMBRE: <i>Roberto Fernández Pacheco</i>	ID (No. de Registro): <i>53501</i>
PROGRAMA: <i>De Posgrado de la Maestría en Ingeniería Civil con salida a Estructuras</i>	AREA: <i>Estructuras</i>
LUGAR DE TRABAJO: <i>Secretaría de Infraestructuras y comunicaciones</i>	PUESTO/CARGO: <i>Proyectista Estructuras</i>
TELÉFONO: <i>454 6813 y 449 1810673</i>	
DATOS DEL PROYECTO RECEPTACIONAL	
TÍTULO: <i>Herramienta de Ayuda para revisión y Diseño de Elementos de Acero Robado en Frío</i>	
TESIS ()	TRABAJO PRÁCTICO (X)
OBJETIVO: <i>Desarrollar Herramienta Informática capaz de realizar revisiones a compresión, tensión, Flexión, Flexotensión y Flexocompresión por los criterios de Anchos efectivos y el método de Resistencia Directa</i>	
CUERPO ACADÉMICO: <i>Estudios y Proyectos en Ingeniería Civil.</i>	LÍNEA GENERAL DE APLICACIÓN DEL CONOCIMIENTO (LGAC): <i>Construcción y Estructuras</i>
COMITÉ TUTORAL	
NOMBRE	FIRMA
Tutor / Asesor Académico: <i>Dr. José Angel Ortiz Lozano</i> (en caso de tener dos Tutores, favor de abrir otro espacio)	<i>[Firma]</i>
Integrante del Comité Tutorial: <i>M. en Ing. Luis Alfredo Hernández Castillo</i>	<i>[Firma]</i>
Integrante del Comité Tutorial: <i>Dr. Mario Eduardo Zermeno de León</i>	<i>[Firma]</i>
VISTO BUENO	
NOMBRE	FIRMA
Consejero Académico: <i>Dr. José Angel Ortiz Lozano</i>	<i>[Firma]</i>
Secretario Técnico del Programa: <i>Dr. Jesús Pacheco Martínez</i>	<i>[Firma]</i>
Secretario de Investigación y Posgrado: <i>M.I. José Luis López López</i>	<i>[Firma]</i>

Aguascalientes, Ags. a 18 de Febrero de 2013

Código: FO-040200-25
Revisión: 01
Emisión: 11/01/12



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

Centro de Ciencias del Diseño
y de la Construcción

No. Oficio: CCDC-D-224-12

Asunto: Integración de Comité Tutoral
programada de Maestría en Ingeniería Civil

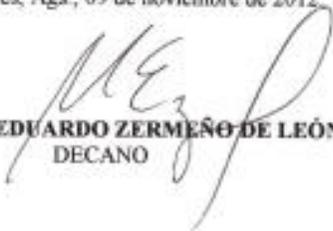
ING. ROBERTO FERNÁNDEZ PACHECO
P R E S E N T E

Con fundamento en el Artículo 105-G Sección 2 del Capítulo XI del Reglamento General de Docencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, me permito designar como tutor al DR. JOSÉ ÁNGEL ORTIZ LOZANO y como asesores al DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN y al M. EN ING. LUIS ALFREDO HERNÁNDEZ CASTILLO del proyecto de trabajo práctico terminal titulado "HERRAMIENTA DE AYUDA PARA REVISIÓN Y DISEÑO DE ELEMENTOS DE ACERO ROLADO EN FRÍO" en el marco del programa de posgrado de la Maestría en Ingeniería Civil con salida en estructuras, durante el período del 23 de Julio del 2012 al 30 de Junio del 2013.

Esta asignación de comité tutorial sustituye a cualquier otra realizada con fecha anterior. Sin otro particular lo exhorto a que continúe trabajando con esmero y dedicación para que pueda obtener el grado en el tiempo y forma establecidos en nuestra legislación vigente.

A T E N T A M E N T E
"SE LUMEN PROFERRE"

Aguascalientes, Ags., 09 de noviembre de 2012.


DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN
DECANO

c.c.p. Dr. Jesús Pacheco Martínez- Coordinador del programa de Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p. Archivo
JPM/cgm.



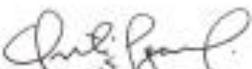
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

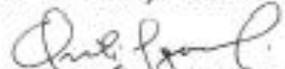
DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **ROBERTO FERNÁNDEZ PACHECO** con ID 53501 quien realizó el trabajo práctico titulado: HERRAMIENTA DE AYUDA PARA REVISIÓN Y DISEÑO DE ELEMENTOS DE ACERO 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.

ATE NTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 8 de octubre de 2013.


Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Tutor de Trabajo Práctico

P.A. 
M. I. Luis Alfredo Piñero Castillo
Asesor de Trabajo Práctico

- cc.- Roberto Fernández Pacheco.
- cc.- Secretario de Investigación y Posgrado, M.I. José Luis López López.
- cc.- Jefatura del Depto. de Construcción y Estructuras, M.I. Manuel Andrés Murillo.
- cc.- Consejero Académico, Dr. José Ángel Ortiz Lozano.
- cc.- Minuta Secretario Técnico, Dr. Jesús Pacheco Martínez.

V.B


Recibí:



AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por haberme permitido concretar mis estudios de posgrado, a mi familia, a mis profesores y compañeros de clase por todo el apoyo proporcionado durante esta etapa mi vida.

También 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.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL 1

INDICE DE TABLAS..... 6

INDICE DE ILUSTRACIONES 7

ÍNDICE DE ECUACIONES..... 11

SIMBOLOGÍA 17

RESUMEN 20

ABSTRACT 21

INTRODUCCION..... 22

CAPÍTULO 1.- OBJETIVOS Y METODOLOGÍA..... 25

 1.1 OBJETIVOS..... 25

 1.2 METODOLOGIA..... 27

 1.2.1 MÉTODO DE ANCHOS EFECTIVOS..... 27

 1.2.2 MÉTODO DE RESISTENCIA DIRECTA..... 28

 1.2.2.1 EL PANDEO LOCAL..... 29

 1.2.2.2 EL PANDEO DISTORSIONAL..... 29

 1.2.2.3 EL PANDEO GLOBAL..... 29

CAPÍTULO 2.- ESTADO GENERAL DEL ARTE 31

 2.1 ANTECEDENTES..... 31

 2.2 PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE ESTRUCTURAS CON ACERO ROLADO EN FRIO..... 32

 2.3 VENTAJAS DE LAS CONSTRUCCIONES DE ACERO LIGERO 33

 2.4 DESVENTAJAS DE LAS CONSTRUCCIONES DE ACERO LIGERO..... 34

 2.5 CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES..... 35

 2.6 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO..... 36

 2.7 DISEÑO POR FACTORES DE CARGA Y RESISTENCIA (LRFD)..... 37

CAPÍTULO 3.- MIEMBROS EN FLEXION 38

 3.1 DISEÑO DE MIEMBROS EN FLEXION..... 38

 3.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO 38

3.3	MIEMBROS FLEXIONANTES.....	42
3.3.1	MIEMBROS SOPORTADOS LATERALMENTE.....	42
3.3.1.1	PROCEDIMIENTO I - BASADO EN LA INICIACIÓN DE FLUENCIA EN LA SECCIÓN EFECTIVA.....	42
3.3.1.2	PROCEDIMIENTO II - BASADO EN LA CAPACIDAD DE RESERVA INELÁSTICA.....	42
3.3.1.3	ELEMENTOS ATIESADOS A LA COMPRESIÓN SIN ATIESADORES INTERMEDIOS.....	43
3.3.1.4	ELEMENTOS NO ATIESADOS A COMPRESIÓN.....	44
3.3.1.5	MIEMBROS NO SOPORTADOS LATERALMENTE.....	45
3.3.1.6	RESISTENCIA AL PANDEO LATERAL.....	45
3.4	DIAGRAMA DE FLUJO DE DISEÑO DE MIEMBROS EN FLEXION.....	52
3.5	MANUAL DE OPERACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL MOMENTO NOMINAL RESISTENTE EN UN CF, PARA MIEMBROS EN FLEXION.....	54
CAPÍTULO 4.- MIEMBROS EN COMPRESIÓN.....		59
4.1	DISEÑO DE MIEMBROS EN COMPRESION.....	59
4.1.1	CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....	59
4.1.2	COMPORTAMIENTO DEL MIEMBRO.....	59
4.1.2.1	RESISTENCIA NOMINAL AXIAL, P_n	59
4.1.3	ESFUERZO NOMINAL AXIAL AL PANDEO, F_n	61
4.1.4	PANDEO FLEXIONANTE (Modo posible de falla).....	61
4.1.5	PANDEO TORSIONAL (Modo posible de falla).....	62
4.1.6	PANDEO FLEXIONANTE - TORSIONAL (Modo posible de falla).....	62
4.1.6.1	FACTOR DE LONGITUD EFECTIVA, K	63
4.1.7	TIPOS DE ELEMENTOS EN COMPRESIÓN.....	64
4.1.8	CONSIDERACIONES DE PANDEO LOCAL.....	64
4.1.8.1	PANDEO ELÁSTICO CRÍTICO DE PLACA ATIESADA.....	66
4.1.8.2	POST-PANDEO DE ELEMENTOS DE PLACA ATIESADA.....	67
4.2	CONCEPTO ANCHO EFECTIVO.....	69
4.3	REVISION DE ELEMENTOS A COMPRESION.....	77

4.3.1	LIMITE DE FLUENCIA.....	78
4.3.2	PANDEO FLEXIONANTE (Wei-Wen Yu, 2000).....	78
4.3.3	PANDEO TORSIONAL Y FLEXIONANTE TORSIONAL. (Wei-Wen Yu, 2000).....	79
4.3.3.1	CASO 1.....	84
4.3.3.2	CASO 2.....	84
4.3.3.3	CASO 3.....	84
4.4	DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DISEÑO DE MIEMBROS EN COMPRESION ...	86
4.5	MANUAL DE OPERACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA NOMINAL AXIAL EN UN CF, PARA MIEMBROS EN COMPRESION.....	92
CAPÍTULO 5.- MIEMBROS EN FLEXOCOMPRESIÓN		101
5.1	DISEÑO DE MIEMBROS EN FLEXO-COMPRESION.....	101
5.1.1	CARGA AXIAL A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN COMBINADOS	101
5.1.1.1	FUENTES DE ESFUERZOS A FLEXIÓN	101
5.1.2	MÉTODO ASD. DISEÑO DE VALORES ADMISIBLES.....	104
5.1.3	MÉTODO LRFD. DISEÑO DE FACTOR DE CARGA Y RESISTENCIA.....	105
5.1.4	EFFECTOS DE MOMENTOS (C_{mx} , C_{my})	106
5.2	MANUAL DE OPERACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA EN UN CF, PARA MIEMBROS EN FLEXOCOMPRESION.	107
5.2.1	PANDEO FLEXIONANTE.....	113
5.2.2	PANDEO TORSIONAL.....	114
5.2.3	PANDEO TORSIONAL-FLEXIONANTE.....	115
5.3	DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DISEÑO DE MIEMBROS EN FLEXOCOMPRESION	120
CAPÍTULO 6.- CURVA MOMENTO-ROTACION.....		129
6.1	METODO DIRECTO PARA ESTRUCTURAS DE ACERO ROLADO EN FRIO..	129
6.1.1	¿Qué es ASCE41?.....	130
6.1.2	FEMA 356: Technical Requirements for Seismic Rehabilitation of Buildings.....	130

6.1.3	FEMA 274: NEHRP Commentary on the Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings.....	130
6.1.3.1	¿PARA QUÉ ES USADO ASCE 41?	131
6.1.4	¿QUÉ ES UNA CURVA MOMENTO ROTACIÓN?.....	132
6.1.5	DATOS PARA OBTENER CURVA MOMENTO-ROTACION PARA PANDEO LOCAL Y DISTORSIONAL EN ESTRUCTURAS DE ACERO ROLADO EN FRIO.....	133
6.1.6	LOS PRIMEROS MODELOS EXPERIMENTALES.....	135
6.1.7	¿QUÉ ES M_y y M_{cr} ?	139
6.1.8	¿QUÉ ES CUFSM?.....	139
6.1.9	¿CUÁLES SON M_{cr} y PCR ?.....	140
6.1.10	¿CÓMO SE OBTUVO EL VALOR DE LA RIGIDEZ ELÁSTICA k_e ?.....	143
6.1.11	MOMENTO CURVA-ROTACION (PANDEO LOCAL).....	144
6.1.12	MOMENTO CURVA-ROTACION (PANDEO DISTORSIONAL).....	144
6.1.13	¿CUÁL ES LA FINALIDAD DE OBTENER ESTOS DATOS?	144
CAPÍTULO 7.- PANDEO LOCAL		147
7.1	DIAGRAMA DE FLUJO PANDEO LOCAL.....	147
7.2	MANUAL DE OPERACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE LA GRÁFICA MOMENTO-ROTACIÓN DEL PANDEO LOCAL.....	151
CAPÍTULO 8.- PANDEO DISTORSIONAL		161
8.1	DIAGRAMA DE FLUJO PANDEO DISTORSIONAL.....	161
8.2	MANUAL DE OPERACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE LA GRÁFICA MOMENTO-ROTACIÓN DEL PANDEO DISTORSIONAL.....	165
CAPÍTULO 9.- CARACTERIZACION CURVA MOMENTO ROTACION Vs RESULTADOS DE ENSAYO EN LABORATORIO.....		174
9.1	CALCULO DE CURVA MOMENTO ROTACION UTILIZANDO SOFTWARE Y HERRAMIENTA INFORMATICA PARA OBTENER GRAFICA CURVA MOMENTO ROTACION.	174
9.1.1	OBTENCION DE LA RIGIDEZ ELASTICA, A TRAVES DE LA PENDIENTE DE LA GRAFICA ESFUERZO-DEFORMACION.....	185

9.1.2	OBTENCION DE PROPIEDADES GEOMETRICAS DE LA SECCION Y OBTENCION DEL MOMENTO DE FLUENCIA POR MEDIO DE SOFTWARE LIBRE CUFSM	186
9.1.3	OBTENCION DE FACTORES DE CARGA PARA MOMENTO CRÍTICO POR MEDIO DEL SOFTWARE LIBRE CUFSM	187
9.2	CALCULO DE LA CURVA MOMENTO-ROTACION (PANDEO LOCAL) PARA UNA SECCION CERRADA.....	188
9.2.1	CALCULO DE CURVA MOMENTO ROTACION UTILIZANDO RESULTADOS DE ENSAYO EN LABORATORIO.....	191
CAPÍTULO 10.- DISCUSION DE RESULTADOS		193
CONCLUSIONES		194
GLOSARIO		195
BIBLIOGRAFIA		203

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 MIEMBROS TIPO DE ACERO ROLADO EN FRIO (DIMENSIONES ESTÁNDAR PARA PERFILES C Y PERFILES JOIST) (NORTH AMERICAN SPECIFICATION FOR THE DESIGN OF COLD-FORMED STEEL STRUCTURAL MEMBERS., 2010) 84

TABLA 2 DISEÑO DE LONGITUD DE BORDE PARA PERFILES C Y JOIST (NORTH AMERICAN SPECIFICATION FOR THE DESIGN OF COLD-FORMED STEEL STRUCTURAL MEMBERS., 2010) 85

TABLA 3 DISEÑO DE LONGITUD DE BORDE PARA PERFILES C Y JOIST (NORTH AMERICAN SPECIFICATION FOR THE DESIGN OF COLD-FORMED STEEL STRUCTURAL MEMBERS., 2010) 85

TABLA 4 FACTOR DE LONGITUD EFECTIVA k PARA CARGA AXIAL EN COLUMNAS CON DIFERENTES CONDICIONES DE APOYO (WEI-WEN YU, 2000) (ALVA, 2005) (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS., 2010/2011) 94

INDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 (NORTH AMERICAN SPECIFICATION FOR THE DESIGN OF COLD FORMED STEEL STRUCTURAL MEMBERS., 2010)..... 22

ILUSTRACIÓN 2 VISITA PLANTA GBS, PARQUE INDUSTRIAL LA NORIA, QUERÉTARO, QRO..... 22

ILUSTRACIÓN 3 VISITA PLANTA GBS, PARQUE INDUSTRIAL LA NORIA, QUERÉTARO, QRO. MÉXICO..... 23

ILUSTRACIÓN 4 HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA CÁLCULO DE ELEMENTOS CARGADOS CONCÉNTRICAMENTE A COMPRESIÓN..... 24

ILUSTRACIÓN 5 HERRAMIENTA INFORMÁTICA DE AYUDA PARA CÁLCULO DE PERFILES C DE LÁMINA ROLADA EN FRÍO A SOMETIDOS A FLEXIÓN..... 25

ILUSTRACIÓN 6 HERRAMIENTA INFORMÁTICA DE AYUDA PARA CÁLCULO DE PERFILES C DE LÁMINA ROLADA EN FRÍO A SOMETIDOS A FLEXIÓN..... 26

ILUSTRACIÓN 7 PLACA EN COMPRESIÓN UNIFORME CON EXTREMOS ARRIOSTRADOS..... 27

ILUSTRACIÓN 8 DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS DE POST-PANDEO (ALVA, 2005)..... 27

ILUSTRACIÓN 9 ANCHO DE UNA PLACA EN COMPRESIÓN CON BORDES ATIESADOS. (WEI-WEN YU, 2000)..... 28

ILUSTRACIÓN 10 CURVA TÍPICA DEL PROGRAMA CUFSM PARA UN PERFIL DETERMINADO (JOSÉ ANGEL ORTIZ LOZANO, 2010)..... 30

ILUSTRACIÓN 11 VISITA PLANTA GBS, PARQUE INDUSTRIAL LA NORIA, QUERÉTARO, QRO. MÉXICO..... 32

ILUSTRACIÓN 12 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS REFERIDA EN LA SECCIÓN A3.1 DE LA ESPECIFICACIÓN AISI-NASPEC..... 35

ILUSTRACIÓN 13 REGLAMENTO ASD (IMAGEN DE INTERNET)..... 36

ILUSTRACIÓN 14 REGLAMENTO LRFD, (IMAGEN DE INTERNET)..... 37

ILUSTRACIÓN 15 VISTA DE LA ESTRUCTURA DEL ENTREPISO CON VIGAS DE PERFILES GALVANIZADOS, FUENTE: STEEL FRAMING ARQUITECTURA, ILAFA..... 38

ILUSTRACIÓN 16 GIMNASIO DE BOX LÍNEA VERDE, AGUASCALIENTES 42

ILUSTRACIÓN 17 MIEMBROS NO SOPORTADOS LATERALMENTE (ALVA, 2005)..... 44

ILUSTRACIÓN 18 MIEMBROS NO SOPORTADOS LATERALMENTE (IMAGEN DE INTERNET) 45

ILUSTRACIÓN 19 PANDEO LATERAL TORSIONAL DE MIEMBROS FLEXIONANTES..... 47

ILUSTRACIÓN 20 PANDEO LATERAL TORSIONAL DE MIEMBROS FLEXIONANTES..... 47

ILUSTRACIÓN 21 FLEXIÓN ALREDEDOR DEL EJE CENTROIDAL 49

ILUSTRACIÓN 22 ALTERNATIVAS PARA SECCIONES I Y Z..... 50

ILUSTRACIÓN 23 PANDEO FLEXIONANTE 61

ILUSTRACIÓN 24 TIPOS DE PANDEO EN COLUMNAS (IMAGEN INTERNET) 64

ILUSTRACIÓN 25 ELEMENTOS DE PLACA ATIESADOS. (ALVA, 2005)..... 65

<i>ILUSTRACIÓN 26 PANDEO ELÁSTICO DE PLACA ATIESADA. (ALVA, 2005).....</i>	<i>66</i>
<i>ILUSTRACIÓN 27 VALORES DE K USADOS FRECUENTEMENTE. (ALVA, 2005).....</i>	<i>66</i>
<i>ILUSTRACIÓN 28 MODELO DE WINTER (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS., 2010/2011)</i> <i>.....</i>	<i>67</i>
<i>ILUSTRACIÓN 29 DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS DE POST-PANDEO (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL</i> <i>ENGINEERS., 2010/2011).....</i>	<i>68</i>
<i>ILUSTRACIÓN 30 ANCHO EFECTIVO DE UN ELEMENTO ATIESADO EN COMPRESIÓN. (WEI-WEN YU,</i> <i>2000).....</i>	<i>69</i>
<i>ILUSTRACIÓN 31 RELACIÓN ANCHO EFECTIVO (ALVA, 2005).....</i>	<i>70</i>
<i>ILUSTRACIÓN 32 FACTOR DE REDUCCIÓN, P, VS FACTOR DE ESBELTEZ.</i>	<i>71</i>
<i>ILUSTRACIÓN 33 PANDEO LOCAL EN FLEXIÓN ATIESADA (ALVA, 2005).....</i>	<i>72</i>
<i>ILUSTRACIÓN 34 PANDEO LOCAL EN UNA SECCIÓN COLUMNA. (ALVA, 2005).....</i>	<i>72</i>
<i>ILUSTRACIÓN 35 DEFINICIONES IMPORTANTES. (ALVA, 2005).....</i>	<i>73</i>
<i>ILUSTRACIÓN 36 BORDE ATIESADO CON UNA SIMPLE CEJA. (ALVA, 2005).....</i>	<i>73</i>
<i>ILUSTRACIÓN 37 BORDE ATIESADO DONDE EL ÁREA ACHURADA ES EL ELEMENTO ATIESADOR.</i> <i>(ALVA, 2005).....</i>	<i>74</i>
<i>ILUSTRACIÓN 38 ELEMENTOS A COMPRESIÓN ATIESADOS EN AMBOS BORDES. (ALVA, 2005)...</i>	<i>74</i>
<i>ILUSTRACIÓN 39 ELEMENTOS A COMPRESIÓN ATIESADOS EN UN BORDE. (ALVA, 2005).....</i>	<i>75</i>
<i>ILUSTRACIÓN 40 ELEMENTOS ATIESADOS UNIFORMEMENTE COMPRIMIDOS. (ALVA, 2005).....</i>	<i>76</i>
<i>ILUSTRACIÓN 41 COMPONENTES DE UN PERFIL "C".</i>	<i>77</i>
<i>ILUSTRACIÓN 42 DESPLAZAMIENTO DE UNA SECCIÓN NO SIMÉTRICA DURANTE EL PANDEO</i> <i>FLEXIONANTE-TORSIONAL (WEI-WEN YU, 2000) PÁG. 318.</i>	<i>79</i>
<i>ILUSTRACIÓN 43 FORMAS SIMÉTRICAS SIMPLES PÁG. 321. (WEI-WEN YU, 2000).....</i>	<i>82</i>
<i>ILUSTRACIÓN 44 CENTRO DE CORTANTE S DE UNA SECCIÓN EN CANAL. (JAMES M. GERE, 2009)</i> <i>.....</i>	<i>82</i>
<i>ILUSTRACIÓN 45 MODO DE PANDEO PARA UNA SECCIÓN CANAL (WEI-WEN YU, 2000, PÁG. 323)</i> <i>.....</i>	<i>83</i>
<i>ILUSTRACIÓN 46 VALORES DE K USADOS FRECUENTEMENTE (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL</i> <i>ENGINEERS., 2010/2011).....</i>	<i>97</i>
<i>ILUSTRACIÓN 47 VALORES DE K USADOS FRECUENTEMENTE (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL</i> <i>ENGINEERS., 2010/2011).....</i>	<i>98</i>
<i>ILUSTRACIÓN 48 FACTORES DE RESISTENCIA ASD Y LRFD (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL</i> <i>ENGINEERS., 2010/2011).....</i>	<i>100</i>
<i>ILUSTRACIÓN 49 CARGA EXCÉNTRICA DE SECCIÓN TRANSVERSAL</i>	<i>103</i>
<i>ILUSTRACIÓN 50 SECCIÓN ABIERTA CON CARGA EXCÉNTRICA.....</i>	<i>103</i>
<i>ILUSTRACIÓN 51 PANDEO TORSIONAL FLEXIONANTE.</i>	<i>103</i>
<i>ILUSTRACIÓN 52 EXCENTRICIDAD SOBRE EL EJE X</i>	<i>104</i>
<i>ILUSTRACIÓN 53 EXCENTRICIDAD SOBRE EJE Y.....</i>	<i>104</i>

<i>ILUSTRACIÓN 54 PARA EL FACTOR DE ESBELTEZ SE APLICA LA ECUACIÓN E. B2.1-4, Eq.B2.1-5</i>	
.....	112
<i>ILUSTRACIÓN 55 RELACIÓN DE ESBELTEZ.</i>	113
<i>ILUSTRACIÓN 56 RELACIÓN DE ESBELTEZ.</i>	114
<i>ILUSTRACIÓN 57 RELACIÓN DE ESBELTEZ.</i>	115
<i>ILUSTRACIÓN 58 COEFICIENTES DE PANDEO.</i>	116
<i>ILUSTRACIÓN 59 CARACTERIZACIÓN MOMENTO-ROTACIÓN (M-θ)</i>	129
<i>ILUSTRACIÓN 60 PORTADA ARTÍCULO DEL PROFESOR BEN SCHAFER</i>	130
<i>ILUSTRACIÓN 61 ASCE41</i>	130
<i>ILUSTRACIÓN 62 CURVAS ASCE 41</i>	131
<i>ILUSTRACIÓN 63 CURVAS DE COMPONENTE FUERZA-DEFORMACIÓN DE LA SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIEROS CIVILES</i>	131
<i>ILUSTRACIÓN 64 IMAGEN OBTENIDA DE SOFTWARE DE ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL SAP2000</i>	132
<i>ILUSTRACIÓN 65 PRUEBAS DE PANDEO LOCAL Y DISTORSIONAL DE YU Y SCHAFER</i>	132
<i>ILUSTRACIÓN 66 CURVA MOMENTO VS. ROTACIÓN</i>	132
<i>ILUSTRACIÓN 67 ABREVIATURA DE MATRIX LABORATORY, LABORATORIO DE MATRICES..</i>	133
<i>ILUSTRACIÓN 68 MODELO 1: MESETA DESPUÉS DEL PICO Y CAÍDA DE FUERZA.</i>	135
<i>ILUSTRACIÓN 69 MODELO 2: MESETA DESPUÉS DEL PICO Y PERDIDA DE RIGIDEZ.</i>	135
<i>ILUSTRACIÓN 70 MODELO 1ª: PERDIDA DE RIGIDEZ BILINEAL DESPUÉS DEL PICO O CUMBRE DE LA CURVA. (D. AYHAN, 2012)</i>	136
<i>ILUSTRACIÓN 71 MODELO (M-θ).</i>	136
<i>ILUSTRACIÓN 72 CÁLCULO DE ROTACIONES PARA PERFILES DEL PROTOTIPO DE VIVIENDA.</i>	138
<i>ILUSTRACIÓN 73 IMAGEN DEL CUFSM 3.1 (ELASTIC BUCKLING ANALYSIS OF THIN-WALLED MEMBERS)</i>	139
<i>ILUSTRACIÓN 74 IMAGEN: ELEMENTO FINITO Y BANDA FINITA (MANUAL CUFSM, DISPONIBLE EN PÁGINA DE INTERNET)</i>	140
<i>ILUSTRACIÓN 75 CURVA DE PANDEO</i>	140
<i>ILUSTRACIÓN 76 MITAD DE UNA ONDA SINUSOIDAL (LABOUBE R, 2011).</i>	141
<i>ILUSTRACIÓN 77 MITAD DE LA LONGITUD DE UNA ONDA SINUSOIDAL (LABOUBE R, 2011)...</i>	141
<i>ILUSTRACIÓN 78 IMÁGENES SOFTWARE LIBRE CUFSM 3.1</i>	143
<i>ILUSTRACIÓN 79 MOMENTO CURVA-ROTACION (PANDEO LOCAL).</i>	144
<i>ILUSTRACIÓN 80 MOMENTO CURVA-ROTACION (PANDEO DISTORSIONAL).</i>	144
<i>ILUSTRACIÓN 81 IMÁGENES DE MODELO EN COMPUTADORA SOFTWARE SAP2000</i>	145
<i>ILUSTRACIÓN 82 SIMULACIÓN DE LAS DEFORMACIONES EN LOS APOYOS DEL MODELO ES UNA SIMULACIÓN DE LAS DEFORMACIONES EN LOS APOYOS DEL MODELO DE ANÁLISIS PARA SIMULAR UN ASENTAMIENTO DIFERENCIAL PROVOCADO POR SUBSIDENCIA.</i>	145
<i>ILUSTRACIÓN 83 CURVA MOMENTO-ROTACION DE UN PERFIL NORMAL</i>	146

ILUSTRACIÓN 84 FUERZA MOMENTO PICO COMO UNA FUNCIÓN DE LA ESBELTEZ LOCAL..... 156

ILUSTRACIÓN 85 GRÁFICA MODELO 1..... 160

ILUSTRACIÓN 86 FUERZA MOMENTO PICO COMO UNA FUNCIÓN DE LA ESBELTEZ LOCAL..... 169

ILUSTRACIÓN 87 PORTADA DE ARTICULO EXPERIMENTAL CARACTERIZACIÓN CURVA MOMENTO-ROTACIÓN PARA VIGAS DE ACERO ROLADO EN FRIO..... 170

ILUSTRACIÓN 88 GRÁFICA MODELO 1..... 173

ILUSTRACIÓN 89 ECUACIÓN DE LA PENDIENTE..... 185

ILUSTRACIÓN 90 IMÁGEN DE FACTORES DE CARGA CUFSM..... 187

ILUSTRACIÓN 91 IMAGEN HERRAMIENTA INFORMÁTICA CÁLCULO CURVA MOMENTO-ROTACIÓN.189

ILUSTRACIÓN 92 CUERVA MOMENTO-ROTACIÓN SECCIÓN CERRADA. 190

ILUSTRACIÓN 93 CARGA-DEFORMACIÓN, ENSAYE DE LABORATORIO. 192



ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>ECUACIÓN 1</i>	28
<i>ECUACIÓN 2</i>	40
<i>ECUACIÓN 3</i>	40
<i>ECUACIÓN 4</i>	41
<i>ECUACIÓN 5</i>	41
<i>ECUACIÓN 6</i>	42
<i>ECUACIÓN 7</i>	43
<i>ECUACIÓN 8</i>	43
<i>ECUACIÓN 9</i>	43
<i>ECUACIÓN 10</i>	43
<i>ECUACIÓN 11</i>	43
<i>ECUACIÓN 12</i>	45
<i>ECUACIÓN 13</i>	45
<i>ECUACIÓN 14</i>	46
<i>ECUACIÓN 15</i>	46
<i>ECUACIÓN 16</i>	46
<i>ECUACIÓN 17</i>	46
<i>ECUACIÓN 18</i>	46
<i>ECUACIÓN 19</i>	47
<i>ECUACIÓN 20</i>	48
<i>ECUACIÓN 21</i>	48
<i>ECUACIÓN 22</i>	48
<i>ECUACIÓN 23</i>	49
<i>ECUACIÓN 24</i>	49
<i>ECUACIÓN 25</i>	50
<i>ECUACIÓN 26</i>	50
<i>ECUACIÓN 27</i>	50
<i>ECUACIÓN 28</i>	50
<i>ECUACIÓN 29</i>	50
<i>ECUACIÓN 30</i>	51
<i>ECUACIÓN 31</i>	51
<i>ECUACIÓN 32</i>	56
<i>ECUACIÓN 33</i>	56
<i>ECUACIÓN 34</i>	57

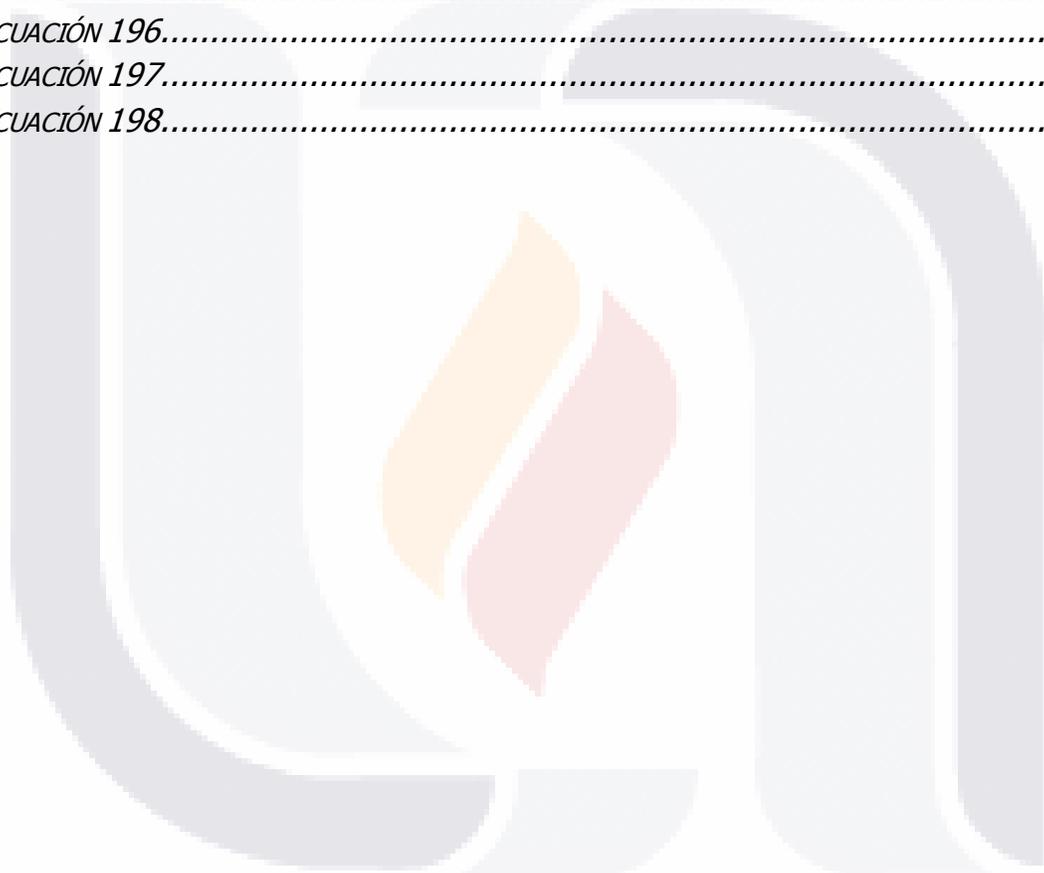
<i>ECUACIÓN 35</i>	<i>57</i>
<i>ECUACIÓN 36</i>	<i>57</i>
<i>ECUACIÓN 37</i>	<i>57</i>
<i>ECUACIÓN 38</i>	<i>57</i>
<i>ECUACIÓN 39</i>	<i>57</i>
<i>ECUACIÓN 40</i>	<i>58</i>
<i>ECUACIÓN 41</i>	<i>58</i>
<i>ECUACIÓN 42</i>	<i>58</i>
<i>ECUACIÓN 43</i>	<i>58</i>
<i>ECUACIÓN 44</i>	<i>58</i>
<i>ECUACIÓN 45</i>	<i>58</i>
<i>ECUACIÓN 46</i>	<i>59</i>
<i>ECUACIÓN 47</i>	<i>59</i>
<i>ECUACIÓN 48</i>	<i>59</i>
<i>ECUACIÓN 49</i>	<i>60</i>
<i>ECUACIÓN 50</i>	<i>61</i>
<i>ECUACIÓN 51</i>	<i>61</i>
<i>ECUACIÓN 52</i>	<i>61</i>
<i>ECUACIÓN 53</i>	<i>61</i>
<i>ECUACIÓN 54</i>	<i>62</i>
<i>ECUACIÓN 55</i>	<i>62</i>
<i>ECUACIÓN 56</i>	<i>62</i>
<i>ECUACIÓN 57</i>	<i>62</i>
<i>ECUACIÓN 58</i>	<i>66</i>
<i>ECUACIÓN 59</i>	<i>69</i>
<i>ECUACIÓN 60</i>	<i>69</i>
<i>ECUACIÓN 61</i>	<i>70</i>
<i>ECUACIÓN 62</i>	<i>70</i>
<i>ECUACIÓN 63</i>	<i>70</i>
<i>ECUACIÓN 64</i>	<i>71</i>
<i>ECUACIÓN 65</i>	<i>71</i>
<i>ECUACIÓN 66</i>	<i>71</i>
<i>ECUACIÓN 67</i>	<i>78</i>
<i>ECUACIÓN 68</i>	<i>78</i>
<i>ECUACIÓN 69</i>	<i>80</i>
<i>ECUACIÓN 70</i>	<i>80</i>
<i>ECUACIÓN 71</i>	<i>80</i>
<i>ECUACIÓN 72</i>	<i>81</i>

<i>ECUACIÓN 73</i>	<i>81</i>
<i>ECUACIÓN 74</i>	<i>81</i>
<i>ECUACIÓN 75</i>	<i>81</i>
<i>ECUACIÓN 76</i>	<i>81</i>
<i>ECUACIÓN 77</i>	<i>81</i>
<i>ECUACIÓN 78</i>	<i>81</i>
<i>ECUACIÓN 79</i>	<i>81</i>
<i>ECUACIÓN 80</i>	<i>82</i>
<i>ECUACIÓN 81</i>	<i>82</i>
<i>ECUACIÓN 82</i>	<i>82</i>
<i>ECUACIÓN 83</i>	<i>83</i>
<i>ECUACIÓN 84</i>	<i>83</i>
<i>ECUACIÓN 85</i>	<i>95</i>
<i>ECUACIÓN 86</i>	<i>95</i>
<i>ECUACIÓN 87</i>	<i>95</i>
<i>ECUACIÓN 88</i>	<i>95</i>
<i>ECUACIÓN 89</i>	<i>95</i>
<i>ECUACIÓN 90</i>	<i>95</i>
<i>ECUACIÓN 91</i>	<i>95</i>
<i>ECUACIÓN 92</i>	<i>95</i>
<i>ECUACIÓN 93</i>	<i>96</i>
<i>ECUACIÓN 94</i>	<i>96</i>
<i>ECUACIÓN 95</i>	<i>96</i>
<i>ECUACIÓN 96</i>	<i>96</i>
<i>ECUACIÓN 97</i>	<i>96</i>
<i>ECUACIÓN 98</i>	<i>96</i>
<i>ECUACIÓN 99</i>	<i>96</i>
<i>ECUACIÓN 100</i>	<i>97</i>
<i>ECUACIÓN 101</i>	<i>97</i>
<i>ECUACIÓN 102</i>	<i>97</i>
<i>ECUACIÓN 103</i>	<i>97</i>
<i>ECUACIÓN 104</i>	<i>98</i>
<i>ECUACIÓN 105</i>	<i>98</i>
<i>ECUACIÓN 106</i>	<i>98</i>
<i>ECUACIÓN 107</i>	<i>98</i>
<i>ECUACIÓN 108</i>	<i>99</i>
<i>ECUACIÓN 109</i>	<i>99</i>
<i>ECUACIÓN 110</i>	<i>99</i>

<i>ECUACIÓN 111.....</i>	<i>99</i>
<i>ECUACIÓN 112.....</i>	<i>99</i>
<i>ECUACIÓN 113.....</i>	<i>99</i>
<i>ECUACIÓN 114.....</i>	<i>100</i>
<i>ECUACIÓN 115.....</i>	<i>100</i>
<i>ECUACIÓN 116.....</i>	<i>104</i>
<i>ECUACIÓN 117.....</i>	<i>104</i>
<i>ECUACIÓN 118.....</i>	<i>104</i>
<i>ECUACIÓN 119.....</i>	<i>105</i>
<i>ECUACIÓN 120.....</i>	<i>105</i>
<i>ECUACIÓN 121.....</i>	<i>105</i>
<i>ECUACIÓN 122.....</i>	<i>106</i>
<i>ECUACIÓN 123.....</i>	<i>106</i>
<i>ECUACIÓN 124.....</i>	<i>110</i>
<i>ECUACIÓN 125.....</i>	<i>110</i>
<i>ECUACIÓN 126.....</i>	<i>110</i>
<i>ECUACIÓN 127.....</i>	<i>110</i>
<i>ECUACIÓN 128.....</i>	<i>111</i>
<i>ECUACIÓN 129.....</i>	<i>111</i>
<i>ECUACIÓN 130.....</i>	<i>111</i>
<i>ECUACIÓN 131.....</i>	<i>111</i>
<i>ECUACIÓN 132.....</i>	<i>111</i>
<i>ECUACIÓN 133.....</i>	<i>111</i>
<i>ECUACIÓN 134.....</i>	<i>111</i>
<i>ECUACIÓN 135.....</i>	<i>111</i>
<i>ECUACIÓN 136.....</i>	<i>111</i>
<i>ECUACIÓN 137.....</i>	<i>112</i>
<i>ECUACIÓN 138.....</i>	<i>112</i>
<i>ECUACIÓN 139.....</i>	<i>112</i>
<i>ECUACIÓN 140.....</i>	<i>112</i>
<i>ECUACIÓN 141.....</i>	<i>113</i>
<i>ECUACIÓN 142.....</i>	<i>113</i>
<i>ECUACIÓN 143.....</i>	<i>113</i>
<i>ECUACIÓN 144.....</i>	<i>114</i>
<i>ECUACIÓN 145.....</i>	<i>115</i>
<i>ECUACIÓN 146.....</i>	<i>115</i>
<i>ECUACIÓN 147.....</i>	<i>115</i>
<i>ECUACIÓN 148.....</i>	<i>115</i>

<i>ECUACIÓN 149</i>	116
<i>ECUACIÓN 150</i>	116
<i>ECUACIÓN 151</i>	116
<i>ECUACIÓN 152</i>	116
<i>ECUACIÓN 153</i>	117
<i>ECUACIÓN 154</i>	117
<i>ECUACIÓN 155</i>	117
<i>ECUACIÓN 156</i>	117
<i>ECUACIÓN 157</i>	117
<i>ECUACIÓN 158</i>	117
<i>ECUACIÓN 159</i>	117
<i>ECUACIÓN 160</i>	117
<i>ECUACIÓN 161</i>	118
<i>ECUACIÓN 162</i>	118
<i>ECUACIÓN 163</i>	118
<i>ECUACIÓN 164</i>	118
<i>ECUACIÓN 165</i>	118
<i>ECUACIÓN 166</i>	119
<i>ECUACIÓN 167</i>	119
<i>ECUACIÓN 168</i>	119
<i>ECUACIÓN 169</i>	119
<i>ECUACIÓN 170</i>	119
<i>ECUACIÓN 171</i>	134
<i>ECUACIÓN 172</i>	134
<i>ECUACIÓN 173</i>	134
<i>ECUACIÓN 174</i>	134
<i>ECUACIÓN 175</i>	157
<i>ECUACIÓN 176</i>	157
<i>ECUACIÓN 177</i>	157
<i>ECUACIÓN 178</i>	158
<i>ECUACIÓN 179</i>	158
<i>ECUACIÓN 180</i>	158
<i>ECUACIÓN 181</i>	158
<i>ECUACIÓN 182</i>	159
<i>ECUACIÓN 183</i>	159
<i>ECUACIÓN 184</i>	159
<i>ECUACIÓN 185</i>	159
<i>ECUACIÓN 186</i>	159

<i>ECUACIÓN 187.....</i>	<i>160</i>
<i>ECUACIÓN 188.....</i>	<i>170</i>
<i>ECUACIÓN 189.....</i>	<i>170</i>
<i>ECUACIÓN 190.....</i>	<i>171</i>
<i>ECUACIÓN 191.....</i>	<i>171</i>
<i>ECUACIÓN 192.....</i>	<i>171</i>
<i>ECUACIÓN 193.....</i>	<i>171</i>
<i>ECUACIÓN 194.....</i>	<i>172</i>
<i>ECUACIÓN 195.....</i>	<i>172</i>
<i>ECUACIÓN 196.....</i>	<i>172</i>
<i>ECUACIÓN 197.....</i>	<i>172</i>
<i>ECUACIÓN 198.....</i>	<i>173</i>

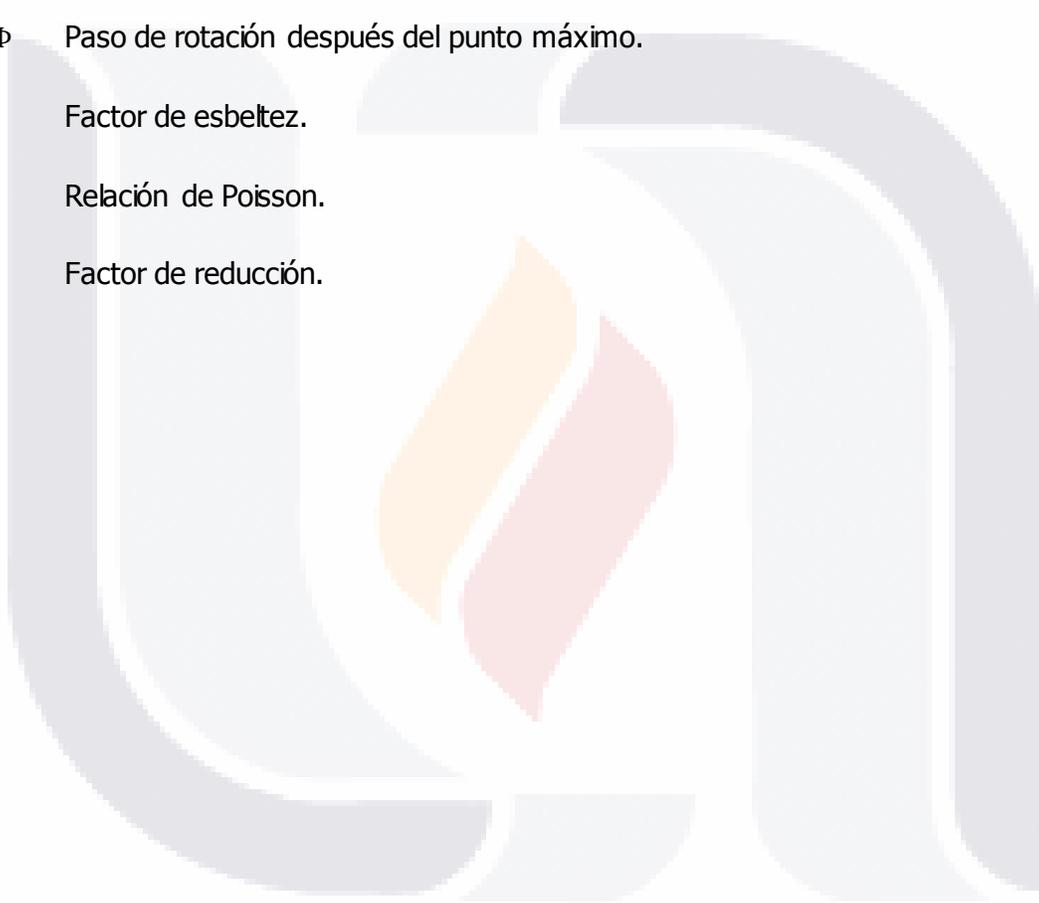


SIMBOLOGÍA

a	Longitud de ceja
A_e	Área efectiva
A_g	Área bruta
b	Ancho efectivo
b_f	Ancho del patín
C_w	Constante de alabeo torsional.
d	Peralte de la viga.
d_s	Dimensión efectiva reducida de la ceja basada en la relación I_s/I_a
d'_s	Borde atiesado efectivo basado en el pandeo local.
E	Módulo de Elasticidad.
F_c	Esfuerzo crítico.
f_{cr}	Esfuerzo crítico por compresión.
F_e	Momento crítico elástico.
F_y	Esfuerzo de fluencia.
G	Módulo de cortante.
I_a	Momento de inercia requerido en un atiesador de borde que admite la compresión adyacente del momento a conducirse como elemento totalmente atiesado.
I_s	Momento de inercia del atiesador de borde completo alrededor de su propio eje centroidal paralelo al elemento a ser atiesado.
I_{xe}	Momento efectivo de inercia.

J	La constante torsional de St. Venant, J , mide la resistencia de un elemento estructural a torsión pura o torsión uniforme.
K	Coefficiente de pandeo.
k_1	Es la rigidez elástica.
k_2	Es la segunda rigidez entre el punto elástico y el punto máximo.
L	Longitud del elemento.
M_1	Momento elástico.
M_2	Momento pico, momento máximo de la curva.
M_3	Es el momento de caída después del punto máximo.
M_4	Momento máximo de pandeo.
P_n	Resistencia nominal axial.
Φ_1	Rotación asociado al momento elástico.
Φ_2	Rotación asociado al momento pico.
Φ_3	Rotación después del momento máximo.
Φ_4	Rotación máxima donde se presenta el pandeo.
R	Radio de doblez interior.
r	Radio intermedio entre el espesor t
r_o	Radio de giro polar de la sección transversal con respecto al centro de cortantes.
r_x	Radio de giro en dirección x
r_y	Radio de giro en dirección y
S_c	Módulo de sección elástico de la sección efectiva calculado a un esfuerzo M_c/S_f en la fibra extrema a compresión.

S_f	Módulo de sección elástico de la sección total no reducida para la fibra extrema en compresión.
t	Espesor del alma.
u	Longitud de arco basado al radio r .
y_{cg}	Distancia desde la fibra extrema hasta el eje neutro en dirección y .
$\Delta\Phi$	Paso de rotación después del punto máximo.
λ	Factor de esbeltez.
μ	Relación de Poisson.
ρ	Factor de reducción.



RESUMEN

El objetivo de este trabajo es el de desarrollar una herramienta informática que permita de una manera práctica revisar los elementos que componen un prototipo de vivienda formada por una estructura de Acero rolado en frío de pared delgada sometida a las cargas y acciones reglamentarias así como a otro tipo de sollicitación que para este caso particular es el fenómeno de la subsidencia, esto con la finalidad de analizar si este tipo de estructura es capaz de soportar estas deformaciones que se presentan en los apoyos de la edificación y por ende son transmitidos al resto de la vivienda en forma de esfuerzos como lo son la tensión, compresión, flexión, flexo-compresión, flexo-tensión y de esta manera poder evaluar su desempeño para una posible propuesta para construcción de vivienda en zonas donde se presenta este fenómeno.

ABSTRACT

The objective of this paper is to develop an informing tool that enables a practical way to analyze the elements that belong to thin-walled, cold formed steel structures. These structures are subjected to regulatory actions and loads, as well as a certain kind of appeal that in this particular case, it is the phenomenon of subsidence. The objective of this is to analyze whether this kind of structure is able to support the deformation that occurs in the posts and therefore transmitted to the rest of the building in the form of pressure, compression, flection, bending compression. This way it is possible to evaluate its execution for a feasible proposal for the construction of houses where this phenomenon can take place.

INTRODUCCION

El uso de miembros de acero rolado en frio comenzó a utilizarse en la construcción en 1850 en dos países Estados Unidos y Gran Bretaña. Sin embargo estos miembros de acero no fueron utilizados ampliamente sino hasta 1940.

Desde 1946 el uso y desarrollo de paredes delgadas de acero rolado en frio en la construcción se aceleró en Estados Unidos debido a la publicación de varias ediciones de la "Especificaciones para el Diseño de miembros de Acero rolado en frio" del Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI). Desde 1939 las primeras ediciones de especificaciones fueron basadas mayormente en la investigación financiada por AISI en la Universidad Cornell bajo la dirección de George Winter. (Wei-Wen Yu, 2000).

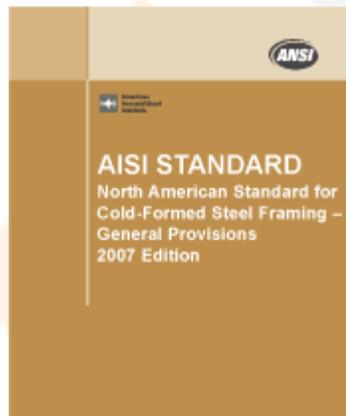


Ilustración 1 (North American Specification for the Design of Cold Formed Steel Structural Members., 2010)



Ilustración 2 Visita planta GBS, Parque Industrial La Noria, Querétaro, Qro

Actualmente en México, (2007) contamos con normatividad para estructuras de acero rolado en frío gracias al desarrollo de la Especificación Norteamericana para el diseño de miembros de acero rolado en frío NASPEC a través de la unión de esfuerzos de la comisión del Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI), la comisión de la Asociación Técnica de normas de Canadá en miembros de acero rolado en Frío (S136), y la Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero (CANACERO) en México.

Los perfiles de acero estructural formados en frío son producidos al pasar hojas o tiras de acero a temperatura ambiente por rodillos o prensas, después se dobla el acero para obtener las formas deseadas. Los miembros formados en frío pueden distinguirse de los perfiles laminados en caliente en que sus formas contienen esquinas redondeadas y elementos planos esbeltos, y en que todos esos elementos tienen el mismo espesor. Una vez que el conjunto especial de rodillos requeridos para un nuevo perfil está disponible, podrá producirse en masa cualquier forma de sección transversal concebible en el molino de laminado en frío.



Ilustración 3 Visita planta GBS, Parque Industrial La Noria, Querétaro, Qro. México.

Los miembros estructurales tienen un estilo general de perfiles laminados en caliente bien establecido, como canales, zetas. Los perfiles I se hacen al unir mediante soldadura de punto dos canales. El peralte de tales secciones, por lo general varía entre 4 y 12 pulg y el espesor entre calibres 18 y 8, estas dimensiones a menudo dan por resultado elementos de placa más delgados (relaciones altas de ancho de superficie plana a espesor) que requieren de rigidizadores o bordes a lo largo de los filos para evitar pandeo local prematuro de la placa.

Las especificaciones AISI-NASPEC 2010 para elementos de acero rolado en frio consideran estos modos de pandeo en el diseño de los perfiles, ya sea aplicando el método de anchos efectivos o el método de resistencia directa.

Estos miembros de acero con calibre pequeño se utilizan en estructuras sometidas a cargas ligeras y/o longitudes de claro corto.

(S.Vinnakota, 2006)

The screenshot shows a software interface for calculating the resistance of a C-section under concentric compression. The interface is divided into several sections:

- MIEMBROS CARGADOS CONCENTRICAMENTE A COMPRESION:** Includes a diagram of a C-section with dimensions b_f , d , t , and R .
- DATOS DE LA SECCION:** Lists section properties such as $d = 7.62$ cms, $b_f = 7.62$ cms, $t = 0.1524$ cms, $R = 0.4763$ cms, $L = 106.68$ cms, $F_y = 3523$ kg/cm², $E = 2079413$ kg/cm², $G = 7961138$ kg/cm², $\mu = 0.3$, $I_{yy} = 3.826$ cm², $I_{xx} = 3.23$ cms, $I_{yy} = 2.84$ cms, $I_{xx} = 8.46$ cms, $W_{xx} = 7.29$ cms, $C_{w} = 561.24$ cm⁶, and $J = 0.02964$ cm⁴.
- CONDICIONES DE LA SECCION:** Lists boundary conditions for $K_x = 1.0$, $K_y = 1.0$, and $K_t = 1.0$.
- DETERMINAREMOS LA RESISTENCIA NOMINAL AXIAL Pn:** Shows calculations for F_e based on different failure modes, resulting in $F_e = 3758$ kg/cm² (correct), $F_e = 14537.92$ kg/cm², and $F_e = 3780.44$ kg/cm².
- ESFUERZO AL PANDEO ELASTICO, POR PANDEO TORSIONAL-FLEXIONANTE, Fe:** Shows a table of results for $K_x L_{Tx} = 33.03$ (correct), $F_e = 11(28) [(cex + ct) - [(cex + ct)^2 - 4 \beta cex ct]^{1/2}]$, $cex = \pi^2 E / (K_x L_{Tx})^2 = 18804.88$ kg/cm², $\beta = 1 - (cxt/ro)^2 = 0.257$, and $F_e = 3269.52$ kg/cm².
- ESFUERZO AL PANDEO NOMINAL, Fn:** Shows $A_c = [F_y/F_e]^{1/2} = 1.04$ (pandeo inelastico), $F_n = 2244.12$ kg/cm² (pandeo elastico), and $F_n = (0.877)(A_c/2)^{1/2} F_y$.
- DETERMINACION DEL AREA EFECTIVA, Ae:** Shows $w = 6.36$ cms, $W = 41.75$ cms, $S = 38.95$ cms, and $S/3 = 12.98$.
- PATIN (ELEMENTO A COMPRESION ATIEZADO):** Shows $r = 1/3$, $d = 1.2763$ cms, $dh = 8.37$ cms, $ls = 0.0264$ cm⁴, $la = 0.0632$ cm⁴, $ls/la = 0.38$, $CZ = 0.38$, $Dla = 0.30$, $ka = 3.75$, $ku = 0.43$, $k = 2.94$, $\lambda = 0.856$, $p = 0.868$, and $b = 5.52$ cms.
- DETERMINAR EL TIPO DE CASO:** Shows 3 .
- ATIESADOR DE BORDE:** Shows $w = 1.28$ cms, $W = 8.4$ cms, $fcr = 11517.07$ kg/cm², $\lambda = 0.4414$, $d_s = 1.276$ cms, and $d_s = 0.43$ cms.
- ALMA:** Shows $w = 6.36$ cms, $W = 41.75$ cms, and $ka = 4.00$ cms.

