

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS VIGAS DE ACERO DE ALMA ALIGERADA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**JESÚS RENÉ ANAGUANO ANAGUANO**

**`j_rene-21@hotmail.com`**

**DIRECTOR: MSC. ING. RICARDO SOTO**

**`ricardo.soto@epn.edu.ec`**

**Quito, Junio 2013**

## DECLARACIÓN

Yo, Jesús René Anaguano Anaguano, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Jesús René Anaguano Anaguano

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor Jesús René Anaguano Anaguano bajo nuestra supervisión.

---

**Ing. Ricardo Soto**

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

---

**Ing. Jorge Escobar**

**CO-DIRECTOR DEL PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco en primer lugar a mi Dios por haberme ayudado y guiado todos los días de mi vida. Agradezco a mi familia por haberme apoyado incondicionalmente durante toda mi formación estudiantil y por haberme inculcado valores.

Agradezco también a la Escuela Politécnica Nacional y en especial a la Facultad de Ingeniería Mecánica por tener excelentes profesores que han sabido impartir sus conocimientos de una manera clara y consistente en todas las materias que dictan. De una manera muy especial agradezco al Ing. Ricardo Soto e Ing. Jorge Escobar por su acertada dirección y colaboración en la realización de este proyecto.

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a todas las personas que han estado conmigo en los momentos buenos y malos de mi vida, especialmente a mi familia.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
SIMBOLOGÍA.....	xix
RESUMEN.....	xxv
PRESENTACIÓN.....	xxvi
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>1</b>
1.1    EL ACERO COMO MATERIAL ESTRUCTURAL.....	1
1.1.1    VENTAJAS DEL ACERO.....	1
1.1.2    DESVENTAJAS DEL ACERO .....	2
1.2    CLASIFICACIÓN.....	2
1.2.1    ACEROS ESTRUCTURALES AL CARBONO .....	3
1.2.2    ACEROS ALTA RESISTENCIA Y BAJA ALEACIÓN.....	4
1.3    PROPIEDADES ESTRUCTURALES DEL ACERO.....	4
1.3.1    RESISTENCIA DEL ACERO .....	4
1.3.2    MÓDULO DE ELASTICIDAD (E) .....	5
1.3.3    COEFICIENTE DE POISSON ( $\mu$ ).....	6
1.3.4    MÓDULO DE ELASTICIDAD AL ESFUERZO CORTANTE (G) .....	6
1.4    PERFILES LAMINADOS.....	6

1.4.1	PERFILES LAMINADOS EN CALIENTE .....	7
1.4.2	DENOMINACIÓN DE PERFILES.....	7
1.5	ESTÁTICA DE VIGAS .....	9
1.5.1	ESTADO DE ESFUERZOS .....	11
1.5.2	CÁLCULO DE REACCIONES .....	12
1.5.3	ESFUERZO DE FLEXIÓN.....	12
1