Ilustración 4 Herramienta informática para cálculo de elementos cargados concéntricamente a compresión

CAPÍTULO 1.- OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

1.1 OBJETIVOS

La Herramienta de Ayuda para Revisión y Diseño de elementos de acero rolado en Frio de acuerdo a la norma NASPEC 2010 es un proyecto para la colaboración del proyecto:

Elaborar un prototipo de vivienda de acero rolado en frio previamente analizada tanto mediante una memoria de cálculo que contenga la respuesta del prototipo ante acciones gravitacionales y de carga lateral, así como de los factores de seguridad involucrados en el diseño estructural de sus elementos.

Someter el prototipo de vivienda a condiciones de esfuerzos y deformaciones producidas por hundimientos diferenciales similares a los observados en la superficie del terreno agrietado (bordes de las grietas).

Con la finalidad de poder hacer una revisión rápida y que cumpla con toda la normativa de los miembros que componen el prototipo de casa sometido a los hundimientos diferenciales.

MIEMBROS A FLEXION

DATOS DEL POLIN		TENIENDO DE PROPIEDADES	
d =>	38.1 cms	L =>	304.8 cms
bf =>	11.43 cms	Fy =>	3523 kg/cm2
a =>	3.18 cms	E =>	2078413 kg/cm2
t =>	0.23 cms	G =>	796138 kg/cm2
R =>	0.46 cms	μ =>	0.3

PROPIEDADES DE LA SECCION BRUTA			
Ag =>	4.49 cm2	Ycg =>	20.46 cm3
rx =>	5.03 cms	Ixx =>	2767.04 cm4
ry =>	1.044 cms	Cxx =>	221.811 cm6
ro =>	5.16 cms	J =>	0.01956 cm4

DETERMINANDO EL MOMENTO NOMINAL BASADO EN EL ARRIOSTRAMIENTO LATERAL E INICIO DEL LIMITE DE FLUENCIA, SE OBTIENE:

Sve =	135.29	cm3	Sve = Ixx / Ycg
Mn =	476610.59	kg-cm	Mn = Sve Fy

Mn = 4766.11 kg-cm

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

Oey =	3693.59	kg/cm2	$\alpha_{ey} = \frac{w' L^2}{(K_y F_y I_{yy})^2}$
Ot =	3799.22	kg/cm2	$\alpha_t = \frac{1}{A G} \left[\frac{w' L C_c}{G J + (K_y I_{yy})^2} \right]$

SI SUPONEMOS QUE Cb = 1.00

Fe =	5671.27	kg/cm2	Fe = ((Cb ro A) / Sf) [(oey ot)^0.5]
------	---------	--------	--------------------------------------

Teniendo en consideración que

Fe > 2.78 Fy	entonces	Fc = Fy
2.78 Fy > Fe > 0.56 Fy	entonces	Fc = [10/9] Fy * [1 - (10**Fy / 38Fe)]
Fe < 0.56 Fy	entonces	Fc = Fe

por lo que calculamos :

0.56 Fy =	1972.88	kg/cm2
2.78 Fy =	9793.94	kg/cm2
Fc =	3238.98	kg/cm2

Ahora tomando f = fc = 3238.98 se debe calcular
El módulo de sección elástico de la sección efectiva calculado a un esfuerzo Mc/Sf en la fibra extrema a compresión, por lo que :

Ilustración 5 Herramienta informática de ayuda para cálculo de perfiles C de lámina rolada en frío a sometidos a flexión

Teniendo en consideracion que		
$f_y = 2.78 \text{ fy}$	entonces	$F_c = F_y$
$2.78 \text{ fy} = 0.56 \text{ fy}$	entonces	$F_c = (100/70) F_y * (1 - (100 F_y / 380 F_c))$
$f_c = 0.56 \text{ fy}$	entonces	$F_c = F_c$
por lo que calculamos :		
$0.56 \text{ fy} = 1972.88$	kg/cm ²	
$2.78 \text{ fy} = 9739.84$	kg/cm ²	
$F_c = 3238.98$	kg/cm ²	
Ahora tomando $f = f_c = 3238.98$ se debe calcular		
El módulo de sección elástico de la sección efectiva calculado a un esfuerzo M_x/SI en la fibra extrema a compresión, por lo que :		
	$S_c =$	236.5 cm^3
Entonces tenemos que:		
$M_x = 442121.27$	kg-cm	$M_x = S_c F_c$
DETERMINANDO LA LONGITUD NO SOPORTADA L_u, PARA SECCIONES SIMPLES Y DOBLEMENTE SIMÉTRICAS		
Para las secciones por separado y doblemente simétrico, y dado que $C_b = 1.00$		
$C_1 = 531.42$		$C_1 = \frac{7.72}{AE} \left[\frac{K_1 F_1 S_1}{C_1 m^2} \right]$
$C_2 = 15203479121737.29$		$C_2 = \frac{m^2 E C_2}{18k^2}$
$L_u = 231.70$	cms	$L_u = \left[\frac{C_1 E}{3 C_2} \right]^{0.5} + \left[\frac{C_1 E}{3 C_2} \right]^{0.25}$

Ilustración 6 Herramienta informática de ayuda para cálculo de perfiles C de lámina rolada en frío a sometidos a flexión.

1.2 METODOLOGIA

1.2.1 MÉTODO DE ANCHOS EFECTIVOS

El concepto de ancho efectivo fue propuesto por Von Karman (1932), (Yu, 2000), y fue introducido en el entendimiento de que el pandeo local de elementos placa causa una concentración de esfuerzos longitudinales cerca de los extremos de la placa.

(José Angel Ortiz Lozano, 2010)

Distribución de esfuerzos de post-pandeo y Diseño de ancho efectivo.

Los elementos en compresión atiesados, no alcanzan a colapsar cuando el punto del fluencia de pandeo haya sido alcanzado debido a una capacidad adicional conocida como post-pandeo, las barras horizontales en la rejilla del modelo actuarán como barras atiesadoras a contra-restar el incremento de deflexión del elementos longitudinal. Después del esfuerzo crítico por compresión, una porción de la carga de post-pandeo de la porción central de la placa se redistribuye a los bordes de la placa. (Alva, 2005)

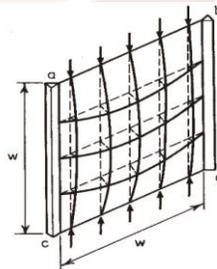


Ilustración 7 Placa en compresión uniforme con extremos arriostrados.

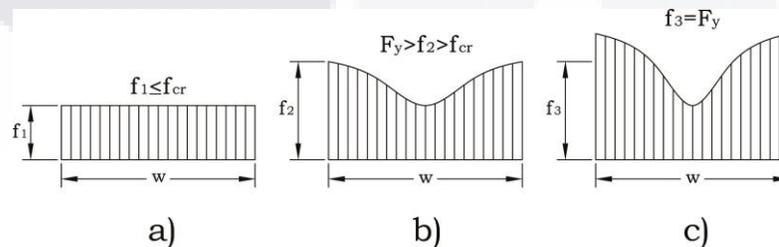


Ilustración 8 Distribución de esfuerzos de post-pandeo (Alva, 2005)

Cuando el esfuerzo es mayor que el esfuerzo crítico de compresión, la distribución de esfuerzos en la sección del elemento placa atiesada se vuelve no uniforme.

La capacidad de post-pandeo es alcanzada cuando el esfuerzo real ha alcanzado el esfuerzo de fluencia en las esquinas de la placa atiesada. (Alva, 2005)

A partir de lo anterior Von Karman en lugar de considerar esa configuración no uniforme de esfuerzos sobre el ancho de placa considerada (w), establece que el total de la carga axial la resiste un ancho efectivo b , sujeto a una distribución uniforme de esfuerzos con una magnitud igual al esfuerzo en los extremos de la placa (figura 3). (Yu, 2000).

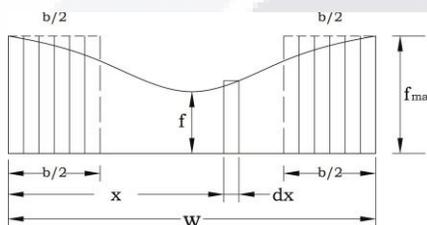


Ilustración 9 Ancho de una placa en compresión con bordes atiesados. (Wei-Wen Yu, 2000)

Durante algunos años, esta ecuación propuesta por Winter sirvió de base a las especificaciones de diseño del AISI para la determinación del ancho efectivo. Actualmente las especificaciones AISI-NASPEC 2007, establecen la ecuación B2.1-5 para el cálculo del esfuerzo crítico de pandeo en relación con el ancho efectivo b (ASCE, 2010)

$$F_{cr} = K \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2) \left(\frac{w}{t}\right)^2}$$

Ecuación 1

(José Angel Ortiz Lozano, 2010)

1.2.2 MÉTODO DE RESISTENCIA DIRECTA

Es un método alternativo para aplicarse en el diseño de elementos de acero rolado en frío de pared delgada. Se aplica a algunas secciones en particular como son las secciones en "C", secciones en "Z" y secciones tipo "omega" o "sombrero". La ventaja de este método estriba en la facilidad y rapidez de los cálculos ya que se apoya en un software como ayuda de diseño. Este método se adoptó como una nueva forma de diseño desde el año 2004.

En las especificaciones norteamericanas de diseño de elementos de acero rolado en frío y su principal característica es que no requiere calcular las propiedades del ancho efectivo de los elementos que forman la sección ni requiere el uso de iteraciones para la determinación de la resistencia de diseño del elemento, en lugar de eso, se requiere el análisis de pandeo elástico de la sección transversal. El método predice la resistencia de los elementos rolados en frío de pared delgada, considerando las cargas de pandeo, arriostamiento y condiciones de soporte. En general se pueden considerar tres tipos básicos de pandeo de los elementos delgados: el pandeo local, el pandeo distorsional y el pandeo global. (Schafer 2006).

(José Angel Ortiz Lozano, 2010)

1.2.2.1 EL PANDEO LOCAL.

Involucra básicamente la deformación por flexión de los elementos placa que forman la sección transversal del perfil, es decir, el elemento placa padea fuera del plano original sin desplazamiento de los puntos de unión entre los elementos placa (Figura 4). En general se forman ondulaciones continuas cuya separación entre estas es usualmente igual o más corta que la mayor dimensión del perfil bajo compresión.

(José Angel Ortiz Lozano, 2010)

1.2.2.2 EL PANDEO DISTORSIONAL.

Involucra deformaciones que usualmente aparecen como una combinación de pandeo local y global, donde parte de la sección transversal (por ejemplo el patín) responde rígidamente por torsión o desplazamiento alrededor de un punto (la unión alma-patín) y otra parte de la sección transversal (por ejemplo el alma) se somete a flexión de placa.

(José Angel Ortiz Lozano, 2010)

1.2.2.3 EL PANDEO GLOBAL.

Se refiere al tipo de pandeo en donde la totalidad de la sección transversal se padea sin distorsión, es decir, empieza a flexionar lateralmente, gira (pandeo torsional), o flexiona y gira simultáneamente (pandeo por flexotorsión)

(José Angel Ortiz Lozano, 2010)

Existen métodos numéricos confiables que pueden ofrecer resultados satisfactorios en cuanto a las cargas o momentos críticos aplicables en los diferentes modos de pandeo. Estos métodos son: el método del elemento finito (FEM), el método de la banda finita (FSM) y finalmente la teoría de la viga generalizada (GBT). (Schen, 2007). El método de la banda finita (FSM) se emplea para facilitar la identificación de los diferentes modos de pandeo, mediante el software CUFSM el cual desarrolla la representación automática de un factor de carga crítica en función de la longitud de pandeo. Por medio de esta grafica se puede determinar el valor de la carga critica observando los valores mínimos de la curva según el modo de pandeo, generalmente encontramos que el primer valor mínimo de la curva corresponde al pandeo local, mientras que el segundo mínimo corresponde al pandeo distorsional (figura 7).

(José Angel Ortiz Lozano, 2010)

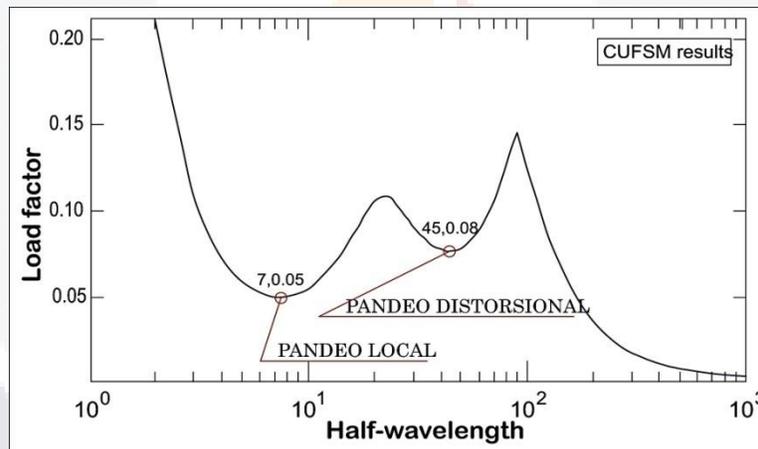


Ilustración 10 Curva típica del programa CUFSM para un perfil determinado (José Angel Ortiz Lozano, 2010)

CAPÍTULO 2.- ESTADO GENERAL DEL ARTE

2.1 ANTECEDENTES

En el Valle de Aguascalientes las fracturas y fallas superficiales se reportaron por primera vez hace 25 años aproximadamente (Aranda y Aranda, 1985; Aranda-Gómez, 1989) se han observado dos tipos de fracturamientos que se diferencian por su mecanismo de formación.

El primero se asocia a hundimientos diferenciales causados por la sobreexplotación del agua subterránea, y son los que ocurren en donde el piso rocoso tiene forma de talud, escalón o protuberancia; y uno asociado al arrastre de materiales granulares finos de rellenos de corrientes fluviales antiguas, con lo cual se generan hundimientos y fracturas incipientes de forma alineada con la proyección en superficie de supuestos paleocauces.

Los efectos de los fracturamientos asociados a la subsidencia y paleocauces se pueden observar como daños en los edificios y en la infraestructura urbana en los sectores donde aparecen.

Actualmente, se reportan en el Valle de Aguascalientes al menos 1820 edificios afectados como consecuencia de la subsidencia, de los cuales 1438 se ubican en la ciudad de Aguascalientes. Se trata principalmente de casas habitación de diferentes tipologías, que han sido dañadas directa o indirectamente por los fracturamientos, presentando diferente grado de afectación, desde daños imperceptibles a simple vista, hasta afectaciones que ponen en riesgo su estabilidad estructural.

(Pacheco M. J., 2012) Pag.17-23

CARACTERISTICAS DE LA CONSTRUCCION CON ACERO ROLADO EN FRIO

- Bajo peso, alta resistencia, material con espesor delgado
- Perfiles formados en frio tanto perfiles de línea como personalizados
- Relación ancho espesor grande, esquinas redondeadas
- Pandeo local e influencia de resistencia de post pandeo
- Compresión de elementos atiesados, parcialmente atiesados y no atiesados

(American Society of Civil Engineers., 2010/2011)



Ilustración 11 Visita planta GBS, parque Industrial La Noria, Querétaro, Qro. México.

2.2 PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE ESTRUCTURAS CON ACERO ROLADO EN FRIO.

- Perfiles son rolados en frio a partir de hojas planas o placas
- Propiedades mecánicas originales del acero cambian a partir del proceso de rolado en frio
- Perfiles de línea o personalizados están disponibles
- Material delgado (en la mayoría de los casos menos de 0.1 pulg)
- Predominantemente modos de falla en secciones transversales son influenciados por pandeo local, seguido por un incremento de resistencia de post-pandeo.(American Society of Civil Engineers., 2010/2011)

TIPO DE CONSTRUCCION EN ACERO FORJADO EN FRIO

El acero en sus distintas clases está presente en las estructuras de las viviendas que habitamos y en la gran mayoría de los edificios modernos.

Las estructuras de acero ligero son una solución más conveniente y pueden satisfacer las normas más exigentes para las paredes, pisos y armaduras de cubierta de edificios residenciales, industriales, comerciales u otros. (Alva, 2005)

2.3 VENTAJAS DE LAS CONSTRUCCIONES DE ACERO LIGERO

Las estructuras de acero ligero son incombustibles, polivalentes (paredes, pisos, armaduras de cubierta) y de calidad uniforme; no se deforman ni pierden sus capacidades al envejecer; resisten a los insectos y se adaptan mejor a las exigencias de las nuevas normas de aislamiento, insonorización y conservación de los bosques.

Se adaptan fácilmente a los diseños, curvas y las tendencias más audaces.

Pre montado en la planta y transportado a la obra, disminuye significativamente el tiempo de construcción, se instalan fácilmente por personal acreditados y requieren una herramienta mucho más simple. Las economías que se derivan de ello son evidentes.

Sin embargo, exigen conocimientos técnicos basados en parte en las normas de ingeniería y tolerancia de los materiales, pero más aún en la experiencia y el arte del montaje creativo y práctico, por lo que podemos resumir en:

- Práctico
- Muy resistente
- Estable
- Duradero
- Ininflamable
- Sólido
- Galvanizado (Alva, 2005)

2.4 DESVENTAJAS DE LAS CONSTRUCCIONES DE ACERO LIGERO

El costo de la producción de acero siempre ha sido relativamente elevado, pero mientras que el costo de la mayoría de los materiales de la estructura de acero mejoró, competitivamente hablando, el costo de levantar la construcción es otro problema.

Toma algo más de tiempo construir una casa con marcos de acero ligero que hacerlo con marcos de madera, ya que lleva más trabajo usar tornillos que clavos, además los tornillos son de costo mayor.

Esto es especialmente válido al comparar con las casas de madera en Norteamérica. Pero no se aplica al comparar con la construcción tradicional de mampostería, ya que estamos hablando básicamente de un sistema de construcción rápida.

(Alva, 2005)

2.5 CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES

El tipo de acero aplicado en la elaboración de los perfiles estructurales a utilizar en este proyecto de investigación es un acero ASTM A-653 de grado 33, lámina de acero, con cubierta de zinc (galvanizada) o aleación de Zinc-Hierro por el proceso de inmersión en caliente. La sección A 2.3.1 (AISI-NASPEC 2010) establece los requisitos de resistencia y ductilidad que debe cumplir este tipo de acero, en donde se indica que 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).

Steel Designation	ASTM Designation	Thickness (in.)	Minimum Yield Point or Yield Strength F_y (ksi)	Minimum Tensile Strength F_u (ksi)	F_u/F_y	Minimum Elongation (%) in 2-in. Gage Length		
Carbon structural steel	A36		36	58-80	1.61	23		
High-strength low-alloy structural steel	A242	$\frac{3}{4}$ and under $\frac{3}{4}$ to $1\frac{1}{2}$	50	70	1.40	21		
			46	67	1.46	21		
Low and intermediate tensile strength carbon steel plates	A283		A	45-60	1.88	30		
			B	50-65	1.85	28		
			C	55-75	1.83	25		
			D	60-80	1.82	23		
Cold-formed welded and seamless carbon steel structural tubing in rounds and shapes	A500 Round tubing		A	33	45	1.36	25	
			B	42	58	1.38	23	
			C	46	62	1.35	21	
			D	36	58	1.61	23	
	Shaped tubing			A	39	45	1.15	25
				B	46	58	1.26	23
				C	50	62	1.24	21
				D	36	58	1.61	23
High-strength carbon-manganese steel	A529 Gr. 42 50	$\frac{1}{2}$ in. max.	42	60-85	1.43	22		
			50	70-100	1.40	21		

Ilustración 12 Propiedades mecánicas de los Aceros referida en la sección A3.1 de la especificación AISI-NASPEC

La relación entre el esfuerzo ultimo 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, la cual presenta un recubrimiento de zinc de grado G90.

(Wei-Wen Yu, 2000)

2.6 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

A partir de 1996, la norma AISI publicó dos especificaciones separadas para el diseño de miembros de acero rolado en frío, conexiones y ensamblajes estructurales. Uno fue el método de Diseño por Esfuerzos Permisibles (ASD) y el otro fue el método de Diseño por factores de carga y resistencia (LRFD).

Método de Diseño por Esfuerzos Permisibles (ASD)

Características:

- Diseño por esfuerzos: cargas nominales, esfuerzos nominales, factores de seguridad: Esfuerzos permisibles.
- Diseño por serviciabilidad: Cargas nominales
- Cargas y esfuerzos son variables determinísticas: Cargas y esfuerzos permisibles (American Society of Civil Engineers., 2010/2011)

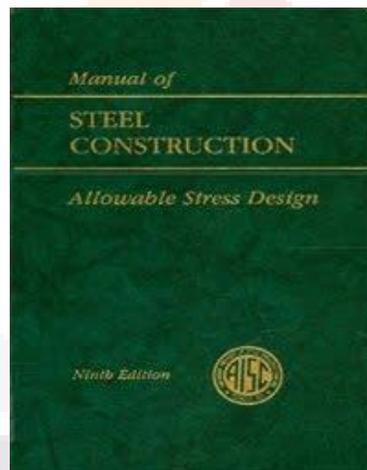


Ilustración 13 Reglamento ASD (Imagen de internet)

2.7 DISEÑO POR FACTORES DE CARGA Y RESISTENCIA (LRFD)

Características:

- Diseño por esfuerzos: Cargas factorizadas, factores de resistencia, factores de carga, estados límite últimos
- Diseño por serviciabilidad: Cargas nominales
- Cargas y esfuerzos son variables aleatorias.

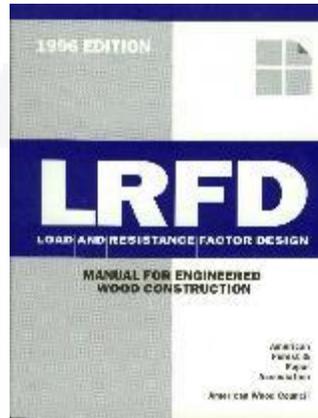


Ilustración 14 Reglamento LRFD, (Imagen de internet)

Diseño por estados Límite

$$R \leq R_n / \Omega$$

R= Resistencia requerida

R_n=Resistencia nominal

Ω = Factor de seguridad

REQUERIMIENTOS DE RESISTENCIA

$$R_u \leq \phi R_n$$

R_u= Resistencia requerida

R_n=Resistencia nominal

φ = Factor de resistencia

R_n=Resistencia disponible (American Society of Civil Engineers., 2010/2011)

CAPÍTULO 3.- MIEMBROS EN FLEXION

3.1 DISEÑO DE MIEMBROS EN FLEXION

Los miembros en flexión son elementos estructurales capaces de resistir cargas y a su vez transmitir las a sus apoyos, estos elementos pueden ser vigas laminadas y travesaños hechos con placas soldados, de sección I o en cajón canales o barras de sección transversal maciza, circular, cuadrada o rectangular, así como de sección transversal hueca. La flexión es producida por cargas transversales o por momentos aplicados en sus extremos.



Ilustración 15 Vista de la estructura del entrepiso con vigas de perfiles galvanizados, fuente: STEEL FRAMING ARQUITECTURA, ILAFA

3.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

RESISTENCIA SERVICIABILIDAD (Alva, 2005)

- 1) Flexión
- 2) Esfuerzo cortante
- 3) Desgarramiento del alma
- 4) Flexión y Esfuerzo cortante
- 5) Flexión y Desgarramiento del alma
- 6) Distorsión por cortante
- 7) Deflexión
- 8) Rizado del patín



El incremento de la resistencia a partir de la formación del trabajo en frío será permitido con las sustituciones F_{ya} por F_{ya} , donde F_{ya} es el promedio del punto de fluencia de la sección total. Este valor puede ser calculado por los métodos ya mencionados:

- 1) Prueba de tensión de la sección transversal total
- 2) Prueba de columna corta
- 3) Cálculo del promedio del punto de fluencia, como se muestra a continuación:

$$F_{ya} = C F_{yc} + (1 - C) * F_{yf}$$

Ecuación 2

Dónde:

F_{ya} = Punto de fluencia promedio del acero en toda la sección de miembros en compresión o secciones de patines de miembros en flexión.

C = (Área total esquina)/(área sección transversal)

Para miembros en compresión, relación del área total de la sección transversal de las esquinas con respecto al área transversal total de la sección completa; para miembros en flexión relación del área total de la sección transversal de las esquinas del patín de control con respecto al área total de la sección transversal del patín de control.

F_{yc} = Punto de fluencia en tensión de las esquinas; esta en función de la ductilidad del acero virgen

$$F_{yc} = \frac{B_c F_{yv}}{\left(\frac{R}{t}\right)^m}$$

Ecuación 3

La ecuación anterior sólo es aplicable cuando: $\frac{F_{uw}}{F_{yv}} \geq 12$, $\frac{R}{t} \leq 7$ ángulo mínimo incluido < 120°.

La relación R/t puede ser como si fuera una medida del trabajo de deformación en la lámina.

F_{yc} = Promedio ponderado del punto de fluencia en tensión de las porciones planas que se establecen en las pruebas correspondientes o punto de fluencia del acero virgen si no se realizan las pruebas.

F_{yv} = Punto de fluencia en tensión del acero virgen según las disposiciones de las especificaciones AISI sobre el Acero Virgen.

$$B_c = 3.69 \frac{F_u}{F_y} - 0.819 \left(\frac{F_u}{F_y} \right)^2 - 1.79$$

Ecuación 4

$$m = 0.192 \frac{F_u}{F_y} - 0.068$$

Ecuación 5

R =Radio de doblez interior.

F_{uv} =Resistencia última en tensión del acero virgen.

(Alva, 2005)

3.3 MIEMBROS FLEXIONANTES

3.3.1 MIEMBROS SOPORTADOS LATERALMENTE (Wei-Wen Yu, 2000)



Ilustración 16 Gimnasio de Box Línea Verde, Aguascalientes

La Resistencia Nominal de la Sección, M_n , se calculará con cualquiera de los siguientes dos procedimientos:

3.3.1.1 PROCEDIMIENTO I - BASADO EN LA INICIACIÓN DE FLUENCIA EN LA SECCIÓN EFECTIVA

El momento nominal, M_n , equivale al momento de fluencia, M_y

$$M_n = S_e * F_y = M_y$$

Ecuación 6

Dónde:

S_e = Módulo de sección elástico de la sección efectiva calculado en la base del ancho efectivo con $f = F_y$, o bien, en la fibra extrema a compresión o a tensión para F_y

3.3.1.2 PROCEDIMIENTO II - BASADO EN LA CAPACIDAD DE RESERVA INELÁSTICA

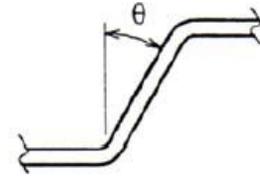
La capacidad de reserva inelástica a flexión podrá emplearse cuando se cumplan las siguientes condiciones:

Lateralmente soportado; el miembro no está sujeto al giro o al pandeo lateral, torsional o flexotorsional.

- El efecto de formado en frío, no se aplica en la determinación del punto de fluencia F_y
- La relación del peralte de la porción comprimida del alma con respecto a su espesor $< \lambda_1$
- La fuerza del cortante será: $V < 0.35 * F_y(h * t)$
- El ángulo entre cualquier alma y la vertical: $\theta < 30^\circ$

El momento nominal, M_n , es:

$$M_n < 1.25M_y < ES_e [C_y e_y]$$



Ecuación 7

M_y =Momento de fluencia, por Procedimiento I --- $S_e F_y$

C_y =Factor de deformación por compresión

e_y =Deformación de Fluencia = F_y/E

$[C_y e_y]$ =Deformación máxima compresiva

E =Módulo de Elasticidad

El momento $ES_e [C_y e_y]$ es calculado basado en el equilibrio de esfuerzos, asumiendo:

Curva ideal de esfuerzo elástico-plástica de deformación, la cual es la misma en tensión y compresión.

Pequeñas deformaciones

Secciones planas permanecen planas durante la flexión.

Factor Deformación por Compresión, C_y

3.3.1.3 **ELEMENTOS ATIESADOS A LA COMPRESIÓN SIN ATIESADORES INTERMEDIOS**

Cuando $w/t < \lambda_1$; $C_y = 3$

Ecuación 8

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

Ecuación 9

$$C_y = 3 - 2 \left(\frac{w/t - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \lambda_1 = \frac{1.11}{\sqrt{F_y/E}} \lambda_2 = \frac{1.28}{\sqrt{F_y/E}}$$

Ecuación 10

Cuando $w/t > \lambda_2$;

Ecuación 11

$$C_y = 1$$

3.3.1.4 ELEMENTOS NO ATIESADOS A COMPRESIÓN

(Wei-Wen Yu, 2000)

$$C_y = 1$$

3.3.1.4.1 ELEMENTO A LA COMPRESIÓN CON ATIESADOR DE BORDE Y MÚLTIPLES ELEMENTOS ATIESADOS A COMPRESIÓN.

$$C_y = 1$$

Cuando sea aplicable, se emplearán los anchos efectivos de diseño en el cálculo de las propiedades de la sección. M_n , se calculará considerando el equilibrio de esfuerzos, suponiendo una curva idealizada de esfuerzo–deformación elastoplástica, la cual es la misma en tensión como en compresión, suponiendo una pequeña deformación y suponiendo que las secciones planas permanecen así durante la flexión.

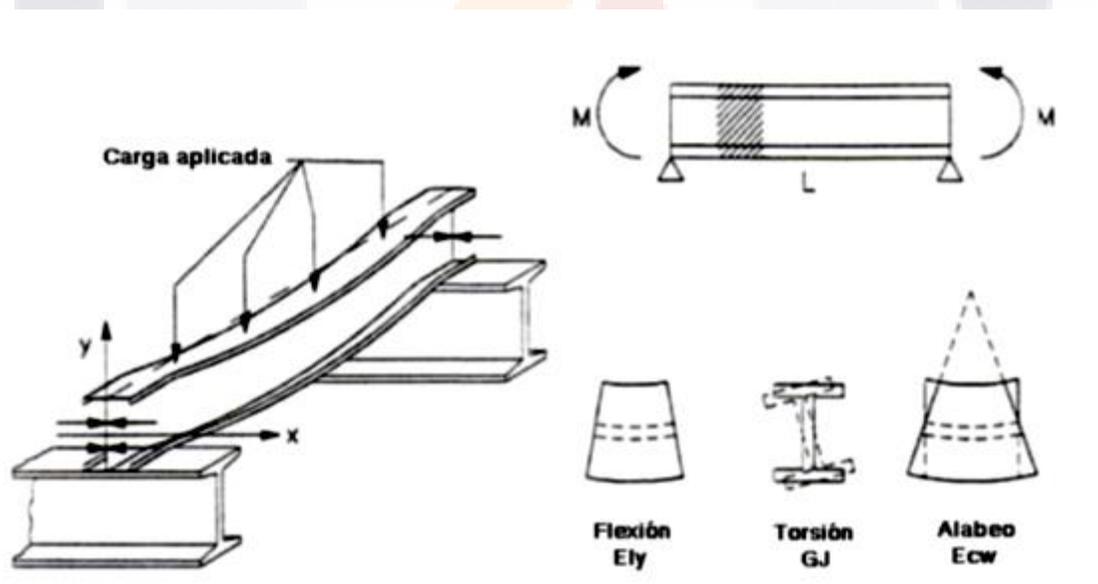


Ilustración 17 Miembros no soportados lateralmente (Alva, 2005)

3.3.1.5 MIEMBROS NO SOPORTADOS LATERALMENTE

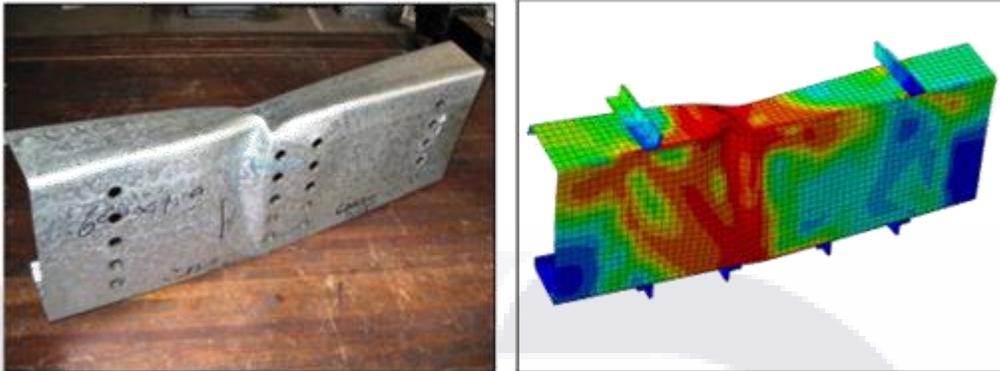


Ilustración 18 Miembros no soportados lateralmente (Imagen de internet)

Como se observa en la figura anterior, al ser cargada en el plano del alma, la viga será flexionada verticalmente.

Si un arriostramiento adecuado no se provee, la viga fallará en pandeo lateral-torsional, la cual comprende flexión lateral así como también torsión. A esto se tienen tres tipos diferentes de rigideces:

- 1) Flexión alrededor del eje y y EI_y
- 2) Torsión GH
- 3) Alabeo o ladeamiento EC_w

3.3.1.6 RESISTENCIA AL PANDEO LATERAL

(Wei-Wen Yu, 2000)

- 1) PANDEO ELÁSTICO LATERAL-TORSIONAL

$$ME = \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y GJ} + \left(\frac{\pi E}{L}\right)^2 C_w I_y$$

Ecuación 12

$$M_e = r_o A \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t}$$

Ecuación 13

Donde:

G = Módulo de cortante

J = Constante de Torsión de Saint Venant

C_w = Constante de alabeo torsional

r_o = Radio de giro polar de la sección transversal con respecto al centro de cortante

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

Ecuación 14

x_0 = Distancia a partir del centro de cortante al centroide a lo largo del eje principal x , que se toma como negativa.

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(L/r_y)^2}$$

Ecuación 15

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

Ecuación 16

Las ecuaciones 1 y 2 producen el mismo resultado. Aunque la expresión 2 es usada en la especificación.

2) PANDEO INELÁSTICO LATERAL-TORSIONAL

Para $M_e > 2.78M_y$; $M_c = M_y$

Para $2.78M_y > M_e > 0.56 M_y$ $M_c = \frac{10}{9} M_y \left(1 - \frac{10M_y}{36M_e} \right)$

Ecuación 17

Para $M_e < 0.56 M_y$; $M_c = M_e$

Donde:

M_e = Momento crítico elástico = M_{cr}

M_y = Momento que causa la iniciación de fluencia en la fibra extrema a compresión de la sección total

$M_y = S_f F_y$

Ecuación 18

. (Wei-Wen Yu, 2000)

Las expresiones anteriores pueden ser usadas para secciones simples y doblemente simétricas o de simetría puntual, para flexión alrededor del eje de simetría.

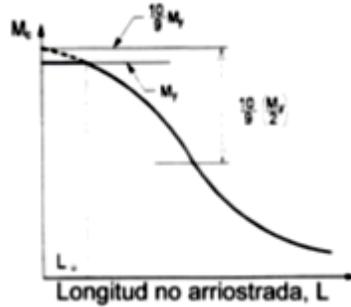


Ilustración 19 Pandeo Lateral Torsional de miembros flexionantes

La curva muestra pandeo lateral-torsionante de miembros flexionante. Solo una curva de pandeo lateral-torsional es usada para secciones simple y doblemente simétricas o de simetría puntual, para flexión alrededor del eje de simetría.

La resistencia nominal de los segmentos lateralmente no arriostrados sujetos al pandeo lateral, se obtiene de la siguiente manera:

Donde:

$$M_n = S_c \frac{M_c}{S_f}$$

Ecuación 19

S_f = Módulo de sección elástico de la sección total no reducida para la fibra extrema en compresión

S_c = Módulo de sección elástico de la sección efectiva calculado a un esfuerzo M_c/S_f en la fibra extrema a compresión

M_c = Momento crítico que se calcula según las condiciones anteriores de pandeo elástico lateral torsional

El momento crítico elástico, se calculó de la siguiente manera, de acuerdo a la sección:

Para secciones simples y doblemente simétricas y de simetría puntual.

(Wei-Wen Yu, 2000)

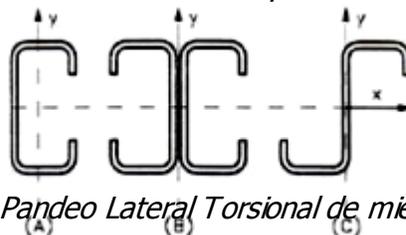


Ilustración 20 Pandeo Lateral Torsional de miembros flexionantes.

Donde para (A) y (B)

$$M_e = C_b r_o A \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t}$$

Ecuación 20

Esto es para la flexión con respecto al eje de simetría. Para simplemente simétricas, el eje x es el eje de simetría orientado de tal forma que el centro de cortantes tiene una coordenada en x negativa.

Y para (C)

$$M_e = \frac{C_b r_o A}{2} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t}$$

Ecuación 21

Para secciones de simetría puntual, se usa $0.5M_e$.

Dónde:

C_b = Coeficiente de flexión para tomar en cuenta el efecto de flexión no uniforme sobre la longitud total no arriostrada. Conservadoramente = 1, o bien se puede calcular como a continuación:

$$C_b = \frac{12.5M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C}$$

Ecuación 22

$M_{máx}$ = Valor absoluto del momento máximo en el segmento sin apoyo

M_A = Valor absoluto del momento a un cuarto del punto del segmento sin apoyo

M_B = Valor absoluto del momento a la línea del centro del segmento sin apoyo

M_C = Valor absoluto del momento a tres cuartos del segmento sin apoyo

C_b es permitido para ser conservadoramente tomado como unidad para todos los casos. Para cantilivers y aleros donde el extremo libre es no arriostrado, C_b suele ser tomado como unidad. Para miembros sujetos a la combinación de carga axial y momento flexionante C_b es tomado como unidad.

(Wei-Wen Yu, 2000)

Flexión alrededor del eje centroidal perpendicular al eje de simetría solo para secciones simplemente simétricas.

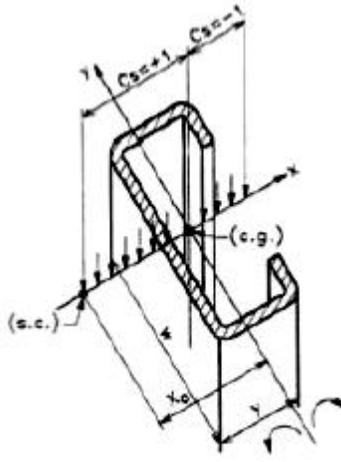


Ilustración 21 Flexión alrededor del eje centroidal

El momento crítico se calcula con la ecuación siguiente:

Donde:

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

Ecuación 23

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

Ecuación 24

$C_s = +1$ para el momento causando compresión en el lado centro de corte del centroide

$C_s = -1$ para el momento causando tensión en el lado centro de corte del centroide

$$C_{FT} = 0.6 - 0.4(M_1/M_2)$$

A = Área de la sección transversal

M_1 es el momento menor y M_2 el momento mayor a flexión en los extremos de la longitud sin arriostrar y donde M_1/M_2 , es la relación de momentos extremos, es positivo cuando M_1 y M_2 tienen el mismo signo (curvatura a flexión inversa) y negativo cuando son de signo opuesto (curvatura a flexión simple). (Wei-Wen Yu, 2000)

Cuando el momento flexionante en algún punto dentro de la longitud sin arriostrar es mayor que ambos en esta longitud, y para miembros sujetos a la combinación de carga axial a momento flexionante, C_{TF} deberá ser tomado como la unidad.

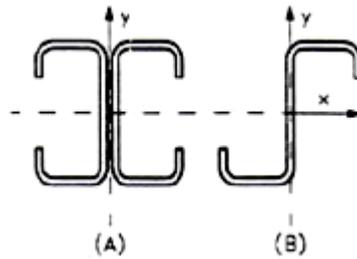


Ilustración 22 Alternativas para secciones I y Z

Alternativamente, M_{er} puede calcularse para secciones I y Z doblemente simétricas o de simetría puntual usando las siguientes ecuaciones:

(A) Para secciones doblemente simétricas: $M_e = \frac{C_b \pi^2 E d_{lyc}}{L^2}$

Ecuación 25

(B) Para secciones punto simétrico, Z: $M_e = \frac{C_b \pi^2 E d_{lyc}}{2L^2}$

Ecuación 26

3.3.1.6.1 LONGITUD MÁXIMA NO ARRIOSTRADA, L_u

Para secciones simplemente y doblemente simétricas y de simetría puntual

$$L_u = \left\{ \frac{GJ}{2C_1} + \left[\frac{C_2}{C_1} + \left(\frac{GJ}{2C_1} \right)^2 \right]^{0.5} \right\}^{0.5}$$

Ecuación 27

Para secciones simple y doblemente simétricas: (Wei-Wen Yu, 2000)

$$C_1 = \frac{7.72}{AE} \left[\frac{K_y F_y S_f}{C_b \pi r_y} \right]^2$$

Ecuación 28

$$C_2 = \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t)^2}$$

Ecuación 29

Para secciones de simetría puntual:

$$C_1 = \frac{30.9}{AE} \left[\frac{K_y F_y S_f}{C_b \pi r_y} \right]^2 \quad C_2 = \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t)^2}$$

Para secciones *I* y *Z*

Para secciones en *I* doblemente simétricas:

$$L_u = \left[\frac{0.36 C_b \pi^2 E d l_{yc}}{F_y S_f} \right]^{0.5}$$

Ecuación 30

Para secciones en *Z* simétricas:

$$L_u = \left[\frac{0.18 C_b \pi^2 E d l_{yc}}{F_y S_f} \right]$$

Ecuación 31

Dónde:

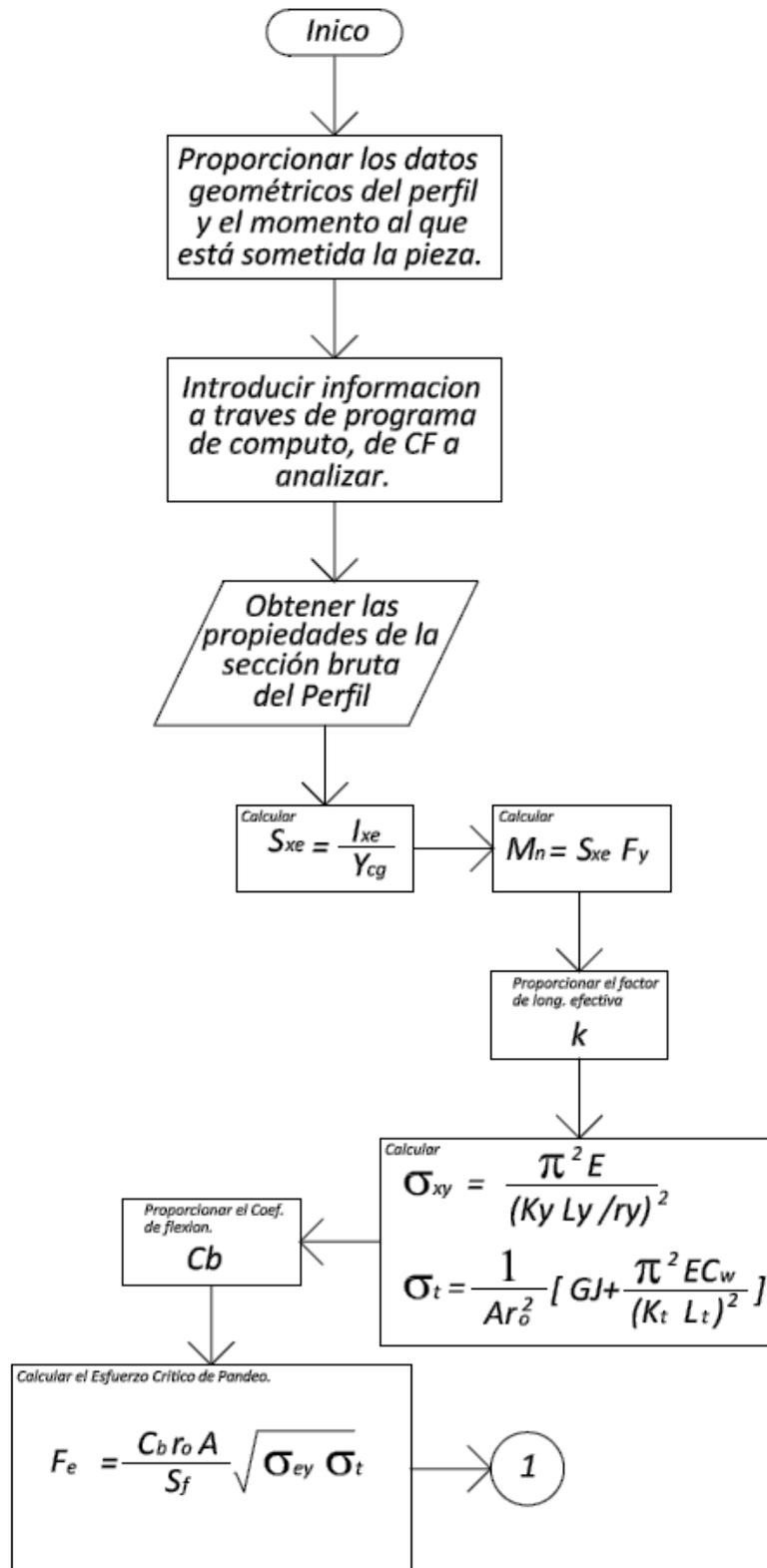
d =Peralte de la sección.

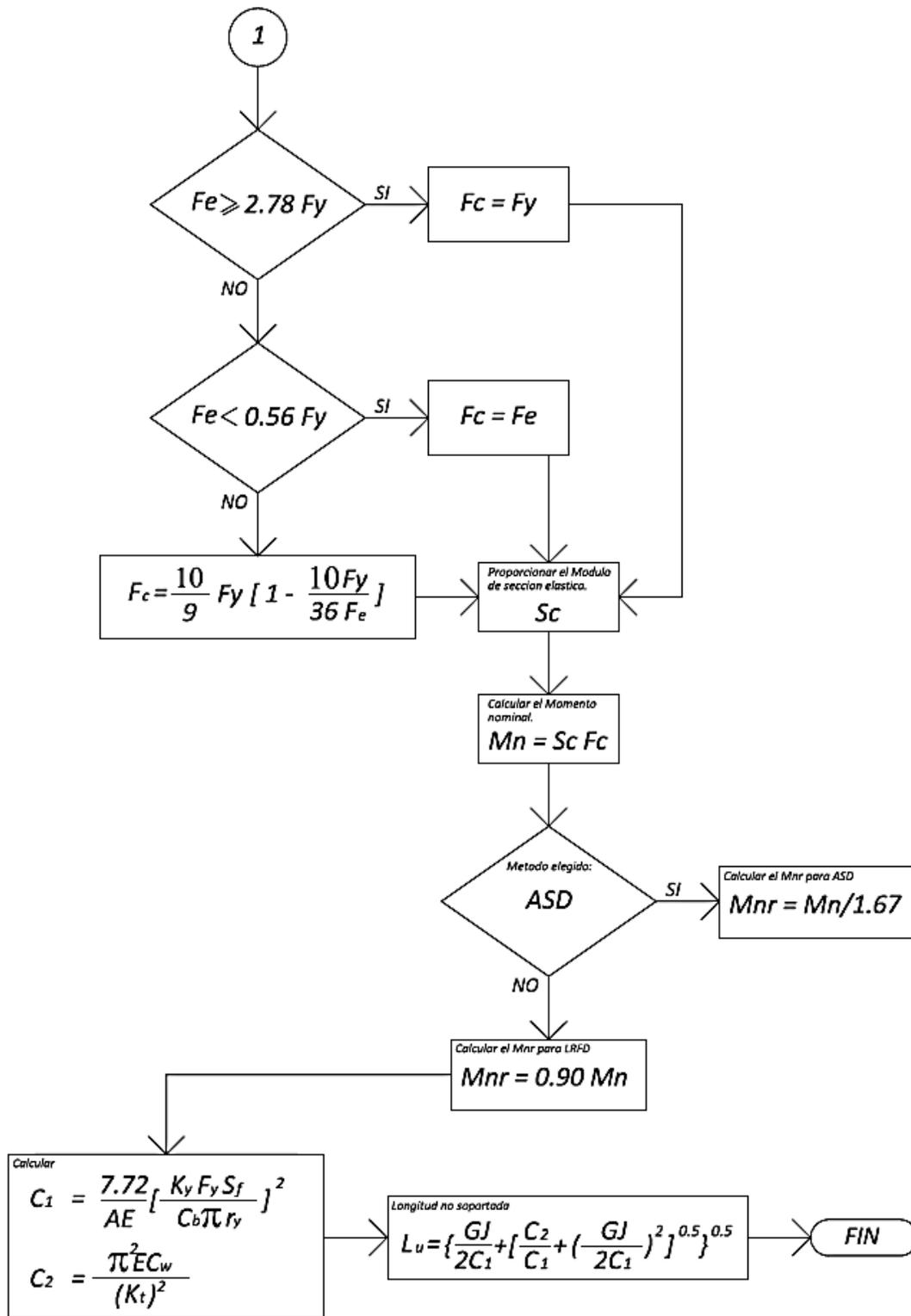
L =Longitud sin arriostrar del miembro.

I_{yc} =Momento de inercia de la porción en compresión de una sección con respecto al eje de gravedad de la sección completa paralela al alma, empleando la sección no reducida completa.

K_x, *K_y*, *K_t*, Son factores de longitud efectiva para la flexión con respecto a los ejes *X* y *Y* para giro conocer *L_u* es de gran ayuda, cuando se preparan tablas de cargas.

3.4 DIAGRAMA DE FLUJO DE DISEÑO DE MIEMBROS EN FLEXION





3.5 MANUAL DE OPERACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL MOMENTO NOMINAL RESISTENTE EN UN CF, PARA MIEMBROS EN FLEXION.

Para poder determinar el Momento Resistente se deben seguir los siguientes pasos:

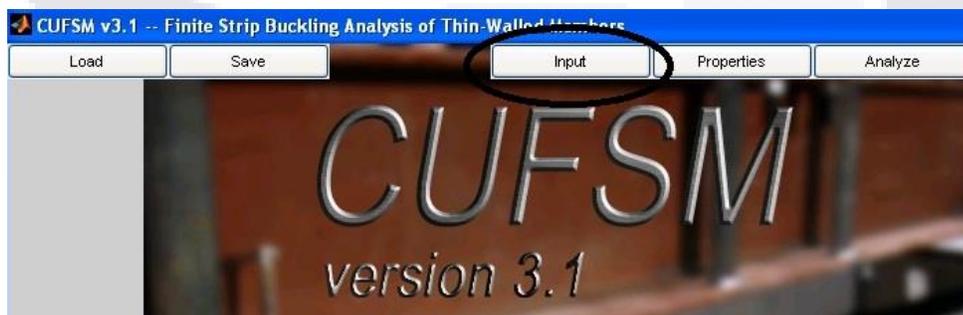
Primeramente se proporcionaran los datos geométricos del perfil en análisis, así como el acero con el que está fabricado, la longitud y el momento al que está sometida la pieza.

Se requieren las propiedades de la sección bruta del Perfil para ello, se puede utilizar un programa de computo con el cual se pueden obtener varios de los datos necesarios; para el cálculo, un programa de apoyo para obtenerlos es llamado CUFSM versión 3.1

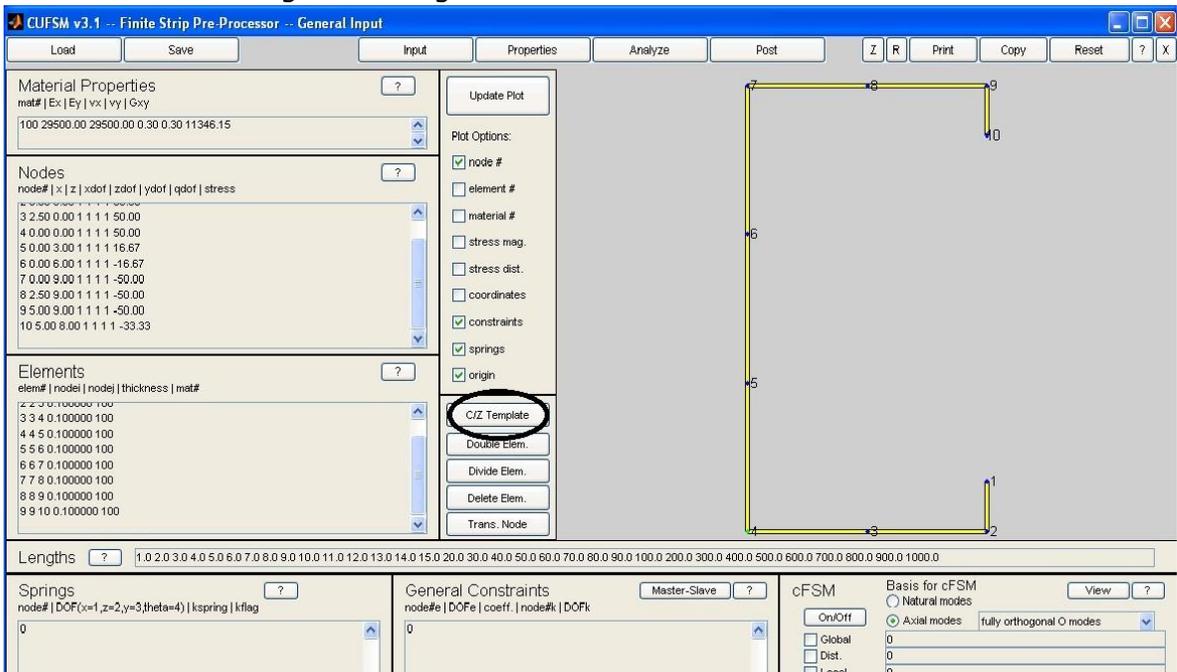
Se accede al CUFSM



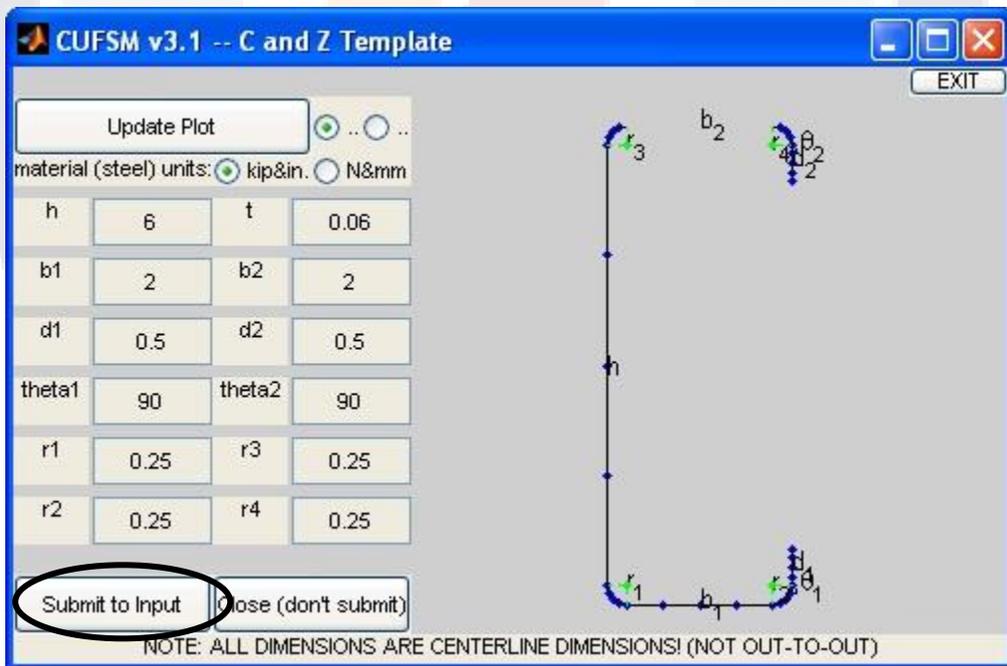
Ya ejecutado el programa se deberá entrar a la pestaña **INPUT**



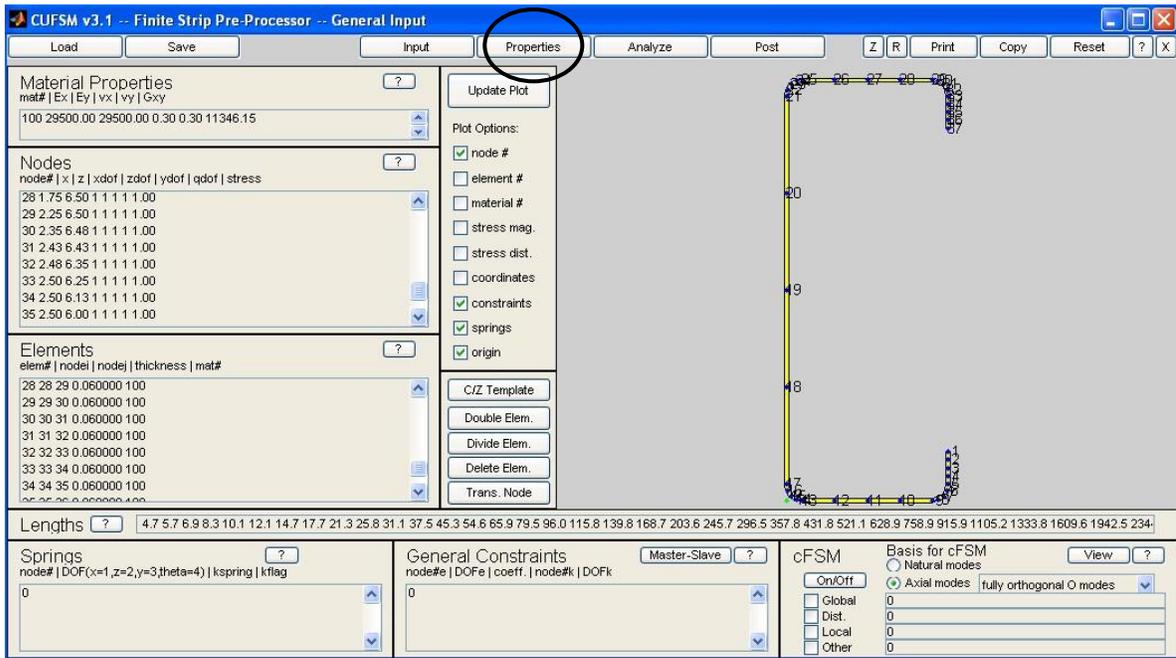
Mostrará la siguiente ventana y se procede a entrar a la pestaña de **C/Z Template** la cual se muestra en la siguiente imagen:



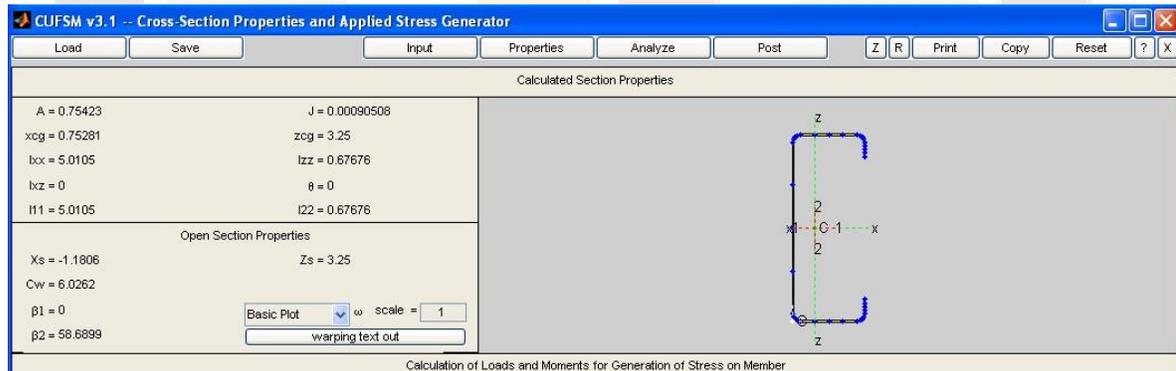
Se introduce la geometría del perfil a utilizar y se presiona **Submit to Input**.



Se accede enseguida a la pestaña de **Properties**



Mostrará la siguiente ventana, la cual proporciona las propiedades de la sección.



Se determina el momento nominal basado en el arriostamiento lateral e inicio del límite de fluencia esto es a través de las siguientes fórmulas:

$$S_{xe} = \frac{I_{xe}}{y_{cg}}$$

Ecuación 32

$$M_n = S_{xe} F_y$$

Ecuación 33

Enseguida se proporciona el Factor de longitud efectiva K alrededor de los ejes.

De North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members 2007 EDITION, ecuación (Eq. C3.1.2.1-8)

Se calculan los esfuerzos en el eje y

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

Ecuación 34

Y el esfuerzo torsional de la ecuación (Eq. C3.1.2.1-9)

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

Ecuación 35

En Coeficiente deflexión C_b

Se calcula el Esfuerzo crítico elástico basado en la fórmula de la ecuación (Eq. C3.1.2.1-4)

$$F_e = \frac{C_b r_o A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t}$$

Ecuación 36

Si $F_e \geq 2.78F_y$ entonces

El segmento de miembros no está sujeto al pandeo lateral en flexión.

Y se utiliza para calcular la Tensión Crítica de Pandeo

$$F_c = F_y$$

Ecuación 37

Si $2.78F_y > F_e > 0.56F_y$, se aplica la (Eq. C3.1.2.1-2)

$$F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10F_y}{36F_e} \right)$$

Ecuación 38

Si $F_e < 0.56F_y$, se usa la (Eq. C3.1.2.1-3)

$$F_c = F_e$$

Ecuación 39

Después se proporciona el módulo de sección elástico de la sección efectiva calculado a un esfuerzo M_c/S_f en la fibra extrema a compresión.

(Wei-Wen Yu, 2000)

Se calcula el Momento Nominal con la (Eq. C3.1.2.1-1)

$$M_n = S_c F_c$$

Ecuación 40

Por último se obtiene el Momento nominal resistente basado al método a diseñar.

Si el método elegido es el ASD, se calcula:

$$M_{nr} = M_n / 1.67$$

Ecuación 41

Si el método elegido es el LRFD, se calcula:

$$M_{nr} = (M_n)(0.90)$$

Ecuación 42

Si además se desea conocer la longitud no soportada L_u , para secciones simples y doblemente simétricas, es necesario utilizar las siguientes expresiones, basadas en la ecuación Ec. 4.74 (North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members., 2010)

$$C_1 = \frac{7.72}{AE} \left[\frac{K_y F_y S_f}{C_b \pi r_y} \right]^2$$

Ecuación 43

$$C_2 = \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t)^2}$$

Ecuación 44

Se calcula la Longitud no soportada:

$$L_u = \left\{ \frac{GJ}{2C_1} + \left[\frac{C_2}{C_1} + \left(\frac{GJ}{2C_1} \right)^2 \right]^{0.5} \right\}^{0.5}$$

Ecuación 45

(Wei-Wen Yu, 2000)

CAPÍTULO 4.- MIEMBROS EN COMPRESIÓN

4.1 DISEÑO DE MIEMBROS EN COMPRESION

4.1.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

De modo general, tenemos las siguientes consideraciones, que serán explicadas posteriormente:

4.1.2 COMPORTAMIENTO DEL MIEMBRO

Límite de Fluencia (corto y compacto)

Pandeo total

- Flexionante (flexión alrededor de uno de los ejes principales)
- Torsional (giro alrededor del centro de cortante)
- Flexionante–torsional (flexión y torsión simultánea)

4.1.2.1 RESISTENCIA NOMINAL AXIAL, P_n

4.1.2.1.1 PARA MIEMBROS LOCALMENTE ESTABLES A LA COMPRESIÓN

$$P_n = A_g F_n$$

Ecuación 46

El pandeo no local ocurrirá antes de que el esfuerzo nominal compresivo llegue hasta el esfuerzo de pandeo de la columna o al esfuerzo de fluencia. Por lo tanto, el área bruta de la sección es usada.

4.1.2.1.2 PARA MIEMBROS LOCALMENTE INESTABLES A LA COMPRESIÓN

$$P_n = A_e F_n$$

Ecuación 47

El pandeo local ocurrirá y el área de la sección efectiva es usada y es calculada al esfuerzo nominal de pandeo a compresión.

$$ASD(\Omega_c = 1.67) = \text{Resistencia Permisible} = P_n / \Omega_c$$

Ecuación 48

$$LRFD(\Phi_c = 0.90) = \text{Diseño a la Resistencia} = \Phi_c P_n$$

Ecuación 49

(Wei-Wen Yu, 2000)



4.1.3 ESFUERZO NOMINAL AXIAL AL PANDEO, F_n

El esfuerzo nominal axial al pandeo se obtiene con las siguientes expresiones:

Para $\lambda_c \geq 1.5$ $F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y$ *Ecuación 50*
 (Pandeo inelástico)

Para $\lambda_c \leq 1.5$ $F_n = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] F_y$ *Ecuación 51*
 (Pandeo elástico)

Donde:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}}$$
Ecuación 52

Donde

F_e es el menor de los esfuerzos por pandeo flexionante, torsional y flexionante-torsional.

ESFUERZO AL PANDEO ELÁSTICO, F_e

4.1.4 PANDEO FLEXIONANTE (Modo posible de falla)

El esfuerzo flexionante al pandeo elástico es calculado usando la siguiente expresión:

$$F_e = \frac{\pi^2 EC_w}{(KL/r)^2}$$
Ecuación 53

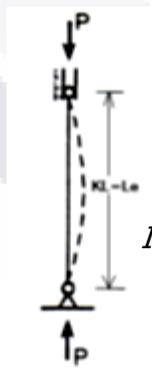


Ilustración 23 Pandeo flexionante

(Wei-Wen Yu, 2000) y (Alva, 2005)

Esto es aplicable en secciones doblemente simétricas, secciones cerradas (tubos cuadrados o rectangulares), secciones cilíndricas, o secciones de simetría puntual. Para secciones simplemente simétricas, el pandeo flexionante es uno de los modos posibles de falla.

4.1.5 PANDEO TORSIONAL (Modo posible de falla)

El esfuerzo torsional al pandeo elástico es calculado usando la siguiente expresión:

$$F_e = \sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(KL/r)^2} \right]$$

Ecuación 54

Esto se aplica, en secciones simétrica puntuales, donde el centro de cortante de la sección y el centroide de la sección coinciden. Secciones I doblemente simétricas, secciones en Z (simétrico y antisimétrico), y secciones tan inusuales como cruciformes, suásticas.

En este caso, el pandeo flexionante también debe ser revisado.

(Alva, 2005)

4.1.6 PANDEO FLEXIONANTE - TORSIONAL (Modo posible de falla)

El esfuerzo torsional – flexionante al pandeo elástico es calculado usando la siguiente expresión:

$$F_e = \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right]$$

Ecuación 55

Alternativamente, un valor conservador para F_e puede ser obtenido de la siguiente expresión $F_e = \frac{\sigma_t\sigma_{ex}}{\sigma_t + \sigma_{ex}}$

Ecuación 56

Esto se aplica en secciones simplemente simétricas tal como canales y secciones en C, secciones sombrero, ángulos, secciones en T, y secciones en I con patines desiguales, donde el centro de corte y el centroide no coinciden, de aquí que el pandeo flexionante torsional es uno de los modos posibles de pandeo. Donde $\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}}$

Ecuación 57

(Alva, 2005)

4.1.6.1 FACTOR DE LONGITUD EFECTIVA, K

El Factor de longitud efectiva K , se toma en cuenta para la influencia de restricción en contra de giro y traslación en los extremos del miembro a compresión.

Para el caso más simple de miembro a compresión, conectado articulado, $K = 1$

K recomendados para seis casos idealizados frecuentemente encontrados en la práctica.

En estos casos la unión rotación y traslación son también completamente realizados o no existentes.

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
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, traslación				
		Rotación libre, traslación				
		Rotación, traslación libre				
		Rotación libre, traslación libre				

Tabla de Factor de longitud efectiva K para carga axial en columnas con diferentes condiciones de apoyo (Wei-Wen Yu, 2000) (Alva, 2005) (American Society of Civil Engineers., 2010/2011)

LIMITE DE LA RELACIÓN DE ESBELTEZ, KL/r

Para miembros a compresión no debe exceder de 200, excepto durante la construcción.

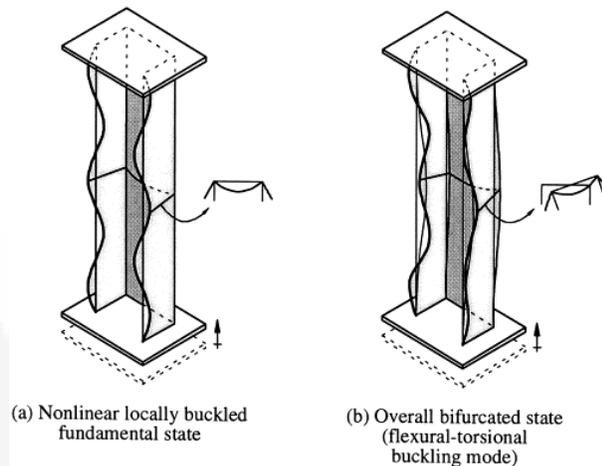


Ilustración 24 Tipos de pandeo en columnas (Imagen Internet)

4.1.7 TIPOS DE ELEMENTOS EN COMPRESIÓN

Los elementos considerados a compresión, pueden ser de la siguiente manera:

- 1.- Atiesados.
- 2.- Parcialmente atiesados.
- 3.- No atiesados.

4.1.8 CONSIDERACIONES DE PANDEO LOCAL

El Pandeo local, es el pandeo de elementos solo dentro una sección, donde la línea de uniones entre elementos permanecen rectos y los ángulos entre elementos no cambian. Este tipo de inestabilidad es un pandeo localizado o arrugamiento en una localidad aislada, cuando se presenta la sección transversal ya no es totalmente efectiva y el miembro habrá fallado.

El pandeo local puede ser:

- 1.- Pandeo elástico crítico.
- 2.- Post-pandeo (Wei-Wen Yu, 2000)

ATIESADOR

Es un miembro que normalmente es un ángulo o una placa y son unidos a la placa o al alma de una viga o trabe para distribuir la carga, transferir el cortante, o para prevenir pandeo del miembro al cual es unido.

Un elemento en compresión atiesado o parcialmente atiesado es un elemento en compresión plano (por ejemplo, un patín plano a compresión o un miembros a flexión o un plano del alma o el patín de un miembro a compresión) del cual ambos bordes paralelos a la dirección de esfuerzos está atiesado por cualquiera del alma, patín, ceja atiesadora, atiesador intermedio, o algo semejante.

Un elemento en compresión no atiesado es un elemento plano en compresión el cual está atiesado o solamente un borde paralelo a la dirección de esfuerzos.

Los elementos anteriores están sujetos a ciertas condiciones de esfuerzos, esfuerzos uniformes y/o gradientes de esfuerzos.

Se puede observar el comportamiento de la columna:

Pandeo local en todos los cuatro lados se una sección cerrada en cajón.

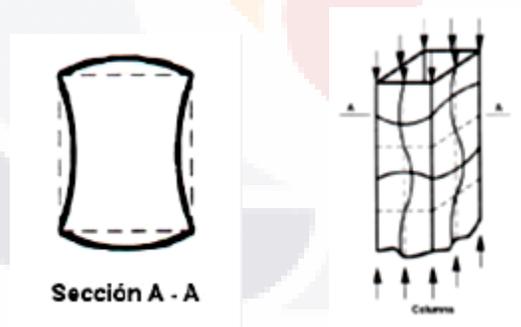


Ilustración 25 Elementos de placa atiesados. (Alva, 2005)

Ahora observemos el comportamiento de estos elementos placa sin atiesar, pandeo local en todos los cuatro patines de compresión de la sección I compuesta.

4.1.8.1 PANDEO ELÁSTICO CRÍTICO DE PLACA ATIESADA

En una placa atiesada, todos los ejes están simplemente soportados (S.S.) y sujetos a esfuerzo uniforme.

Esto lo podemos notar en la siguiente figura:

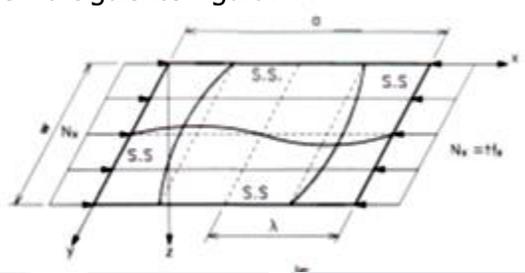


Ilustración 26 Pandeo elástico de placa atiesada. (Alva, 2005)

$$f_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(w/t)^2}$$

Ecuación 58

Dónde:

k = coeficiente de pandeo de planca

μ = relación de Poisson (0.3)

t = espesor de la placa

Para $a/w > 4$, el cual es el mayor de los casos para elementos placa, $k = 4$

Valores de k usados frecuentemente:

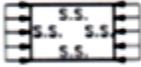
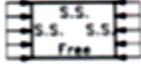
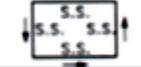
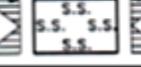
CASO	CONDICIÓN DE BORDE	TIPO DE ESFUERZO	VALORES DE k PARA EL LADO LARGO DE LA PLACA
1		COMPRESIÓN	4.0
2		COMPRESIÓN	0.425
3		CORTANTE	5.34
4		FLEXIÓN	23.9

Ilustración 27 Valores de k usados frecuentemente. (Alva, 2005)

Los valores de k en la tabla son para placas rectangulares longitudinales sujetas a diferentes condiciones de esfuerzos y bajo diferentes condiciones de borde.

Para el caso 2, la Especificación usa $k = 0.43$ (Wei-Wen Yu, 2000).

4.1.8.2 POST-PANDEO DE ELEMENTOS DE PLACA ATIESADA

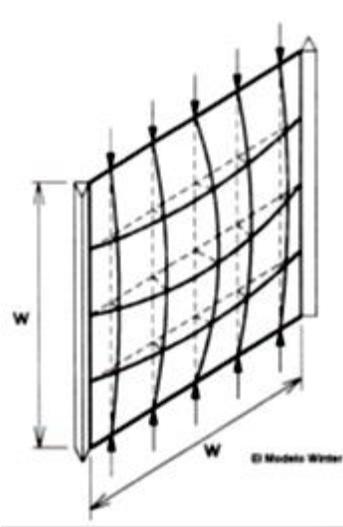


Ilustración 28 Modelo de Winter (American Society of Civil Engineers., 2010/2011)

El modelo anterior, llamado Winter, observamos el siguiente comportamiento:

- Todos los bordes están soportados simplemente y sujetos a esfuerzo uniforme.
- Incremento en esfuerzo mayor a F_{cr}
- Redistribución de esfuerzos.
- Los esfuerzos de Post-pandeo se incrementan para valores grandes (w/t)

Tan pronto como el pandeo de placa a F_{cr} , las barras horizontales en la rejilla del modelo actuarán como barras atiesadoras a contra-restar el incremento de deflexión del elemento longitudinal. Después del f_{cr} , una porción de la carga de post-pandeo de la porción central de la placa se redistribuye a los bordes de la placa.

(Alva, 2005)

DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS DE POST-PANDEO

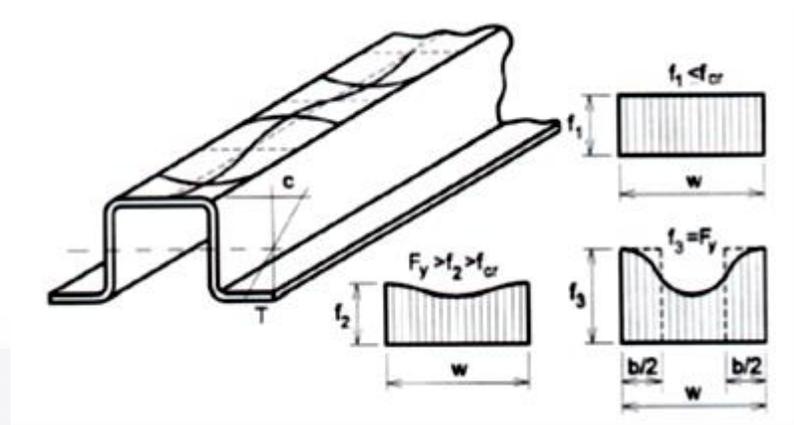


Ilustración 29 Distribución de esfuerzos de Post-pandeo (American Society of Civil Engineers., 2010/2011)

Cuando el esfuerzo es mayor que f_{cr} , la distribución de esfuerzos en la sección del elemento placa atiesada se vuelve no uniforme.

La capacidad del post-pandeo es alcanzada cuando el esfuerzo real ha alcanzado el esfuerzo de fluencia en las esquinas de la placa atiesada.

En 1910, Von Karman introdujo una ecuación diferencial, basada en la teoría de grandes deformaciones, para determinar la capacidad del post-pandeo de un elemento a compresión atiesado.

Esto fue muy complejo para aplicarla todos los días, por tanto Von Kaman introduce el concepto del "ancho efectivo", al esfuerzo nivel f_3 la distribución real de esfuerzo no uniforme es reemplazada con un block simple rectangular.

Esto es similar al concreto reforzado donde el esfuerzo real no uniforme del concreto es reemplazado con un block de esfuerzo rectangular uniforme equivalente.

(Wei-Wen Yu, 2000)

4.2 CONCEPTO ANCHO EFECTIVO

Es el ancho reducido de una placa o losa que, con una distribución de esfuerzos uniformes supuestos, producen el mismo efecto en el comportamiento de un miembro estructural que el del ancho real de la placa con su distribución de esfuerzos no uniformes.

Donde el ancho plano de un elemento se reduce para propósitos de diseño, el ancho reducido de diseño es determinado ancho efectivo o ancho efectivo de diseño.

En 1932, Von Karman, introduce el concepto "Ancho Efectivo".

Supone que el total de la carga es llevada por un ancho b , sujeto a un esfuerzo uniforme de compresión igual al esfuerzo del borde, $f_{m\acute{a}x}$

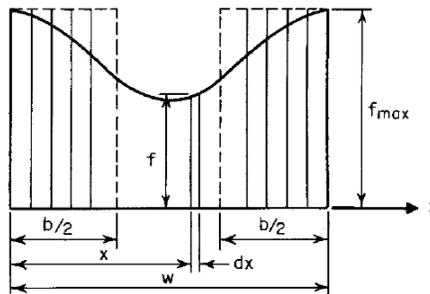


Ilustración 30 Ancho efectivo de un elemento atiesado en compresión. (Wei-Wen Yu, 2000)

$$f_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(w/t)^2}$$

Ecuación 59

$$f_{cr} = F_y$$

Ecuación 60

Dónde:

f_{cr} =Esfuerzo crítico por compresión.

F_y =Punto de fluencia de diseño.

E =Módulo de Elasticidad del Acero, (29,500 ksi = 20,300 MPa = 2'078,413 kg/cm²).

μ = Relación de Poisson para acero = 0.30

k = Coeficiente de pandeo de placa = 4

b = Ancho efectivo de diseño de un elemento en compresión.

t = Espesor de cualquier elemento o sección

w = Ancho plano (José Angel Ortiz Lozano, 2010)

Por Von Karman, tenemos la siguiente ecuación:

$$b = 1.9t \sqrt{E/F_y}$$

Ecuación 61

Para esfuerzos bajo fluencia:

$$b = 1.9t \sqrt{E/f_{max}}$$

Ecuación 62

En 1946, Winter modifico la expresión de von Karman al incluir w/t. Expresión básica de ancho efectivo con coeficiente variable de pandeo de placa:

$$b = 0.95t \sqrt{\frac{kE}{f_{max}} \left(1 - 0.208 \left(\frac{t}{w} \right) \sqrt{\frac{kE}{f_{max}}} \right)}$$

Ecuación 63

Relación ancho efectivo:

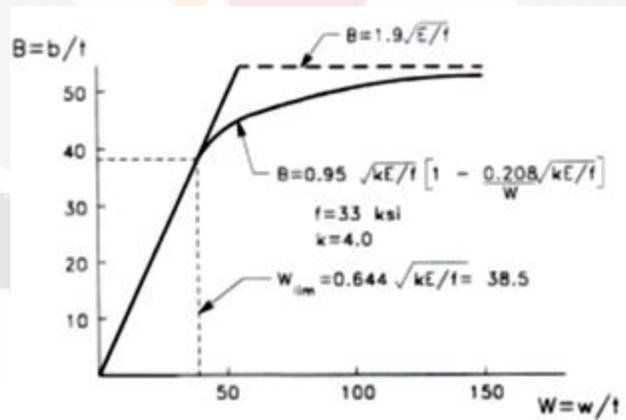


Ilustración 31 Relación Ancho efectivo (Alva, 2005)

Arriba la línea punteada, región compleja de interacción entre pandeo elástico de placa, fluencia del material e imperfecciones geométricas. (Wei-Wen Yu, 2000)

EXPRESIÓN UNIFICADA BÁSICA DE ANCHO EFECTIVO EN AISI

Los anchos efectivos, b , de elementos uniformes comprimidos, se determinarán a partir de las siguientes consideraciones:

$$b = w \text{ donde } \lambda \leq 0.673$$

$$b = \rho w \text{ donde } \lambda > 0.673$$

$$\rho = \frac{1 - \frac{0.22}{\lambda}}{\lambda}$$

Ecuación 64

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{f/E}$$

Ecuación 65

Factor de esbeltez:

Dónde:

λ = Factor de esbeltez $\lambda = \sqrt{f/f_{cr}}$

Ecuación 66

ρ = Factor de reducción.

t = Espesor de los elementos atesados uniformemente comprimidos.

En Resistencia:

f = Esfuerzo en compresión basado en una sección de ancho efectivo $f = F_y$ ó F_{ya}

En Serviciabilidad:

$f = f_d$, esfuerzo en compresión el cual es calculado en un elemento basado en la ecuación efectiva a la carga para la cual las deformaciones son determinadas.

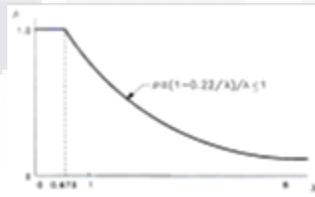


Ilustración 32 Factor de reducción, ρ , vs factor de esbeltez.

Esta curva es similar a la mayoría de curvas de miembros pandeados en compresión.

Mostrando factor de reducción r , contra factor de esbeltez,

. (LaBoube R, 2011)

EFFECTO LOCAL DE PANDEO

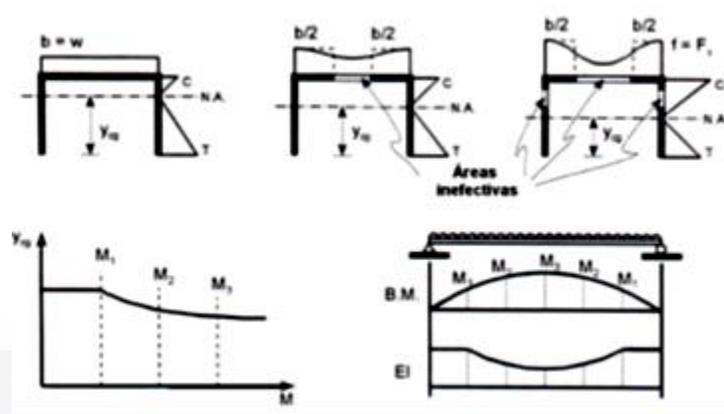


Ilustración 33 Pandeo Local en Flexión atiesada (Alva, 2005)

En la figura anterior, se muestra el efecto de pandeo local en flexión atiesada, donde EI varía conforme el Eje Neutro (E.N.) se mueve hacia abajo como resultado del pandeo local en varios elementos en compresión de una sección en flexión.

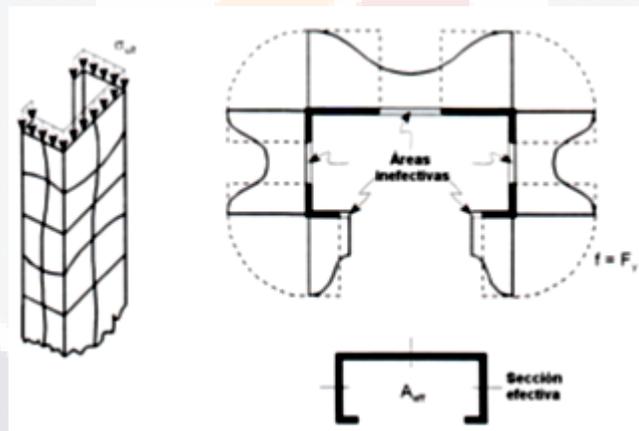


Ilustración 34 Pandeo local en una Sección Columna. (Alva, 2005)

Se muestra la influencia local de pandeo en un miembro en compresión, resultando en una reducción de la sección transversal seccional. (Wei-Wen Yu, 2000)

DEFINICIONES IMPORTANTES

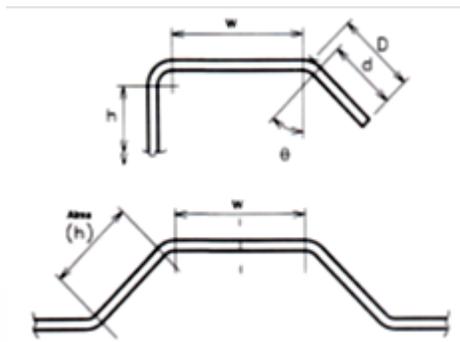


Ilustración 35 Definiciones importantes. (Alva, 2005)

w = Ancho plano del elemento excluyendo el radio.

h = Dimensión plana del alma medida a lo largo del plano de alma excluyendo el radio.

d = Dimensión plana del atiesador externo excluida del radio.

D = Dimensión total del atiesador de borde basado en tangentes exteriores.

RELACIÓN DE ESBELTEZ MÁXIMA DE LA SECCIÓN

Las relaciones máximas admisibles totales del ancho plano con respecto al espesor total, w/t , despreciando los atiesadores intermedios y tomando a t como espesor real del elemento, será como a continuación:

1) Elemento en compresión atiesado (atiesador de borde)

Elementos atiesados en compresión que tengan un borde longitudinal conectado a un elemento alma o patín, estando el otro borde atiesado por:

Borde atiesado simple (ceja) ($w/t \leq 60$)

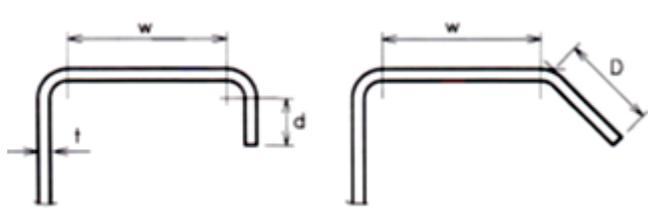


Ilustración 36 Borde atiesado con una simple ceja. (Alva, 2005)

Otros tipos de bordes atiesados

Dónde: $I_s < I_a (w/t < 60)$

Dónde: $I_s \geq I_a (w/t \leq 90)$

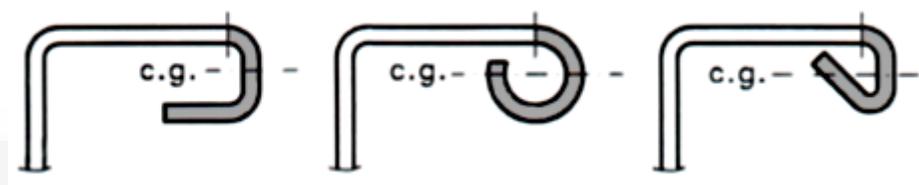


Ilustración 37 Borde atiesado donde el área achurada es el elemento atiesador. (Alva, 2005)

I_s es el momento de inercia del atiesador alrededor de su centro de gravedad e I_a es el momento de inercia requerido para un atiesador adecuado, así que el elemento en compresión adyacente puede actuar como un atiesador total.

2) Elementos en compresión atiesados ($w/t \leq 500$)

Un elemento atiesado en compresión con ambos bordes longitudinales conectados a otros elementos atiesados, alma o patín.

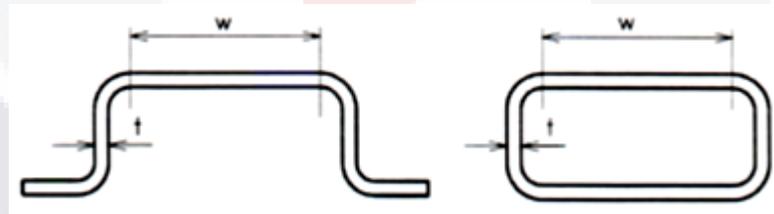


Ilustración 38 Elementos a compresión atiesados en ambos bordes. (Alva, 2005)

Los elementos en compresión atiesados con ($w/t > 250$) están probablemente a desarrollar notables deformaciones locales bajo cargas específicas, sin detrimento de la aptitud de soportar las cargas. (Alva, 2005)

Los elementos atiesados con $w/t > 60$ pueden emplearse en una resistencia de diseño adecuada para soportar las cargas que se requieran.

3) Elementos en compresión no atiesados ($w/t \leq 60$)

Elementos en compresión no atiesados con un borde conectado al alma o patín, y el otro borde libre.

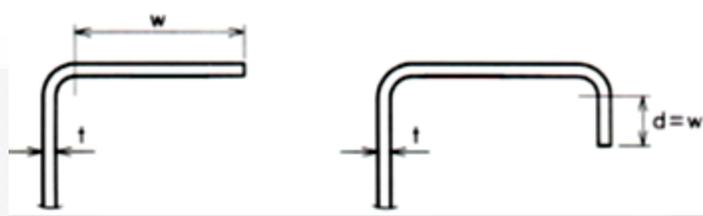


Ilustración 39 Elementos a compresión atiesados en un borde. (Alva, 2005)

Dónde $I_s < I_a$ ($D/w \leq 0.8$)

Los elementos en compresión no atiesados con $w/t > 30$ están probablemente a desarrollar notables deformaciones locales bajo cargas específicas, sin detrimento de la aptitud de soportar las cargas.

PERALTE DE LAS SECCIONES

La relación h/t , de almas de miembros en flexión no excederá los siguientes límites:

- a) Almas no reforzadas $-(h/t)_{m\acute{a}x} \leq 200$
- b) Almas reforzadas con atiesadores transversales.

Con atiesadores de apoyo $(h/t)_{m\acute{a}x} \leq 260$

Con atiesadores de apoyo intermedios $(h/t)_{m\acute{a}x} \leq 300$

Dónde:

h = peralte de la porción plana del alma media a lo largo del plano del alma.

Los atiesadores transversales unidos a las almas de las vigas en puntos de cargas concentradas o reacciones, se diseñarán como miembros a compresión. Las cargas concentradas o reacciones se aplicarán directamente a los atiesadores, o cada atiesador se ajustará con precisión a la parta plana del patín, para proporcionar directamente un soporte de carga en el extremo del atiesador. (Alva, 2005)

ELEMENTOS ATIESADOS UNIFORMEMENTE COMPRIMIDOS

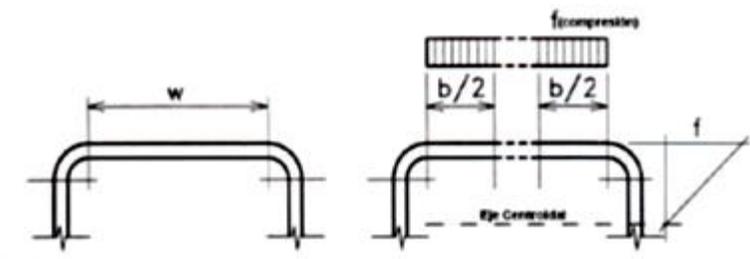


Ilustración 40 Elementos atiesados uniformemente comprimidos. (Alva, 2005)

Se debe usar la expresión básica de ancho efectivo con $k = 4.0$

Esto es aplicable para la determinación de carga (resistencia) y deflexión (Serviciabilidad).

La línea punteada, determina la porción central del elemento a compresión inefectiva.

(Alva, 2005)

4.3 REVISION DE ELEMENTOS A COMPRESION

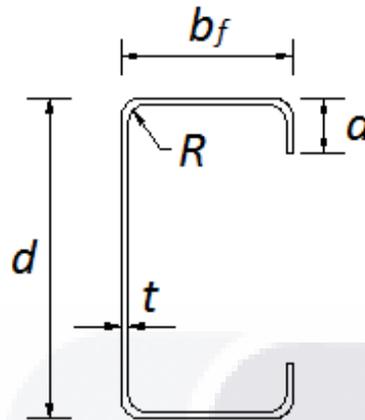


Ilustración 41 Componentes de un perfil "C".

Similar a las secciones de acero rolado en caliente, los miembros de acero rolado en frío de pared delgada pueden ser cargados axialmente en el centroide de la sección.

Para el caso particular del proyecto de investigación los miembros a compresión están conformados por perfiles tipo C los cuales son considerados por el reglamento como una combinación de elementos atiesados y elementos no atiesados.

Secciones formadas en frío son hechas de material delgado, y en muchos casos el centro de cortante no coincide con el centroide de la sección. Por lo tanto en el diseño de tales miembros a compresión, deberán seguirse consideraciones de estados límite que dependen de la configuración de la sección, espesor del material y longitud de columnas usadas:

- Límite de fluencia
- Pandeo completo de la columna
- Pandeo flexionante: flexión alrededor de un eje principal
- Pandeo torsional: torsión alrededor del centro de cortante
- Pandeo flexionante-torsional: pandeo y torsión simultáneamente
- Pandeo Local del elemento individual.

(American Society of Civil Engineers., 2010/2011)

El procedimiento para el diseño de miembros cargados axialmente consiste en los siguientes pasos:

- 1.- Cálculo del esfuerzo de pandeo elástico de la columna (flexionante, torsional, o torsional-flexionante) para la sección completa sin reducir.
- 2.- Determinar el esfuerzo de falla nominal (pandeo elástico, pandeo inelástico, o fluencia del material).
- 3.- Calcular la carga nominal de la columna basado en el esfuerzo de falla gobernante y el área efectiva.
- 4.- Determinar la carga de diseño de la columna de la carga nominal de la columna usando el factor de seguridad especificado para ASD o de factor de resistencia LRFD.

4.3.1 LIMITE DE FLUENCIA.

Para columnas muy cortas, bajo carga axial la falla que podría presentarse es por fluencia del acero

$$P_y = Af_y$$

A = Área completa de la sección columna

F_y = punto de fluencia del acero

4.3.2 PANDEO FLEXIONANTE (Wei-Wen Yu, 2000)

Una posible falla por carga axial en columnas esbeltas por Pandeo Flexionante en toda la columna.

Para una simetría simple, el pandeo flexionante es uno de los posibles modos de falla.

La carga de pandeo crítico para una columna larga puede ser determinada por la fórmula

de Euler:

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{KL^2}$$

Ecuación 67

P_e = Carga de pandeo de Euler

E = modulo de elasticidad

I = momento de inercia

L = longitud de columna

K = factor de longitud efectiva

Substituyendo $I = Ar^2$ en la ecuación anterior, se obtiene el esfuerzo de Euler para

pandeo elástico de columnas

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

Ecuación 68

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

4.3.3 PANDEO TORSIONAL Y FLEXIONANTE TORSIONAL. (Wei-Wen Yu, 2000)

Para secciones abiertas de pared delgada, se consideran en el análisis tres modos de falla deberán ser considerados en el análisis de estabilidad total de la pieza (pandeo flexionante, pandeo torsional, y pandeo flexionante-torsional).

Cuando una columna de sección abierta se pandea en el modo flexionante-torsional, flexión y torsión ocurren simultáneamente en la sección.

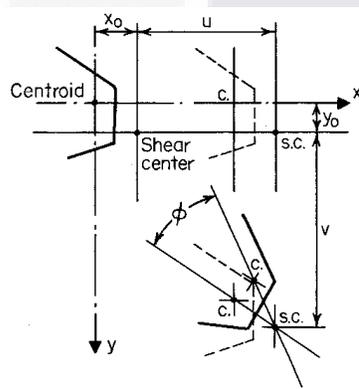


Ilustración 42 Desplazamiento de una sección no simétrica durante el pandeo flexionante-torsional (Wei-Wen Yu, 2000) pág. 318.

Como se muestra en la figura, la sección traslada u y v en la dirección x y en la dirección y , también rota un ángulo ϕ alrededor o cerca del centro de cortante.

Este problema fue investigado por Goodier, Timoshenko, y otros. Y más profundamente por Winter, Chajes y Fang para del criterio de diseño del AISI.

El equilibrio de una columna sujeta a una carga axial, condujo a las siguientes ecuaciones diferenciales:

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

Ecuación 69

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

Ecuación 70

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

Ecuación 71

Dónde:

I_x = momento de inercia alrededor del eje x

I_y = momento de inercia alrededor del eje y

u = desplazamiento lateral en dirección x

v = desplazamiento lateral en dirección y

ϕ = angulo de rotación, rad

x_0 = coordenada x del centro de cortante

y_0 = coordenada y del centro de cortante

C_w = Constante de alabeo por torsión de la sección transversal

E = modulo de elasticidad = $29.5 * 10^3$ Ksi (203 GPa)

G = mudulo de cortante, = $11.3 * 10^3$ Ksi (78 GPa)

J = Constante de torsión de St.Venant de la sección transversal, = $\frac{1}{3} \sum l_i t_i^3$

EC_w = Rigidez al alabeo

GJ = Rigidez a la torsión

r_0 = radio de giro polar de la sección transversal alrededor del centro de cortante,

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

r_x, r_y = radio de giro de la sección transversal alrededor del eje x y del eje y

(Wei-Wen Yu, 2000)

De la derivada de estas ecuaciones con respecto al eje Z el cual se encuentra en el eje longitudinal del elemento se desprende la ecuación:

$$r_0^2(P_{cr} - P_y)(P_{cr} - P_x)(P_{cr} - P_z) - (P_{cr})^2(y_0)^2(P_{cr} - P_x) - (P_{cr})^2(x_0)^2(P_{cr} - P_y) = 0$$

Ecuación 72

Dónde:

Carga crítica de pandeo de Euler en eje X

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

Ecuación 73

Carga crítica de pandeo de Euler en eje Y

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

Ecuación 74

Carga de pandeo torsional en eje Z

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

Ecuación 75

(Wei-Wen Yu, 2000)

KL = longitud efectiva de columna; teóricamente para apoyos articulados,

K = 1 y para apoyos empotrados K = 0.5

El menor de los tres valores corresponde a la carga crítica de pandeo P_{cr}

Forma con un solo eje de simetría.

Si el eje x es el eje de simetría, la distancia y_0 entre el centro de cortante y el centroide en la dirección del eje y es igual a cero por lo que la ecuación queda reducida a:

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

Ecuación 76

Para este caso particular una de las tres soluciones es:

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

Ecuación 77

La cual es la carga crítica de pandeo alrededor del eje y

Las otras dos soluciones para obtener la carga crítica de pandeo flexo-torsional pueden ser obtenidas resolviendo la ecuación cuadrática:

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

Ecuación 78

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

Ecuación 79

(Wei-Wen Yu, 2000)

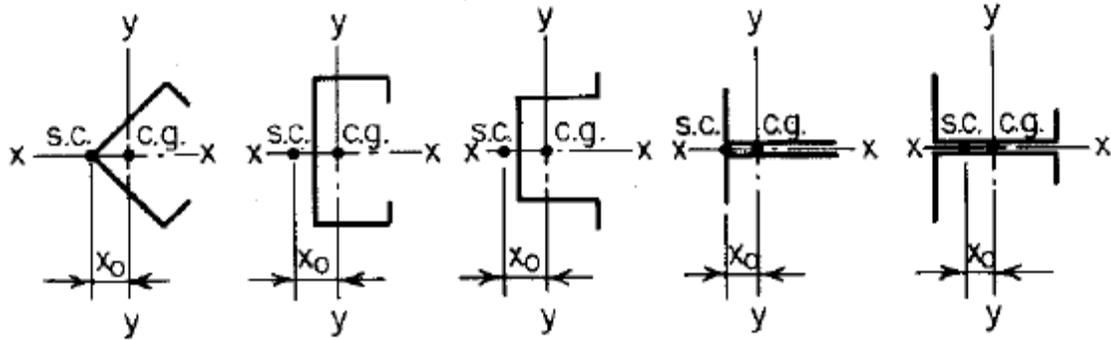


Ilustración 43 Formas simétricas simples pág. 321. (Wei-Wen Yu, 2000)

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

Ecuación 80

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

Ecuación 81

Dividiendo esta última ecuación entre el área total de la sección transversal A se puede obtener la siguiente ecuación para el esfuerzo de pandeo elástico flexionante-torsional.

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

Ecuación 82

La sección canal con un solo eje de simetría se observa que el centro de cortante está ubicado en el eje de simetría (el eje z).

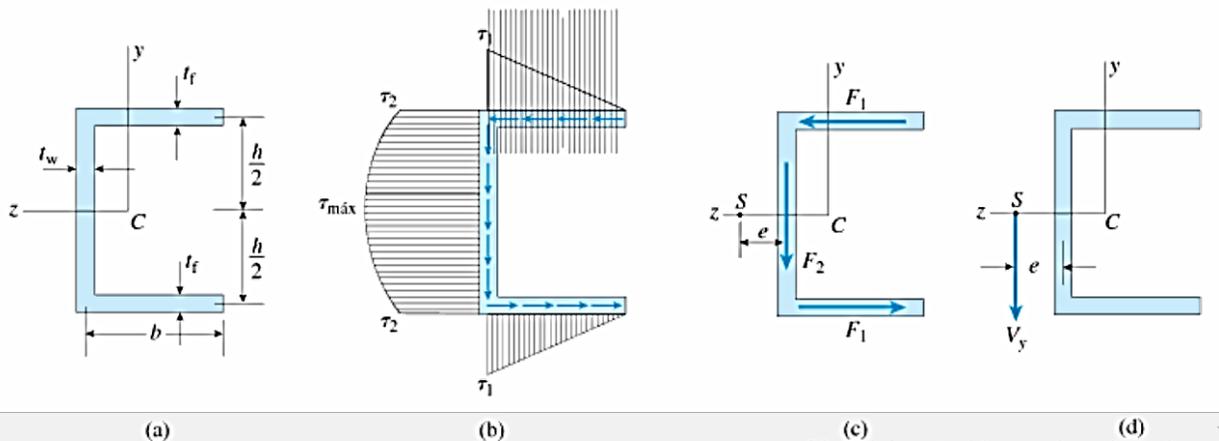


Ilustración 44 Centro de cortante S de una sección en canal. (James M. Gere, 2009)

Para encontrar la posición del centro de cortante en el eje z , se supone que la viga se flexiona con respecto al eje z como el eje neutro y luego determinamos la línea de acción de la fuerza cortante resultante V_y que actúa paralela al eje y . El centro de cortante está ubicado donde la línea de acción de V_y interseca al eje z (observe que el origen de los ejes está en el centroide C , de manera que y y z son ejes centroidales principales).

Podemos encontrar la resultante de estos esfuerzos si conocemos el esfuerzo máximo en el patín, el esfuerzo en la parte superior del alma y el esfuerzo máximo en el alma.

PARA CALCULO DE ESFUERZO NOMINAL (ELASTICO E INELASTICO)

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

Ecuación 83

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

Ecuación 84

, cuando $\lambda_c > 1.5$

Donde $(F_n)_I$ es el esfuerzo de pandeo nominal inelástico, $(F_n)_e$ es el esfuerzo de pandeo nominal elástico, λ_c es el parámetro de esbeltez $= \sqrt{F_y / \sigma_e}$, en donde σ_e es el esfuerzo de pandeo elástico flexionante teórico.

Como se indica en la siguiente ilustración

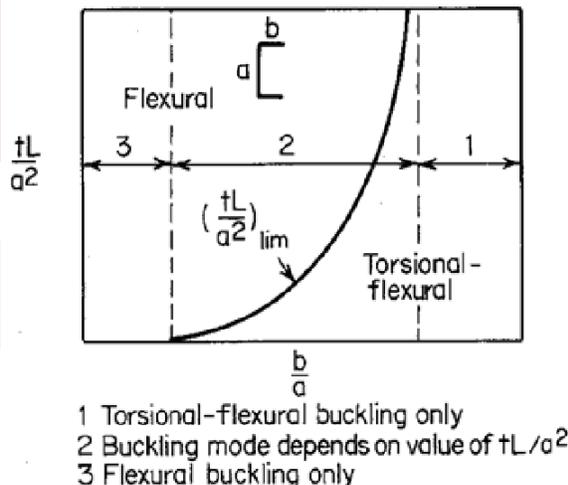


Ilustración 45 Modo de pandeo para una sección canal (Wei-Wen Yu, 2000, pág. 323)

El posible pandeo global de la de una sección simétrica simple alrededor del eje x puede ser considerado por tres casos diferentes.

4.3.3.1 CASO 1.

Solo por pandeo torsional-flexionante. Este caso particular es característico de secciones donde $I_y > I_x$ cuando $I_y > I_x$, la sección fallara ya sea en el caso 2 o en el caso 3.

4.3.3.2 CASO 2.

El canal será sometido a pandeo de modo flexionante o torsional-flexionante dependiendo específicamente de la relación b/a y del parámetro, donde b es el ancho de patín, a es la altura del alma del elemento, t es el espesor, y L es la longitud efectiva. Para una sección canal dada y longitud de columna si el valor de tL/a^2 esta arriba del límite $(tL/a^2)_{lim}$ de la curva, la sección fallara en el modo de pandeo por flexión. En caso contrario fallara en el modo de pandeo torsional-flexionante.

4.3.3.3 CASO 3.

La sección siempre fallara en el modo flexionante a pesar del valor tL/a^2 .

Tabla 1 Miembros Tipo de Acero Rolado en Frio (Dimensiones Estándar para perfiles C y perfiles Joist) (North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members., 2010)

Web Depth		
Depth Designation	Design Depth	
	(inch)	(mm)
162	1-5/8	41.3
250	2-1/2	63.5
350	3-1/2	88.9
362	3-5/8	92.1
400	4	102
550	5-1/2	140
600	6	152
800	8	203
1000	10	254
1200	12	305
1400	14	356

Flange Width		
Width Designation	Design Width	
	(inch)	(mm)
125	1-1/4	31.8
137	1-3/8	34.9
162	1-5/8	41.3
200	2	50.8
250	2-1/2	63.5
300	3	76.2
350	3-1/2	88.9

Tabla 2 Diseño de longitud de borde para perfiles Cy Joist (North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members., 2010)

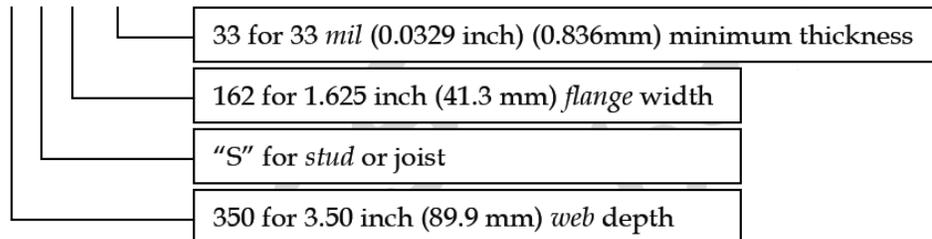
Design Lip Length for C-Shape Studs and Joists (S)

Section	Flange Width		Design Lip Length	
	(inch)	(mm)	(inch)	(mm)
S125	1-1/4	31.8	3/16	4.8
S137	1-3/8	34.9	3/8	9.5
S162	1-5/8	41.3	1/2	12.7
S200	2	50.8	5/8	15.9
S250	2-1/2	63.5	5/8	15.9
S300	3	76.2	5/8	15.9
S350	3-1/2	88.9	1	25.4

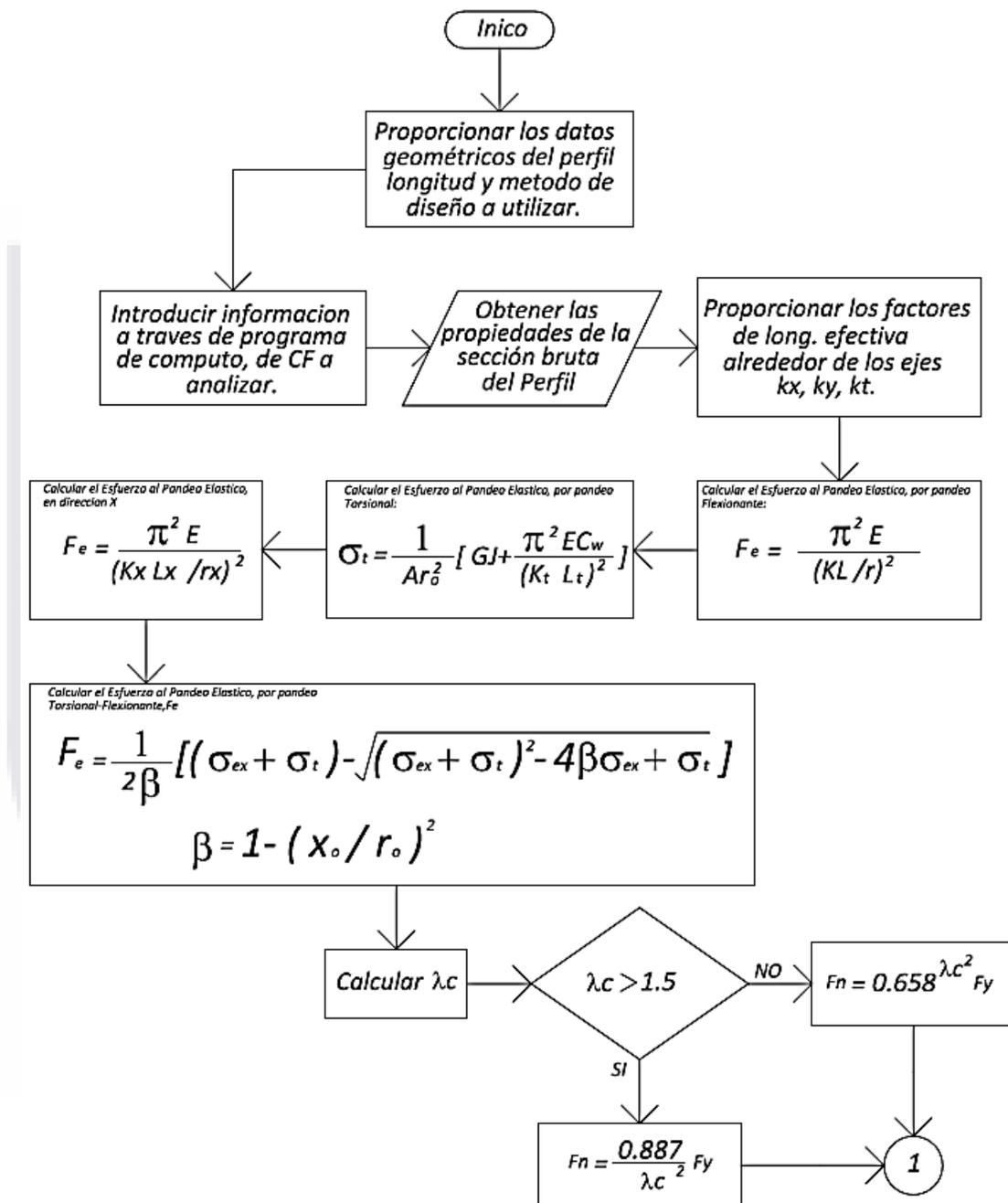
Tabla 3 Diseño de longitud de borde para perfiles Cy Joist (North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members., 2010)

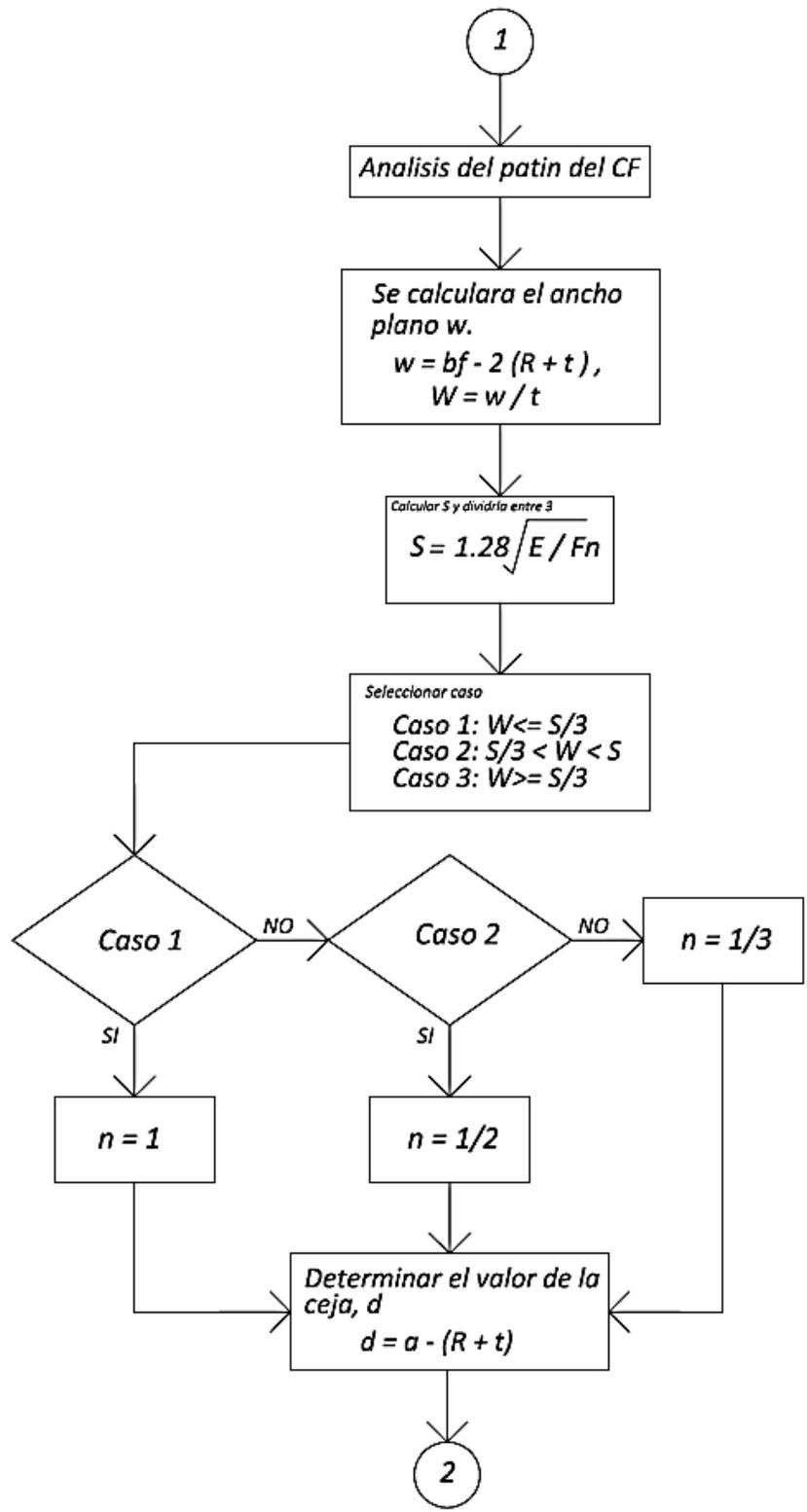
350S162-33 represents a member with the following:

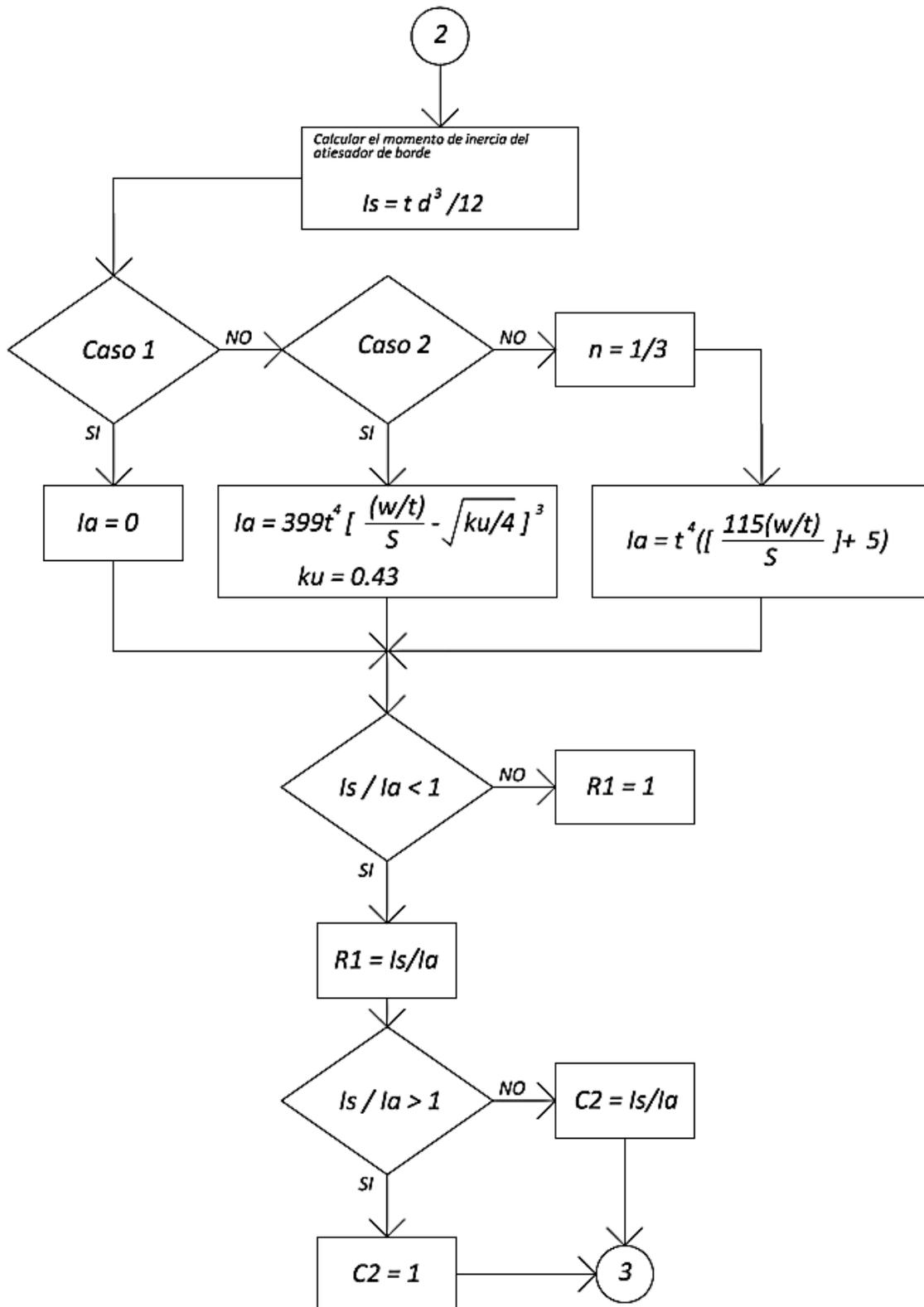
350S162-33

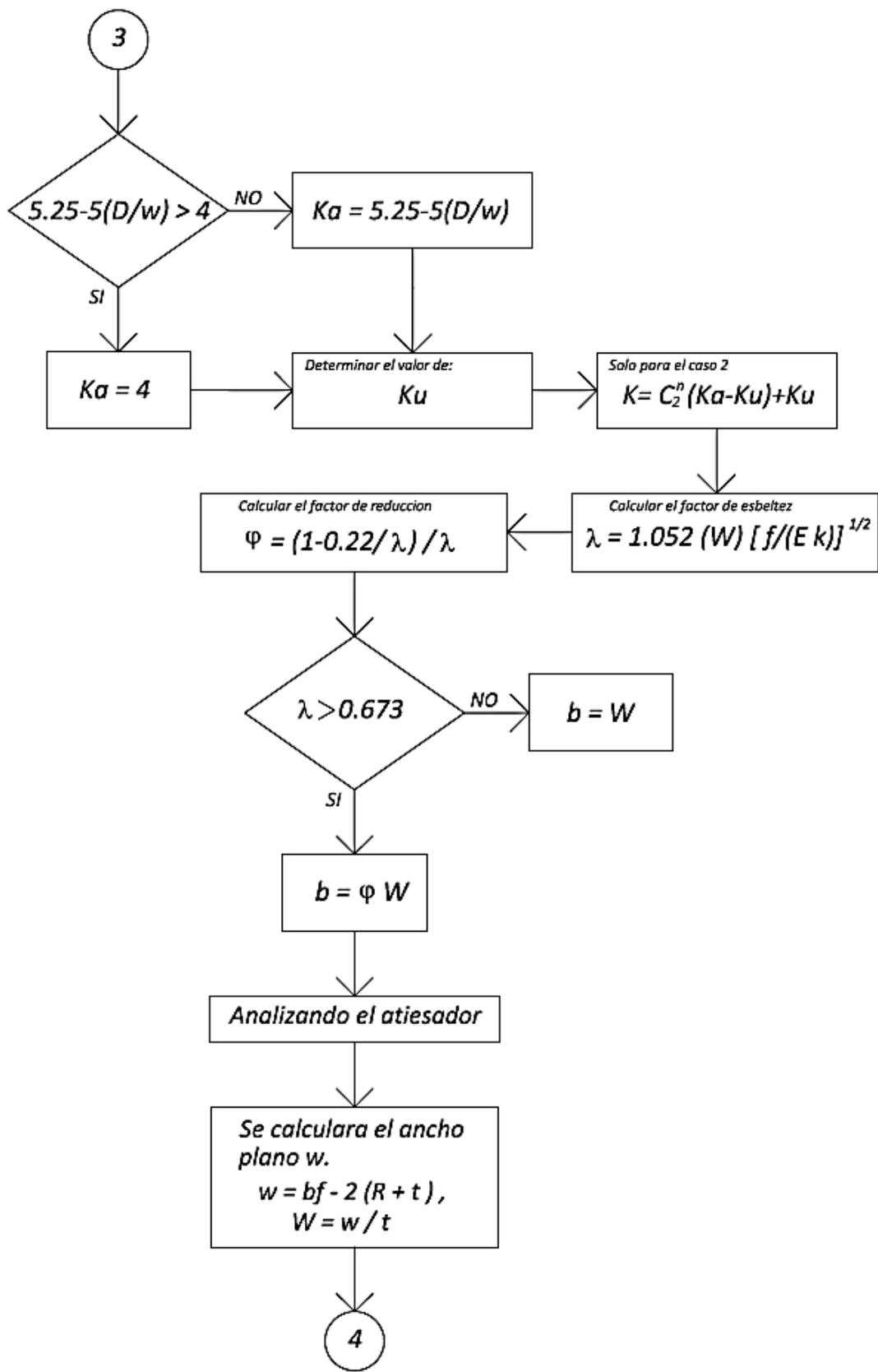


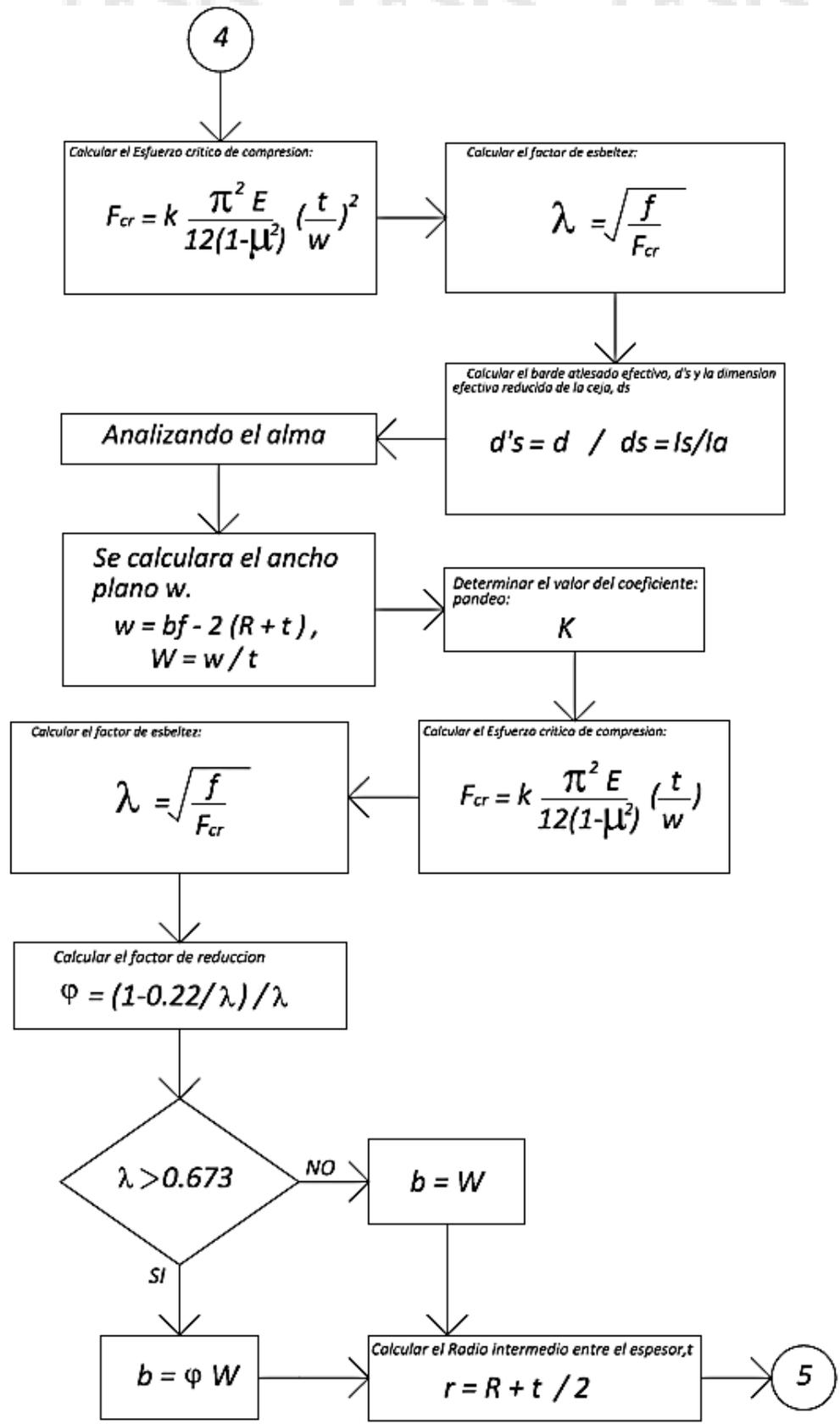
4.4 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DISEÑO DE MIEMBROS EN COMPRESION

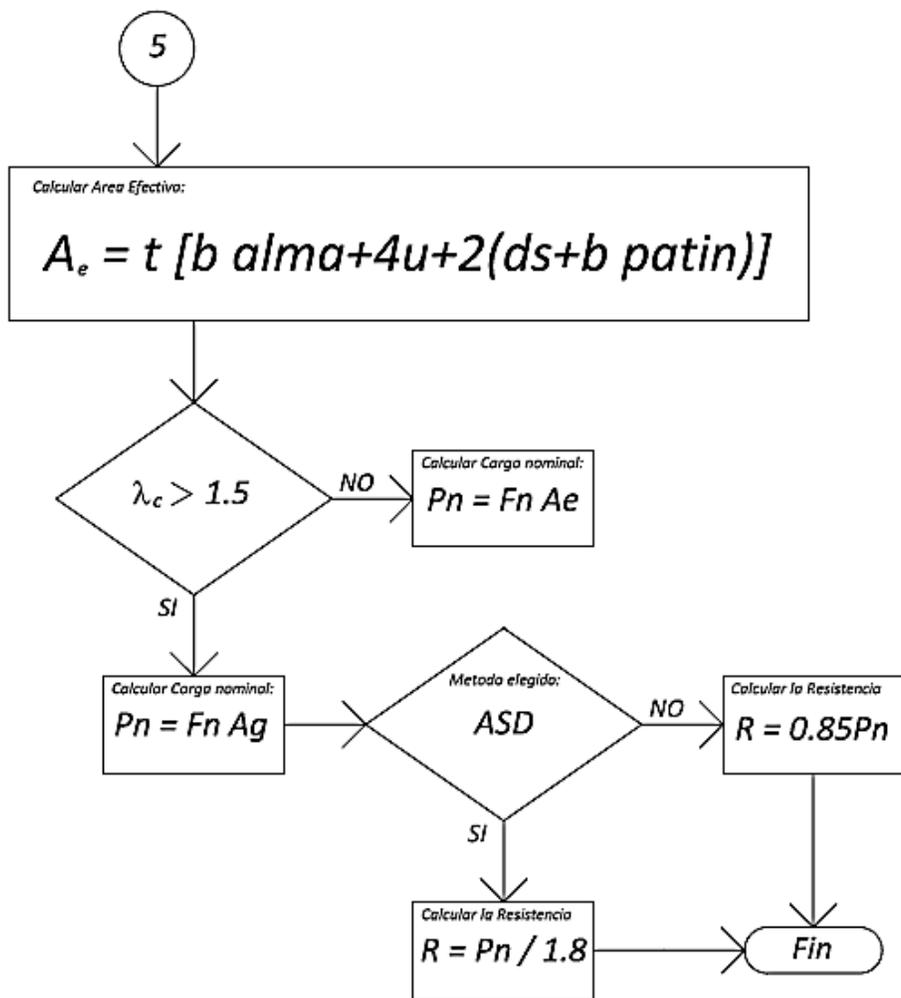












4.5 MANUAL DE OPERACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA NOMINAL AXIAL EN UN CF, PARA MIEMBROS EN COMPRESION.

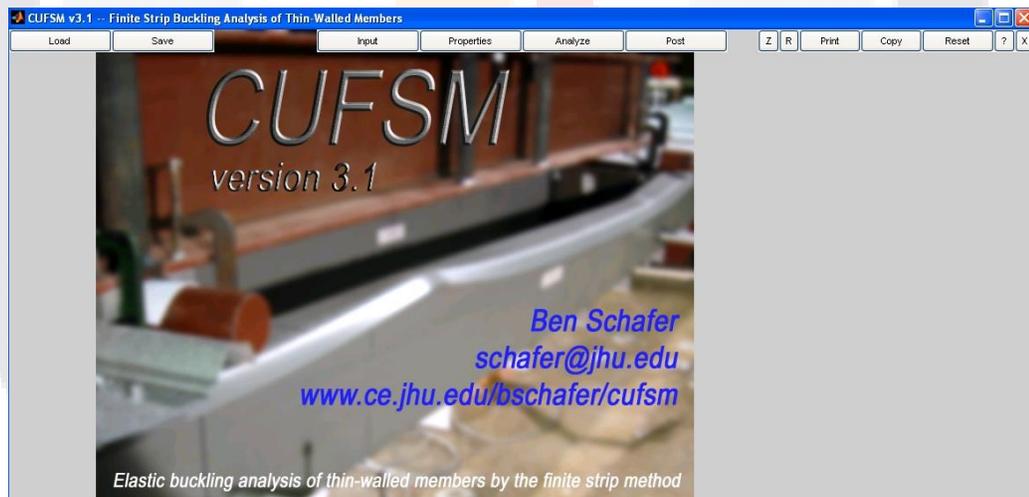
Para poder determinar la Resistencia se deberán seguir los siguientes pasos:

Primeramente se proporcionaran los datos geométricos del perfil en análisis, así como el acero con el que está fabricado, la longitud y el método que se utilizara para el diseño del perfil.

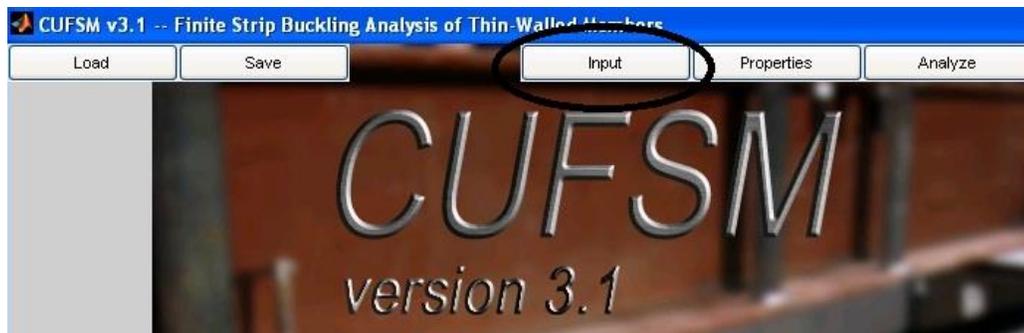
Obtener las propiedades de la sección bruta del Perfil.

Se puede utilizar para ello un programa de computo el cual puede servir de auxilio para obtener varios de los datos que se van a utilizar para el cálculo, el programa llamado CUFSM versión 3.1

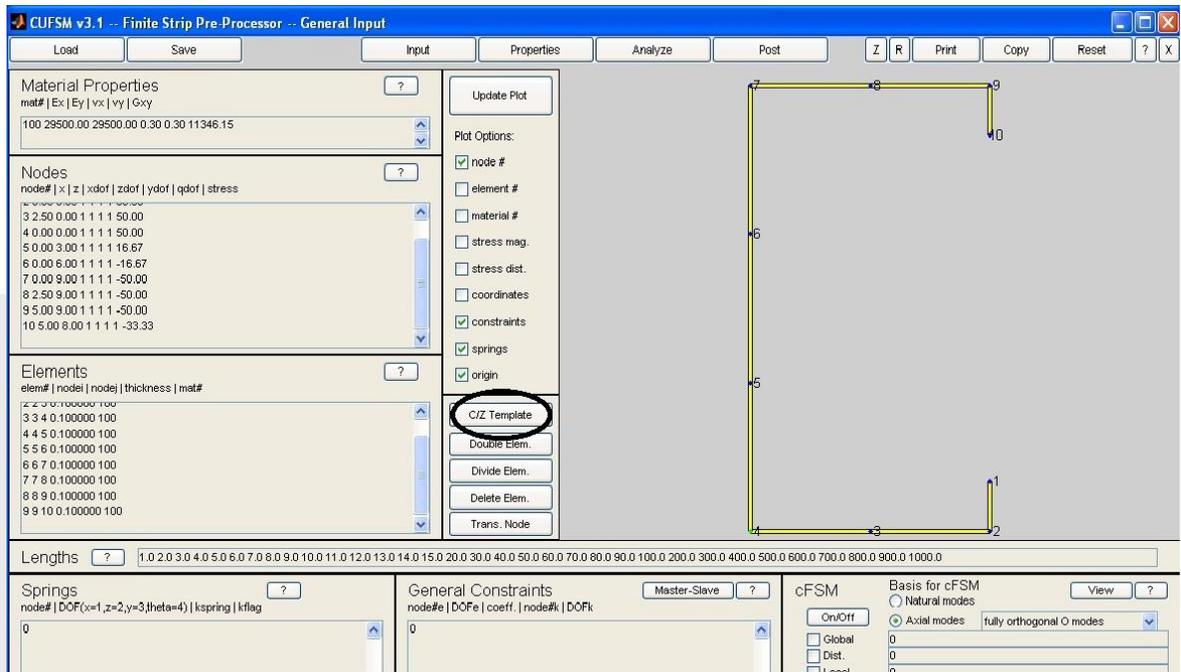
Acceder a CUFSM



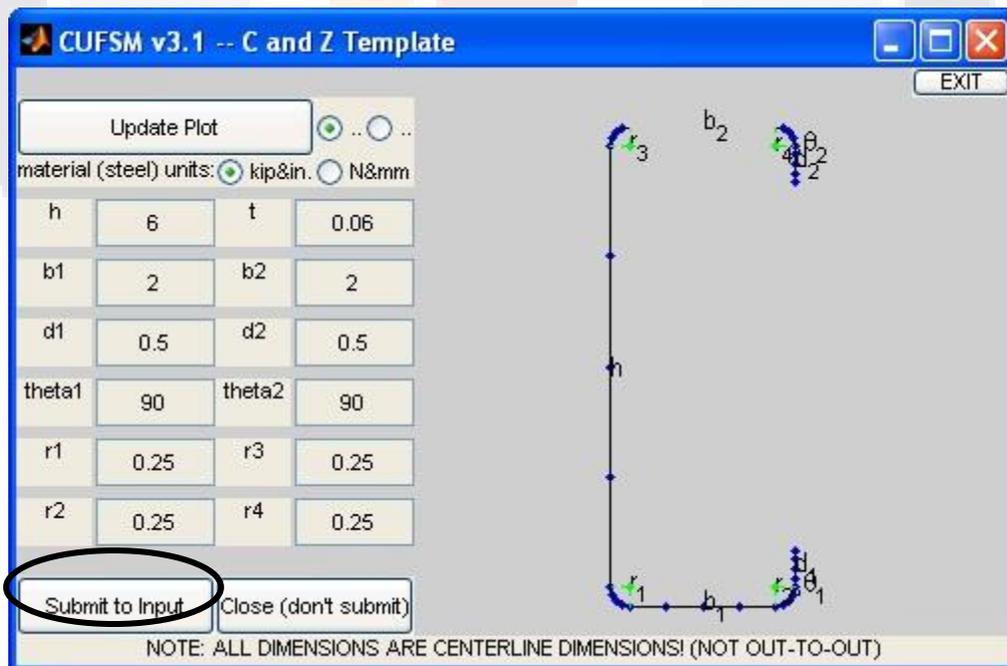
Ya ejecutado el programa entrar a la pestaña **INPUT**



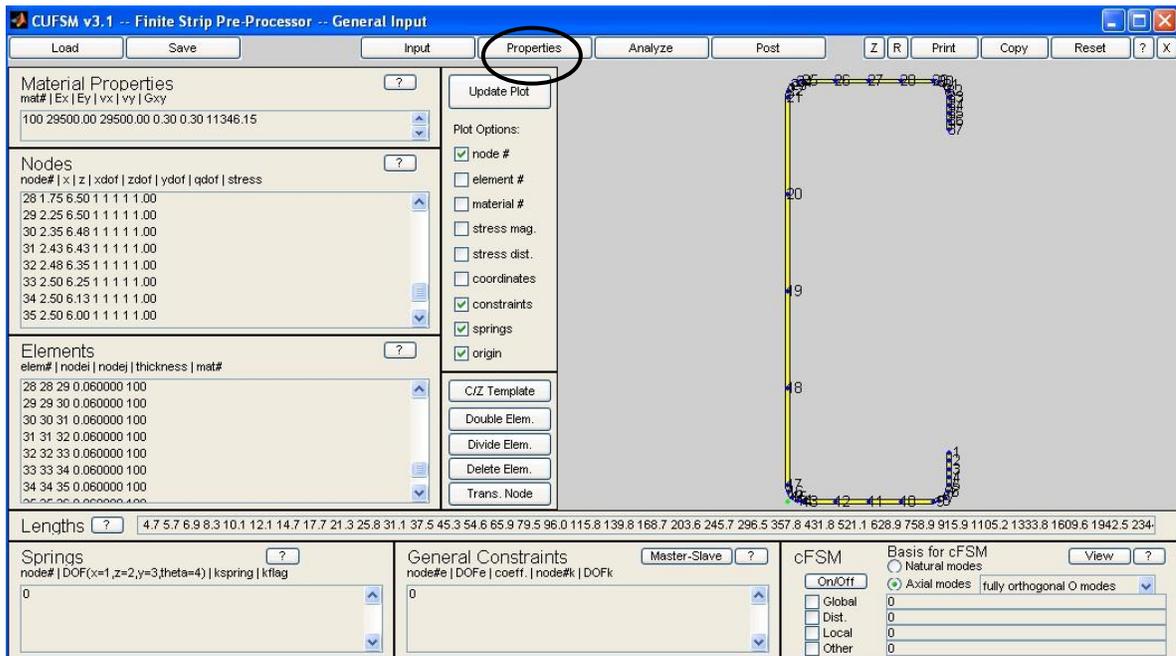
Mostrará la siguiente ventana y ahora se procede a entrar a la pestaña de **C/Z Template** la cual se muestra en la siguiente imagen:



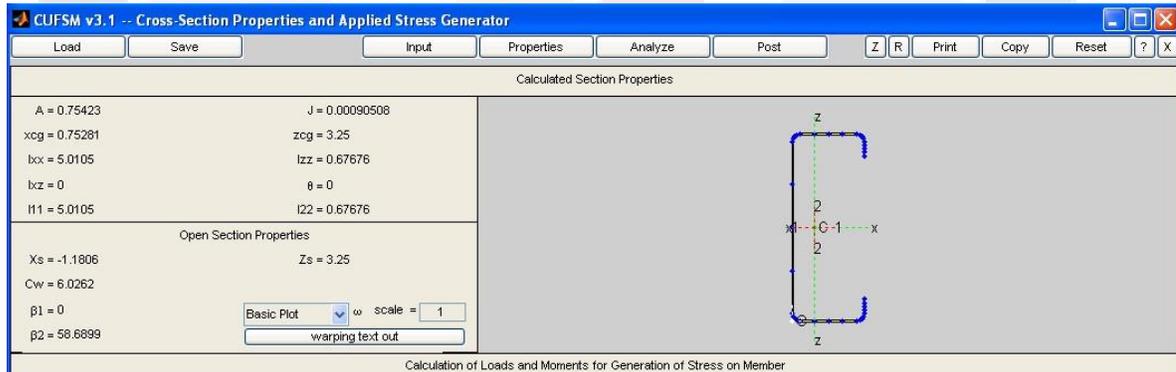
Incorporar la geometría del perfil que se va a utilizar y presionar **Submit to Input**.



Entrar enseguida a la pestaña de **Properties**



Y aparecerá la siguiente ventana, la cual proporciona las propiedades de la sección.



Ahora se proporcionarán los factores de longitud efectiva (k) alrededor del eje x, y, t

Condición de apoyo	Factor de longitud efectiva k
Columna empotrada en ambos extremos	0.5
Columna empotrada en un extremo y articulada en el otro	0.7
Columna articulada en ambos extremos	1.0
Columna articulada en un extremo y empotrada en el otro	2.0
Columna empotrada en un extremo y libre en el otro	2.0

Tabla 4 Factor de longitud efectiva k para carga axial en columnas con diferentes condiciones de apoyo (Wei-Wen Yu, 2000) (Alva, 2005) (American Society of Civil Engineers., 2010/2011)

Se calcula el esfuerzo al pandeo elástico, por pandeo flexionante, F_e , haciendo uso de la ecuación Eq. C4.1.1-1 de la norma NASPEC para el diseño de perfiles forjados en Frio.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

Ecuación 85

Ahora calcularemos el esfuerzo al pandeo elástico, por pandeo torsional, F_e , apoyándonos en la ecuación Eq. C3.1.2.1-9

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

Ecuación 86

Siguiendo las ecuaciones Eq. C4.1.2-1, Eq. C3.1.2.1-11, Eq. C4.1.2-3, obtendremos el valor del esfuerzo al pandeo elástico, por pandeo torsional-flexionante, F_e

$$F_e = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right]$$

Ecuación 87

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

Ecuación 88

$$\beta = 1 - (x_o / r_o)^2$$

Ecuación 89

Para calcular el esfuerzo al pandeo nominal, F_n , nos referiremos primeramente a la ecuación Eq. C4.1.4.

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}}$$

Ecuación 90

De la ecuación Eq. C4.1-3

Para $\lambda_c \leq 1.5$ $F_n = (0.658\lambda_c^2) F_y$

Ecuación 91

Para $\lambda_c > 1.5$ $F_n = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] F_y$

Ecuación 92

Analizando el patín del perfil

$$\text{Calcular el ancho plano } w = bf - 2(R + t), \quad W = w/t$$

Ecuación 93

Y basado en la ecuación Eq. B4-7

$$S = 1.28\sqrt{E/f}$$

Ecuación 94

Seleccionar tipo de caso en base al $S/3$

Determinar el valor de n , según sea el caso

Determinar el valor de la ceja, d

$$d = a - (R + t)$$

Ecuación 95

Calcular el momento de inercia del atiesador de borde completo alrededor de su propio eje centroidal paralelo al elemento a ser atiesado

$$I_s = td^3/12$$

Ecuación 96

Se determina según el caso el momento de inercia requerido en un atiesador de borde que admite la compresión adyacente del momento a conducirse como elemento totalmente atiesado.

$$\text{Para caso } = 1, \quad I_a = 0$$

Ecuación 97

$$\text{Para caso } = 2, \quad I_a = 399t^4 \left\{ \frac{\left(\frac{w}{t}\right)}{S} - \sqrt{\frac{k_u}{4}} \right\}^3; \quad k_u = 0.43$$

Ecuación 98

$$\text{Para caso } = 3, \quad I_a = t^4 \left\{ \left[\frac{\left(115 \frac{w}{t}\right)}{S} \right] + 5 \right\}$$

Ecuación 99

Calculo de $R1 = I_s/I_a \leq 1$

Ecuación 100

Calculo de C_2

$$C_2 = \frac{I_s}{I_a} \leq 1$$

Ecuación 101

Cálculo de k_a, k_w, k (coeficiente de pandeo), λ (factor de esbeltez) (factor de reducción- Eq. B2.1-3) y b (ancho efectivo- Eq. B2.1-2).

$$k_a = 5.25 - 5(D/w) \leq 4.0$$

k_u :

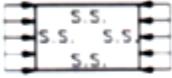
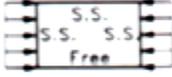
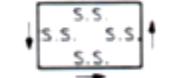
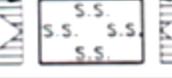
CASO	CONDICIÓN DE BORDE	TIPO DE ESFUERZO	VALORES DE k PARA EL LADO LARGO DE LA PLACA
1		COMPRESION	4.0
2		COMPRESION	0.425
3		CORTANTE	5.34
4		FLEXION	23.9

Ilustración 46 Valores de K usados frecuentemente (American Society of Civil Engineers., 2010/2011)

$$k = C_2^n (k_a - k_u) + k_u; \quad n = \frac{1}{2}$$

Ecuación 102

$$\lambda = 1.052(W)[f/E/k]^{1/2}$$

Ecuación 103

$$\rho = \text{Factor de reducción local} = (1 - 0.22/\lambda)/\lambda$$

$$b = w \quad \text{cuando} \quad \lambda \leq 0.673$$

$$b = \rho w \quad \text{cuando} \quad \lambda > 0.673$$

Ahora analizando el atiesador de borde

Calcular el ancho plano $w = bf - 2(R + t)$, $W = w/t$

Ecuación 104

El esfuerzo crítico por compresión se deducirá con la siguiente ecuación Eq. B2.1-4, Eq.B2.1-5

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w}\right)^2$$

Ecuación 105

Para el factor de esbeltez se aplica la ecuación E. B2.1-4, Eq.B2.1-5

$$\lambda = \text{Factor de esbeltez} = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}}$$

Ecuación 106

Se calcula el borde atiesado efectivo basado en el pandeo local (d'_s) y la dimensión efectiva reducida de la ceja basada en la relación $I_s/I_a(d_s)$

$$d'_s = d \quad d_s = I_s/I_a$$

Ecuación 107

Analizando el alma

Calculo del ancho plano $w = b_f - 2(R + t)$, $W = w/t$

Según el caso se elegira el coeficiente de pandeo

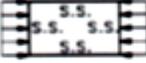
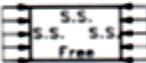
CASO	CONDICIÓN DE BORDE	TIPO DE ESFUERZO	VALORES DE k PARA EL LADO LARGO DE LA PLACA
1		COMPRESIÓN	4.0
2		COMPRESIÓN	0.425
3		CORTANTE	5.34
4		FLEXIÓN	23.9

Ilustración 47 Valores de k usados frecuentemente (American Society of Civil Engineers., 2010/2011)

El esfuerzo crítico por compresión se deducirá con la siguiente ecuación Eq. B2.1-4, Eq.B2.1-5

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w}\right)^2$$

Ecuación 108

Para el factor de esbeltez aplicaremos la ecuación E. B2.1-4, Eq.B2.1-5

$$\lambda = \text{Factor de esbeltez} = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}}$$

Ecuación 109

Se calcula el ρ (factor de reducción- Eq. B2.1-3) y b (ancho efectivo- Eq. B2.1-2).

$$\rho = \text{Factor de reducción local} = (1 - 0.22/\lambda)/\lambda$$

Ecuación 110

$$b = w \quad \text{cuando} \quad \lambda \leq 0.673$$

$$b = \rho w \quad \text{cuando} \quad \lambda > 0.673$$

Analizar las propiedades de esquina a 90°

Radio intermedio entre el espesor $t(R + t/2)$

Ecuación 111

Longitud de arco basado al radio $r(u = 1.57r)$

Ecuación 112

Área Efectiva, $A_e = t[b_{alma} + 4(u) + 2(d_s + b_{patin})]$

Ecuación 113

Con los datos ya recabados, se calcula la resistencia nominal axial teniendo las siguientes condiciones:

$$P_n = A_g F_n$$

Ecuación 114

(Para miembros localmente estables a la compresión)

$$P_n = A_e F_n$$

Ecuación 115

(Para miembros localmente inestables a la compresión)

Basado a los factores de seguridad y resistencia según el método de diseño elegido, se calcula la resistencia del perfil.

Factor de Resistencia, Ω

Miembros en tensión	1.67
Miembros en compresión	1.80
Montantes de muro (axial)	1.80
Miembros en flexión	1.67
Resistencia a cortante en el alma	1.50 a 1.67
Desgarramiento del alma	1.85 a 2.00
Conexiones atornilladas	2.00 a 2.52
Conexiones soldadas	2.50

Factor de Seguridad, ϕ

Miembros en tensión	0.95
Miembros en compresión	0.85
Montantes de muro (axial)	0.85 a 0.90
Miembros en flexión	0.90 a 0.95
Resistencia a cortante en el alma	0.90 a 1.00
Desgarramiento del alma	0.75 a 0.80
Conexiones atornilladas	0.55 a 0.75

Ilustración 48 Factores de Resistencia ASD y LRFD (American Society of Civil Engineers., 2010/2011)

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

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

$$R = P_n / 1.80 \text{ (ASD)}$$

$$R = 0.85 P_n \text{ (LRFD)}$$

CAPÍTULO 5.- MIEMBROS EN FLEXOCOMPRESIÓN

5.1 DISEÑO DE MIEMBROS EN FLEXO-COMPRESION

5.1.1 CARGA AXIAL A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN COMBINADOS

Ecuaciones separadas de interacción para ASD y LRFD

Las mismas ecuaciones básicas de interacción para ASD y LRFD

Los miembros de acero formados en frío sujetos a la combinación de carga axial y flexión son usualmente referidos como VIGAS-COLUMNAS.

El comportamiento estructural de VIGAS-COLUMNAS depende de:

- 1) El perfil y dimensiones de sección transversal
- 2) La carga del miembro
- 3) La ubicación de la carga excéntrica aplicada
- 4) La longitud del miembro
- 5) La restricción del extremo del miembro, y
- 6) La condición de arriostramiento.

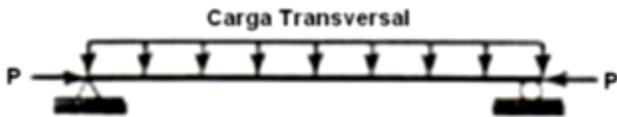
5.1.1.1 FUENTES DE ESFUERZOS A FLEXIÓN

5.1.1.1.1 MIEMBROS CARGADOS

Carga Axial Excéntrica



Carga Axial más Transversal



Carga Axial más Momentos y cortantes en extremos (Alva, 2005, pág. 132)





5.1.1.1.2 CARGAS DE SECCIÓN TRANSVERSAL

1) Cuando $e_y = 0$, pero no e_x , compresión excéntrica con flexión en el plano de simetría.

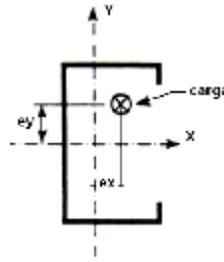


Ilustración 49 Carga excéntrica de sección transversal

2) Cuando $e_x = 0$, pero no e_y , compresión excéntrica con flexión alrededor del eje de simetría.

3) Cuando ni e_y ni e_x son igual a cero, la flexión biaxial será experimentada.

5.1.1.1.3 TIPOS DE SECCIÓN TRANSVERSAL

- a) Doblemente simétrica
- b) Simplemente simétrica
- c) Simetría puntual
- d) No simétrico

SECCIONES DOBLEMENTE SIMÉTRICAS

5.1.1.1.3.1 SECCIÓN ABIERTA

El miembro fallará flexionándose alrededor del eje menor (eje y) en la ubicación del momento máximo, por cualquiera, Fluencia ó pandeo local. (Alva, 2005)

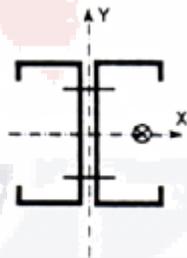


Ilustración 50 Sección abierta con carga excéntrica.

El miembro puede fallar flexionándose o en el modo de pandeo torsional flexionante, porque la carga no pasa a través del centro de cortante. (Alva, 2005)

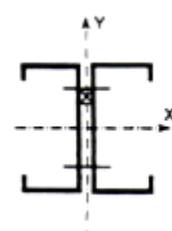


Ilustración 51 Pandeo Torsional Flexionante.

5.1.1.1.3.2 SECCIÓN CERRADA

El miembro fallará flexionándose alrededor del eje menor (eje y) en la ubicación del momento máximo, por cualquiera, Fluencia ó pandeo local. (Alva, 2005)

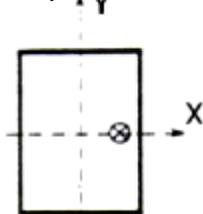


Ilustración 52 Excentricidad sobre el eje X

El miembro puede fallar flexionándose alrededor del eje mayor (eje x) o del eje menor (eje y) en la ubicación del momento máximo, dependiendo de la magnitud de la excentricidad.

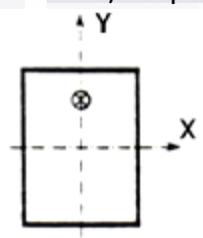


Ilustración 53 Excentricidad sobre eje Y

Ecuaciones de interacción para carga axial, compresión y flexión combinados

5.1.2 MÉTODO ASD. DISEÑO DE VALORES ADMISIBLES

Las resistencias requeridas, P, M_x y M_y deberán satisfacer las siguientes ecuaciones de interacción: (Alva, 2005)

1) Estabilidad

$$\frac{\Omega_c P}{P_n} + \frac{\Omega_b C_{mx} M_x}{M_{nx} \alpha_x} + \frac{\Omega_b M_y}{M_{ny} \alpha_y} \leq 1.0$$

Ecuación 116

2) Resistencia

$$\frac{\Omega_c P}{P_{n0}} + \frac{\Omega_b M_x}{M_{nx}} + \frac{\Omega_b M_y}{M_{ny}} \leq 1.0$$

Ecuación 117

Cuando $\Omega_c P/P_n \leq 0.15$, la siguiente ecuación puede ser usada en lugar de las ecuaciones anteriores: (Alva, 2005)

$$\frac{\Omega_c P}{P_n} + \frac{\Omega_b M_x}{M_{nx}} + \frac{\Omega_b M_y}{M_{ny}} \leq 1.0$$

Ecuación 118

5.1.3 MÉTODO LRFD. DISEÑO DE FACTOR DE CARGA Y RESISTENCIA

Las resistencias requeridas, P_u , M_{ux} y M_{uy} deberán satisfacer las siguientes ecuaciones de interacción:

$$1) \text{ Estabilidad} \quad \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{C_{mx} M_{ux}}{\phi_b M_{nx} \alpha_x} + \frac{C_{my} M_{uy}}{\phi_b M_{ny} \alpha_y} \leq 1.0$$

Ecuación 119

$$2) \text{ Resistencia} \quad \frac{P_u}{\phi_c P_{no}} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0$$

Ecuación 120

Cuando $P_u / \phi_c P_n \leq 0.15$, la siguiente ecuación puede ser usada en lugar de las ecuaciones anteriores:

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0$$

Ecuación 121

Dónde:

P, P_y = Resistencia requerida a compresión axial

M_x, M_y = Resistencia requerida a flexión con respecto a los ejes centroidales de la sección efectiva determinada por la resistencia a compresión axial solamente. Para secciones angulares, M_y se tomará cualquiera de las dos como la resistencia a flexión requerida más $PL/1000$, cualquier resultado en un valor permisible más bajo de P

M_{ux}, M_{uy} = Resistencia requerida a flexión con respecto a los ejes centroidales de la sección efectiva determinada por la resistencia a compresión axial solamente. Para secciones angulares, M_{yy} se tomará cualquiera de las dos como la resistencia a flexión requerida más $P_u L / 1000$, cualquier resultado en un valor permisible más bajo de P_u

P_n = Resistencia nominal axial.

P_{no} = Resistencia nominal axial, con $F_n = F_y$

M_{nx}, M_{ny} = Resistencia nominal a flexión alrededor del eje centroidal.

$\Omega_b = 1.67$, Para resistencia a flexión o para vigas no arriostradas lateralmente.

$\Omega_t = 1.80$

$\Phi_b = 0.90$ ó 0.95 , Para resistencia a flexión o 0.90 , para vigas no arriostradas lateralmente.

$\Phi_t = 0.85$

5.1.4 EFECTOS DE MOMENTOS (C_{mx} , C_{my})

Si los momentos finales son como los mostrados en las figuras previas, no es necesaria una modificación adicional. Para momentos finales desiguales M_1 y M_2 , M_1 y M_2 , y miembros en compresión en marcos, las siguientes modificaciones se deberán aplicar:

1) Para miembros a compresión en marcos sujetos a traslación de juntas (corrimiento lateral)

$$C_m = 0.85$$

2) Para miembros a compresión en marcos arriostrados contra la traslación de nudos y sin carga transversal entre soportes

$$C_m = 0.6 + 0.4(M_1/M_2) \text{ (curvatura simple)}$$

Ecuación 122

$$C_m = 0.6 - 0.4(M_1/M_2) \text{ (curvatura doble)}$$

Ecuación 123

Donde M_1/M_2 es la relación del menor al mayor de los momentos finales.

3) Para miembros a compresión en marcos arriostrados contra la traslación de juntas con carga transversal entre soportes.

C_m puede ser determinado por un análisis racional, o en su lugar:

(a) Para miembros con extremos restringidos $C_m = 0.85$

(b) Para miembros con miembros no restringidos $C_m = 1.00$

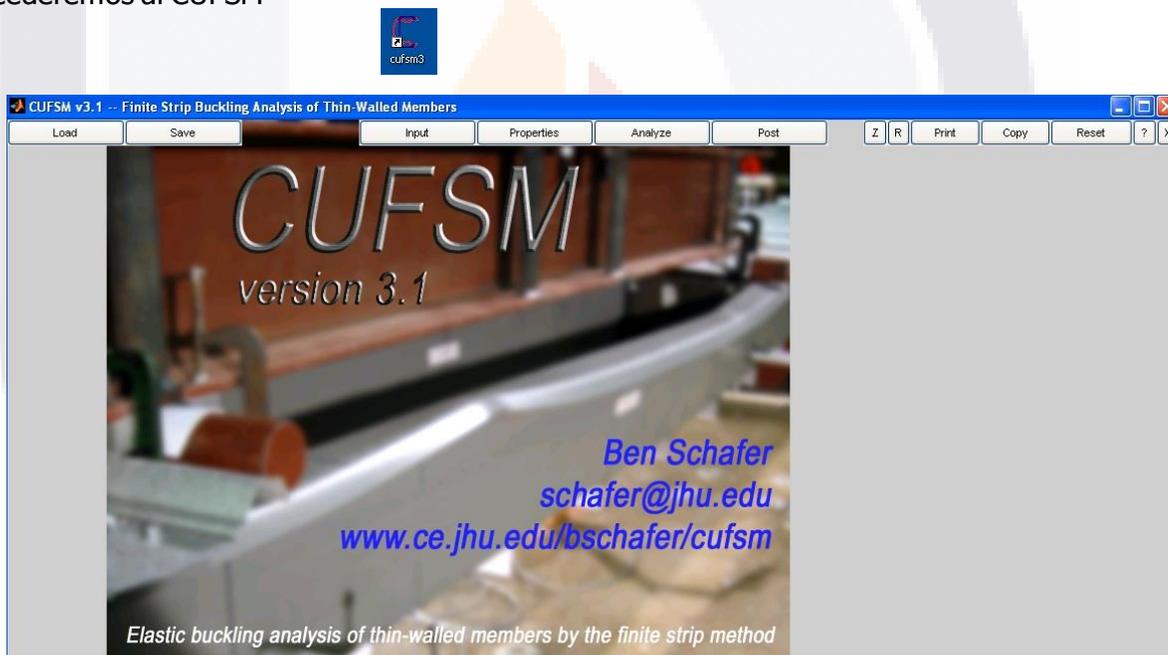
5.2 MANUAL DE OPERACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA EN UN CF, PARA MIEMBROS EN FLEXOCOMPRESION.

Para poder determinar la Resistencia se deben seguir los siguientes pasos:

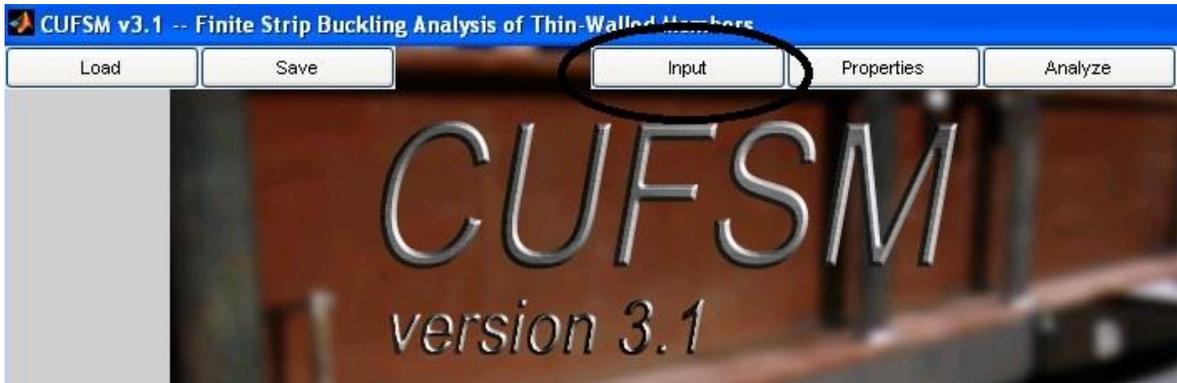
Primeramente se proporcionaran los datos geométricos del perfil en análisis, así como el acero con el que está fabricado, la longitud y el método que se utilizara para el diseño del perfil.

Obtener las propiedades de la sección bruta del Perfil, para lo cual se puede utilizar un programa de computo el cual nos también sirve de auxilio para obtener varios de los datos que se van a utilizar para el cálculo, el programa llamado CUFSM versión 3.1

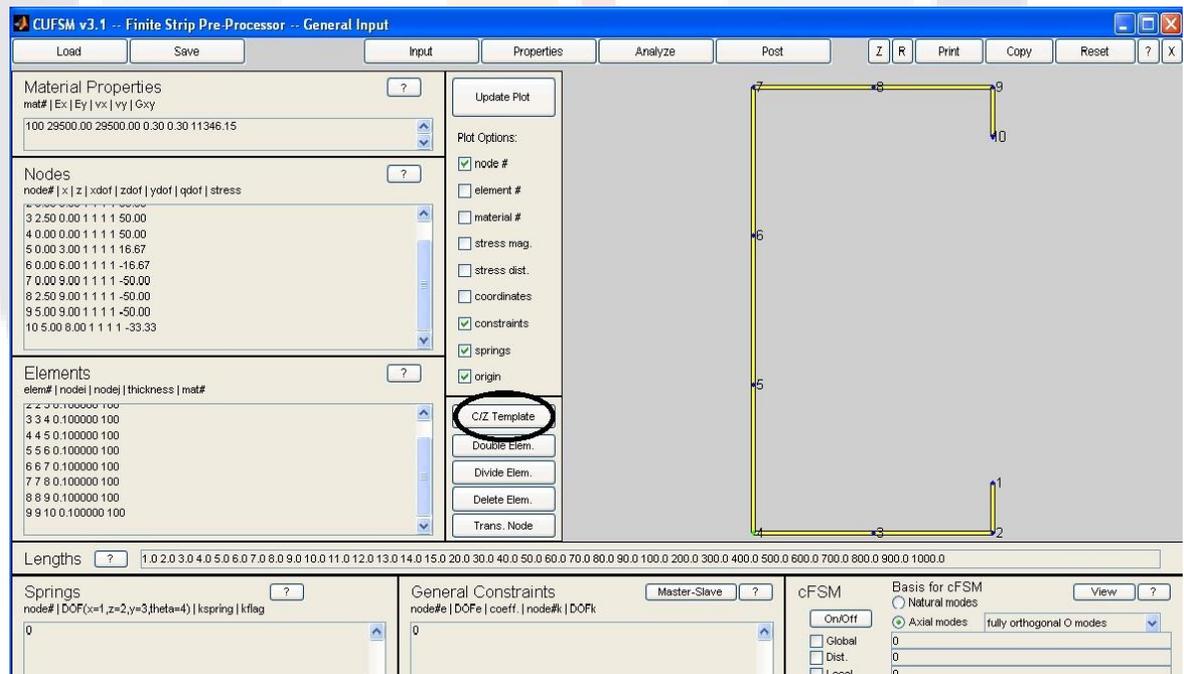
Accederemos al CUFSM



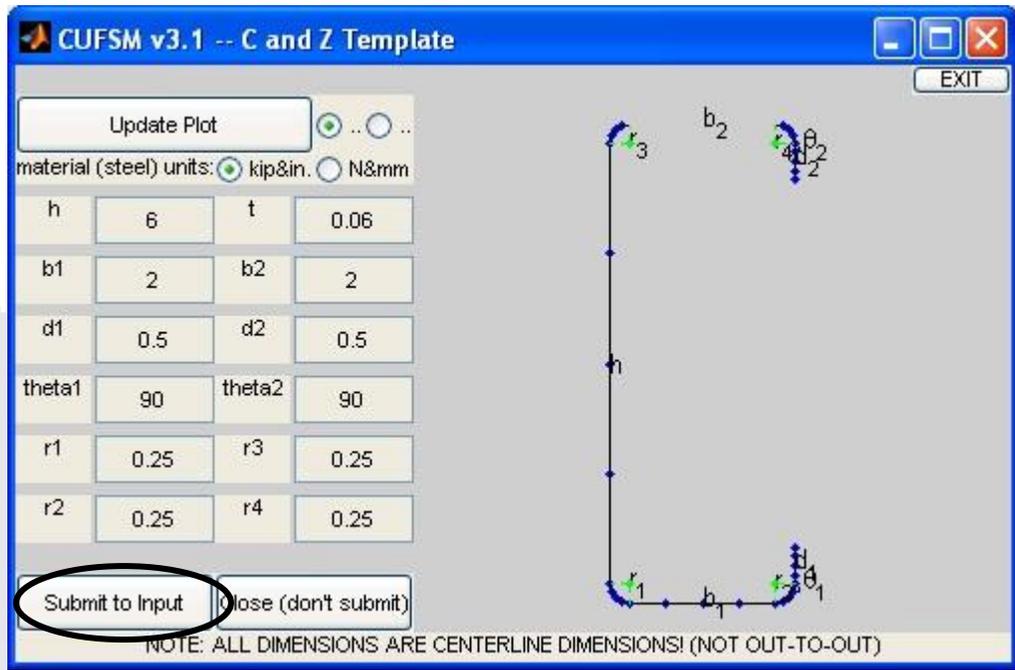
Ya ejecutado el programa se introducen con la pestaña **INPUT**



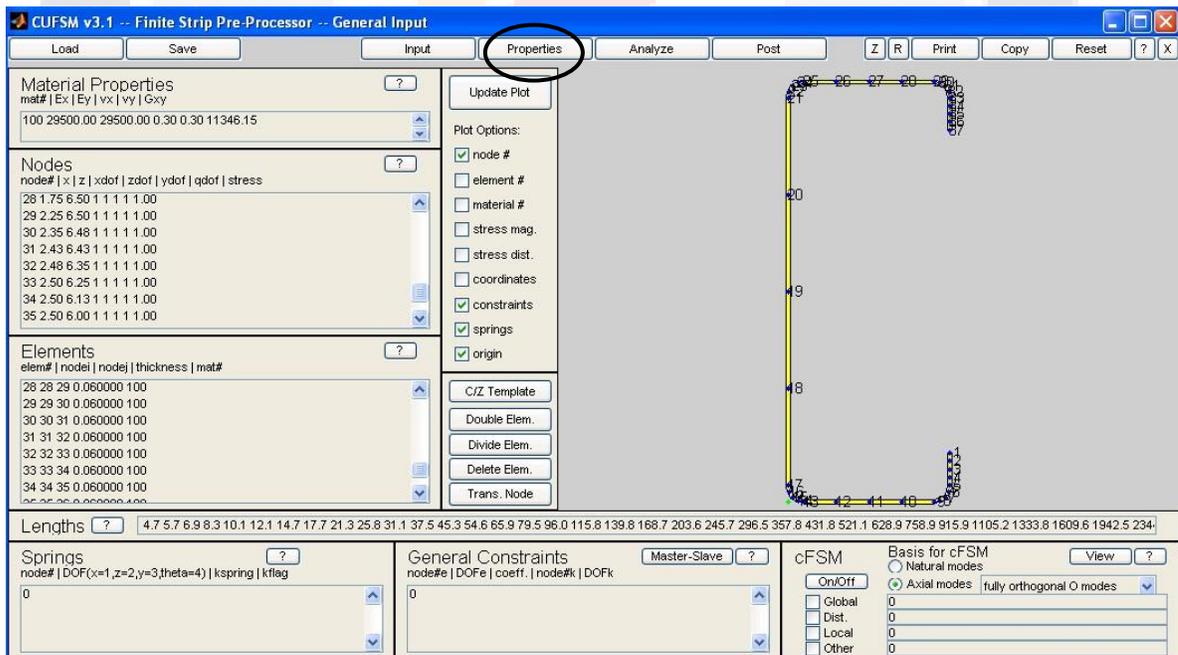
El programa mostrará la siguiente ventana y ahora se procede a entrar a la pestaña de **C/Z Template** la cual se muestra en la siguiente imagen:



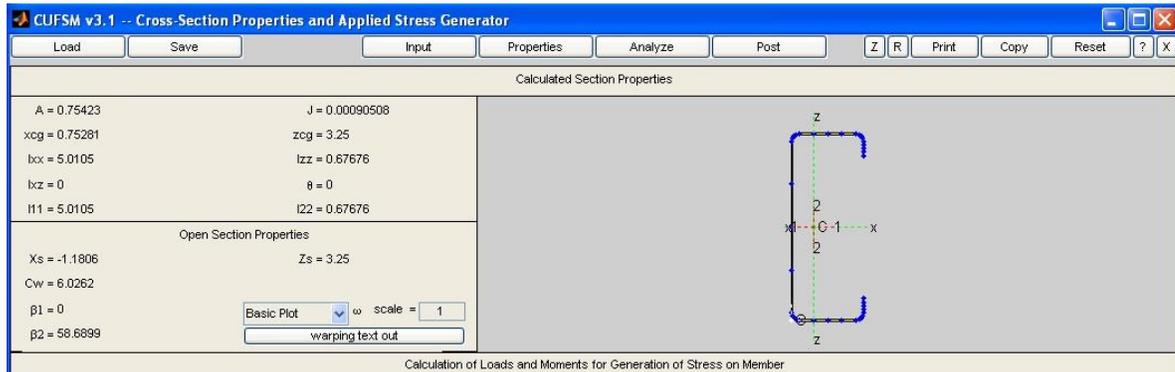
Se Incorpora la geometría del perfil que se va a utilizar y se presiona la opción **Submit to Input**.



Se entra enseguida a la pestaña de **Properties**



Y aparecerá la siguiente ventana, la cual proporcionará las propiedades de la sección.



Revisando el pandeo local del patín del perfil

Calcular el ancho plano $w = b_f - 2(R + t)$, $W = w/t$

Ecuación 124

Y basado en la ecuación Eq. B4-7

$$S = 1.28\sqrt{E/f}$$

Ecuación 125

Seleccionar el tipo de caso en base al $S/3$

Determinar el valor de n , según sea el caso

Determinar el valor de la ceja, d

$$d = a - (R + t)$$

Ecuación 126

Calcular el momento de inercia del atiesador de borde completo alrededor de su propio eje centroidal paralelo al elemento a ser atiesado

$$I_s = td^3/12$$

Ecuación 127

Se determina según el caso el momento de inercia requerido en un atiesador de borde que admite la compresión adyacente del momento a conducirse como elemento totalmente atiesado.

Para caso =1, $I_a = 0$ *Ecuación 128*

Para caso =2, $I_a = 399t^4 \left\{ \left(\frac{w}{s} \right) - \sqrt{\frac{k_u}{4}} \right\}^3 ; \quad k_u = 0.43$ *Ecuación 129*

Para caso =3, $I_a = t^4 \left\{ \left[\frac{115w}{s} \right] + 5 \right\}$ *Ecuación 130*

Calculo de $R1 = I_s/I_a \leq 1$ *Ecuación 131*

Calculo de $C_2 = \frac{I_s}{I_a}$ *Ecuación 132*

Calcular a/w
 Cálculo de k_a, k (coeficiente de pandeo), λ (factor de esbeltez)
 $k_a = 5.25 - 5 (D/w) \leq 4.0$ *Ecuación 133*

$k = C_2^n (k_a - k_u) + k_u ; \quad n = \frac{1}{2}$ *Ecuación 134*

$\lambda = 1.052(W)[f/E /k]^{1/2}$ *Ecuación 135*

$b = w$ cuando $\lambda \leq 0.673$
 $b = \rho w$ cuando $\lambda > 0.673$ Patín a compresión totalmente efectivo

Ahora analizando el atiesador de borde
 Calcularemos el ancho plano $w = b_f - 2(R + t), \quad W = w/t$ *Ecuación 136*

Según el caso elegiremos el coeficiente de pandeo (k)

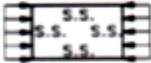
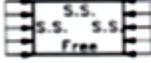
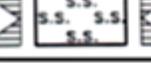
CASO	CONDICIÓN DE BORDE	TIPO DE ESFUERZO	VALORES DE k PARA EL LADO LARGO DE LA PLACA
1		COMPRESIÓN	4.0
2		COMPRESIÓN	0.425
3		CORTANTE	5.34
4		FLEXIÓN	23.9

Ilustración 54 Para el factor de esbeltez se aplica la ecuación E. B2.1-4, Eq.B2.1-5

$$\lambda = 1.052(W)[f/E/k]^{1/2}$$

Ecuación 137

$b = w$ cuando $\lambda \leq 0.673$

$b = \rho w$ cuando $\lambda > 0.673$

Calcular el borde atiesado efectivo basado en el pandeo local (d'_s) y la dimensión efectiva reducida de la ceja basada en la relación:

$$\frac{I_s}{I_a} (d_s)$$

$$d'_s = dd_s = I_s/I_a$$

Ecuación 138

Analizando el alma

Calculo del ancho plano $w = b_f - 2(R + t), \quad W = w/t$

Ecuación 139

Según el caso elegir el coeficiente de pandeo (k)

Para el factor de esbeltez se aplica la ecuación E. B2.1-4, Eq.B2.1-5

$$\lambda = 1.052(W)[f/E/k]^{1/2}$$

Ecuación 140

Calculo de:(factor de reducción-Eq. B2.1-3) y b (ancho efectivo- Eq. B2.1-2).

$$\rho = \text{Factor de reducción local} = (1 - 0.22/\lambda)/\lambda$$

Ecuación 141

$$b = w \quad \text{cuando} \quad \lambda \leq 0.673$$

$$b = \rho w \quad \text{cuando} \quad \lambda > 0.673$$

Consideraciones de estabilidad (al centro del miembro)

$$\frac{\Omega_c P}{P_n} + \frac{\Omega_b C_{mx} M_x}{M_{nx} \alpha_x} + \frac{\Omega_b C_{my} M_y}{M_{ny} \alpha_y} \leq 1.0$$

Ecuación 142

Cálculo de la resistencia nominal axial, P_n (basado en el pandeo)

5.2.1 PANDEO FLEXIONANTE

Determinar el coeficiente de pandeo efectivo.

El perfil pandeado de columna es mostrado por las líneas a rayos

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, traslación	Rotación libre, traslación	Rotación, traslación libre	Rotación libre, traslación libre		

Ilustración 55 Relación de esbeltez.

Calculando la relación de esbeltez

$$K_y L / r_y < 200$$

Calculo del esfuerzo

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

Ecuación 143

5.2.2 PANDEO TORSIONAL

Determinar el coeficiente de pandeo efectivo (K_t)

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

						
Valor técnico 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				

Ilustración 56 Relación de esbeltez.

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

Ecuación 144

5.2.3 PANDEO TORSIONAL-FLEXIONANTE

Determinar el coeficiente de pandeo efectivo (K_x)

El perfil pandeado de columna es mostrado 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, traducción				
		Rotación libre, traducción				
		Rotación, traducción libre				
		Rotación libre, traducción libre				

Ilustración 57 Relación de Esbeltez.

Calculando la relación de esbeltez

$$K_x L / r_x < 200$$

Calculando el esfuerzo

$$F_e = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 7\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right]$$

Ecuación 145

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

Ecuación 146

$$\beta = 1 - (X_o / r_o)^2$$

Ecuación 147

Para calcular el esfuerzo nominal axial al pandeo, F_n , se utiliza primeramente a la ecuación Eq. C4.1.4.

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}}$$

Ecuación 148

Después siguiendo la ecuación Eq. C4.1-2

$$\text{Para } \lambda_c \leq 1.5$$

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

Ecuación 149

De la ecuación Eq. C4.1-3

$$\text{Para } \lambda_c > 1.5$$

$$F_n = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] F_y$$

Ecuación 150

REVISIÓN DEL PANDEO LOCAL EN EL ALMA, CUANDO $f = F_n$

Calculo del ancho plano $w = b_f - 2(R + t)$,

Ecuación 151

$$W = w/t$$

Según el caso se elige el coeficiente de pandeo (k)

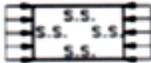
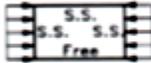
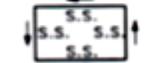
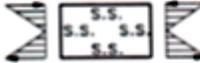
CASO	CONDICIÓN DE BORDE	TIPO DE ESFUERZO	VALORES DE k PARA EL LADO LARGO DE LA PLACA
1		COMPRESIÓN	4.0
2		COMPRESIÓN	0.425
3		CORTANTE	5.34
4		FLEXIÓN	23.9

Ilustración 58 Coeficientes de pandeo.

Para el factor de esbeltez se aplica la ecuación E. B2.1-4, Eq.B2.1-5

$$\lambda = 1.052(W)[f/E/k]^{1/2}$$

Ecuación 152

Conocido el valor del Área bruta $A_g = A_e$

Ecuación 153

Se calcula la carga resistente, $P_n = A_e F_n$

Ecuación 154

Calculo de la resistencia nominal flexionante, M_{ny}

$$M_{ny} = S_c M_c / S_f$$

Ecuación 155

Para flexión alrededor del eje centroidal perpendicular al eje de simetría para secciones simplemente, simétricas, puede ser calculada al usar la siguiente expresión:

$$M_e = \frac{C_s A \sigma_{ex}}{C_{TF}} \left[j + C_s \sqrt{j^2 + r_o^2 \frac{\sigma_t}{\sigma_{ex}}} \right]$$

Ecuación 156

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r_x)^2} \quad \text{y} \quad \sigma_t = \frac{1}{Ar_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(KL)t^2} \right]$$

Ecuación 157

Dónde:

$C_s = +1$ para el momento causando compresión en el lado centro de corte del centroide

$C_s = -1$ para el momento causando tensión en el lado centro de corte del centroide

$$C_{FT} = 0.6 - 0.4(M_1/M_2)$$

Ecuación 158

$A =$ Área de la sección transversal

$$C_{FT} = 0.6 - 0.4(M_1/M_2)$$

Ecuación 159

$$F_e = \frac{C_s A \sigma_{ex}}{C_{TF} S_f} \left[j + C_s \sqrt{j^2 + r_o^2 (\sigma_t / \sigma_{ex})} \right]$$

Ecuación 160

Ahora se calcula:

La tensión de pandeo lateral-torsional elástica o inelástica crítica, F_n

$$\text{Para, } F_e \geq 2.78 F_y \quad F_c = F_y$$

Para $2.78F_y > F_e > 0.56,$ $F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10F_y}{36F_e}\right)$

Ecuación 161

Para $F_e \leq 0.56F_y,$ $F_c = F_e$

Por lo que se procede a calcular la Resistencia Nominal Flexionante, M_{ny}

Se elegirá el método a utilizar

ASD

$$\alpha_x = 1 - \frac{\Omega_c P}{P_{Ex}}$$

$$\alpha_y = 1 - \frac{\Omega_c P}{P_{Ey}}$$

$$P_{Ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2}$$

LRFD

$$\alpha_x = 1 - \frac{P_u}{P_{Ex}}$$

$$\alpha_y = 1 - \frac{P_u}{P_{Ey}}$$

$$P_{Ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2}$$

Ecuación 162

Ecuación 163

Ecuación 164

Se calcularán α_x, α_y y P_E

Usando la ecuación de la estabilidad

$$\frac{\Omega_c P}{P_n} + \frac{\Omega_b C_{mx} M_x}{M_{nx} \alpha_x} + \frac{\Omega_b C_{my} M_y}{M_{ny} \alpha_y} \leq 1.0$$

Ecuación 165

Resolviendo la ecuación se calcula la resistencia nominal axial, P_n , basado en la formula de la estabilidad.

Consideración de resistencia utilizando la ecuación de la estabilidad

Se calculara el factor de reducción ρ

$$b = w \quad \text{cuando} \quad \lambda \leq 0.673$$

$$b = \rho w \quad \text{cuando} \quad \lambda > 0.673$$

$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right)}{\lambda} \leq 1.0$$

Ecuación 166

Se obtendrá:

$$A_e = t(b_{alma} + 4(u) + 2(d_s + b_{patin}))$$

Ecuación 167

$$P_n = A_e F_y$$

Ecuación 168

Cálculo de la resistencia nominal flexionante, M_{ny}
(basado en el inicio del límite de fluencia)

$$M_{ny} = S_{ye} F_y$$

Ecuación 169

Usando la ecuación de resistencia

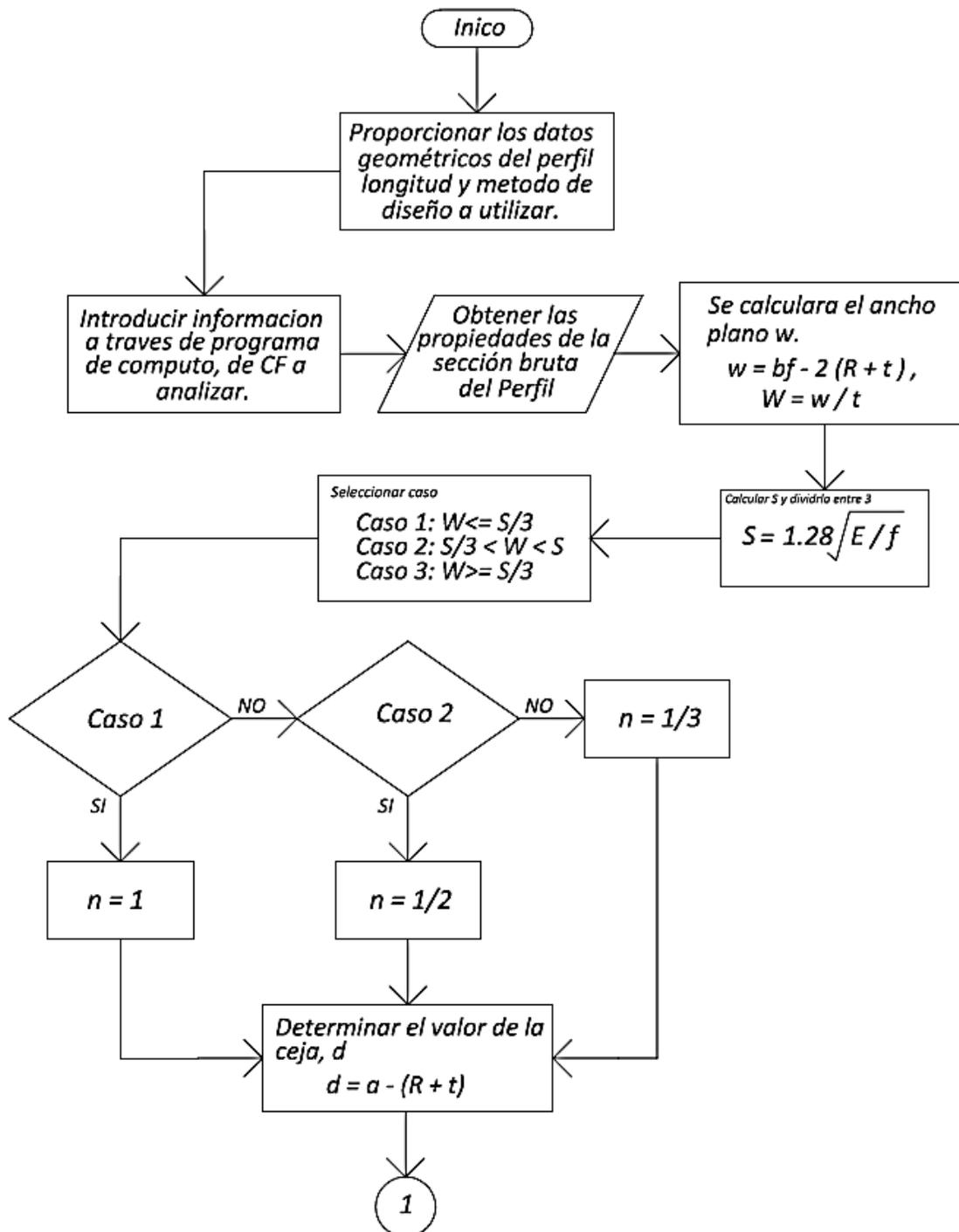
$$\frac{\Omega_c P}{P_{no}} + \frac{\Omega_b M_x}{M_{nx}} + \frac{\Omega_b M_y}{M_{ny}} \leq 1.0$$

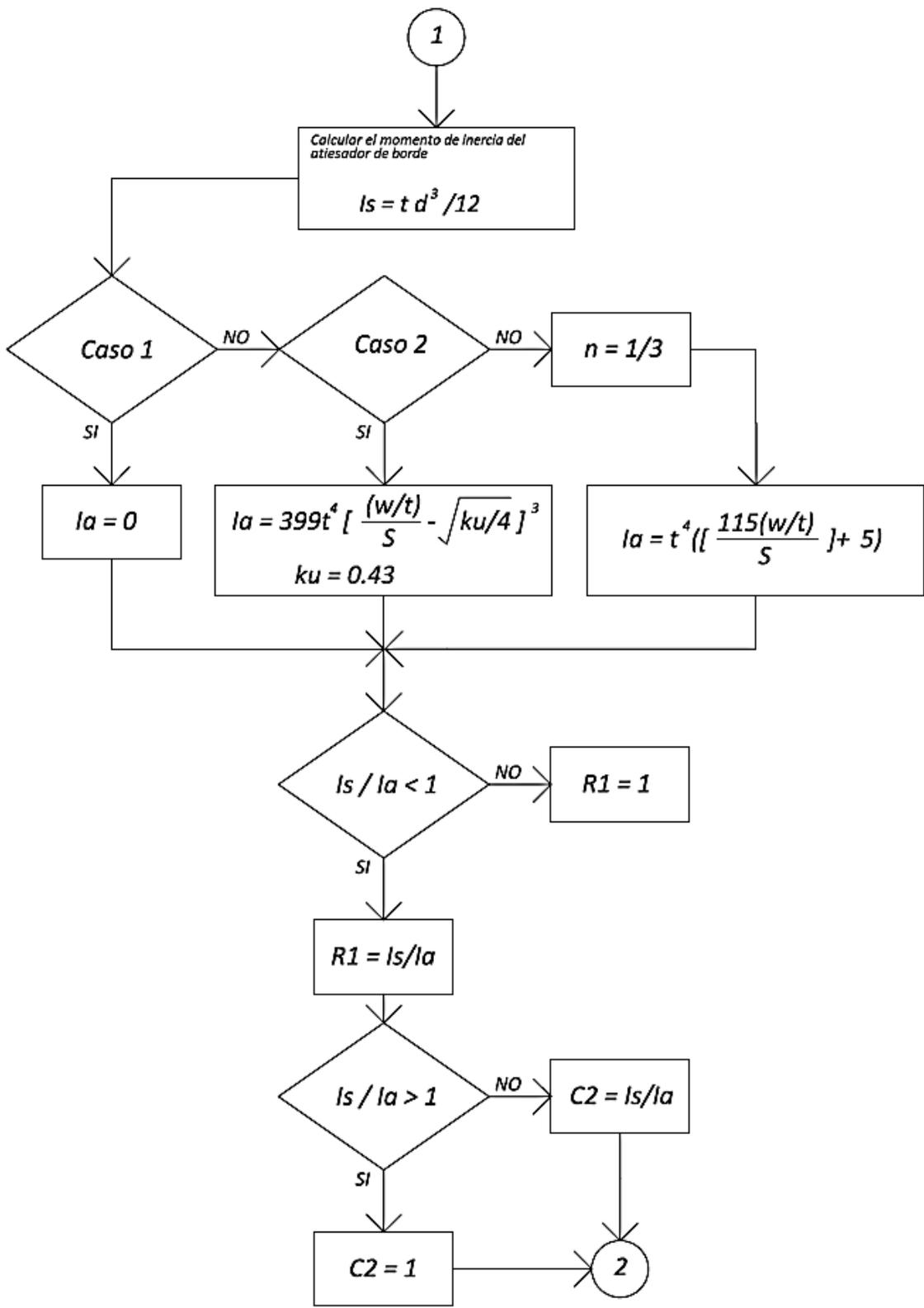
Ecuación 170

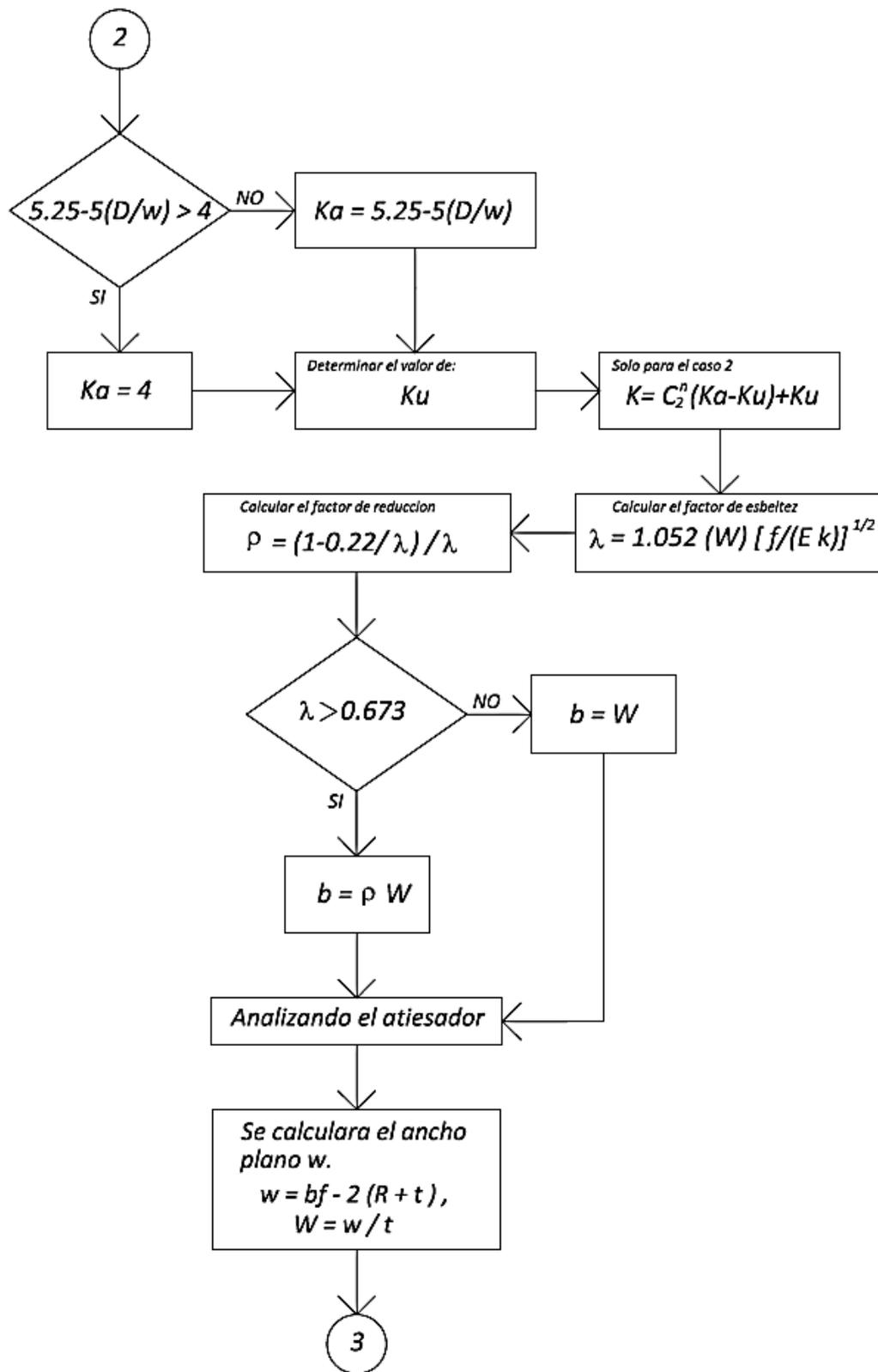
Se calcula la resistencia nominal, en base a la fórmula de la resistencia.

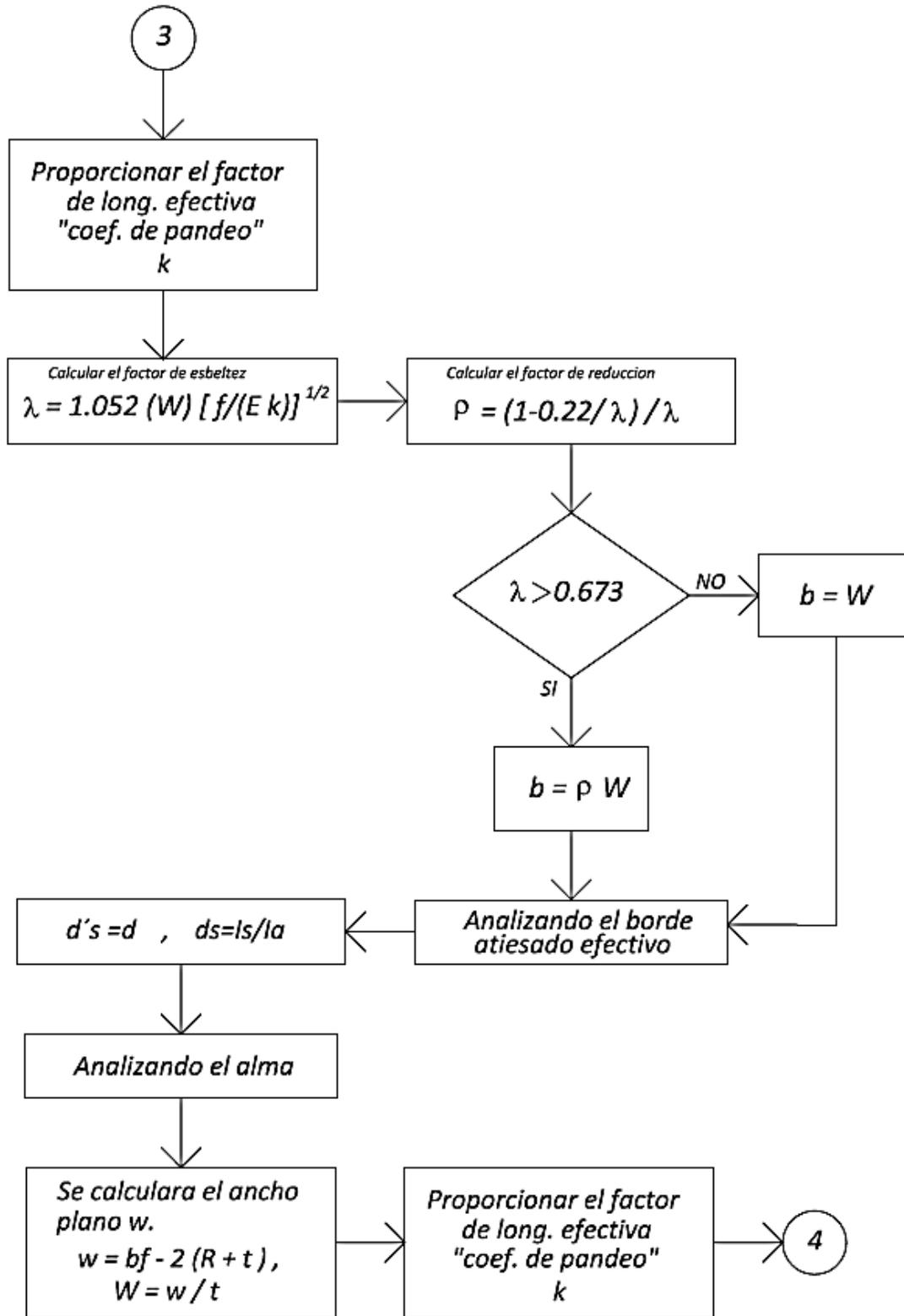
Por lo que la resistencia a compresión axial, p está determinada por la carga que se obtiene por la fórmula de la estabilidad, o la resistencia menor de ellas.

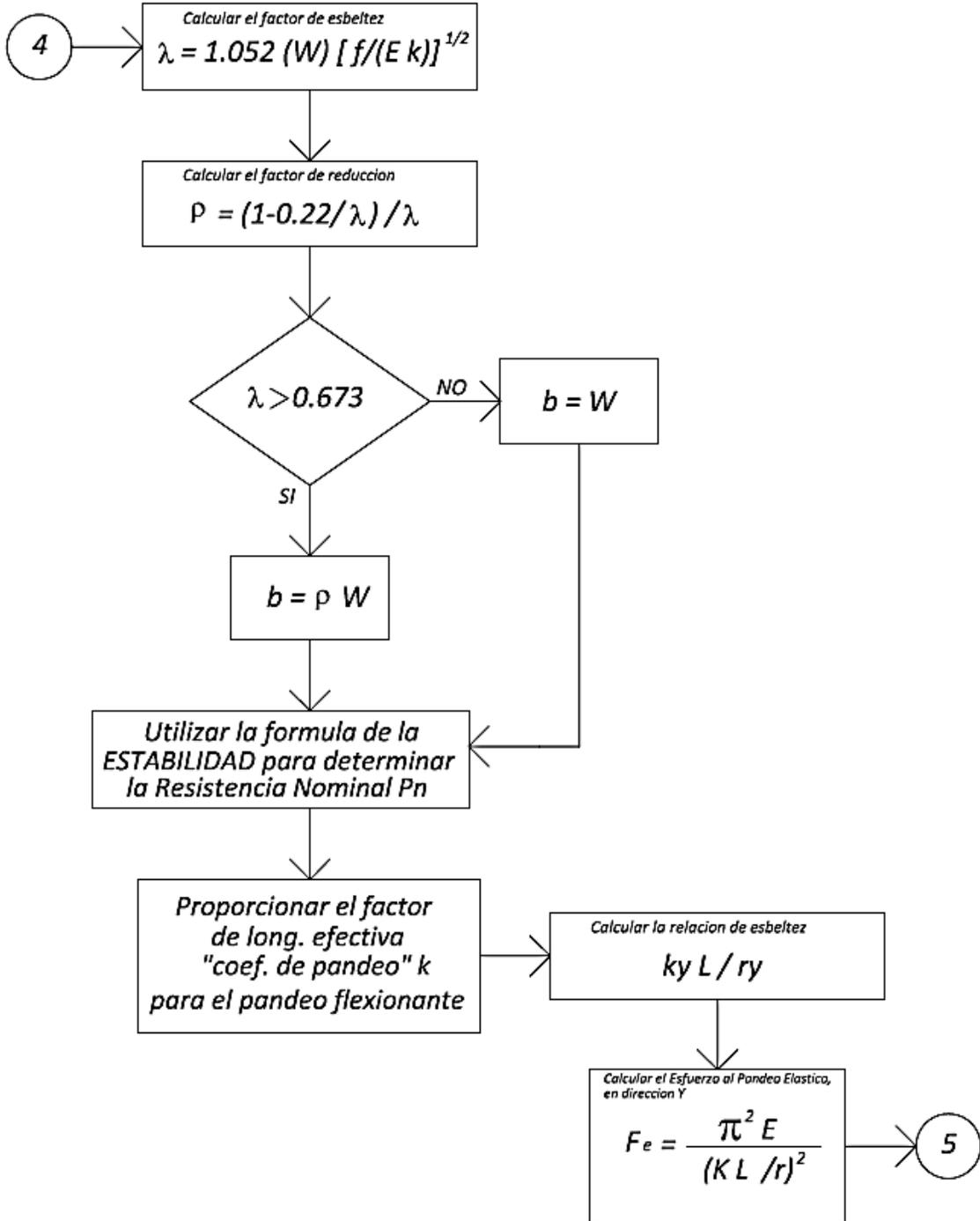
5.3 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DISEÑO DE MIEMBROS EN FLEXOCOMPRESION

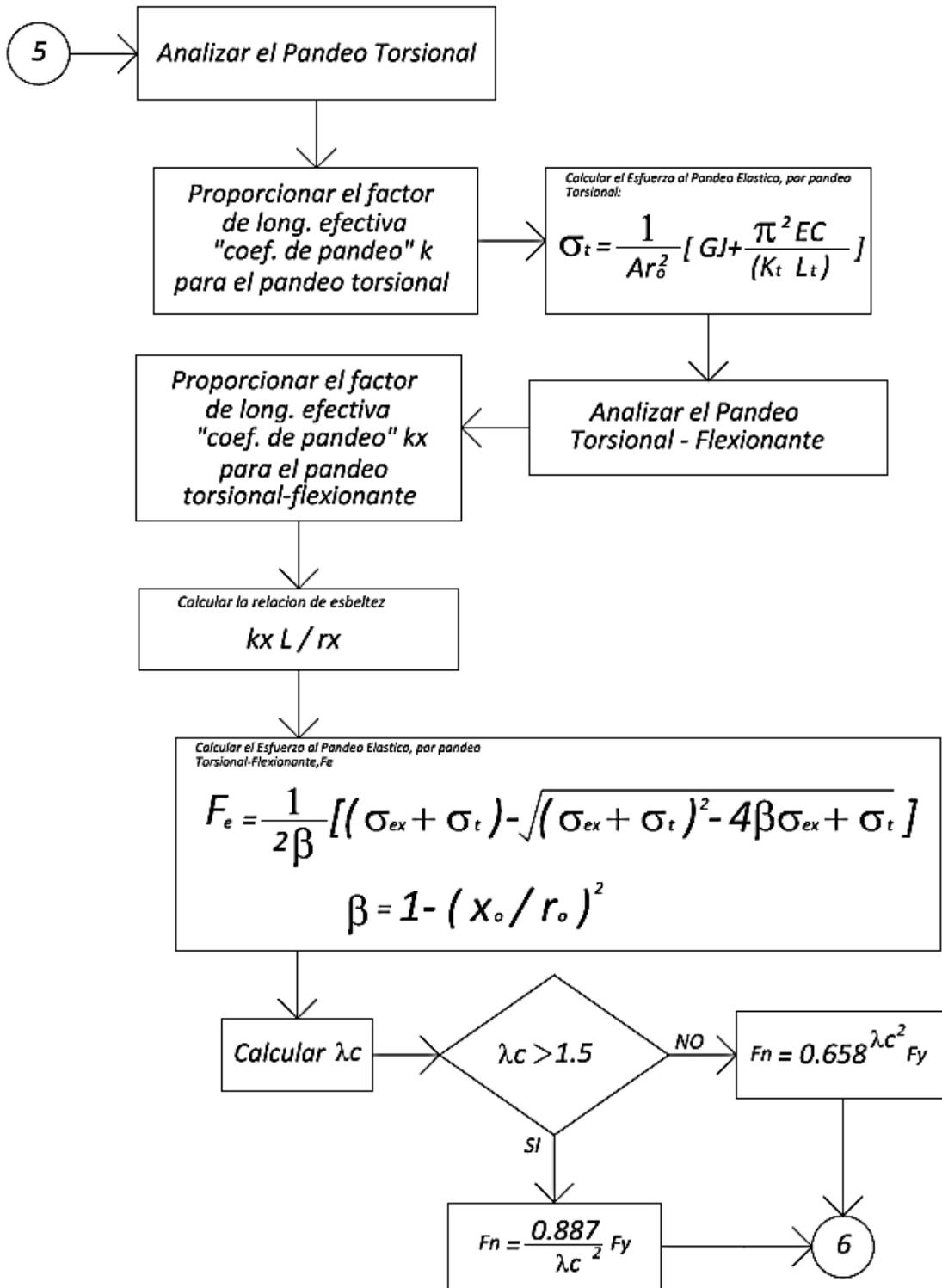


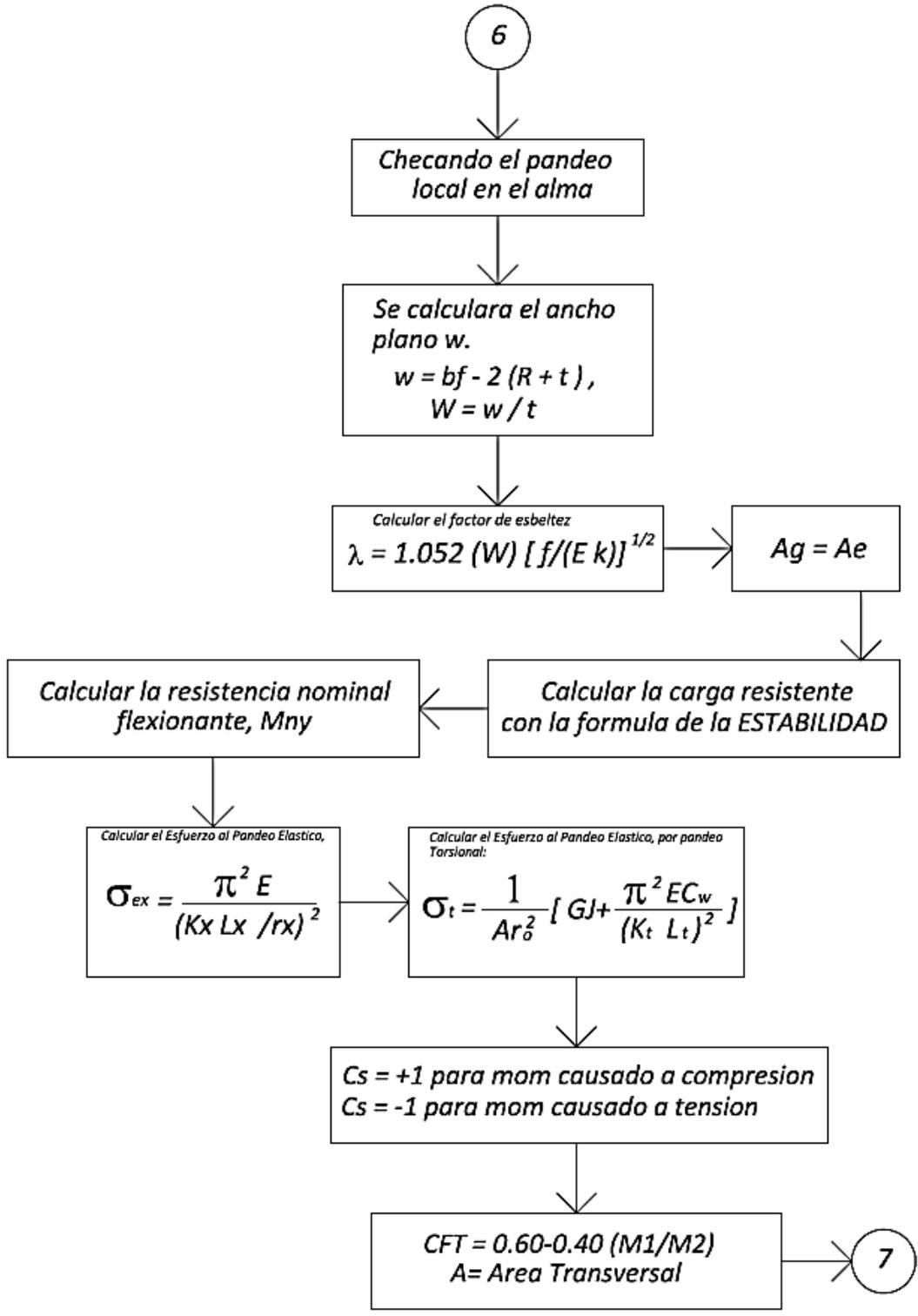


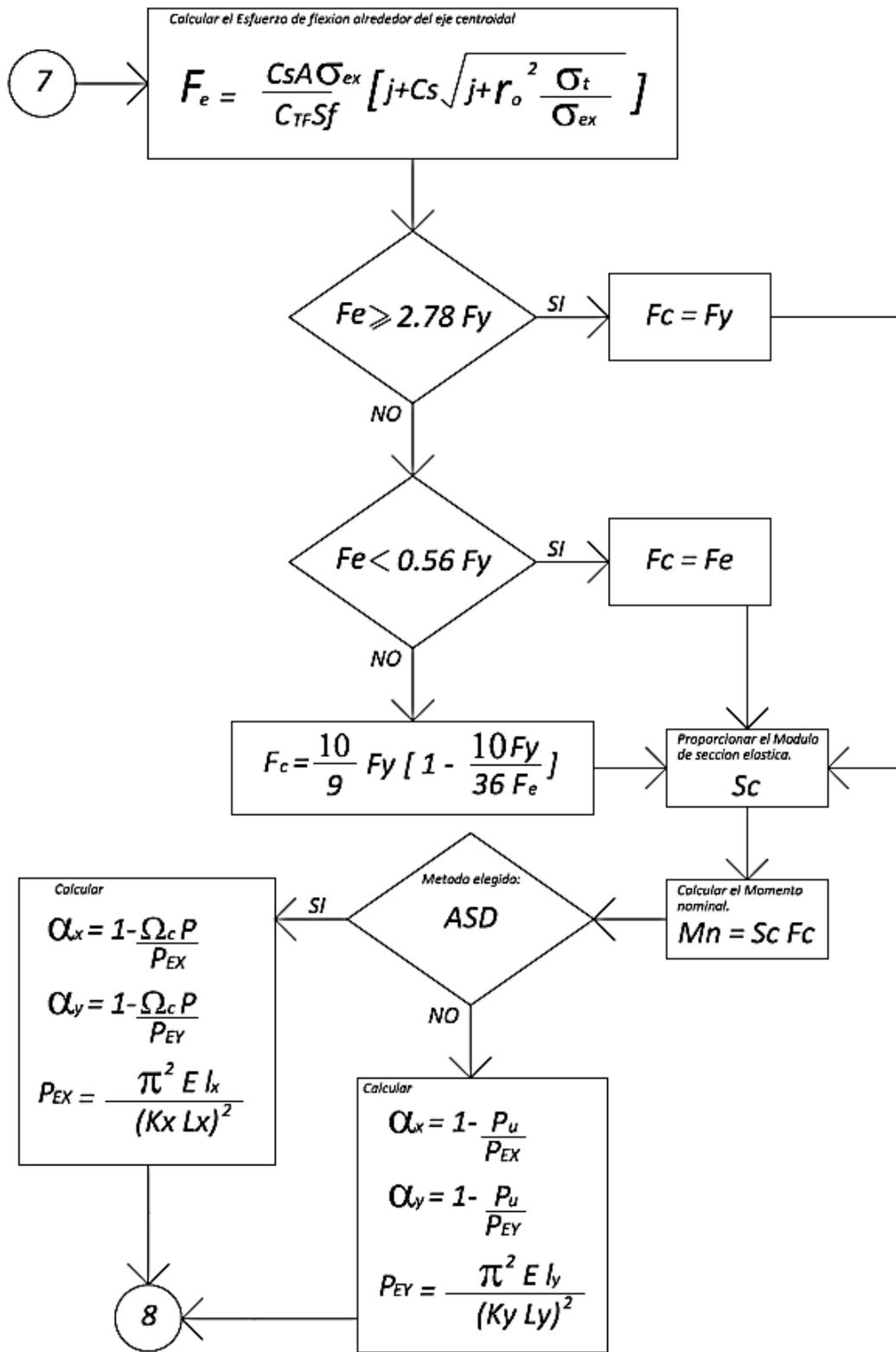


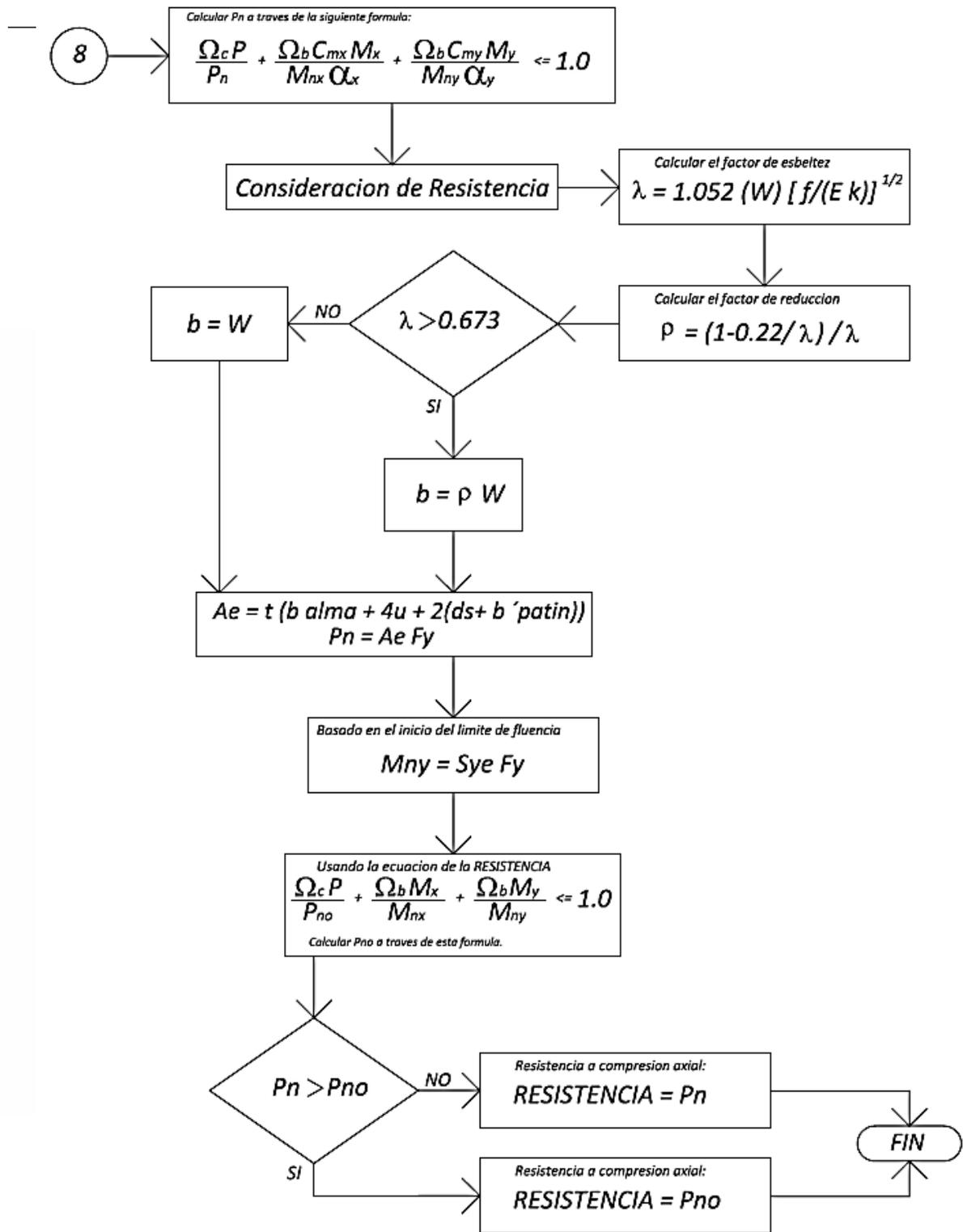












CAPÍTULO 6.- CURVA MOMENTO-ROTACION

6.1 METODO DIRECTO PARA ESTRUCTURAS DE ACERO ROLADO EN FRIO

La simple determinación de la redistribución de momentos y fuerzas en una edificación de Acero Rolado en Frio después de que uno de los miembros fallo, no podría ser completada con conocimientos simples, debido a que las secciones transversales de CFS tienen la característica típica de ser localmente esbeltas por lo que tienen una respuesta momento-rotación más compleja y menos flexible que las vigas compactas de acero rolado en caliente.

El objetivo de este estudio es proporcionar un método de predicción para la caracterización momento-rotación ($M - \theta$) de la respuesta de miembros de acero rolado en frio en flexión.

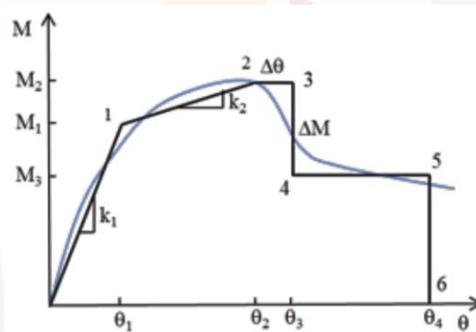


Ilustración 59 caracterización momento-rotación ($M-\theta$)

Una respuesta completa ($M - \theta$) es necesaria para análisis estructural no lineal de los marcos de edificios de Acero rolado en frio.

La información está basada en el artículo del profesor Ben Schafer el cual fue publicado en el año 2012

Para miembros de acero rolado en frio, los cuales sufren de pandeo local y distorsional; los códigos existentes proporcionan resistencias al esfuerzo máximo y aproximaciones de la pérdida de rigidez; pero no una estimación de la capacidad después del esfuerzo máximo.

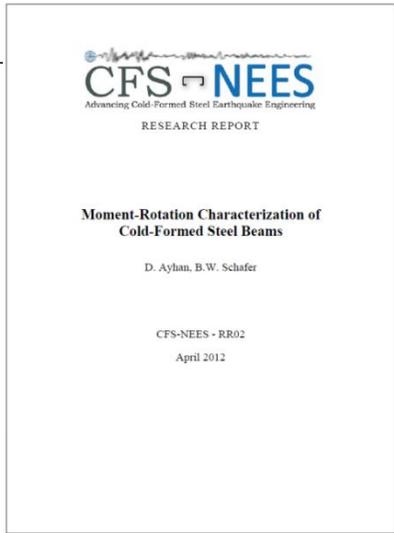


Ilustración 60 Portada artículo del profesor Ben Schafer

La información está basada en un artículo de investigación en el cual se obtuvieron datos a través de experimentos y análisis de elemento finito, los cuales se procesan para examinar la respuesta completa ($M - \theta$) de vigas de acero rolado en frío

ASCE 41-06: Seismic Rehabilitation of Existing Buildings

A New Tool for Achieving Seismic Safety

By Chris D. Poland, S.E., F. SEAOC

Earthquakes wreak havoc on our lives, our businesses and our communities. For the last 140 plus years, scientists and engineers have been working to understand where they can occur and how to best mitigate their effects. What started as a concern centered along the West Coast has become known as a real threat that affects the vast majority of states in the United States. Thanks to the work of the United States Geological Survey, we now have a science-based understanding of earthquake hazards nationwide, which has become the source for national earthquake hazard maps.

For over 50 years, engineers have focused on protecting lives and the vitality of our



Ilustración 61 ASCE41

Los investigadores de este artículo hacen referencia a un documento llamado ASCE41

6.1.1 ¿Qué es ASCE41?

Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, es una combinación de dos documentos denominados por sus siglas en ingles FEMA.

6.1.2 FEMA 356: Technical Requirements for Seismic Rehabilitation of Buildings

6.1.3 FEMA 274: NEHRP Commentary on the Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings

6.1.3.1 ¿PARA QUÉ ES USADO ASCE 41?

Para mejorar el desempeño sísmico de cualquier estructura existente

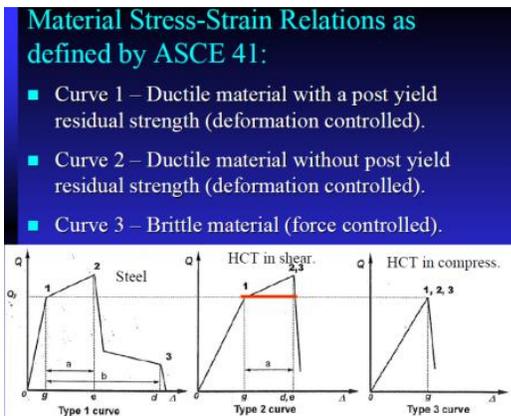


Ilustración 62 Curvas ASCE 41

Los investigadores del artículo se basaron en las curvas contenidas aquí para compararlas con sus resultados

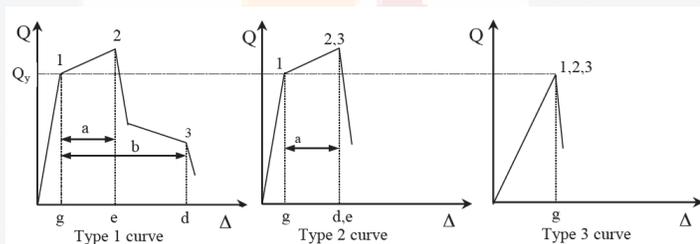


Ilustración 63 Curvas de componente fuerza-deformación de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles

ASCE41 no incluye predicciones explícitas para CFS; la curva tipo 1 asume un rango elástico seguido de un rango plástico que incluye un esfuerzo por endurecimiento después de un rango de fuerza degradada del punto máximo.

Esto es modificado por los miembros de CFS, el cual en vez de esto tienen un rango antes del punto máximo completamente efectivo "elástico". El rango del punto máximo parcialmente efectivo es seguido por un pico (momento) que es típicamente menos que el momento de punto de fluencia del material de la viga y después seguido de un rango de fuerza degradada antes del punto máximo.

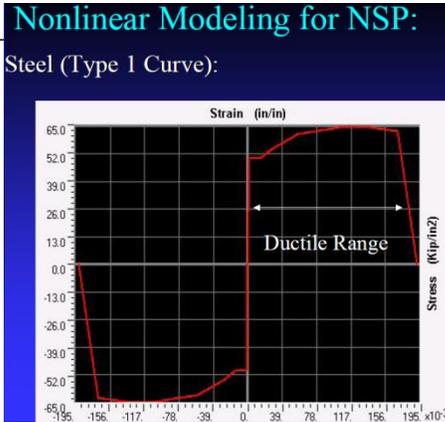


Ilustración 64 Imagen obtenida de Software de Análisis y Diseño Estructural SAP2000

Usando una modificación del modelo simplificado contenido en ASCE41 para análisis pushover, la respuesta ($M - \theta$) es parametrizada en una curva simple multi-linear

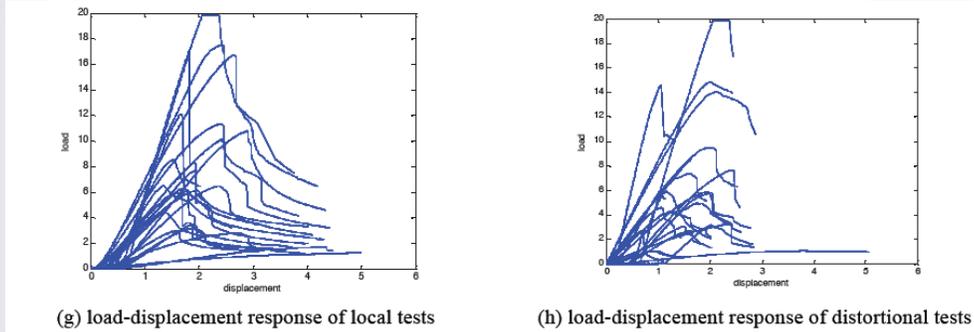


Ilustración 65 Pruebas de pandeo local y distorsional de Yu y Schafer

6.1.4 ¿QUÉ ES UNA CURVA MOMENTO ROTACIÓN?

Es el ángulo de rotación entre dos secciones planas.

La curvatura en cualquier etapa dada está controlada por la distribución de esfuerzos, ya que los esfuerzos reflejan el movimiento rotacional de las secciones planas antes y después de la flexión.

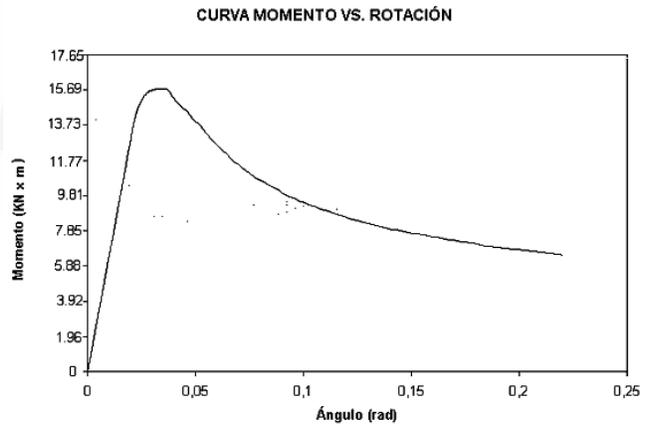


Ilustración 66 Curva Momento Vs. Rotación

6.1.5 DATOS PARA OBTENER CURVA MOMENTO-ROTACION PARA PANDEO LOCAL Y DISTORSIONAL EN ESTRUCTURAS DE ACERO ROLADO EN FRIO.

De acuerdo a los experimentos realizados por Yu y Schafer (2003, 2006 y 2007) y los resultados del análisis de elemento finito (2010), se llega a la respuesta para obtener momento-rotación para vigas de acero rolado en frío.

El problema de optimización de áreas bajo la curva resultado de cientos de pruebas de laboratorio que usaron Yu y Schafer para llegar a modelos aceptables de respuesta fue resuelto programando rutinas de MATLAB

MATLAB (abreviatura de MATRIX LABORATORY, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un lenguaje de programación propio.

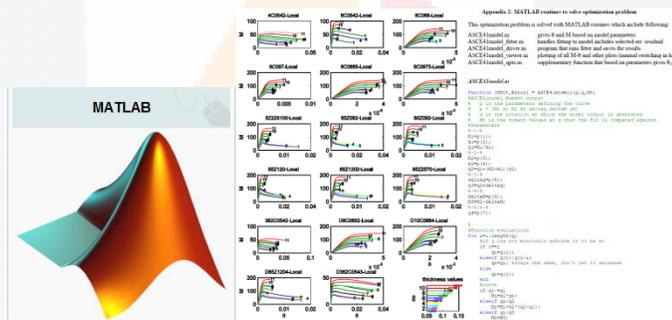


Ilustración 67 Abreviatura de MATRIX LABORATORY, laboratorio de matrices.

Los parámetros que se necesitan para caracterizar el momento-rotación de acero rolado en frío responden a través de la curva tipo 1 fueron variadas de tal manera que el área bajo la curva de acero rolado en frío experimental fue igual al área bajo la curva de la curva modelada, esto fue completado en dos piezas: la energía antes de la cumbre de la curva y la energía después de la cumbre de la curva, el error considerado fue calculado como la suma de los cuadrados de la diferencia del área antes de la cumbre de la curva, y la diferencia del área bajo la curva después de la cumbre; este problema de optimización es resuelto con rutinas del MATLAB.

Los errores residuales son generalmente menos del 1×10^{-10} y los ejercicios de ajuste fueron exitosos, el punto clave en seleccionar de los tres modelos de momento-rotación obtenidos son la figura de la curva y su habilidad en representar apropiadamente el comportamiento del Acero Rolado en Frio.

Las formulas usadas en este estudio no son las mismas que en las de ASCE41 (2007), pero las figuras de las curvas dirigidas de $(M - \theta)$ son similares a las de tipo 1 de ASCE41. Las fórmulas que se muestran a continuación son utilizadas en los programas de MATLAB para ajustar la información.

Los parámetros del modelo seleccionado son definidos en un vector lineal como se muestra a continuación.

$$p = [M_1 k_1 M_2 k_2 \Delta M \theta_4]$$

Ecuación 171

Dónde:

M_1 es el momento elástico

k_1 es la rigidez elástica

M_2 es el momento máximo de la curva

k_2 es la segunda rigidez entre el punto elástico y el punto máximo

$\Delta\theta$ es el paso de rotación después del punto máximo

θM es el momento de caída después del punto máximo

θ_4 es la rotación máxima donde la curva de $M - \theta$ termina.

Las rotaciones son definidas por los parámetros del modelo seleccionado como se muestra a continuación: (D. Ayhan, 2012)

$$\theta_1 = \frac{M_1}{k_1}$$

Ecuación 172

$$\theta_2 = \theta_1 + \frac{M_2 - M_1}{k_2}$$

Ecuación 173

$$\theta_3 = \theta_2 + \Delta\theta$$

Ecuación 174

$$\theta_1 > 0 \text{ y } \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4$$

$$M_1 > 0 \text{ y } M_2 > M_1 \text{ y } M_3 < M_2 \text{ y } M_3 > 0$$

6.1.6 LOS PRIMEROS MODELOS EXPERIMENTALES

(D. Ayhan, 2012)

Modelo 1: meseta después del pico y caída de fuerza

Model 1: post-peak plateau and strength drop

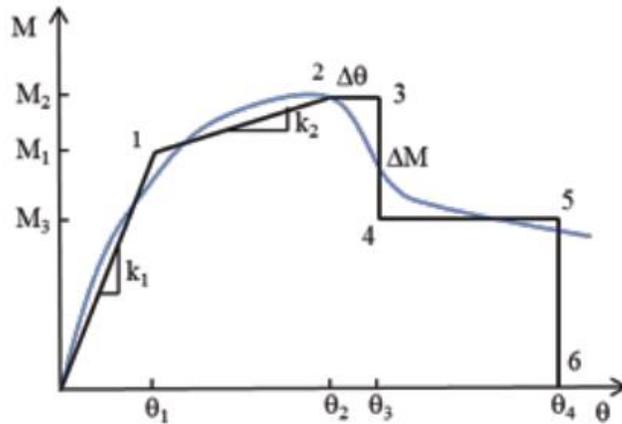


Ilustración 68 Modelo 1: meseta después del pico y caída de fuerza.

Modelo 2: meseta después del pico y pérdida de rigidez

Model 2: post-peak plateau and stiffness loss

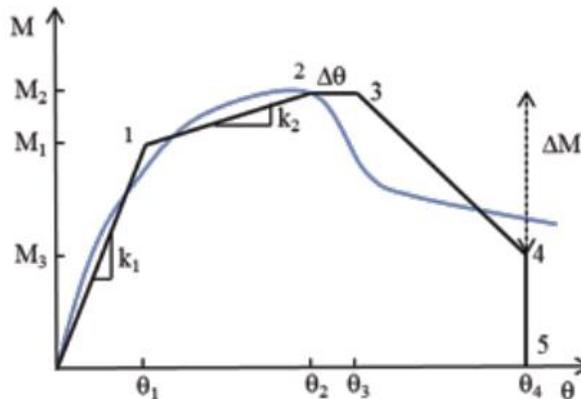


Figure 10: Model 2 backbone curve

Ilustración 69 Modelo 2: meseta después del pico y pérdida de rigidez.

Modelo 1ª: pérdida de rigidez bilineal después del pico o cumbre de la curva (D. Ayhan, 2012) *Model 1a: post-peak bilinear stiffness loss*

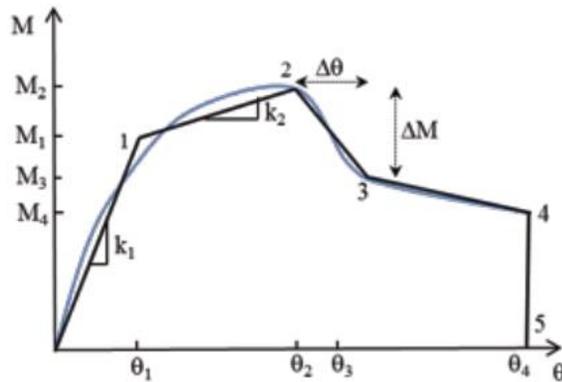


Ilustración 70 Modelo 1ª: pérdida de rigidez bilineal después del pico o cumbre de la curva. (D. Ayhan, 2012)

Los modelos multi-lineales parecidos al ASCE 41 fueron ajustados separadamente a la información generada de las pruebas de Yu y Schafer (2003 y 2006) y los modelos de elementos finitos de Shifferaw y Schafer (2010), varios ajustes fueron realizados ya sea minimizando sumas de cuadrados, denominado el ajuste completo o ajustando solo k_2 , $\Delta\theta$ y θM (D. Ayhan, 2012)

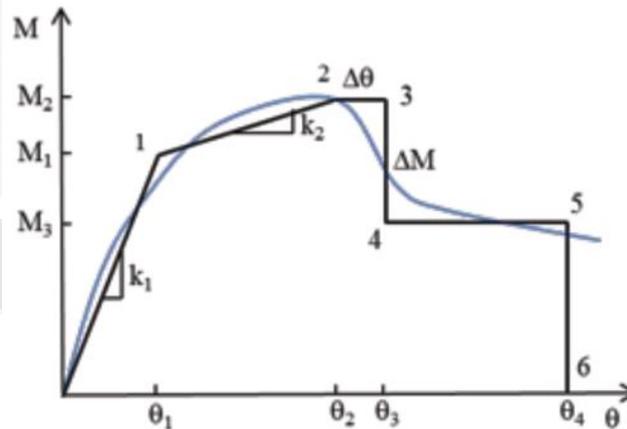


Ilustración 71 modelo (M-θ).

Finalmente un método de diseño sistemático para predecir los parámetros del modelo ($M - \theta$) de la curva de la columna como se muestra en la figura anterior, aplicable a todas las vigas de Acero Rolado en frio cayendo ya sea en un pandeo local o distorsional.

Del modelo mostrado se derivan las siguientes expresiones

(D. Ayhan, 2012)

Tabla: Expresiones de diseño para pandeo local

Local	
	$\lambda_t = \sqrt{\frac{M_y}{M_{cr,t}}}$
rotations	$\frac{\theta_1}{\theta_y} = \frac{M_1}{k_1 \theta_y} = \frac{M_1}{k_e \theta_y} = \frac{M_1}{M_y}$ (note, M_1 given below)
	$\frac{\theta_2}{\theta_y} = \frac{1}{\lambda_t} \leq \frac{M_2}{k_e}$
	$\theta_3 = \theta_2 + \Delta\theta$, where $\Delta\theta$ is:
	$\frac{\Delta\theta}{\theta_y} = \begin{cases} \left(\frac{0.776}{\lambda_t}\right) - 1 & \text{if } \lambda_t < 0.776 \\ 0 & \text{if } \lambda_t \geq 0.776 \end{cases}$
	$\frac{\theta_4}{\theta_y} = \begin{cases} 1.5 \frac{1}{\lambda_t} & \text{if } \lambda_t > 1 \\ 1.5 \left(\frac{1}{\lambda_t}\right)^{1/\lambda_t} & \text{if } \lambda_t \leq 1 \end{cases}$
moments	$\frac{M_1}{M_y} = \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_t < 0.650 \\ \left(\frac{0.650}{\lambda_t}\right)^2 & \text{if } \lambda_t \geq 0.650 \end{cases} \leq \frac{M_2}{M_y}$
	$\frac{M_2}{M_y} = \frac{M_{nt}}{M_y}$ where M_{nt} is per AISI-S100, i.e.:
	$\frac{M_2}{M_y} = \begin{cases} 1 + \left(1 - \frac{1}{C_{yt}^2}\right) \frac{(M_p - M_y)}{M_y} \text{ and } C_{yt} = \sqrt{\frac{0.776}{\lambda_t}} \leq 3 & \text{if } \lambda_t < 0.776 \\ \left(1 - 0.15 \left(\frac{1}{\lambda_t^2}\right)^{0.4}\right) \left(\frac{1}{\lambda_t^2}\right)^{0.4} & \text{if } \lambda_t \geq 0.776 \end{cases}$
	$M_3 = M_2 - \Delta M$, where ΔM is:
	$\frac{\Delta M}{M_2} = 1 - 1 / \left(\frac{\lambda_t}{0.776} + 1\right)^{1.1} \leq 0.5$

Ancillary expressions useful for defining the complete curve include

$$k_2 = \frac{M_2 - M_1}{\theta_2 - \theta_1}$$

Datos requeridos para el cálculo (Imagen herramienta informática)

PANDEO LOCAL		
(panel simple de 9mm)		
Proporcione los siguientes datos:		
$M_y =$	34.43	VER COMO OBTENER M_y
$M_{cr1} =$	63.00	VER COMO OBTENER M_{cr1}
$k_1 = k_e =$	8011.22	
$M_y / M_{cr1} =$	0.55	
$M_p / M_y =$	1.00	VER COMO OBTENER M_p/M_y
$M_p =$	34.43	
Rotaciones		
$\theta_1 = \frac{M_1}{k_1}$	$\Theta_1 = 0.003322$	(pag. 13)
$\theta_2 = \frac{1}{\lambda_4} M_y$	$\Theta_2 = 1.3528$	VERIFICAR (pag. 28)

PANDEO DISTORSIONAL		
(panel simple de 9mm)		
Proporcione los siguientes datos:		
$M_y =$	34.43	VER COMO OBTENER M_y
$M_{crd} =$	59.21	VER COMO OBTENER M_{crd}
$k_1 = k_e =$	8011.22	"Rigidez Elastica" (pag. 20)
$M_y / M_{crd} =$	0.58	VER COMO OBTENER M_y/M_{crd}
$M_p / M_y =$	1.00	
$M_p =$	34.43	
Rotaciones		
$\theta_1 = \frac{M_1}{k_1}$	$\Theta_1 = 0.00266$	(pag. 13)
$\theta_2 = \left(\frac{1}{\lambda_4}\right)^{1.4}$	$\Theta_2/\Theta_y = 1.4617$	(pag. 28)

Rotaciones			
$\theta_1 = \frac{M_1}{k_1}$	$\Theta_1 =$	0.00266	(pag. 13)
$\theta_2 = \left(\frac{1}{\lambda_4}\right)^{1.4}$	$\Theta_2/\Theta_y =$	1.4617	(pag. 28)
$(\theta_y = M_y k_1 \text{ or } M_y k_e)$	$\Theta_y =$	0.00430	(pag. 20)
$\Theta_2 =$	0.0063		
$\frac{\Delta\theta}{\theta_y} = \begin{cases} \left(\frac{0.673}{\lambda_4}\right) - 1 & \text{if } \lambda_4 < 0.673 \\ 0 & \text{if } \lambda_4 \geq 0.673 \end{cases}$	$\Delta\Theta/\Theta_y =$	0.00000	(pag. 28)
"Paso de rotación después del punto máximo"			$\Delta\Theta = 0.0000$
$\theta_3 = \theta_2 + \Delta\theta$	$\Theta_3 =$	0.006281	(pag. 28)
$\frac{\theta_4}{\theta_y} = \begin{cases} 1.5 \left(\frac{1}{\lambda_4}\right)^{1.4} & \text{if } \lambda_4 > 1 \\ 1.5 \left(\frac{1}{\lambda_4}\right)^{1.4} & \text{if } \lambda_4 \leq 1 \end{cases}$	$\Theta_4/\Theta_y =$	2.4678	(pag. 28)
	$\Theta_4 =$	0.010605	

Ilustración 72 Cálculo de rotaciones para perfiles del prototipo de vivienda.

6.1.7 ¿QUÉ ES M_y y M_{crl} ?

El M_y significa Moment yield y es el momento máximo de fluencia que resiste el material antes de sufrir una deformación permanente (Ley Hooke)

M_{crl} es el momento crítico de pandeo es decir el momento máximo que resiste la pieza antes de sufrir una falla de pandeo ya sea del tipo local, distorsional o global.

¿Cómo se obtuvieron los datos para calcular los momentos máximos y las rotaciones?

Haciendo uso de un software libre llamado CUFSM 3.1 (Elastic Buckling Analysis of Thin-Walled Members using the classical finite strip method) una evolución de las rutinas en MATLAB cuyo autor es Ben Schafer



Ilustración 73 Imagen del CUFSM 3.1 (Elastic Buckling Analysis of Thin-Walled Members)

6.1.8 ¿QUÉ ES CUFSM?

Software para explorar el comportamiento de pandeo elástico.

CUFSM calcula esfuerzo de pandeo y la forma arbitraria de pandeo, de paredes delgadas simplemente apoyadas.

Fue escrito originalmente para apoyar la investigación sobre el comportamiento y el diseño de los miembros de acero rolado en frío con una variedad de diferentes tipos de atiesadores longitudinales.

Es distribuido y está disponible gratuitamente. Permite a todos los modos de pandeo elástico de una estructura a ser cuantificado y examinado.

Para determinar los insumos tales como PCR y MCR para el método de fuerza directa de diseño

6.1.9 ¿CUÁLES SON M_{cr} y PCR?

Con el uso del software podemos obtener el momento pandeo elástico y la carga de pandeo elástico.

Son datos de entrada en el método de resistencia directa.

CUFSM analiza los perfiles mediante Banda finita, este proceso es una versión especializada del método del elemento finito.

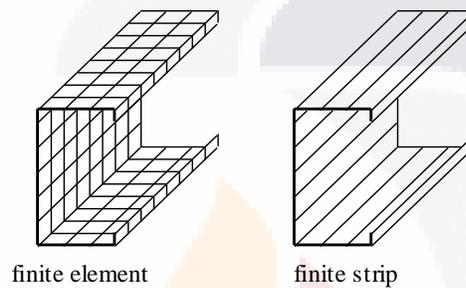


Ilustración 74 Imagen: Elemento Finito y Banda Finita (Manual CUFSM, disponible en página de internet)

La curva de pandeo es el principal resultado de un análisis de banda finita.

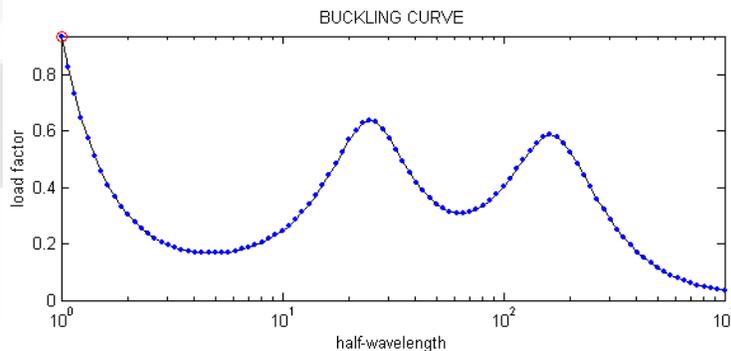


Ilustración 75 Curva de pandeo.

Los mínimos de esta curva son de especial interés como lo indica la media-longitud de onda fundamental y factor de carga para un modo dado de pandeo.

El modo de pandeo es la forma en que un miembro se pandea o se flambea en, por ejemplo mostrado aquí es el modo de pandeo local de una C en flexión.

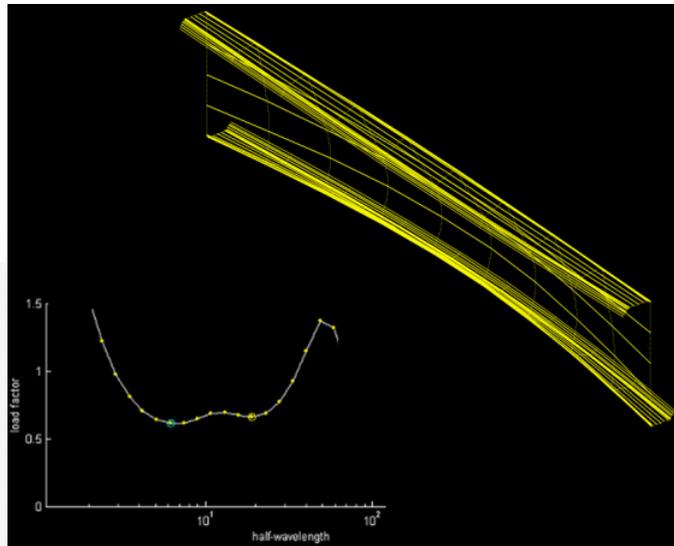


Ilustración 76 Mitad de una onda sinusoidal (LaBoube R, 2011)

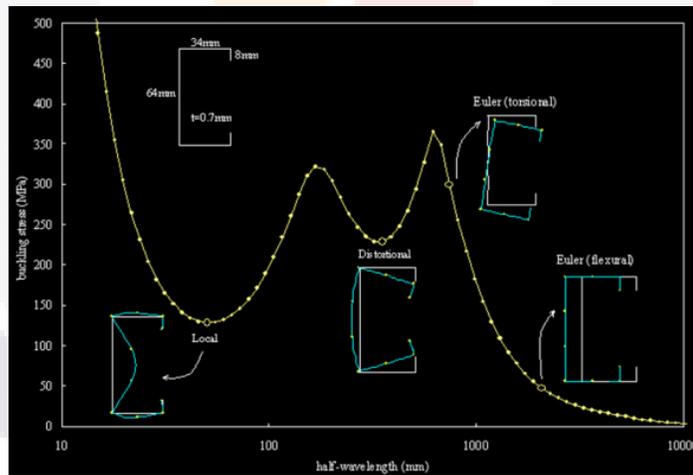
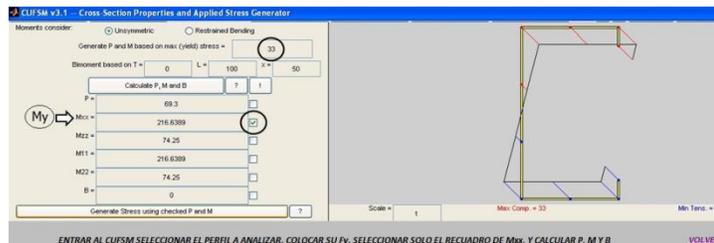
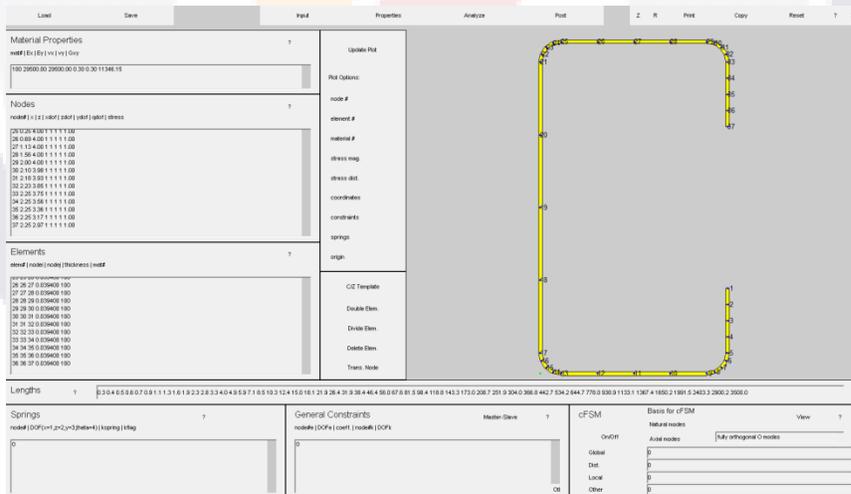
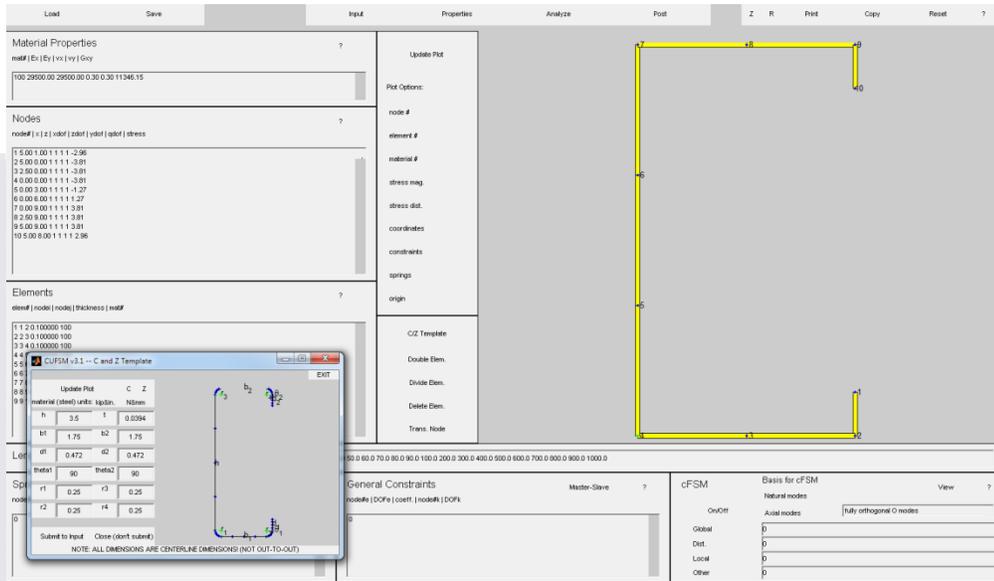


Ilustración 77 Mitad de la longitud de una onda sinusoidal (LaBoube R, 2011)

El método de la banda finita asume deformación longitudinal se produce en la mitad de una onda sinusoidal.

El análisis se realiza para aumentar sistemáticamente medias longitudes de onda para determinar el comportamiento de pandeo (forma del modo y el factor de carga) de un miembro

Imágenes software libre CUFSM 3.1



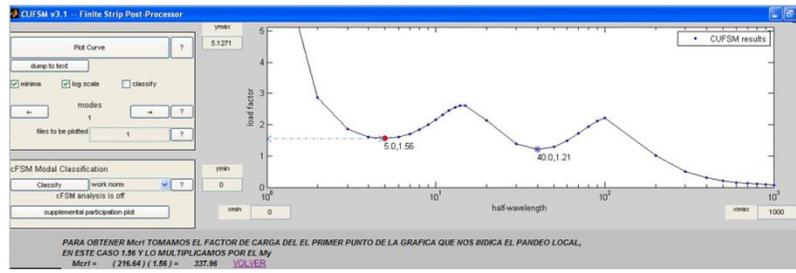


Ilustración 78 Imágenes software libre CUFSM 3.1

Nota: media-longitud de onda no es estrictamente igual a la longitud no soportada, ya que cualquier modo identificado se puede repetir varias veces dentro de una determinada longitud no arriostrada

6.1.10 ¿CÓMO SE OBTUVO EL VALOR DE LA RIGIDEZ ELÁSTICA k_e ?

Se obtuvo en laboratorio probando perfiles en diferentes condiciones de rigidez



- 1.- con panel de yeso de 9mm
- 2.- con panel de yeso de 12mm
- 3.- con panel de yeso simple

Rotaciones			
$\theta_1 = \frac{M_1}{k_1}$	$\Theta_1 =$	0.00266	(pag. 13)
$\theta_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ \lambda_d \end{pmatrix}^{14}$	$\Theta_2/\Theta_1 =$	1.4617	(pag. 28)
$(\theta_y = M_y k_1 \text{ or } M_y k_e)$	$\Theta_y =$	0.00430	(pag. 20)
$\Theta_2 =$		0.0063	
$\theta_x = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0.673 \\ \lambda_d \end{pmatrix} & \text{if } \lambda_d < 0.673 \\ 0 & \text{if } \lambda_d \geq 0.673 \end{cases}$	$\Delta\theta/\Theta_y =$	0.00000	(pag. 28)
"Paso de rotación después del punto máximo"		$\Delta\theta =$	
$\theta_3 = \theta_2 + \Delta\theta$	$\Theta_3 =$	0.006281	(pag. 28)
$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 \\ \lambda_d \end{pmatrix}^{14} & \text{if } \lambda_d > 1 \\ \begin{pmatrix} 1 \\ \lambda_d \end{pmatrix}^{20} & \text{if } \lambda_d \leq 1 \end{cases}$	$\Theta_d/\Theta_y =$	2.4678	(pag. 28)
	$\Theta_2 =$	0.010605	
Esbeltez	$\lambda_d =$	0.7625	
$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{cr}}}$			
Coefficientes de placa "k"	$k_2 =$	2984.5783	(pag. 28)
$k_2 = \frac{M_1 - M_2}{\theta_1 - \theta_2}$			
	$1/\lambda_d =$	1.3115	(pag. 28)
	$C_{ed} =$	0.9395	(pag. 28)

Imagen de herramienta Informática para el cálculo de Curva momento-rotación Pandeo local o distorsional

Momentos			
$M_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_d < 0.600 \\ \begin{pmatrix} 0.600 \\ \lambda_d \end{pmatrix} & \text{if } \lambda_d \geq 0.600 \end{cases}$	$\frac{M_1}{M_2} =$	0.6192	CORRECTO
$M_1 =$	21.32	"Momento elastico"	
$\frac{M_2}{M_1} = \begin{cases} 1 + \left(1 - \frac{1}{C_{ed}^2}\right) \frac{(M_p - M_1)}{M_y} & \text{and } C_{ed} = \sqrt{\frac{0.673}{\lambda_d}} \leq 3 \text{ if } \lambda_d < 0.673 \\ \left(1 - 0.22\left(\frac{1}{\lambda_d^2}\right)^{0.5}\right) \left(\frac{1}{\lambda_d^2}\right)^{0.5} & \text{if } \lambda_d \geq 0.673 \end{cases}$			
		$M_2/M_1 =$	0.9331 (pag. 28)
$M_2 =$	32.12	"Momento pico"	
$\frac{\Delta M}{M_2} = 1 - 1/\left(\frac{\lambda_d}{0.673} + 1\right)^{14} \leq 0.5$		$\Delta M/M_2 =$	0.5000 (pag. 28)
$\Delta M =$	16.0608		
$M_3 = M_2 - \Delta M$		$M_3 =$	16.0608 (pag. 28)

6.1.11 MOMENTO CURVA-ROTACION (PANDEO LOCAL)

	θ	M
0	0.0000	0.0000
1	0.0033	26.6166
2	0.0058	34.4251
3	0.0060	34.4251
4	0.0060	17.2126

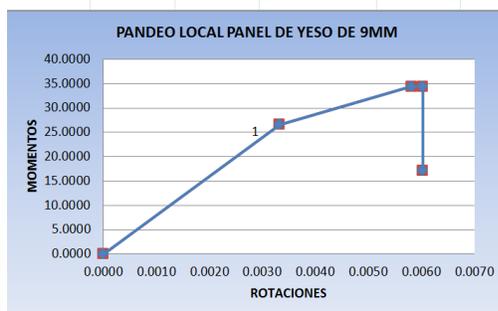


Ilustración 79 MOMENTO CURVA-ROTACION (PANDEO LOCAL).

6.1.12 MOMENTO CURVA-ROTACION (PANDEO DISTORSIONAL)

	θ	M
0	0.0000	0.0000
1	0.0027	21.3160
2	0.0063	32.1216
3	0.0063	32.1216
4	0.0063	16.0608

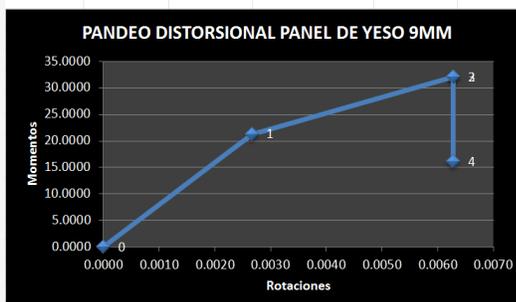


Ilustración 80 MOMENTO CURVA-ROTACION (PANDEO DISTORSIONAL)

6.1.13 ¿CUÁL ES LA FINALIDAD DE OBTENER ESTOS DATOS?

Proporcionar datos en referentes a la rigidez real al modelo en computadora

Para realizar un análisis Push-down (Deformación en apoyo)

Con la finalidad de observar mecanismos de falla plástica que dan paso a grandes deformaciones

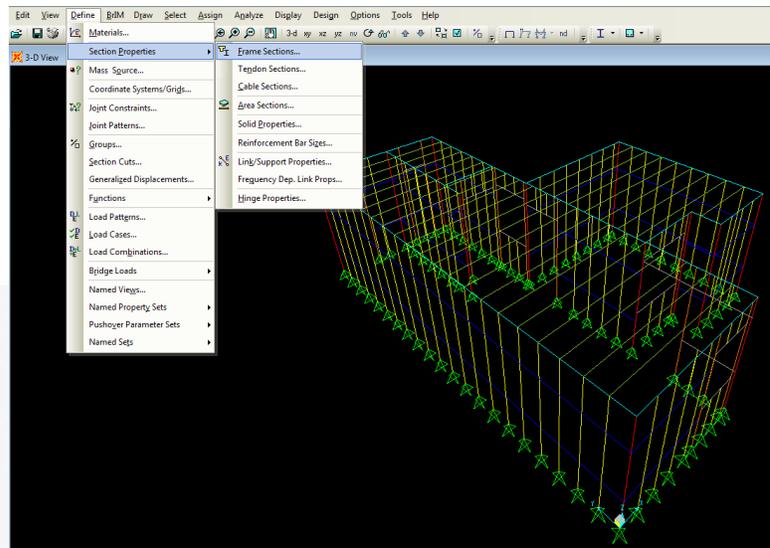


Ilustración 81 Imágenes de modelo en computadora software sap2000

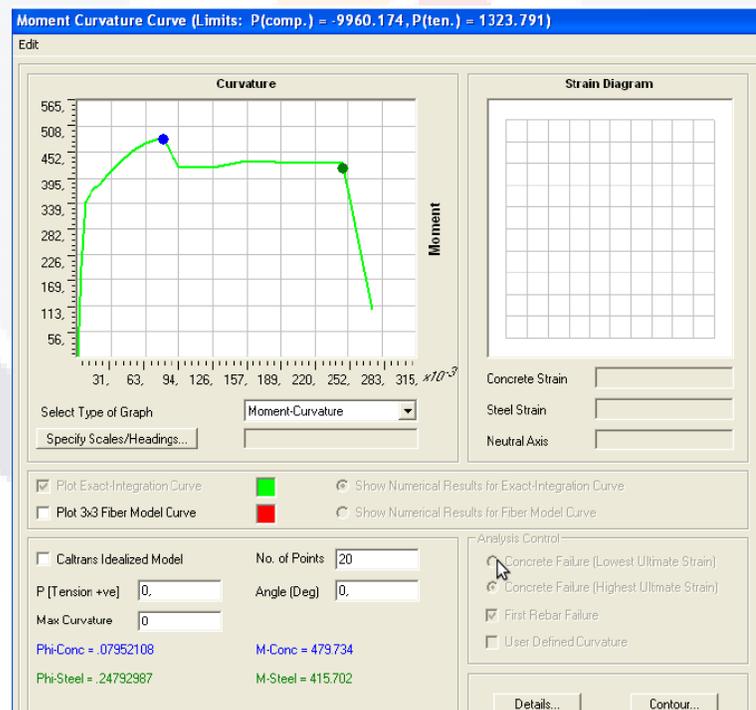


Ilustración 82 simulación de las deformaciones en los apoyos del modelo Es una simulación de las deformaciones en los apoyos del modelo de análisis para simular un asentamiento diferencial provocado por subsidencia.

Curva momento-rotacion

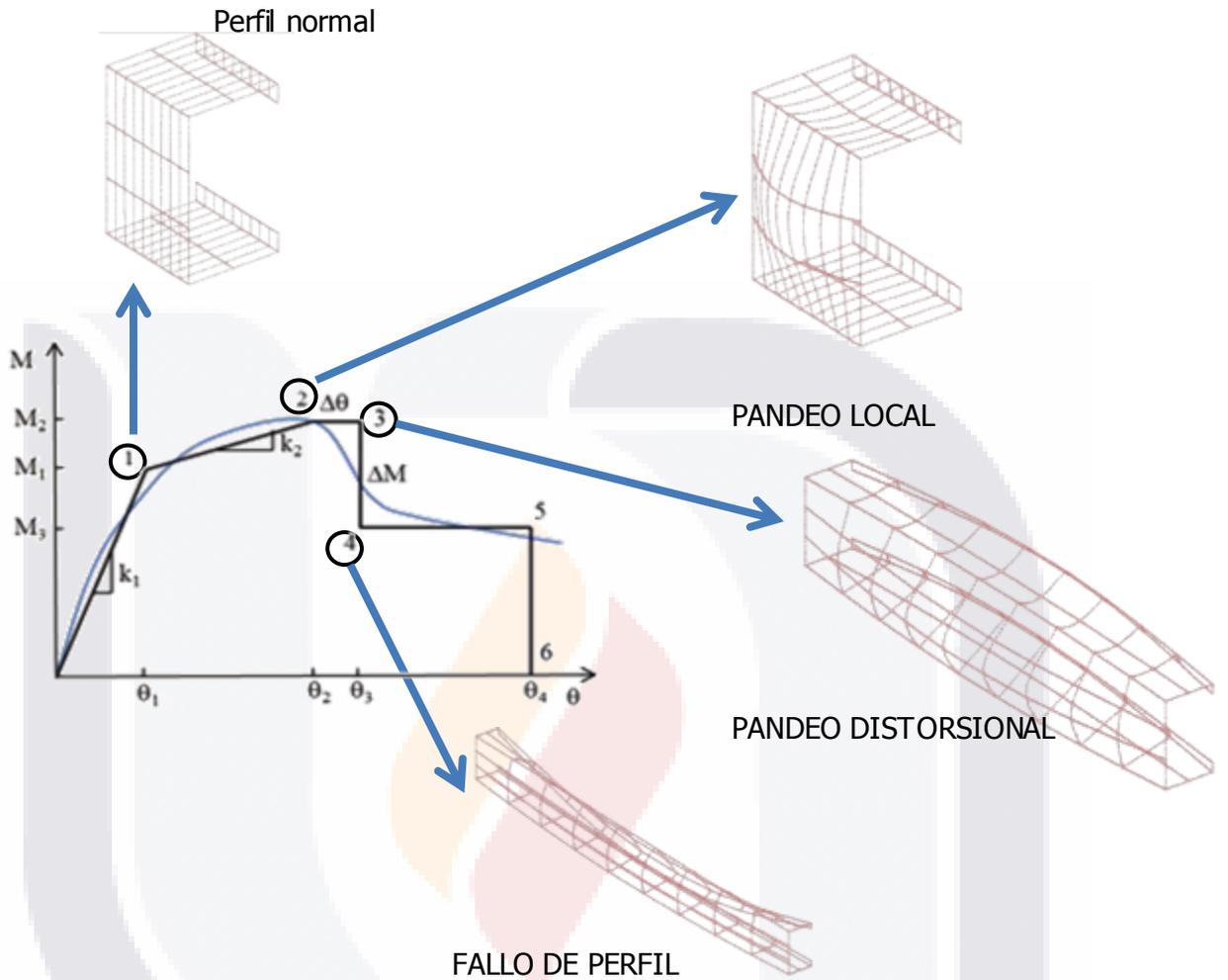
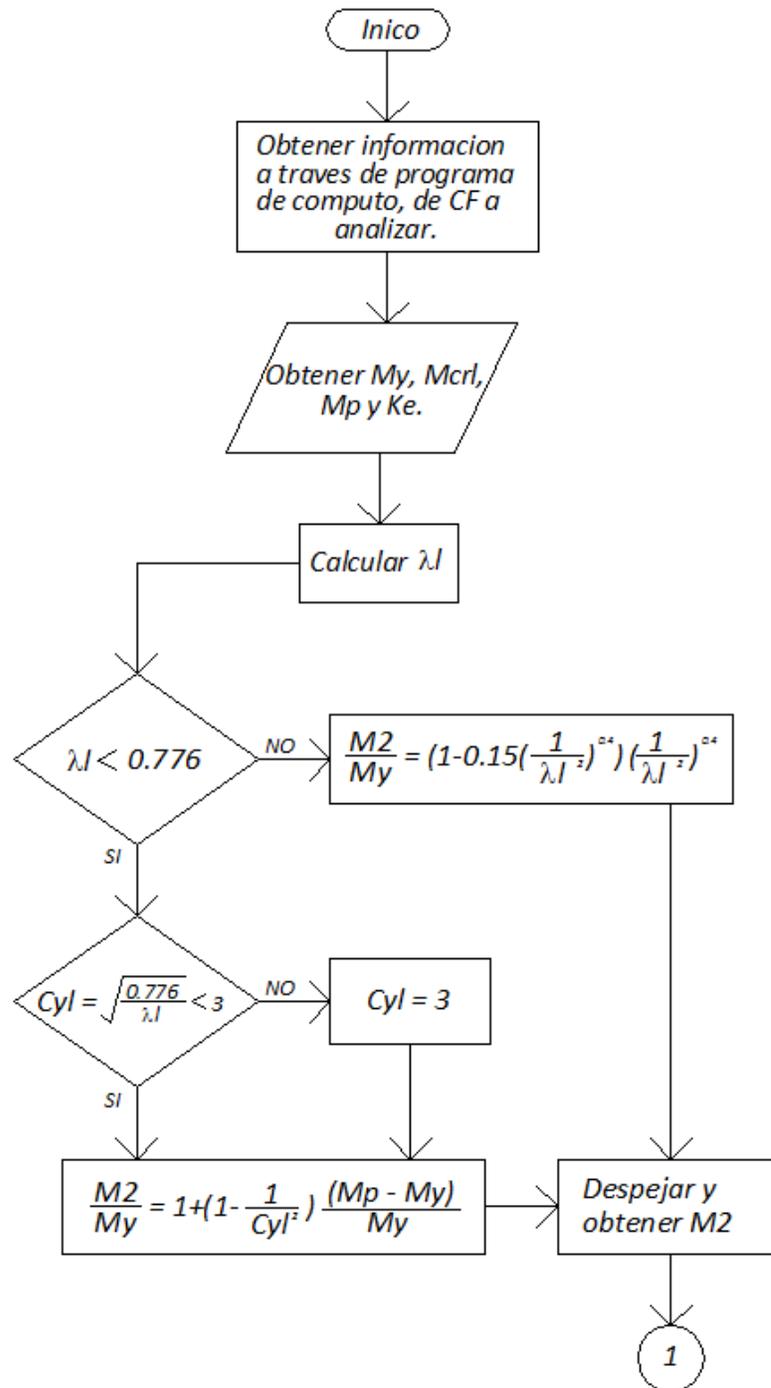
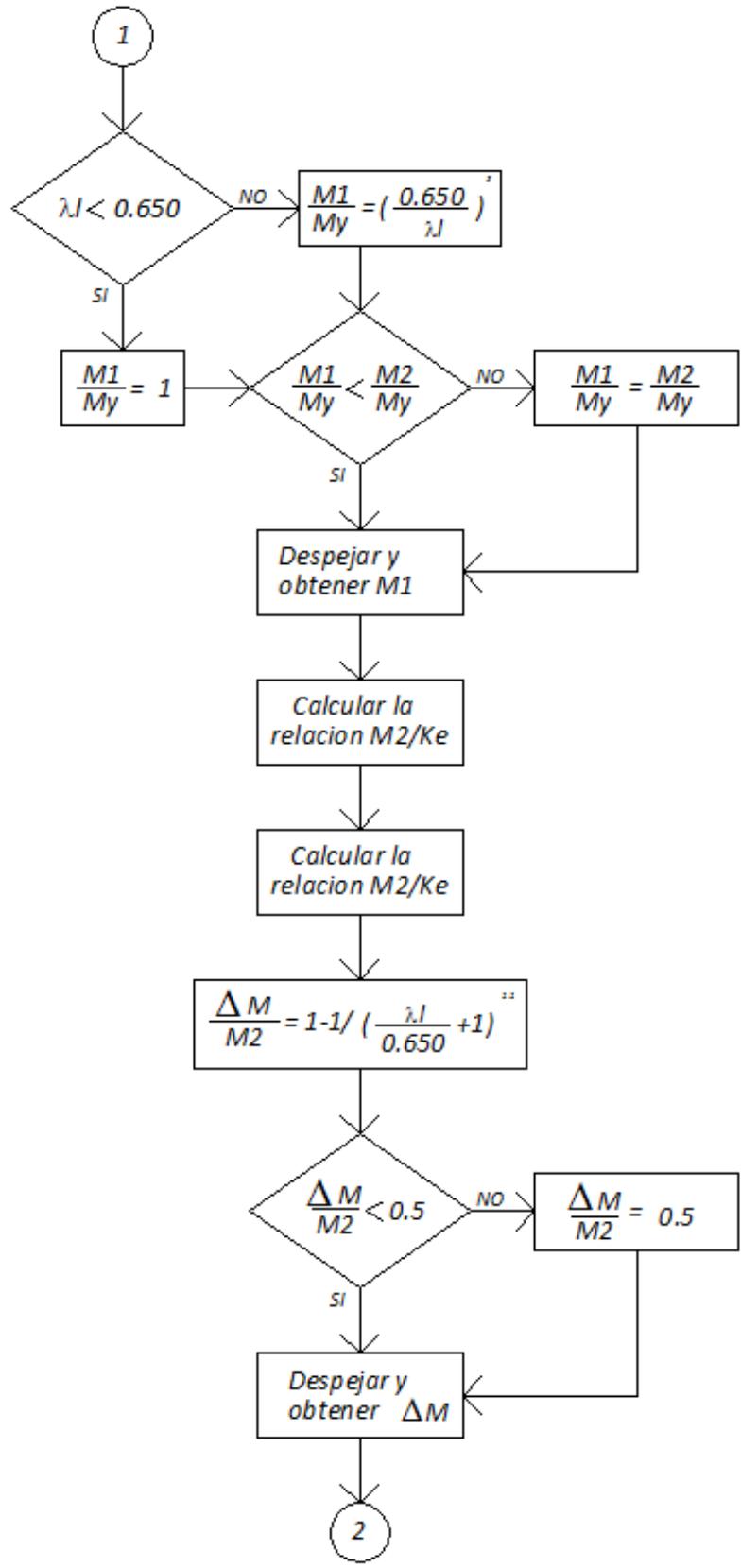


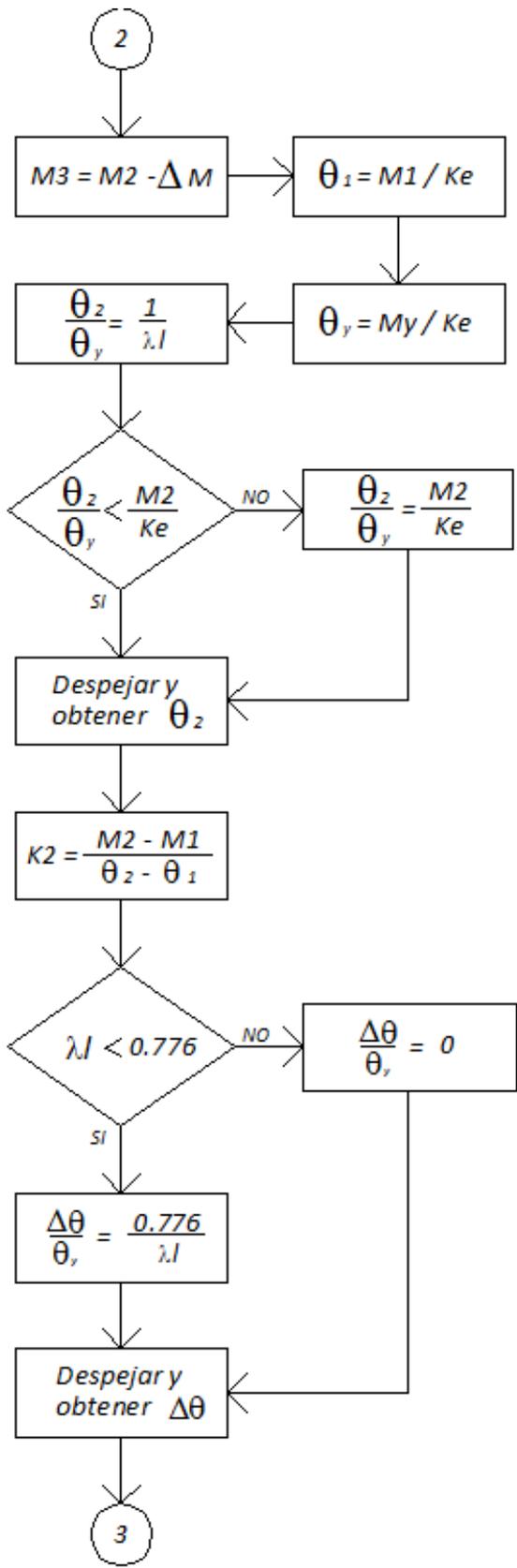
Ilustración 83 Curva momento-rotacion de un perfil normal

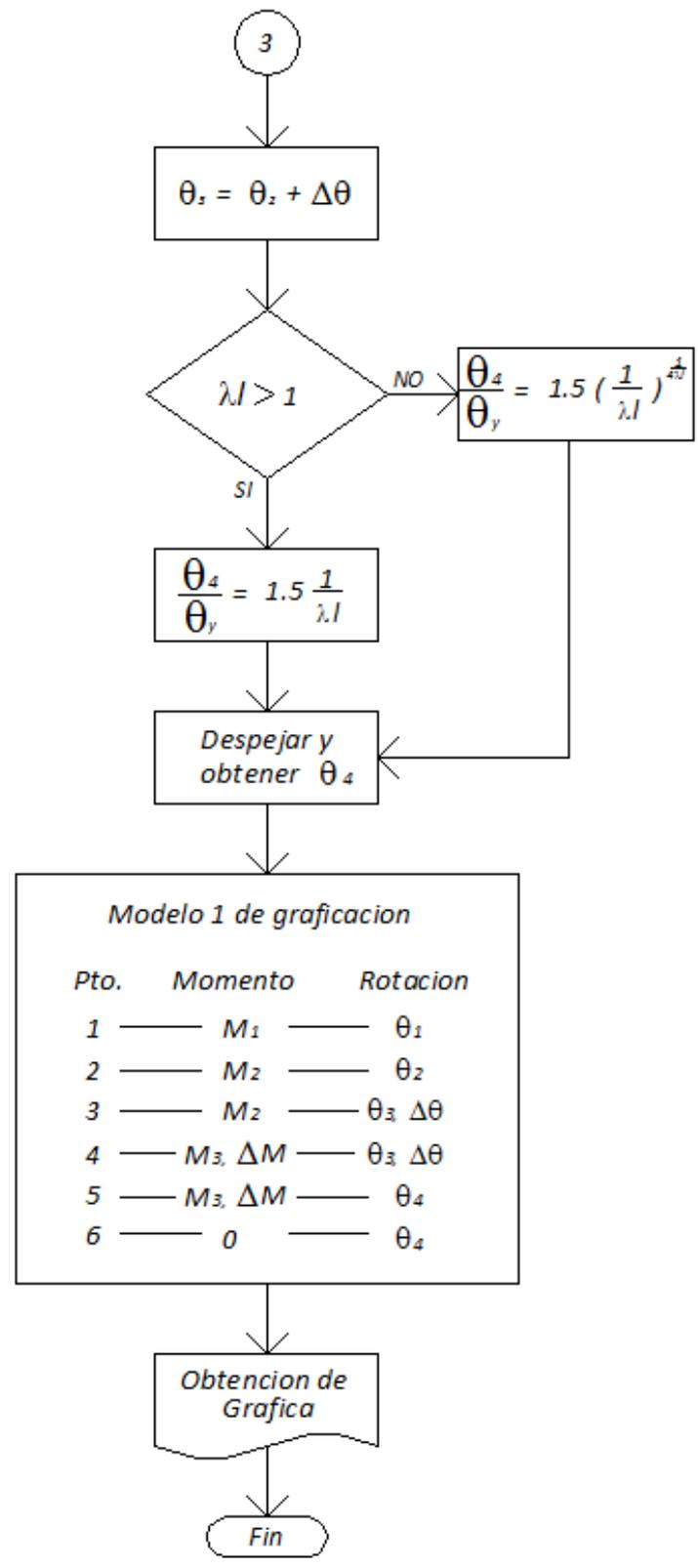
CAPÍTULO 7.- PANDEO LOCAL

7.1 DIAGRAMA DE FLUJO PANDEO LOCAL









7.2 MANUAL DE OPERACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE LA GRÁFICA MOMENTO-ROTACIÓN DEL PANDEO LOCAL.

Para poder realizar la curva momento-rotación se deben seguir los siguientes pasos:

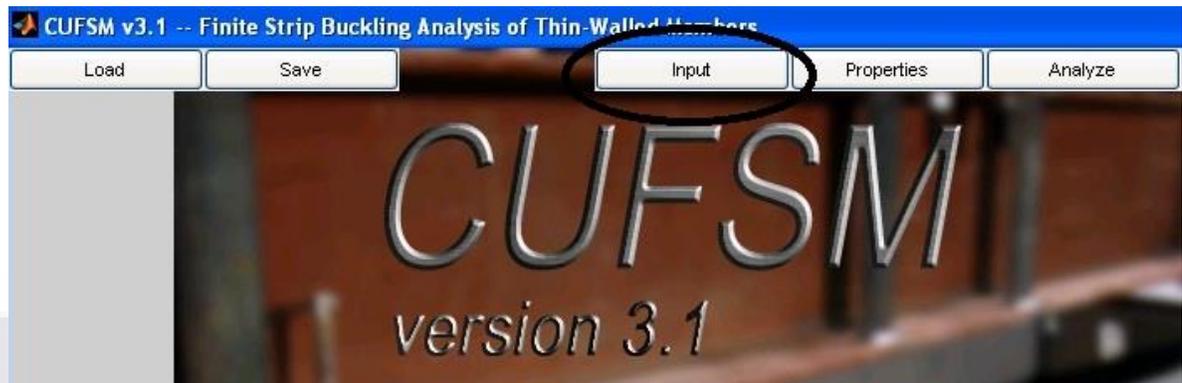
Primeramente es necesario obtener el momento al que el perfil alcanza la fluencia del acero al que está diseñado, el cual se identifica como M_y

Para ello un programa de cómputo que puede también auxiliar para obtener varios de los datos que se requieren para realizar el gráfico, es el CUFSM versión 3.1

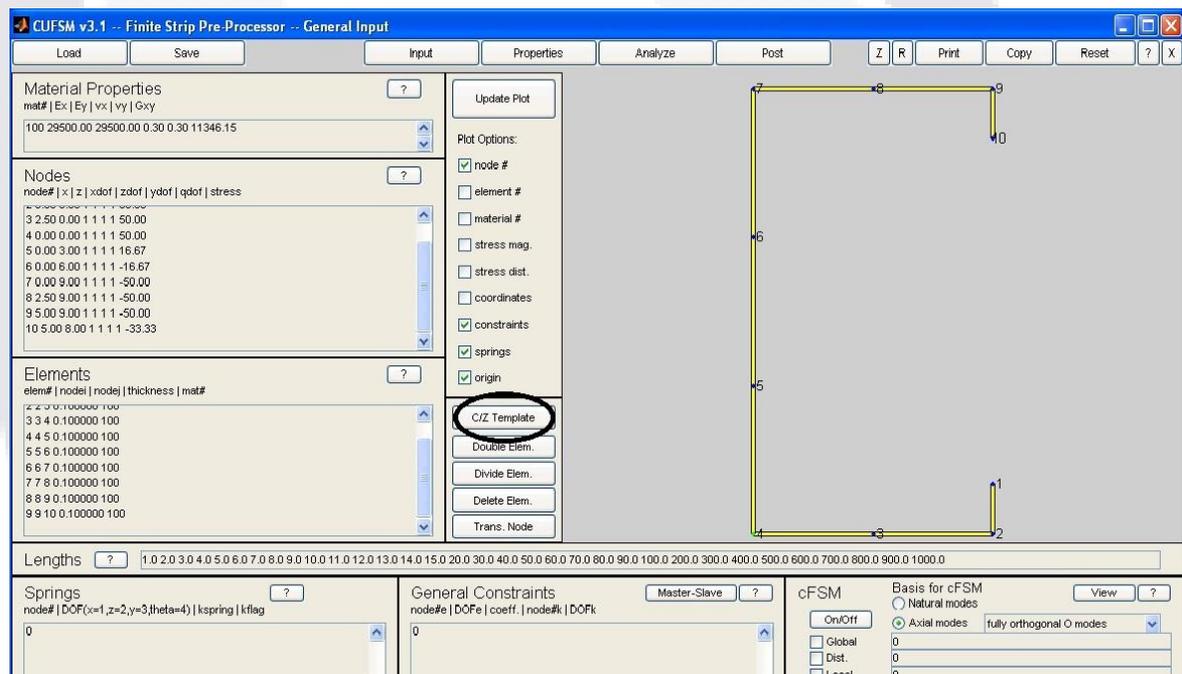
Se accede a CUFSM



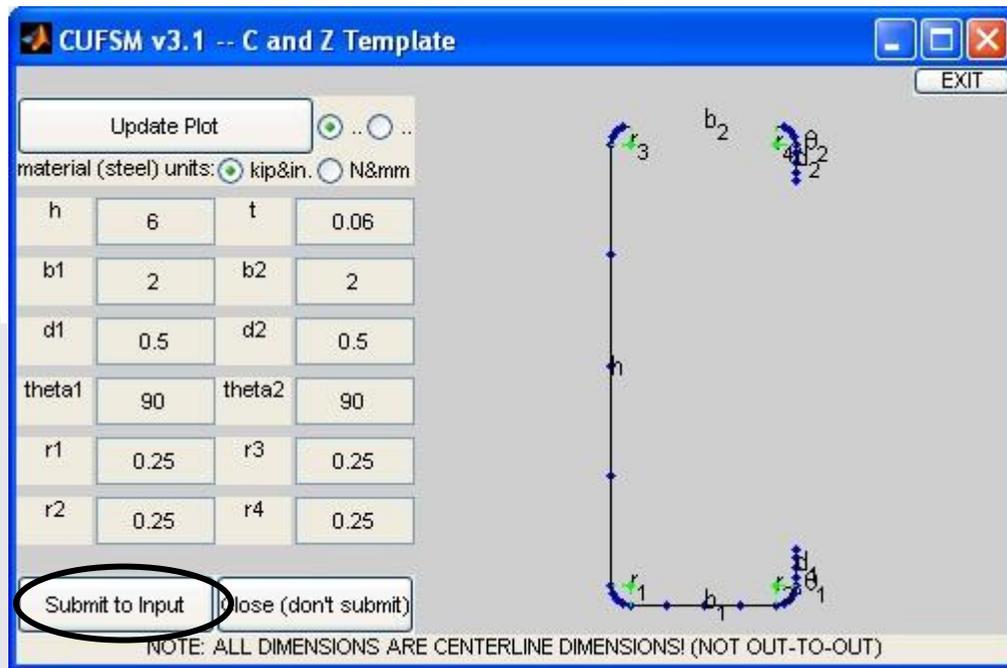
Ya ejecutado el programa entrar a la pestaña **INPUT**



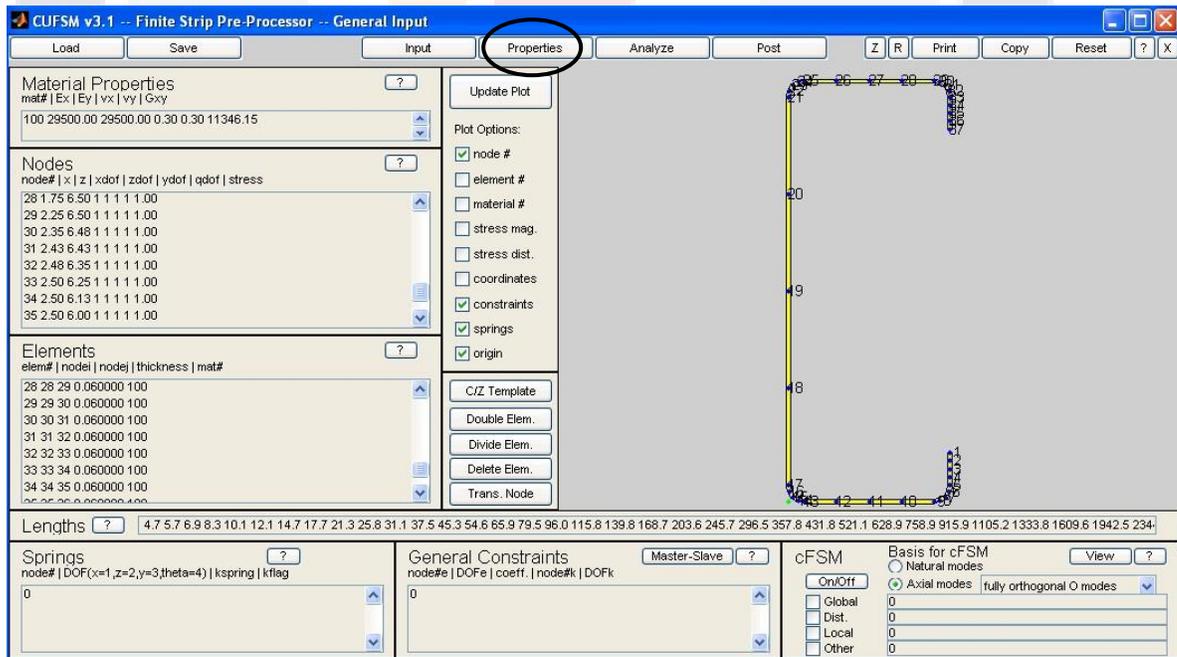
Mostrará la siguiente ventana y se procede a entrar a la pestaña de **C/Z Template** la cual se muestra en la siguiente imagen:



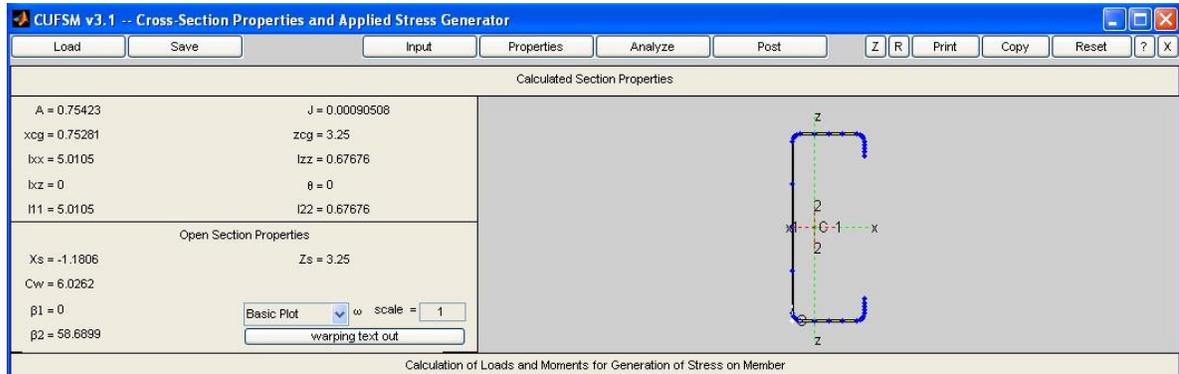
Se incorpora la geometría del perfil que se va utilizar y se presiona **Submit to Input**.



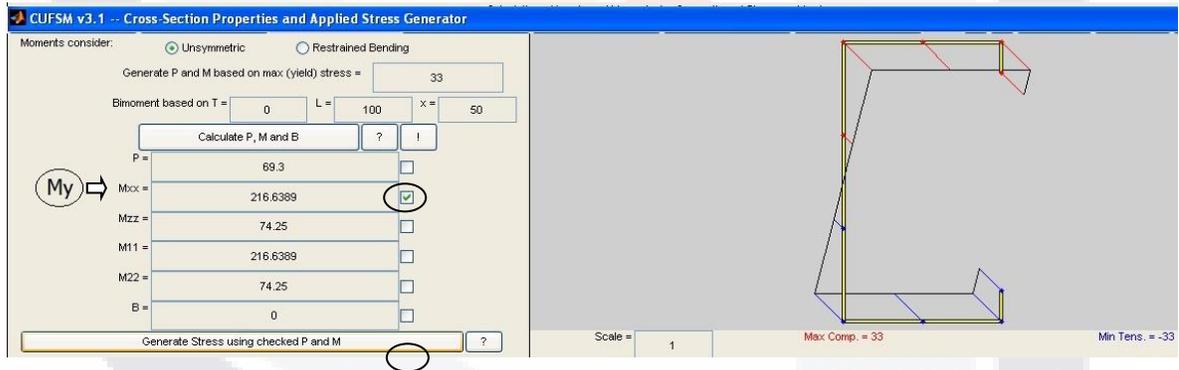
Entrar enseguida a la pestaña de **Properties**



Aparecerá la siguiente ventana, la cual proporciona datos del perfil como el área, momento polar de inercia entre otros.

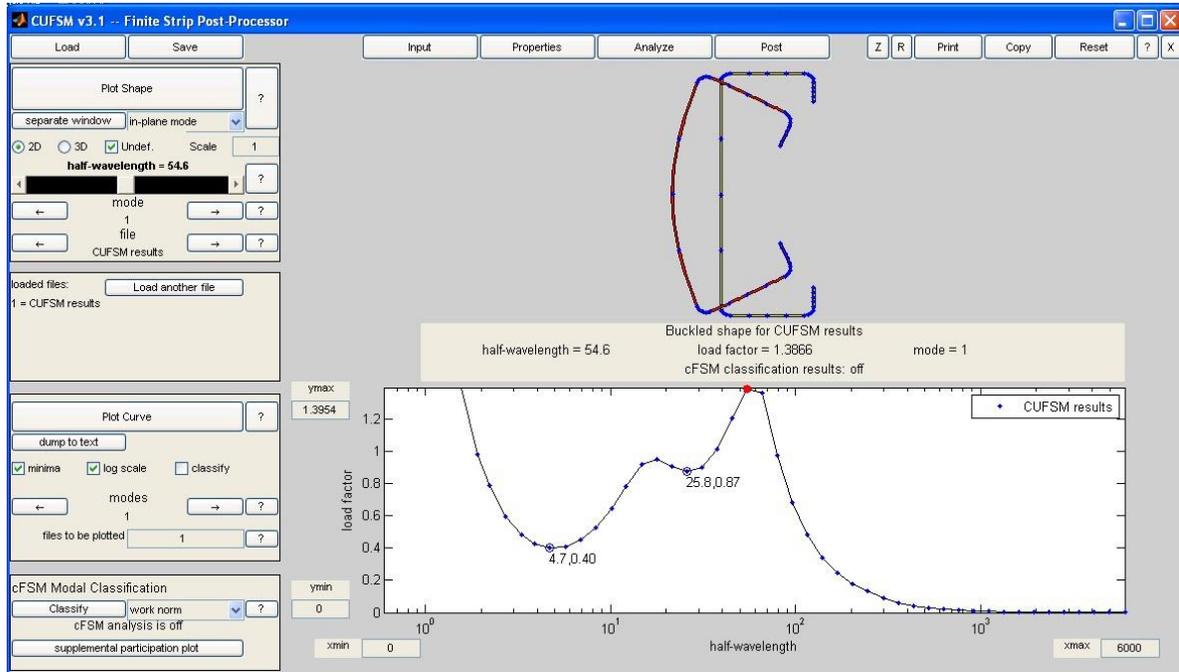


Ahora se coloca el grado de acero del perfil en ksi en el campo de **Generate P and M base on max yield stress**, después se selecciona solo la casilla de **Mxx** y se presiona el botón de **Calculate P, M and B**, automáticamente el programa arroja los datos de P, Mxx entre otros, como se observa en la siguiente imagen.



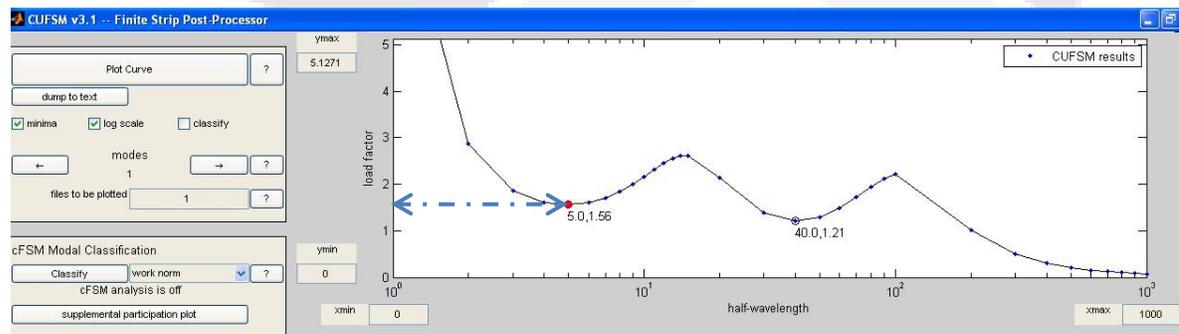
Si se presiona la pestaña de **Generate Stress using checked P and M**, mostrara el grafico del perfil en base a los elementos mecánicos a los que estará sometido.

Ahora se entra a la pestaña de **Analyze** donde se puede observar el perfil con la deformación y se obtienen los valores del factor de carga para el pandeo local y pandeo distorsional.



Para poder determinar el valor de M_{crL} (Momento crítico de pandeo local) se siguen los siguientes pasos:

Se toma el factor de carga del primer punto de la gráfica que indica el pandeo local, en este caso 1.56 y se multiplica por el Momento de fluencia elástico M_y y se obtiene el valor del Momento crítico elástico de pandeo local, M_{crL} . (Como se observa en la imagen).



Se Procede a calcular el valor de M_p , lo cual se hace de la siguiente manera:

(D. Ayhan, 2012)

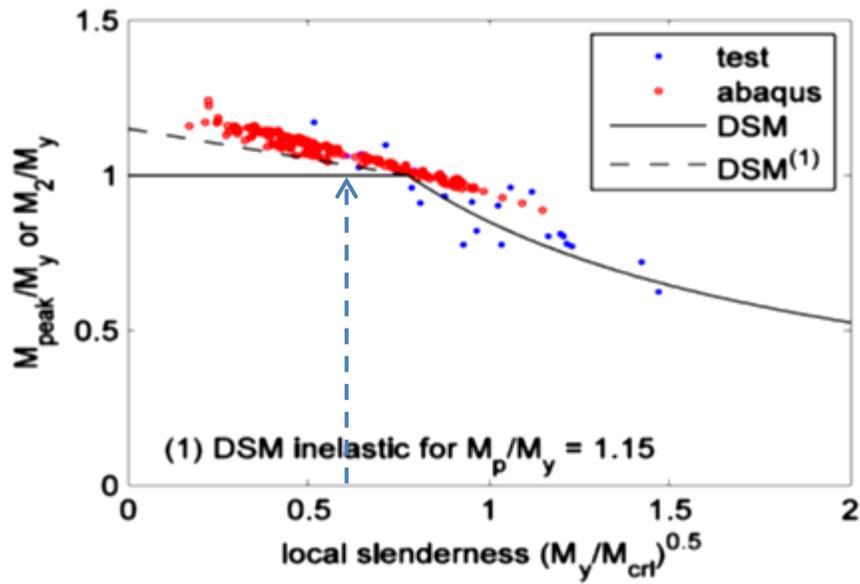
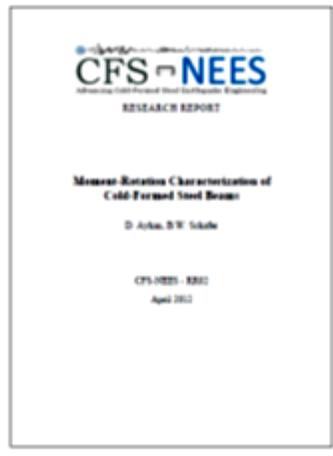


Ilustración 84 Fuerza momento pico como una función de la esbeltez local.

Entrar en la gráfica con el valor de M_y/M_{cr} e interceptar con la gráfica de *DSM* y obtener el valor de M_p/M_y

Este valor lo se multiplica por el valor de M_y y se obtiene el valor de M_p

Siguiendo la información contenida en el artículo: Caracterización Momento-Rotación de vigas de acero rolado en frío



(D. Ayhan, 2012)

En los siguientes pasos se desarrollara el método sistemático de diseño para predecir los parámetros Momento-Rotación aplicable a los perfiles de acero forjados en frío.

Se procede a calcular los valores claves como son la esbeltez λ_l y el coeficiente C de fluencia local, este último si $\lambda_l < 0.776$ pero este valor no debe ser mayor a 3 o por consecuencia tomar este valor como máximo.

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crl}}} \quad C_{yl} = \sqrt{\frac{0.776}{\lambda_l}} \leq 3$$

Ecuación 175

Después se aplica la fórmula para obtener el valor de M_2/M_y (D. Ayhan, 2012, pág. 20)

$$\frac{M_2}{M_y} = \left\{ 1 + \left(1 - \frac{1}{C_{yl}^2} \right) \frac{M_p - M_y}{M_y} \right\} \text{ y } C_{yl} = \sqrt{\frac{0.776}{\lambda_l}} \leq 3 \text{ si } \lambda_l < 0.776$$

Ecuación 176

$$\left(1 - 0.15 \left(\frac{1}{\lambda_l^2} \right)^{0.4} \right) \left(\frac{1}{\lambda_l^2} \right)^{0.4} \text{ si } \lambda_l \geq 0.776$$

Ecuación 177

Y de esta manera se encuentra el valor clave para el modelo que es el M_2 que es el máximo momento de soporte del perfil en análisis o también llamado Momento pico.

Enseguida al igual que de la forma pasada, se obtiene el valor de M_1/M_y conociendo el valor de la esbeltez, basados en la fórmula (D. Ayhan, 2012, pág. 22)

$$\frac{M_1}{M_y} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si } \lambda_l < 0.650 \\ \left(\frac{0.650}{\lambda_l}\right)^2 \text{ si } \lambda_l \geq 0.650 \end{array} \right\} \leq \frac{M_2}{M_y}$$

Ecuación 178

Con la condicional que dicho valor no debe ser mayor que el obtenido de M_2/M_y , ya que si es el caso se deberá tomar el valor de M_2/M_y

Despejando M_1 se obtiene el valor correspondiente al momento elástico del perfil en análisis.

Conocidos los valores de M_2 y K_e "Rigidez Elástica" se procede a calcular la relación M_2/K_e

Se calcula el incremento en el momento a través de la fórmula: a continuación, con la esbeltez y como la condición indica no podrá ser mayor de 0.5 (D. Ayhan, 2012, pág. 24)

$$\frac{\Delta M}{M_2} = 1 - 1/\left(\frac{\lambda_t}{0.776} + 1\right)^{1.1} \leq 0.5$$

Ecuación 179

Después se despeja ΔM ya conocido M_2

De una manera sencilla se calcula el valor de M_3 (D. Ayhan, 2012, pág. 25)

$$M_3 = M_2 - \Delta M$$

Ecuación 180

Ahora se procede al cálculo de los valores de rotación θ

Conocidos los valores del Momento elástico M_1 y la Rigidez elástica $K_1 = K_e$ (D. Ayhan, 2012, pág. 13)

$$\theta_1 = \frac{M_1}{K_1}$$

Ecuación 181

De esta manera se conoce el valor de rotación referente al momento elástico θ_1

Aplicando la fórmula para calcular el valor de θ_y (D. Ayhan, 2012, pág. 20)

$$\theta_y = M_y/k_1 \text{ o } M_y/k_e$$

Ecuación 182

Posteriormente se aplica la fórmula para conocer la rotación correspondiente al momento pico (D. Ayhan, 2012, pág. 25)

$$\frac{\theta_2}{\theta_y} = \frac{1}{\lambda_l} \leq \frac{M_2}{k_e}$$

Ecuación 183

Despejando para encontrar el valor de θ_2

Se encuentra el valor del coeficiente de placa k_2 (D. Ayhan, 2012, pág. 25)

$$k_2 = \frac{M_2 - M_1}{\theta_2 - \theta_1}$$

Ecuación 184

A continuación aplicando la siguiente fórmula dependiendo del valor de la esbeltez (D. Ayhan, 2012, pág. 23)

$$\frac{\Delta\theta}{\theta_y} = \begin{cases} \left(\frac{0.776}{\lambda_l}\right) - 1 & \text{si } \lambda_l < 0.776 \\ 0 & \text{si } \lambda_l \geq 0.776 \end{cases}$$

Ecuación 185

Como se conoce el valor de θ_y , se despeja y se obtiene el paso de rotación después del punto máximo, $\Delta\theta$

Aplicando la fórmula para conocer el valor de θ_3 (D. Ayhan, 2012, pág. 13)

$$\theta_3 = \theta_2 + \Delta\theta$$

Ecuación 186

Por último se calcula la rotación máxima θ_4 , nuevamente basados a la esbeltez se elige la fórmula que corresponde para dicho cálculo. (D. Ayhan, 2012, pág. 22)

$$\frac{\theta_4}{\theta_y} = \begin{cases} 1.5 \frac{1}{\lambda_l} & \text{si } \lambda_l > 1 \\ 1.5 \left(\frac{1}{\lambda_l}\right)^{1/4\lambda_l} & \text{si } \lambda_l \leq 1 \end{cases}$$

Ecuación 187

Teniendo todas las variables para poder realizar la gráfica Momento-Rotación, se realiza bajo ciertas recomendaciones considerando que el modelo 1 da resultados más fiable en base al estudio realizado. (D. Ayhan, 2012, pág. 18)

Por lo que se aplica para graficar lo siguiente:

Tabla: Definición de variables , curva ($M - \theta$) Modelo 1

point no	rotation	moment	stiffness	parameters selected
1	θ_1	M_1	k_1	M_1, k_1
2	θ_2	M_2	k_2	M_2, k_2
3	$\theta_3, \Delta\theta$	M_2	0	$\Delta\theta$
4	$\theta_3, \Delta\theta$	$M_3, \Delta M$	∞	$\Delta\theta, \Delta M$
5	θ_4	$M_3, \Delta M$	0	$\theta_4, \Delta M$
6	θ_4	0	∞	θ_4

Y se obtiene la gráfica basado en el Modelo 1

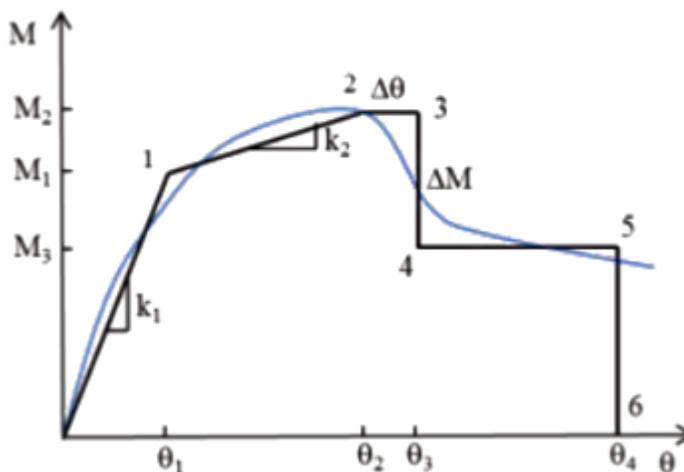
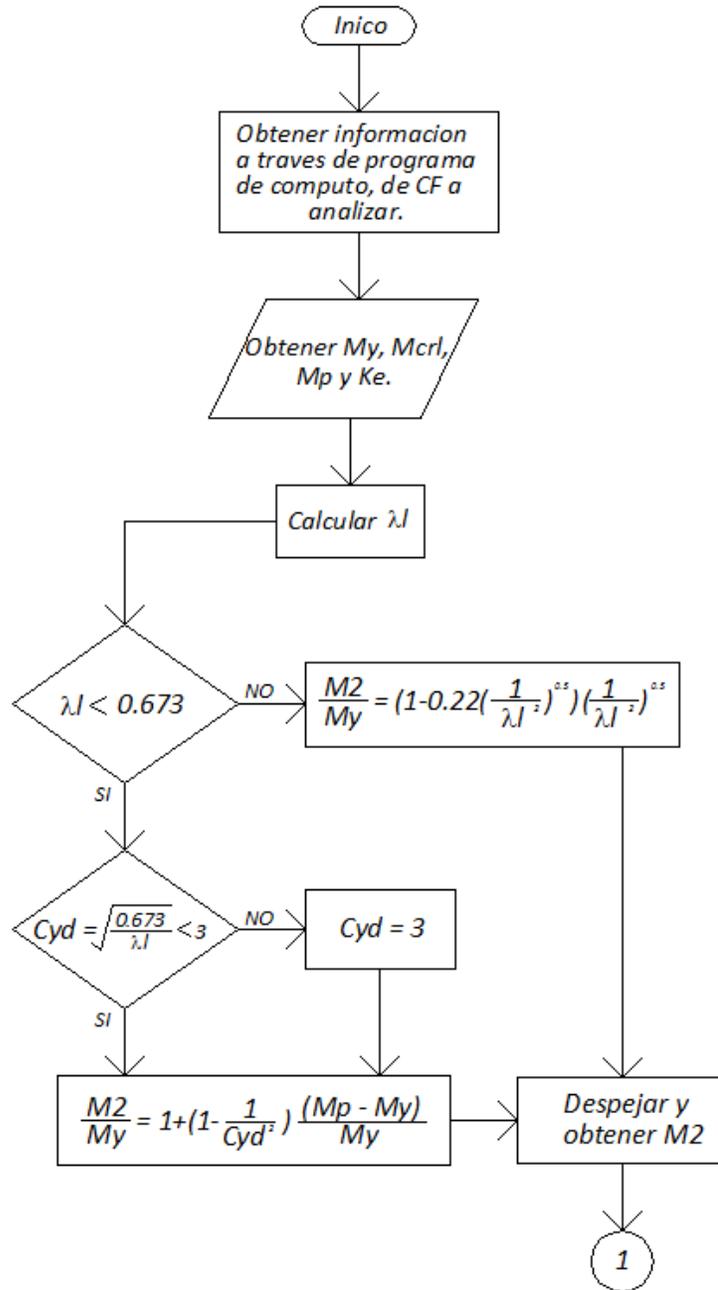
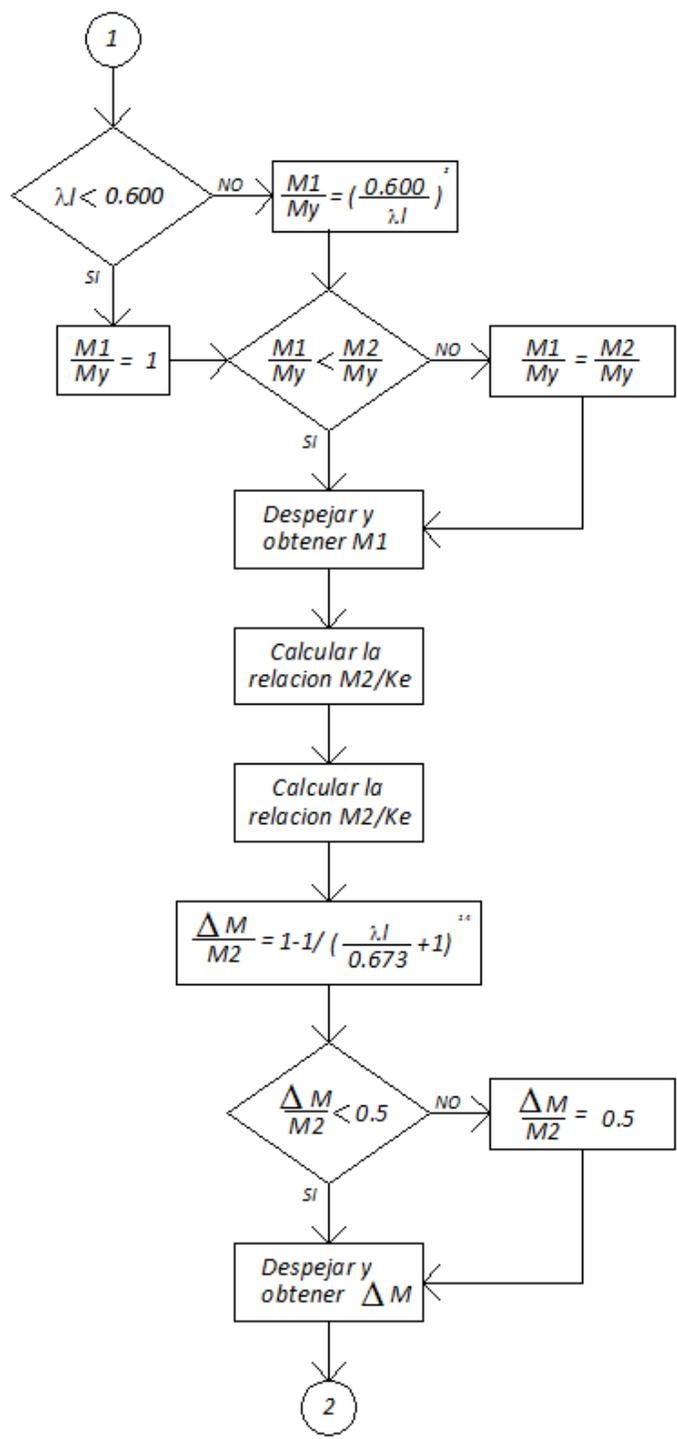


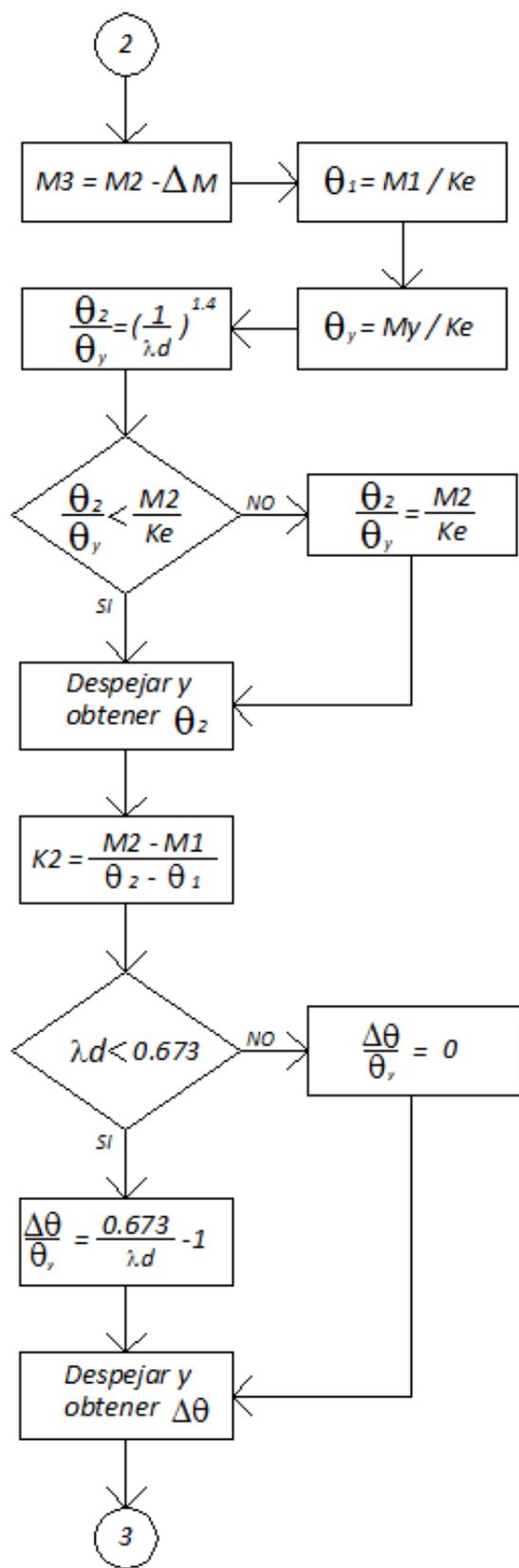
Ilustración 85 Gráfica Modelo 1.

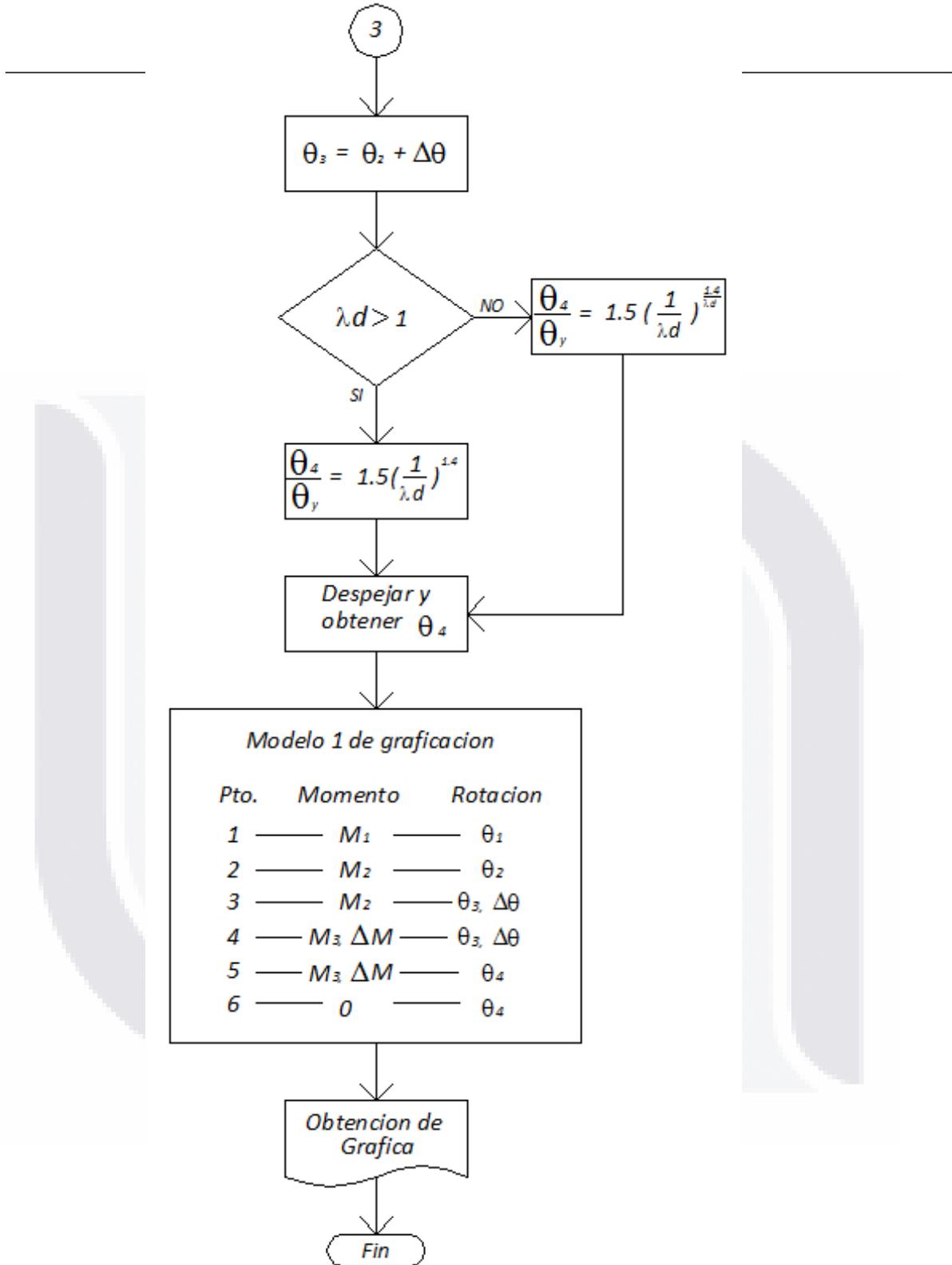
CAPÍTULO 8.- PANDEO DISTORSIONAL

8.1 DIAGRAMA DE FLUJO PANDEO DISTORSIONAL









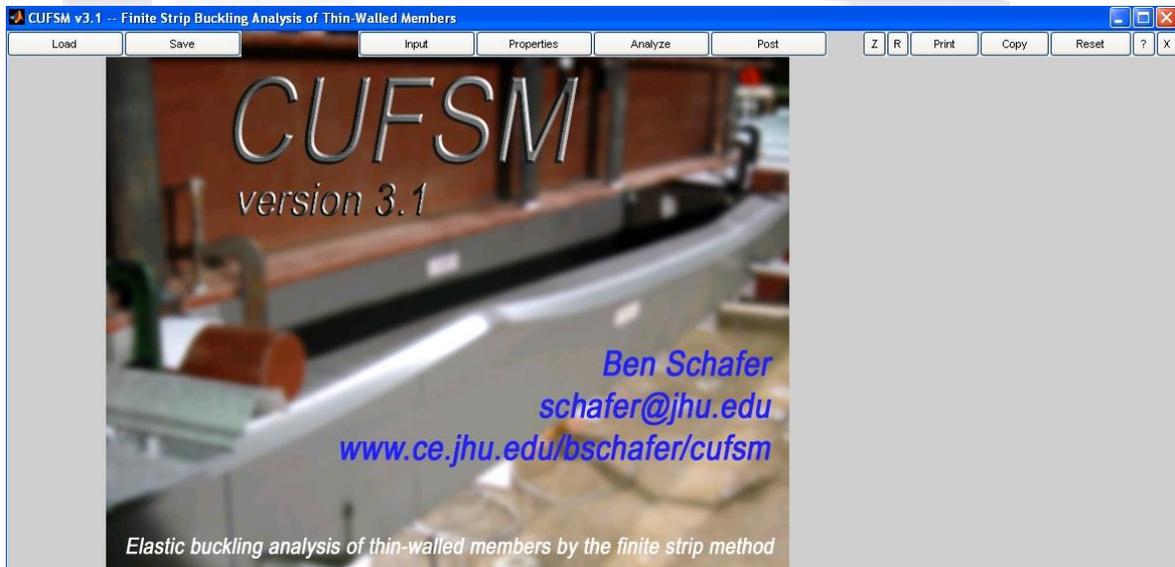
8.2 MANUAL DE OPERACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE LA GRÁFICA MOMENTO-ROTACIÓN DEL PANDEO DISTORSIONAL.

Para poder realizar la curva momento-rotación se deben seguir los siguientes pasos:

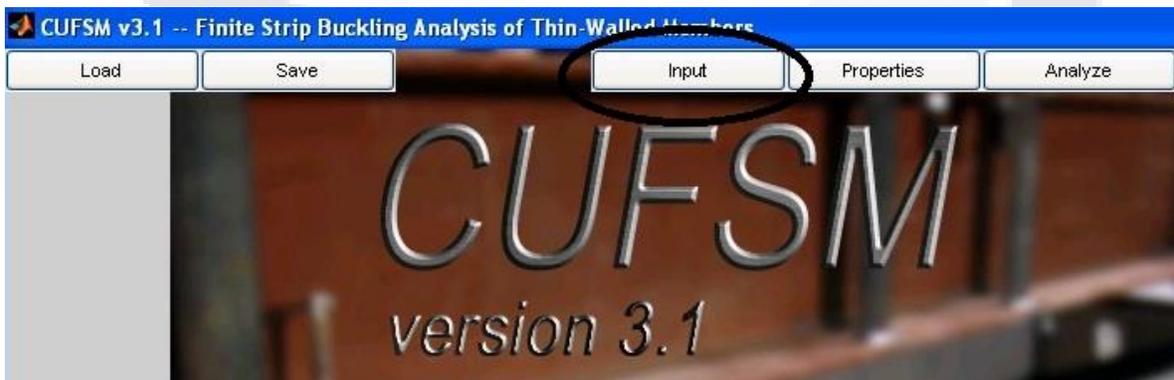
Primeramente se debe de obtener el momento al que el perfil alcanza la fluencia del acero al que está diseñado el cual se identifica como M_y

Para ello un programa de cómputo el cual puede servir de auxilio para obtener varios de los datos requeridos para realizar el gráfico, es el CUFSM versión 3.1

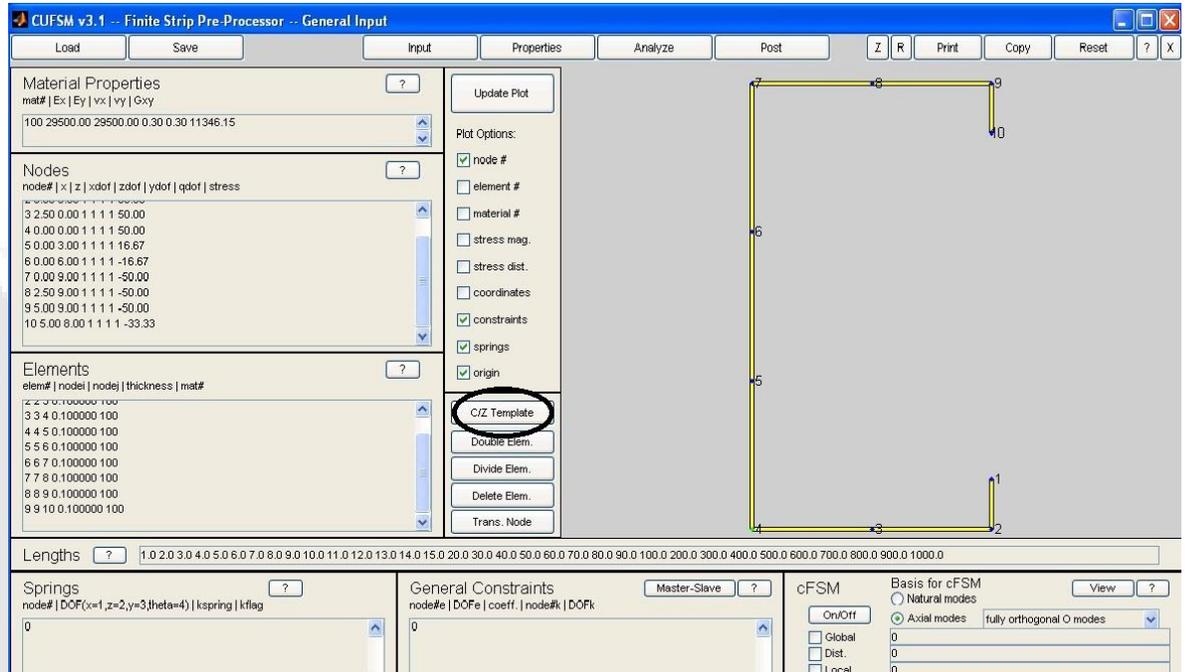
Acceder a CUFSM



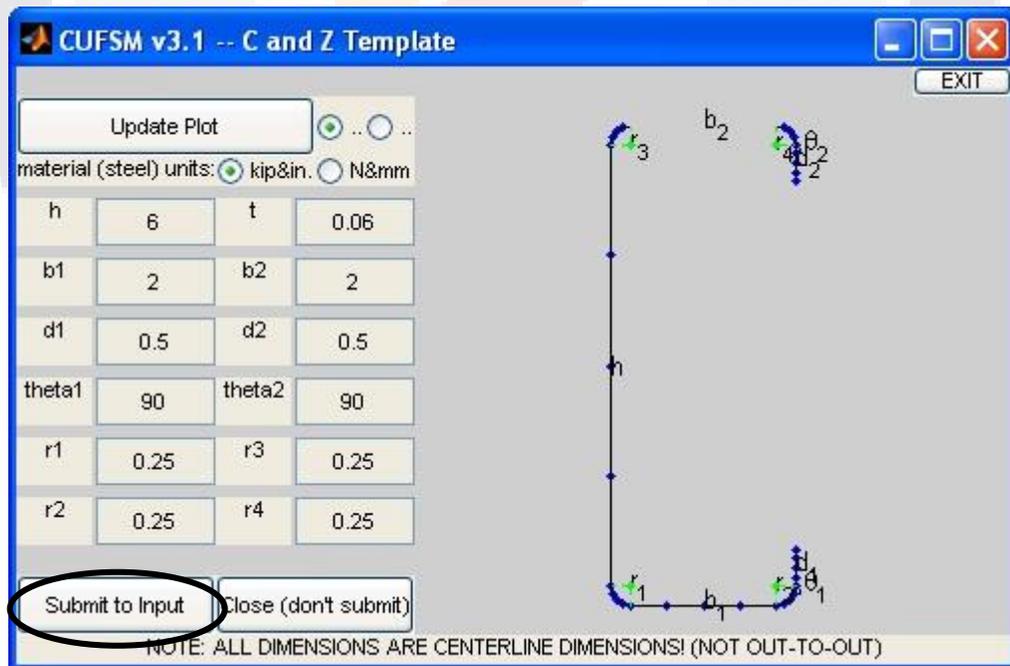
Ya ejecutado el programa entrar a la pestaña **INPUT**



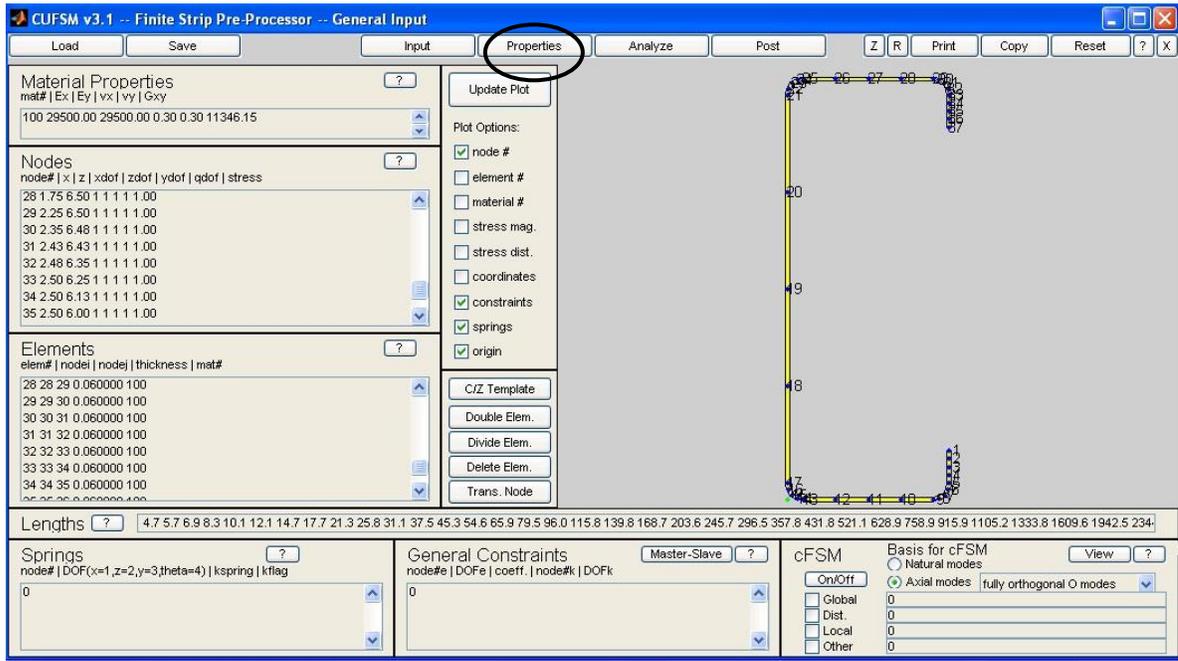
Mostrará la siguiente ventana y se procede a entrar a la pestaña de **C/Z Template** la cual se muestra en la siguiente imagen:



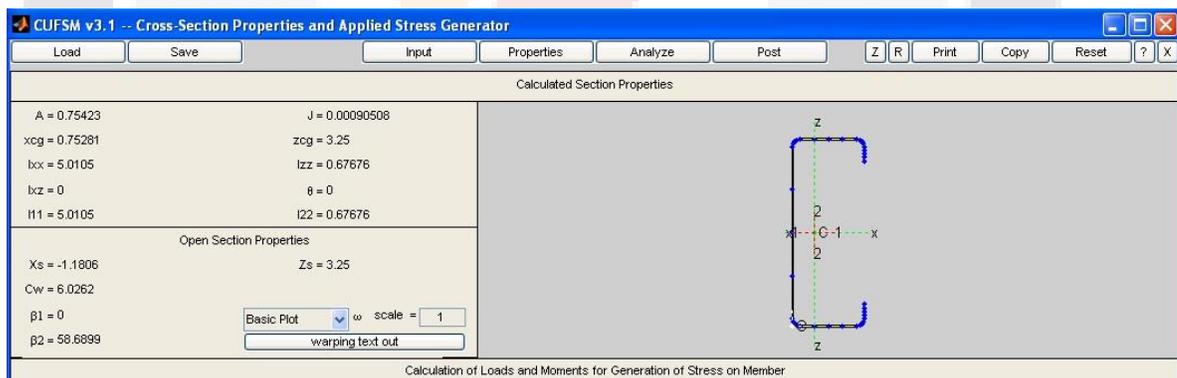
Incorporar la geometría del perfil que se va a utilizar y presionar **Submit to Input**.



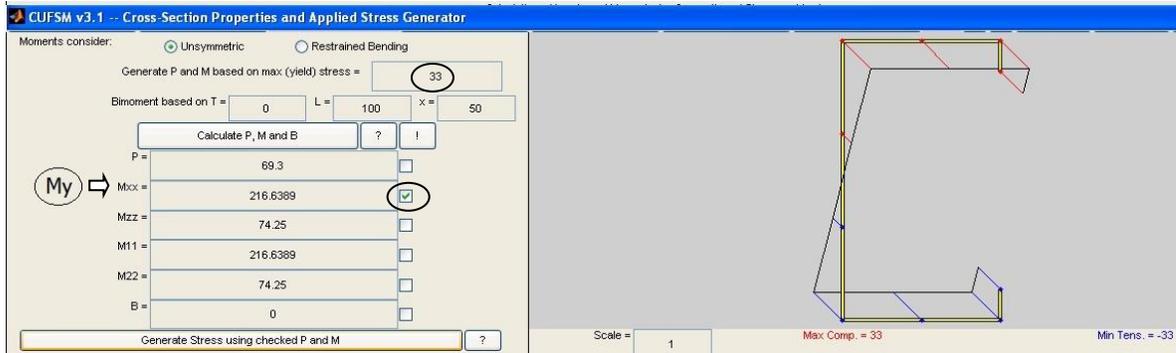
Entrar enseguida a la pestaña de **Properties**



Aparecerá la siguiente ventana, la cual proporciona datos del perfil como el área, momento polar de inercia entre otros.

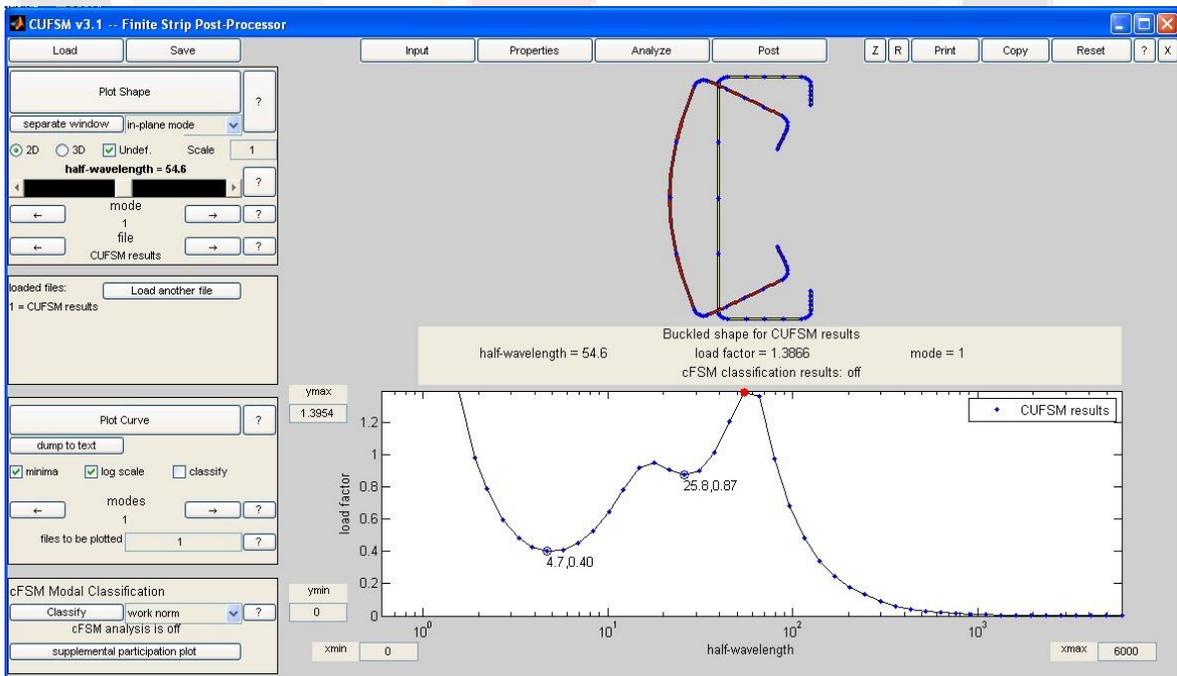


Enseguida colocar el grado de acero del perfil en ksi en el campo de **Generate P and M base on max yield stress**, después seleccionar solo la casilla de **Mxx** y presionar el botón de **Calculate P, M and B**, automáticamente el programa arroja los datos de P, Mxx entre otros, como se observa en la siguiente imagen.



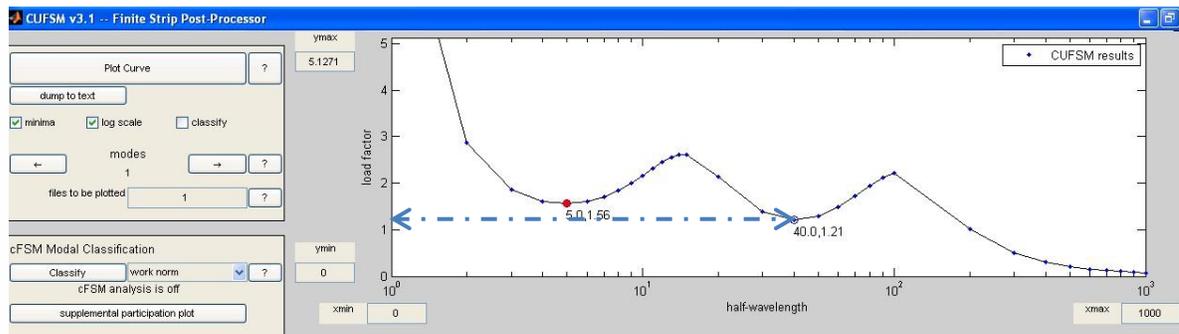
Si se presiona la pestaña de **Generate Stress using checked P and M**, mostrara el grafico del perfil en base a los elementos mecánicos a los que está sometido.

Entrar a la pestaña de **Analyze** donde se podrá observar el perfil con la deformación y los valores del factor de carga para el pandeo distorsional.



Para poder determinar el valor de M_{crit} (Momento crítico de pandeo local) realizar los siguientes pasos:

Tomar el factor de carga del segundo punto de la gráfica que indica el pandeo distorsional, en este caso 1.21 y multiplicarlo por el Momento de fluencia elástico M_y y para obtener el valor del Momento crítico elástico de pandeo distorsional, M_{crd} . (Como se observa en la imagen).



Proceder a calcular el valor de M_p , de la siguiente manera:

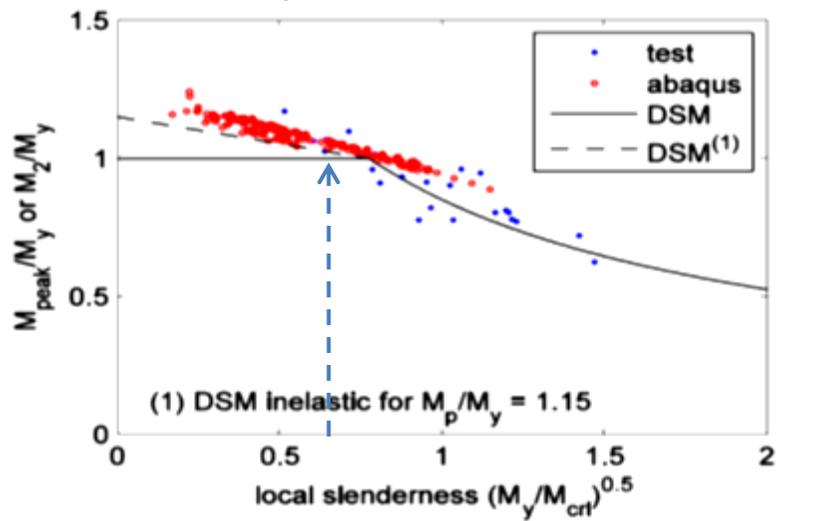


Ilustración 86 Fuerza momento pico como una función de la esbeltez local.

Entrar en la gráfica con el valor de M_y/M_{crit} , e interceptar con la gráfica de DSM y obtener el valor de M_p/M_y

Este valor se multiplicarlo por el valor de M_y y obtener el valor de M_p

Siguiendo el procedimiento descrito en el Artículo experimental Caracterización curva Momento-Rotación para vigas de acero rolado en frío(D. Ayhan, 2012)

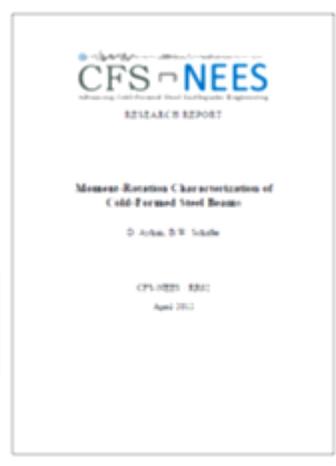


Ilustración 87 Portada de Artículo experimental Caracterización curva Momento-Rotación para vigas de acero rolado en frío.

En los siguientes pasos se desarrollara el método sistemático de diseño para predecir los parámetros Momento-Rotación aplicable a los perfiles de acero forjados en frío.

Se procede a calcular los valores claves como son la esbeltez λ_d y el coeficiente C de fluencia distorsional, este último si $\lambda_d < 0.673$ pero este valor no debe ser mayor a 3 o por consecuencia tomar este valor como máximo.

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} \qquad C_{yd} = \sqrt{\frac{0.673}{\lambda_d}} \leq 3$$

Ecuación 188

Después aplicar la fórmula para obtener el valor de M_2/M_y (D. Ayhan, 2012, pág. 28)

$$\frac{M_2}{M_y} = \left\{ \begin{array}{l} 1 + \left(1 - \frac{1}{C_{yd}^2}\right) \frac{(M_p - M_y)}{M_y} \text{ y } C_{yd} = \sqrt{\frac{0.673}{\lambda_d}} \leq 3 \text{ si } \lambda_d < 0.673 \\ \left(1 - 0.22 \left(\frac{1}{\lambda_t^2}\right)^{0.5}\right) \left(\frac{1}{\lambda_t^2}\right) \text{ si } \lambda_d \geq 0.673 \end{array} \right\}$$

Ecuación 189

Y de esta manera encontrar el valor clave para el modelo que es el M_2 que es el máximo momento de soporte del perfil en análisis o también llamado Momento pico.

Enseguida al igual que de la forma pasada, obtener el valor de M_1/M_y conociendo el valor de la esbeltez, (D. Ayhan, 2012, pág. 28)

$$\frac{M_1}{M_y} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si } \lambda_t < 0.6 \\ \left(\frac{0.6}{\lambda_d}\right)^2 \text{ si } \lambda_d \geq 0.6 \end{array} \right\} \leq \frac{M_2}{M_y}$$

Ecuación 190

Con la condicional que dicho valor no debe ser mayor que el obtenido de M_2/M_y , ya que si es el caso se tomara el valor de M_2/M_y

Despejando M_1 para obtener el valor correspondiente al momento elástico del perfil en análisis.

Conocidos los valores de M_2 y k_e "Rigidez Elástica," se procede a calcular la relación M_2/K_e

Calcular el incremento en el momento a través de la fórmula siguiente, con la esbeltez y como la condición indica no podrá ser mayor de 0.5

$$\frac{\Delta M}{M_2} = 1 - 1/\left(\frac{\lambda_d}{0.673} + 1\right)^{1.4} \leq 0.5$$

Ecuación 191

Después despejar ΔM ya conocido M_2

De una manera sencilla calcular el valor de M_3 (D. Ayhan, 2012, pág. 28)

$$M_3 = M_2 - \Delta M$$

Ecuación 192

proceder al cálculo de los valores de rotación θ

Conocidos los valores del Momento elástico M_1 y la Rigidez elástica $K_1 = K_e$ Aplicar la fórmula de: (D. Ayhan, 2012, pág. 28)

$$\frac{\theta_1}{\theta_y} = \frac{M_1}{k_1 \theta_y} = \frac{M_1}{k_1 \theta_y} = \frac{M_1}{M_y}$$

Ecuación 193

De esta manera conseguimos saber el valor de rotación referente al momento elástico θ_1

Aplicaremos la fórmula de la para calcular el valor de Θ_y , (D. Ayhan, 2012, pág. 20)

$$\theta_y = M_y/k_1 \quad \text{ó} \quad M_y/k_e$$

Posteriormente aplicaremos la fórmula para conocer la rotación correspondiente al momento pico, (D. Ayhan, 2012, pág. 28)

$$\frac{\theta_2}{\theta_y} = \left(\frac{1}{\lambda_d}\right)^{1.4}$$

Ecuación 194

Despejaremos para encontrar el valor de θ_2

Encontraremos el valor del coeficiente de placa K_2 , basándonos en la siguiente fórmula.

$$k_2 = \frac{M_2 - M_1}{\theta_2 - \theta_1}$$

Ecuación 195

A continuación aplicaremos la siguiente fórmula dependiendo del valor de nuestra esbeltez.

$$\frac{\Delta\theta}{\theta_y} = \begin{cases} \left(\frac{0.673}{\lambda_d}\right) - 1 & \text{si } \lambda_d < 0.673 \\ 0 & \text{si } \lambda_d \geq 0.673 \end{cases}$$

Ecuación 196

Como conocemos el valor de θ_y , despejaremos y obtendremos el paso de rotación después del punto máximo, $\Delta\theta$

Aplicando la fórmula para conocer el valor de θ_3 . (D. Ayhan, 2012, pág. 13)

$$\theta_3 = \theta_2 + \Delta\theta$$

Ecuación 197

Por último calcular la rotación máxima θ_4 , nuevamente basado a la esbeltez se erigirá la fórmula :

$$\frac{\theta_4}{\theta_y} = \begin{cases} 1.5 \left(\frac{1}{\lambda_d}\right)^{1.4} & \text{si } \lambda_d > 1 \\ 1.5 \left(\frac{1}{\lambda_d}\right)^{1.4/\lambda_d} & \text{si } \lambda_d < 1 \end{cases}$$

Ecuación 198

Teniendo todas las variables para poder realizar la gráfica Momento-Rotación, se realiza bajo ciertas recomendaciones considerando que el modelo 1 da resultados más fiables en base al estudio realizado. (D. Ayhan, 2012, pág. 18)

Por lo que se aplica para graficar lo siguiente:

Tabla: Definición de variables, curva ($M - \theta$) Modelo 1

point no	rotation	moment	stiffness	parameters selected
1	θ_1	M_1	k_1	M_1, k_1
2	θ_2	M_2	k_2	M_2, k_2
3	$\theta_3, \Delta\theta$	M_2	0	$\Delta\theta$
4	$\theta_3, \Delta\theta$	$M_3, \Delta M$	∞	$\Delta\theta, \Delta M$
5	θ_4	$M_3, \Delta M$	0	$\theta_4, \Delta M$
6	θ_4	0	∞	θ_4

Y se obtiene la gráfica basados en el Modelo 1

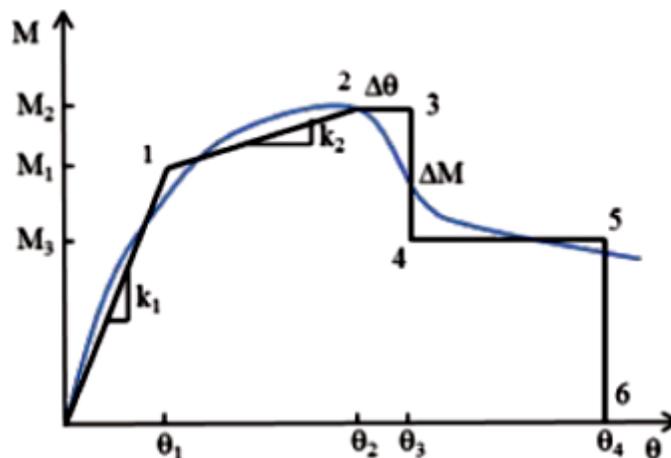


Ilustración 88 Gráfica Modelo 1.

CAPÍTULO 9.- CARACTERIZACION CURVA MOMENTO ROTACION Vs RESULTADOS DE ENSAYO EN LABORATORIO

9.1 CALCULO DE CURVA MOMENTO ROTACION UTILIZANDO SOFTWARE Y HERRAMIENTA INFORMATICA PARA OBTENER GRAFICA CURVA MOMENTO ROTACION.

En el Artículo citado se utilizó un perfil sencillo, en esta ocasión se desea obtener la curva momento-Rotación de una sección cerrada formada por dos canales de lámina doblada en frío, por lo cual se desconoce si el procedimiento empleado anteriormente arrojará resultados correctos para graficar la Curva Momento-Rotación de esta sección, para lo cual se empleara el procedimiento que se describe a continuación:

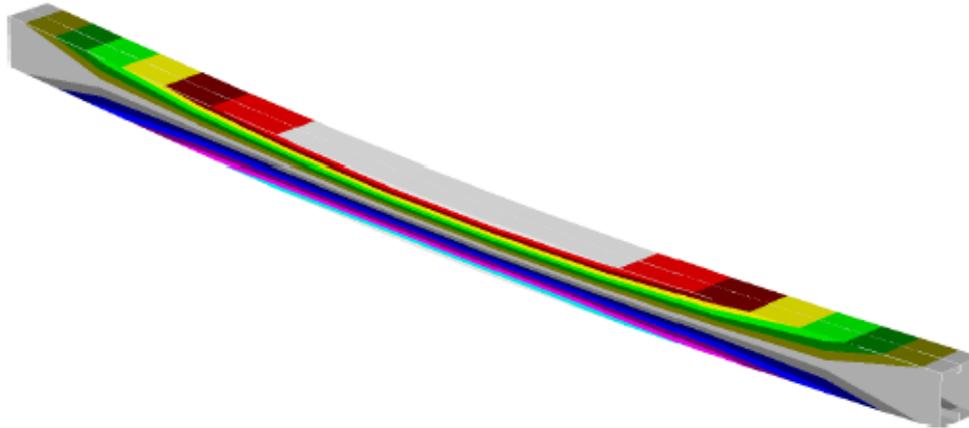
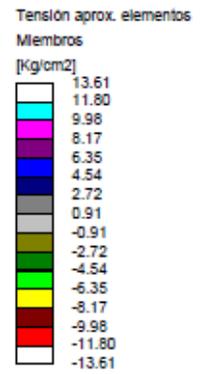
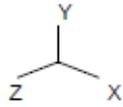
- El primer paso que se siguió para el cálculo de la curva Momento-Rotación fue determinar el valor de la Rigidez Elástica; para eso se utilizo como auxilio un software de Cálculo y Diseño Estructural, en el cual se realizó un modelo de una viga simplemente apoyada de 2mts de longitud, con una carga concentrada al centro del claro, estas cargas fueron aumentando paulatinamente en incrementos de 50 kg.
- Se graficó cada incremento con sus respectivos valores de deformación y esfuerzos, así hasta llegar al valor del límite de fluencia del material (33 ksi, 2320 kg/cm²).
- Se tabularon los datos obtenidos en una hoja de cálculo.
- Se graficaron los datos: Deformación Vs Esfuerzos
- Se obtuvo la ecuación que representa la pendiente de la curva.
- Se substituyó un valor de 100cms en la curva y se obtuvo el valor de la rigidez elástica.
- Se reprodujeron las condiciones simuladas en el programa de computadora en laboratorio.
- Se aplicaron las cargas y se pudo establecer una comparativa de los datos tomados en laboratorio con los datos obtenidos en el programa de computadora.

Los datos descritos se muestran a continuación:

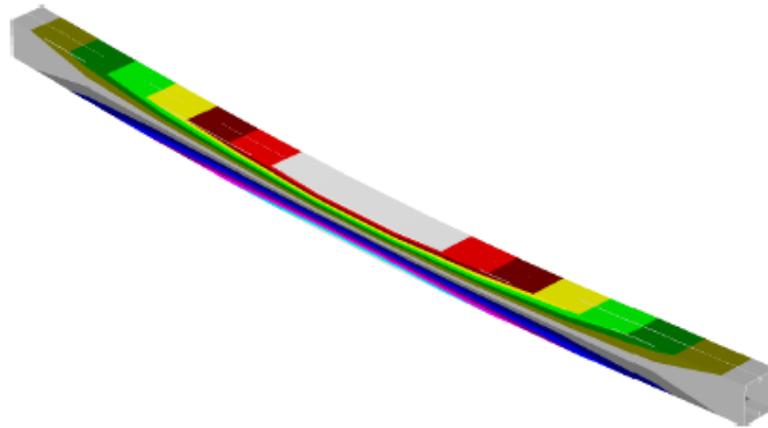
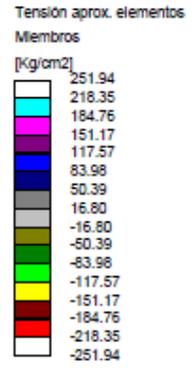
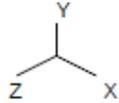
RAM Advanse

Archivo: ENSAYO.AVV
Estado: C1=PP+CV

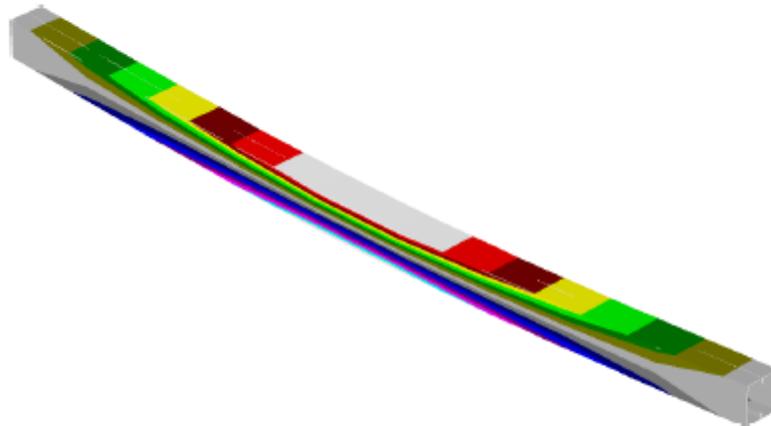
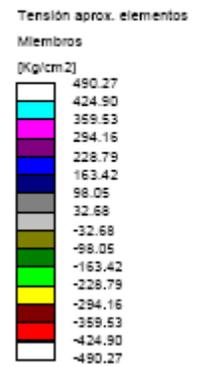
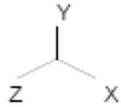
Análisis: 1er orden
Fecha: 14/09/2013 06:17:13 p.m.



ELEMENTO DE ENSAYO CF EN CAJON DE 3.5"
LONGITUD = 2.00 MTS
CARGA AL CENTRO DEL CLARO = 0.00 kgs.
DEFORMACION POR PESO PROPIO = 0.006 cms.
ESF. MAXIMOS = 13.61 Kgs/cm²



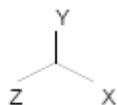
ELEMENTO DE ENSAYE CF EN CAJON DE 3.5"
LONGITUD = 2.00 mts.
CARGA AL CENTRO DEL CLARO = 50 kgs.
DEFORMACION DEL ELEMENTO = 0.1072 cms.
ESF. MAXIMOS = 251.94 kgs/cm²



ELEMENTO DE ENSAYE CF EN CAJON DE 3.5"
LONGITUD = 2.00 mts.
CARGA AL CENTRO DEL CLARO = 100 kgs.
DEFORMACION DEL ELEMENTO = 0.208 cms.
ESF. MAXIMOS = 490.27 kgs/cm²

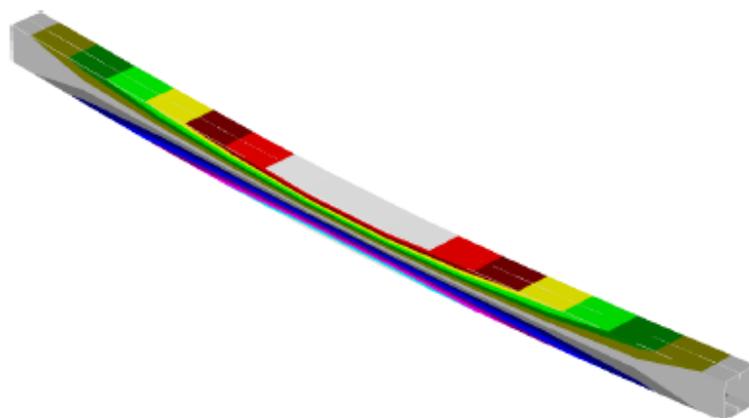
VIAJEROS
Archivo: ENSAYO.AVV
Estado: C1=PP+CV

Análisis: 1er orden
Fecha: 14/09/2013 08:54:43 p.m.

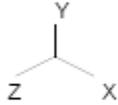


Tensión aprox. elementos
Miembros
[Kg/cm²]

728.61
631.46
534.31
437.16
340.02
242.87
145.72
48.57
-48.57
-145.72
-242.87
-340.02
-437.16
-534.31
-631.46
-728.61

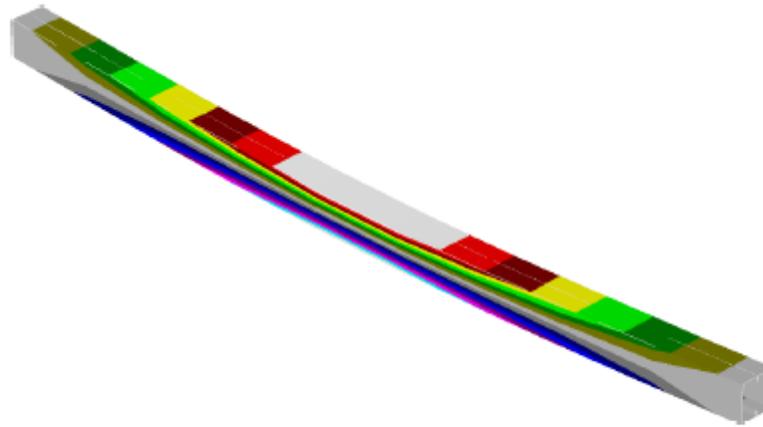


ELEMENTO DE ENSAYE CF EN CAJON DE 3.5"
LONGITUD = 2.00 mts.
CARGA AL CENTRO DEL CLARO = 150 kgs.
DEFORMACION DEL ELEMENTO = 0.3088 cms.
ESF. MAXIMOS = 728.61 kgs/cm²

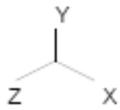


Tensión aprox. elementos
 Miembros
 [Kg/cm²]

966.94
838.01
709.09
580.16
451.24
322.31
193.39
64.46
-64.46
-193.39
-322.31
-451.24
-580.16
-709.09
-838.01
-966.94

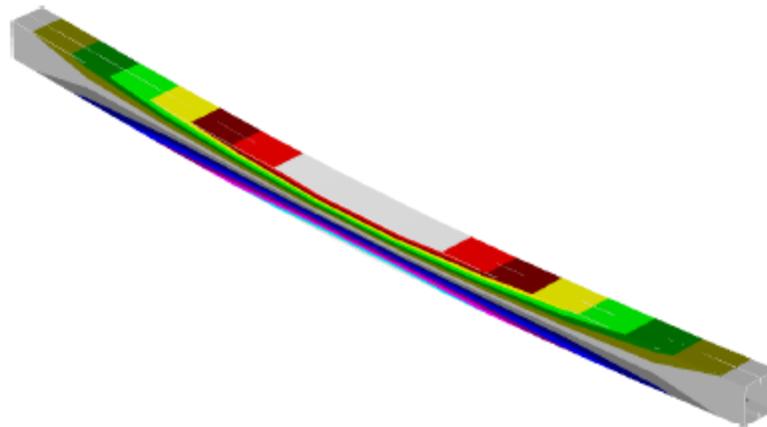


ELEMENTO DE ENSAYE CF EN CAJON DE 3.5"
 LONGITUD = 2.00 mts.
 CARGA AL CENTRO DEL CLARO = 200 kgs.
 DEFORMACION DEL ELEMENTO = 0.4096 cms.
 ESF. MAXIMOS = 966.94 kgs/cm²



Tensión aprox. elementos
 Miembros
 (Kg/cm²)

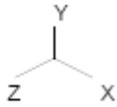
1205.27
1044.56
883.86
723.16
562.46
401.76
241.05
80.35
-80.35
-241.05
-401.76
-562.46
-723.16
-883.86
-1044.56
-1205.27



ELEMENTO DE ENSAYE CF EN CAJON DE 3.5"
 LONGITUD = 2.00 mts.
 CARGA AL CENTRO DEL CLARO = 250 kgs.
 DEFORMACION DEL ELEMENTO = 0.5104 cms.
 ESF. MAXIMOS = 1205.77 kgs/cm²

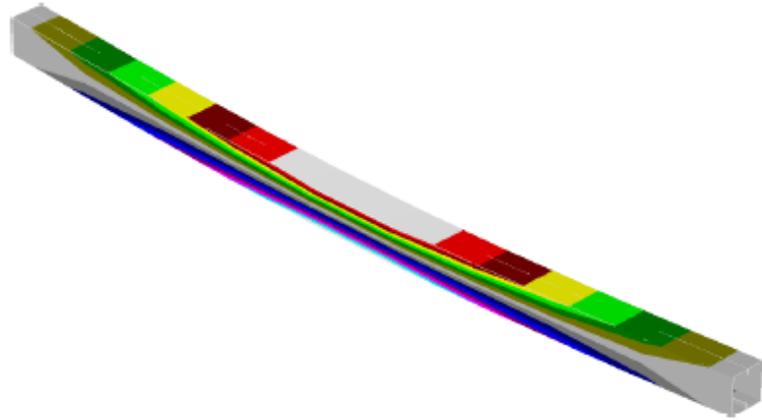
RAM Advanse
 Archivo: ENSAYO.AVV
 Estado: C1=PP+CV

Análisis: 1er orden
 Fecha: 14/09/2013 07:05:01 p.m.

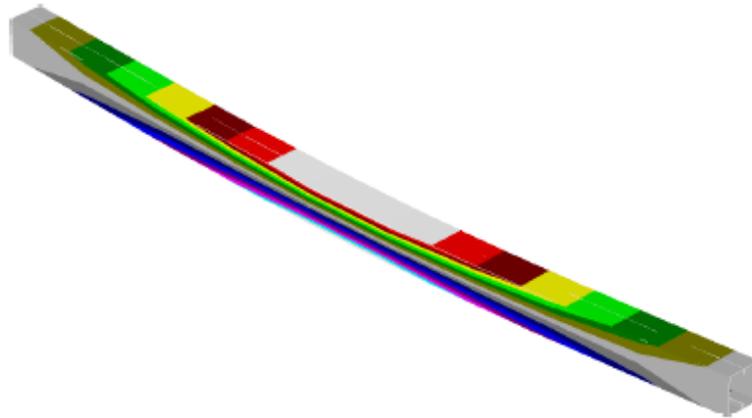
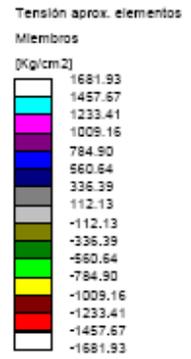
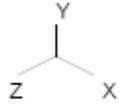


Tensión aprox. elementos
 Miembros
 (Kg/cm²)

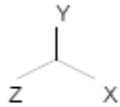
1443.60
1251.12
1058.64
866.16
673.68
481.20
288.72
96.24
-96.24
-288.72
-481.20
-673.68
-866.16
-1058.64
-1251.12
-1443.60



ELEMENTO DE ENSAYE CF EN CAJON DE 3.5"
 LONGITUD = 2.00 mts.
 CARGA AL CENTRO DEL CLARO = 300 kgs.
 DEFORMACION DEL ELEMENTO = 0.6112 cms.
 ESF. MAXIMOS = 1443.6 kgs/cm²

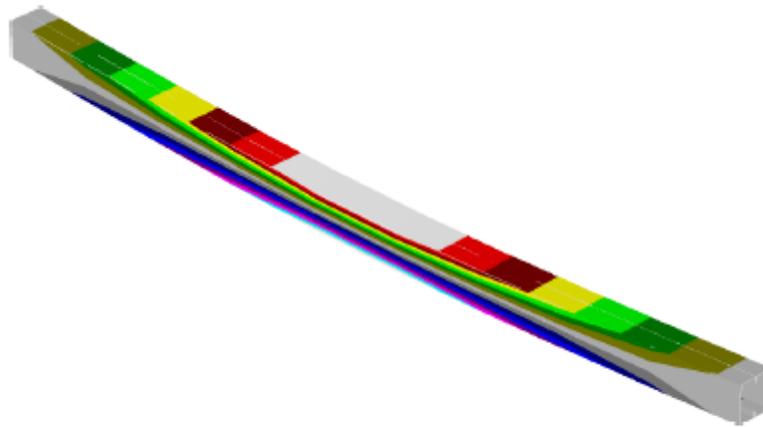


ELEMENTO DE ENSAYE CF EN CAJON DE 3.5"
 LONGITUD = 2.00 mts.
 CARGA AL CENTRO DEL CLARO = 350 kgs.
 DEFORMACION DEL ELEMENTO = 0.7112 cms.
 ESF. MAXIMOS = 1681.93 kgs/cm²



Tensión aprox. elementos
 Miembros
 (Kg/cm²)

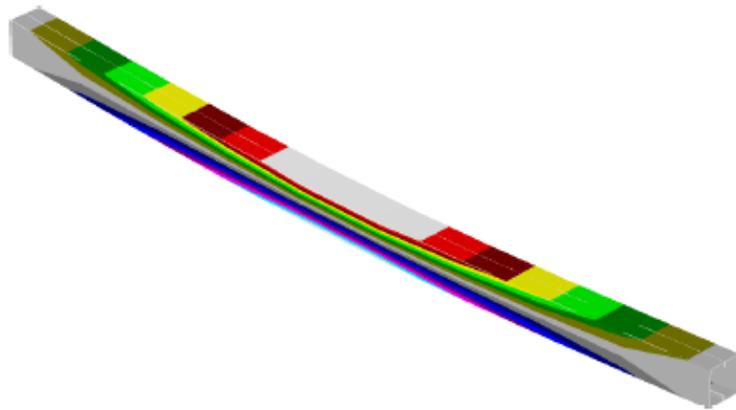
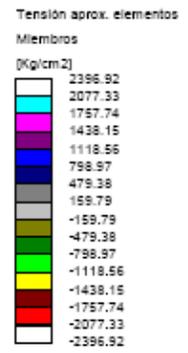
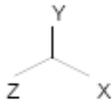
White	1920.26
Light Blue	1664.23
Blue	1408.19
Dark Blue	1152.16
Black	896.12
Dark Grey	640.09
Grey	384.05
Light Grey	128.02
White	-128.02
Light Yellow	-384.05
Yellow	-640.09
Orange	-896.12
Red	-1152.16
Dark Red	-1408.19
Light Red	-1664.23
White	-1920.26



ELEMENTO DE ENSAYE CF EN CAJON DE 3.5"
 LONGITUD = 2.00 mts.
 CARGA AL CENTRO DEL CLARO = 400 kgs.
 DEFORMACION DEL ELEMENTO = 0.8127 cms.
 ESF. MAXIMOS = 1920.26 kgs/cm²

RAM Advanse
Archivo: ENSAYO.AVV
Estado: C1=PP+CV

Análisis: 1er orden
Fecha: 14/09/2013 07:12:22 p.m.



ELEMENTO DE ENSAYE CF EN CAJON DE 3.5"
LONGITUD = 2.00 mts.
CARGA AL CENTRO DEL CLARO = 500 kgs.
DEFORMACION DEL ELEMENTO = 1.0143 cms.
ESF. MAXIMOS = 2396.92 kgs/cm²

9.1.1 OBTENCION DE LA RIGIDEZ ELASTICA, A TRAVES DE LA PENDIENTE DE LA GRAFICA ESFUERZO-DEFORMACION

CARGA APLICADA (KG)	Flecha programa (cms)	Esf programa (kg/cm ²)
0	0.00646	13.61
50	0.1072	251.94
100	0.208	490.27
150	0.3088	728.61
200	0.4096	966.94
250	0.5104	1205.77
300	0.6112	1443.6
350	0.7112	1681.93
400	0.8127	1920.26



Ilustración 89 Ecuación de la Pendiente.

9.1.2 OBTENCION DE PROPIEDADES GEOMETRICAS DE LA SECCION Y OBTENCION DEL MOMENTO DE FLUENCIA POR MEDIO DE SOFTWARE LIBRE CUFSM

I_{x-x}

Open Section Properties

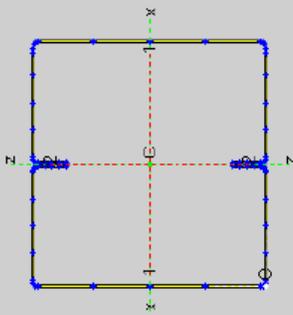
$A = 0.54247$
 $x_{cg} = 1.6472$
 $I_{xx} = 1.0943$
 $I_{xz} = 0$
 $I_{yy} = 1.0943$

$J = 1.2211$
 $z_{cg} = 1.75$
 $I_{zz} = 0.871$
 $\theta = 0$
 $I_{22} = 0.871$

$Z_s = NaN$
 $C_{rw} = NaN$
 $\beta_1 = NaN$
 $\beta_2 = NaN$

Basic Plot scale = 1
 wrapping text out

Calculated Section Properties



Moments consider:

Unsymmetric
 Restrained Bending

Generate P and M based on max (yield) stress = 33

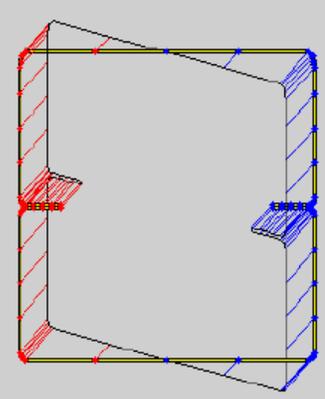
Bimoment based on T = 0 L = 100 X = 50

Calculate P, M and B

P =	17.9014
Mxx =	20.6352
Mzz =	17.3574
M11 =	20.6352
M22 =	17.3574
B =	0

Generate Stress using checked P and M

Calculation of Loads and Moments for Generation of Stress on Member



Scale = 1
 Max Comp. = 32.9999
 Min Tens. = -32.9999

9.1.3 OBTENCION DE FACTORES DE CARGA PARA MOMENTO CRÍTICO POR MEDIO DEL SOFTWARE LIBRE CUFSM

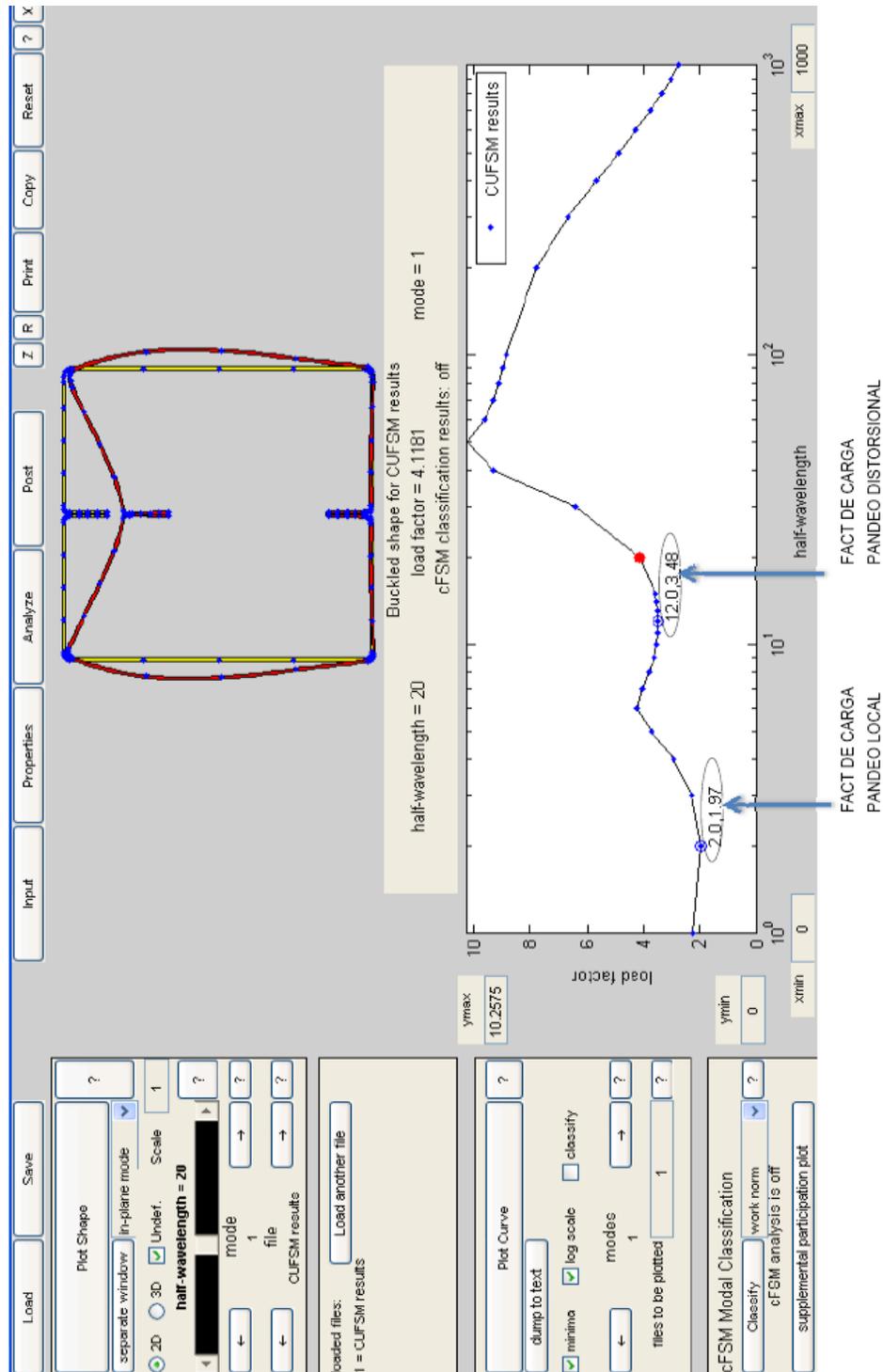


Ilustración 90 Imágen de factores de carga CUFSM

9.2 CALCULO DE LA CURVA MOMENTO-ROTACION (PANDEO LOCAL) PARA UNA SECCION CERRADA

Proporcione los siguientes datos:

$M_y =$	23786.57	<i>VER COMO OBTENER M_y</i>
FACT. CARG	1.97	
$M_{cri} =$	46859.54	<i>VER COMO OBTENER M_{cri}</i>
$k_1 = k_e =$	236568.23	"Rigidez Elastica"
$M_y / M_{cri} =$	0.51	
$M_p / M_y =$	1.00	<i>VER COMO OBTENER M_p/M_y</i>
$M_p =$	23786.57	
$E =$	2039400 Kg/cm ²	$I =$ 1.0943 in ⁴ $L =$ 200 CM

Rotaciones

$$\theta_1 = \frac{M_1}{k_1} \quad \theta_1 = 0.08 \quad (\text{pag. 13})$$

$$\frac{\theta_2}{\theta_y} = \frac{1}{\lambda_y} < \frac{M_y}{k_e} \quad \theta_2/\theta_y = 1.4036 \quad \text{CORRECTO} \quad (\text{pag. 25})$$

$$(\theta_y = M_y/k_1 \text{ or } M_y/k_e) \quad \theta_y = 0.100548455 \quad (\text{pag. 20})$$

$$\theta_2 = 0.14$$

$$\frac{\Delta\theta}{\theta_y} = \begin{cases} \left(\frac{0.776}{\lambda_y}\right) - 1 & \text{if } \lambda_y < 0.776 \\ 0 & \text{if } \lambda_y \geq 0.776 \end{cases} \quad \Delta\theta/\theta_y = 0.0892 \quad (\text{pag. 23})$$

"Paso de rotación después del punto máximo" $\Delta\theta = 0.0090$

$$\theta_3 = \theta_2 + \Delta\theta \quad \theta_3 = 0.1501 \quad (\text{pag. 13})$$

$$\frac{\theta_4}{\theta_y} = \begin{cases} 1.5 \frac{1}{\lambda_y} & \text{if } \lambda_y > 1 \\ 1.5 \left(\frac{1}{\lambda_y}\right)^{3/4} & \text{if } \lambda_y < 1 \end{cases} \quad \theta_4/\theta_y = 1.6895 \quad (\text{pag. 22})$$

$$\theta_4 = 0.1699 \quad \text{"Maxima Rotacion"}$$

Esbeltéz

$$\lambda_t = \sqrt{\frac{M_y}{M_{cr}}} \quad \lambda = 0.7125 \quad (\text{pag. 19})$$

Coefficientes de placa "k"

$$k_2 = \frac{M_2 - M_1}{\theta_2 - \theta_1} \quad k_2 = 69439.1973 \quad (\text{pag. 25})$$

$$1/\lambda = 1.4036 \quad (\text{pag. 25})$$

$$C_{yt} = \sqrt{\frac{0.776}{\lambda_t}} \approx 3 \quad C_{yt} = 1.0436 \quad (\text{pag. 20})$$

Momentos

$$\frac{M_1}{M_y} = \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_t < 0.650 \\ \left(\frac{0.650}{\lambda_t}\right)^2 & \text{if } \lambda_t \geq 0.650 \end{cases} \leq \frac{M_2}{M_y} \quad M_1/M_y = 0.8323 \quad \text{CORRECTO} \quad (\text{pag. 22})$$

$$M_1 = 19798.16 \quad \text{"Momento elastico"}$$

$\frac{M_2}{M_1} = \frac{M_{cr}}{M_1}$ where M_{cr} is per AISI S100, i.e.:

$$\frac{M_2}{M_y} = \begin{cases} 1 - \left(1 - \frac{1}{C_{yt}}\right) \frac{(M_2 - M_1)}{M_y} \text{ and } C_{yt} = \sqrt{\frac{0.776}{\lambda_t}} \approx 3 & \text{if } \lambda_t < 0.776 \\ \left(1 - 0.15\left(\frac{1}{\lambda_t}\right)^{1.5}\right) \left(\frac{1}{\lambda_t}\right)^{1.5} & \text{if } \lambda_t \geq 0.776 \end{cases}$$

$$\rightarrow M_2/M_y = 1.0000 \quad (\text{pag. 20})$$

$$M_2 = 23786.57 \quad \text{"Momento pico"}$$

$$\frac{\Delta M}{M_y} = 1 - 1/\left(\frac{\lambda_t}{0.776} + 1\right)^{1.5} \leq 0.5 \quad \Delta M/M_2 = 0.5000 \quad (\text{pag. 24})$$

$$\Delta M = 11893.29$$

$$M_3 = M_2 - \Delta M \quad M_3 = 11893.2850 \quad (\text{pag. 25})$$

Ilustración 91 Imagen herramienta informática cálculo curva momento-rotación.

Pto.	θ	M
0	0.0000	0.00
1	0.0837	19798.16
2	0.1411	23786.57
3	0.1501	23786.57
4	0.1501	11893.29
5	0.1699	11893.29
6	0.1699	0.00

DIAGRAMA MOMENTO-ROTACION

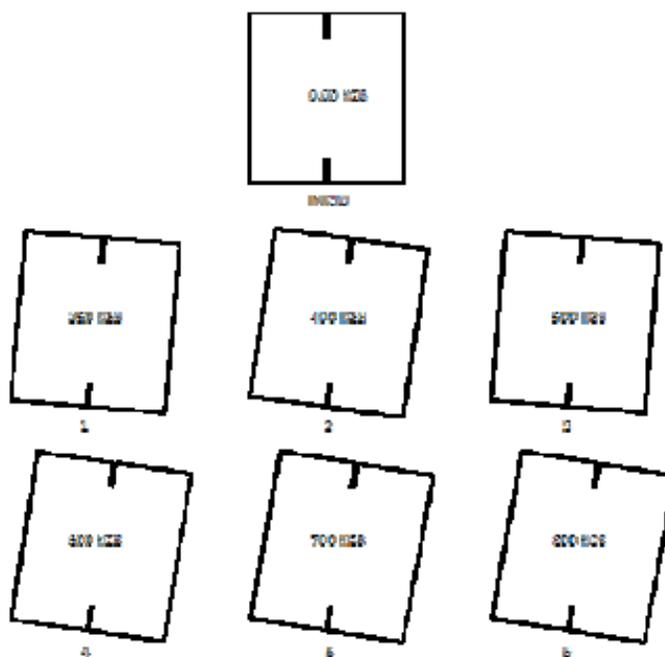
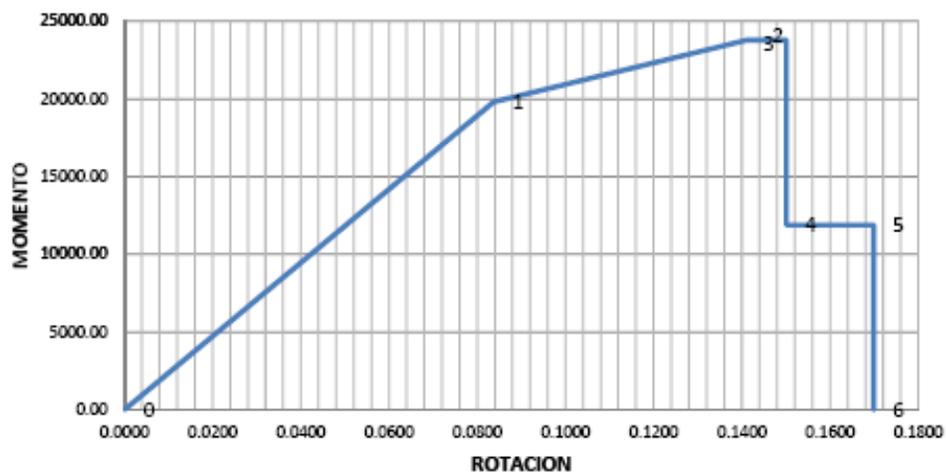


Ilustración 92 Curva Momento-Rotación sección cerrada.

9.2.1 CALCULO DE CURVA MOMENTO ROTACION UTILIZANDO RESULTADOS DE ENSAYO EN LABORATORIO.

Calculo de curva momento rotación ensayo de laboratorio.



ENSAYO DE PERFIL SECCION CAJON EN LABORATORIO

VIGA SIMPLEMENTE APOYADA DE 2MTS CON CARGA AL CENTRO					
LECTURA	CARGA APLICADA (KG)	Mom (kg-cm)	Flecha ensayo (cms)	Flecha fórmula (cms)	Esf programa (kg/cm2)
1	250	12500	0.60	0.45	1205.77
2	400	20000	0.80	0.72	1920.26
3	500	25000	1.10	0.90	2396.92
4	600	30000	1.40	1.08	2873.58
5	700	35000	1.70	1.26	3350.24
6	800	40000	2.20	1.44	3826.91

E = 2039400 Kg/cm²
 I = 1.0943 in⁴
 L = 200 CM
 I = 45.55 CM⁴
 f max = PL³ / 48EI CM
 M max = PL / 4 KG-CM

M_y = 20.6352 KLb-plg
 M_y = 23781.038 kg-cm

LECTURA	CARGA APLICADA (KG)	Flecha programa (cms)	Esf programa (kg/cm2)
1	0	0.00646	13.61
2	50	0.1072	251.94
3	100	0.208	490.27
4	150	0.3088	728.61
5	200	0.4096	966.94
6	250	0.5104	1205.77
7	300	0.6112	1443.6
8	350	0.7112	1681.93
9	400	0.8127	1920.26
10	500	1.0143	2396.92
11	600	1.2200	2873.58
12	700	1.4174	3350.24
13	800	1.6125	3826.91
14	1000	2.0221	4780.23

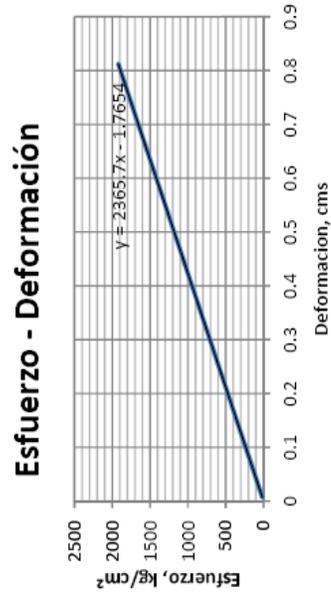


Ilustración 93 Carga-deformación, ensayo de laboratorio.

CAPÍTULO 10.- DISCUSION DE RESULTADOS

En el presente trabajo práctico, se siguió paso a paso el procedimiento descrito en un artículo de investigación cuya cita fue contenida, en el cual se utiliza un perfil C doblado en frío.

Utilizando el mismo procedimiento descrito en el artículo y con el auxilio de un software libre para estructuras de acero rolado en frío, del cual también se hace referencia, se obtuvieron resultados para poder graficar la curva momento-rotación de una sección cerrada.

Finalmente se reprodujeron las condiciones en laboratorio y se pudieron comprobar los resultados, los cuales coincidieron con el modelo realizado en computadora.

En cuanto a las otras herramientas informáticas referentes a la revisión de elementos de acero rolado en frío sometidos a flexión, compresión y flexocompresión, se pudo probar la efectividad de las mismas introduciendo tanto datos teóricos, es decir ejemplos de libro y comprobando resultados, como datos prácticos referentes al prototipo de vivienda que fue probado escala 1:1

CONCLUSIONES

Ya existe software para la revisión y diseño de estructuras de acero rolado en frío tales como CUFSM, el cual sirvió de auxilio para poder obtener algunos de los datos necesarios para revisar elementos de acero rolado en frío, haciendo uso de la herramienta informática.

También existen algunas otras herramientas para revisión de elementos de acero rolado en frío tales como CFS y están disponibles de manera gratuita, la finalidad de crear esta herramienta informática fue el contar con una herramienta propia, en la cual se pueda visualizar el procedimiento empleado, entenderlo y modificarlo según convenga de acuerdo a las necesidades y a la reglamentación que esté vigente en el País, también permite introducir y obtener resultados tabulados para la rápida revisión de una serie de elementos que componen la estructura.

Se pudo concluir que el procedimiento descrito en el Artículo citado en el presente documento para obtener la curva momento-rotación para un perfil C doblado en frío es igualmente aplicable para una sección cerrada de acero doblado en frío.

Los resultados obtenidos con el uso de la herramienta informática en comparación con las deformación medidas en laboratorio fueron similares, lo cual lleva a concluir la efectividad del uso de la misma, así como el adecuado manejo de del software libre del cual se hace referencia y del cual se realizó un manual de uso contenido en este trabajo práctico.

GLOSARIO

ACERO FORJADO EN FRÍO.

El acero forjado en frío, es el término común para los productos fabricados por laminación o presionando indicadores finos de chapa en productos de acero. Los productos de acero conformados en frío son creados por el trabajo de chapa de acero laminado y se presiona para deformar la hoja en un producto utilizable.

ANCHO EFECTIVO.

Es el ancho reducido de una placa o ceja que, con una distribución de esfuerzos uniformes supuestos, producen el mismo efecto en el comportamiento de un miembro estructural que el del ancho real de la placa con su distribución de esfuerzos no uniformes.

ÁREA BRUTA.

Se refiere a toda el área de la sección.

ÁREA NETA.

Se traduce como el área real de la sección menos el área de los agujeros o de los miembros.

ARRIOSTRAMIENTO.

Es la acción de rigidizar o estabilizar una estructura mediante el uso de elementos que impidan el desplazamiento o deformación de la misma por lo que se concluye como un dispositivo para evitar la deformación y el derrumbamiento de las armaduras de vigas, por medio de riostras, tornapuntas o bridas ensambladas.

ATIESADOR.

Es un miembro que normalmente es un ángulo o una placa y son unidos a la placa o al alma de una viga o trabe para distribuir la carga, transferir el cortante, o para prevenir pandeo del miembro al cual es unido.

ATIESADORES DE BORDE.

Son atiesadores adicionales con el fin de proteger el alma de las cargas directas de compresión.

ATIESADORES INTERMEDIOS.

Son los que se utilizan cuando un alma no atiesada es incapaz de resistir el cortante aplicado para proporcionar rigidez en vez de resistir directamente las cargas aplicadas.

ATIESADORES TRANSVERSALES.

Son aquellos unidos a las almas de las vigas en puntos de cargas concentradas o reacciones, diseñados como miembros a compresión.

COEFICIENTE DE PANDEO.

El coeficiente de pandeo es un valor que depende de la calidad del material y de la esbeltez de la barra. Son magnitudes físicas que cuantifican la rigidez de un elemento resistente bajo diversas configuraciones de carga. Normalmente las rigideces se calculan como la razón entre una fuerza aplicada y el desplazamiento obtenido por la aplicación de esa fuerza.

CONSTANTE DE ALABEO TORSIONAL.

La constante torsional de alabeo, C_w , mide la resistencia de un elemento estructural sometido a torsión no uniforme o alabeo torsional. Se utiliza en miembros a compresión para calcular el momento resistente a pandeo en vigas no soportadas lateralmente y a pandeo flexo-torsional.

CONSTANTE TORSIONAL.

La constante torsional de St. Venant, J , mide la resistencia de un elemento estructural a torsión pura o torsión uniforme. Se utiliza en miembros a compresión para calcular el momento resistente a pandeo en vigas no soportadas lateralmente y a pandeo flexotorsional.

COLUMNA.

Miembro vertical cuya función principal es soportar cargas verticales.

CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN.

Muestra las características típicas, con la porción elástica inicial, meseta de fluencia, endurecimiento por deformación y fractura subsecuente del acero.

DEFLEXIÓN.

Es un estado límite de servicio que depende de la función de la viga y de la probabilidad del daño resultante.

ELEMENTOS ATIESADOS CON GRADIENTE DE ESFUERZOS.

Estos elementos atiesados están sujetos a esfuerzos tanto positivos como negativos, es decir, en tensión o compresión o ambos en compresión.

ELEMENTOS ATIESADOS UNIFORMEMENTE COMPRIMIDOS.

Se trata de un elemento atiesado en compresión con ambos bordes longitudinales conectados a otros elementos atiesados a esfuerzo uniforme.

ELEMENTO EN COMPRESION ATIESADO.

Elemento plano en compresión, del cual ambos bordes paralelos a la dirección de esfuerzos está atiesado por cualquiera del alma, patín, ceja atiesadora, atiesador intermedio, o algo semejante.

ELEMENTO EN COMPRESION NO ATIESADO.

Elemento plano en compresión el cual está atiesado o solamente un borde paralelo a la dirección de esfuerzos.

ESBELTEZ.

Si un miembro estructural tiene una sección transversal pequeña en relación con su longitud, se dice que es esbelto.

ESFUERZO CRÍTICO.

El esfuerzo es un medio conveniente para definir el límite de validez de la ecuación de Euler, es útil expresar la ecuación en términos del esfuerzo, en lugar de en términos de la carga.

ESFUERZO DE FLUENCIA.

Esfuerzo de fluencia (σ_y): valor de esfuerzo que separa el comportamiento elástico del comportamiento plástico de un material. Para materiales dúctiles pueden existir fluctuaciones y generarse esfuerzos de fluencia superior e inferior hasta que se define completamente el paso a la zona plástica.

ESTADO LÍMITE DE FALLA O ÚLTIMO.

Es el estado último de resistencia, en el cual el elemento ha alcanzado una condición de falla física.

ESTADO LIMITE DE SERVICIO.

Es cuando se ha alcanzado el límite para el cual se le fue diseñado y por tanto, se hace no funcional.

FACTOR DE CARGA.

Estos factores incrementan las magnitudes de las cargas para tomar en cuenta las incertidumbres y estimar sus valores.

FACTOR DE RESISTENCIA.

Para estimar con precisión la resistencia última de un elemento estructural se deben tomar en cuenta la incertidumbre que se tiene en las hipótesis de diseño, resistencia de materiales, dimensiones de cada sección, mano de obra, aproximación de los análisis, etc.

FALLA.

Significa la ruptura o el colapso completo de una estructura, o bien que las deformaciones rebasan algún valor limitante, de tal modo que la estructura se vuelve incapaz de realizar sus funciones.

FLEXIÓN.

Es la capacidad de resistir cargas y a su vez transmitir las a sus apoyos, teniendo una deformación temporal.

LONGITUD EFECTIVA.

Dentro de las ecuaciones para la carga crítica de pandeo, esta longitud es KL , donde K es un factor de longitud efectiva que depende de la rotación o traslación de los apoyos, y L , es la longitud real del miembro.

MÉTODO (ASD) DISEÑO DE VALORES ADMISIBLES.

Método para dosificar componentes estructurales (miembros, conectores, elementos de conexión y montajes) tales que los esfuerzos admisibles, fuerzas admisibles o momentos admisibles no son excedidos por el requerimiento de resistencia de un componente determinado por los efectos de carga de todas las apropiadas combinaciones de cargas nominales.

MÉTODO (LRFD) DISEÑO DE FACTOR DE CARGA Y RESISTENCIA.

Método de dimensionamiento de componentes estructurales (miembros, conectores, conexión de elementos y montajes) tales que no se aplican si se excede el estado límite cuando la estructura está sujeta a todas las combinaciones apropiadas de carga.

MIEMBROS AXIALMENTE CARGADOS.

Cuando un miembro estructural es cargado axialmente, es decir, el esfuerzo es uniforme sobre la sección transversal y la fuerza resultante puede considerarse que actúa a lo largo del eje de gravedad, que es un eje longitudinal a través del centroide. Para que el miembro este cargado concéntricamente en sus extremos, la fuerza resistente resultante proporcionada por la conexión debe también actuar a lo largo de este eje.

MIEMBROS ESTRUCTURALES DE ACERO FORMADO EN FRÍO.

Son aquellos manufacturados por troquelada sobre láminas, cortadas de rollos largos o placas, por rollos o láminas formadas en frío o rodadas en caliente, trabajadas a temperatura ambiente natural, sin necesidad de elevar dicha temperatura.

MIEMBROS EN COMPRESIÓN.

Los miembros en compresión son elementos estructurales sometidos solo a fuerzas axiales de compresión; es decir, las cargas son aplicadas a lo largo de un eje longitudinal que pasa por el centroide de la sección transversal del miembro y el esfuerzo puede calcularse con $f_a = P/A$ donde f_a , se considera uniforme sobre toda la sección transversal.

MIEMBROS EN FLEXIÓN.

Los miembros en flexión son elementos estructurales capaces de resistir cargas y a su vez transmitirlos a sus apoyos.

MODULO DE CORTANTE.

Es una constante elástica que caracteriza el cambio de forma que experimenta un material elástico (lineal e isótropo) cuando se aplican esfuerzos cortantes. Este módulo recibe una gran variedad de nombres, entre los que cabe destacar los siguientes: módulo de rigidez transversal, módulo de corte, módulo de cortadura, módulo elástico tangencial, módulo de elasticidad transversal

MÓDULO DE YOUNG O MÓDULO DE ELASTICIDAD.

Es la razón del esfuerzo a la deformación unitaria dentro del rango elástico, denotada como E.

PANDEO FLEXIONANTE.

Se trata de una deflexión causada por flexión respecto al eje correspondiente a la relación de esbeltez más grande, este es usualmente el eje principal menor, o sea, aquel con el menor radio o giro.

PANDEO LATERAL TORSIONANTE.

Es cuando la porción en compresión de la sección transversal está restringida por la porción en tensión y la deflexión hacia fuera es acompañada por torsión.

PANDEO LOCAL.

Este tipo de inestabilidad es un pandeo localizado o arrugamiento en una localidad aislada, cuando se presenta la sección transversal ya no es totalmente efectiva y el miembro habrá fallado.

PANDEO TORSIONANTE.

Este tipo de falla es causada por torsión alrededor del eje longitudinal del miembro, esta solo puede ocurrir en secciones transversales doblemente simétricas con elementos muy esbeltos en su sección.

PUNTO DE FLUENCIA.

Es el esfuerzo en el material para el cual la deformación presenta un gran incremento sin que haya un aumento correspondiente en el esfuerzo.

RELACIÓN DE POISSON.

Se denomina relación de Poisson a la relación entre la deformación unitaria transversal y la deformación unitaria longitudinal, bajo una carga axial dada.

RELACION DE ESBELTEZ.

Es la relación L/r , (longitud/radio) y es una medida de esbeltez de un miembro, con valores grandes correspondientes a miembros esbeltos.

RESISTENCIA.

Capacidad de los materiales para soportar esfuerzo. Se determina cuantificando la fuerza máxima por unidad de área de sección que resiste un material antes de romperse.

RESISTENCIA AL CORTE

Es la satisface la relación entre las fuerza cortante máxima basada en la combinación gobernante de cargas factorizadas con el factor de resistencia por cortante y la resistencia nominal por cortante.

RESISTENCIA NOMINAL.

Capacidad de una estructura o componente a resistir los efectos de cargas por medio de cálculos usando resistencias específicas de materiales y dimensiones y ecuaciones derivadas sobre principios o pruebas de laboratorio.

RIGIDEZ.

Es la capacidad de un elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones y/o desplazamientos.

TORSIÓN.

La torsión en elementos estructurales puede deberse a dos factores fundamentalmente diferentes; puede ser ocasionada en forma directa por las solicitaciones exteriores que obran sobre el elemento, o puede presentarse al iniciarse el pandeo de un miembro originalmente recto, sometido a solicitaciones de otro tipo.

VIGA.

Miembro estructural que soporta cargas transversales y queda por tanto, sometido principalmente a flexión. Si está presente también una cantidad considerable de carga axial, al miembro se llama viga-columna.

BIBLIOGRAFIA

Alva, C. B. (2005). *DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO FORMADO EN FRÍO USANDO LAS ESPECIFICACIONES AISI 96*. Zacatenco, México, México: INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.

American Society of Civil Engineers. (s.f.). *DESIGN OF COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. CFS SEMINAR OUTLINE*. Nashville , TN, EEUU: CFS SEMINAR OUTLINE.

D. Ayhan, B. S. (2012). *Moment-Rotation Characterization of Cold-Formed Steel Beams*. (A. C.-F. Engineering, Ed.)

James M. Gere, B. J. (2009). *Mecánica de materiales* (Septima ed.). (J. L. Cárdenas, Trad.) CENGAGE Learning.

José Angel Ortiz Lozano, L. A. (2010). *COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ELEMENTOS DE ACERO ROLADO EN FRÍO DE PARED DELGADA ANTE CARGAS DE COMPRESIÓN, CONTRASTÁNDOLO CON SU CARACTERIZACION TERMOGRÁFICA*. Aguascalientes: Universidad Autonoma de Aguascalientes.

LaBoube R, P. D. (2011). *Overview of Changes to 2007 AISI Specification Design of Cold-Formed Steel Structural Members*. Obtenido de <http://www.structuremag.org/article.aspx?articleID=550>

North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. (2010). Recuperado el 20 de septiembre de 2011, de <http://legacy.steel.org./shopaisi/S100-07-S2-10 small s.pdf>

Pacheco M. J., Z. d. (2012). *ZONIFICACION DEL PELIGRO POR SUBSIDENCIA: CASO AGUASCALIENTES*. Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes.

S.Vinnakota. (2006). *Estructuras de acero: comportamiento y LRFD*. Mc Graw Hill.

Wei-Wen Yu, P. D. (2000). (J. W. Inc., Ed.) Recuperado el 20 de septiembre de 2011, de COLD-FORMED STEEL DESIGN.: http://books.google.com.mx/books/about/Cold Formed Steel Design.html?id= WfeZtoJbY8C&redir_esc=y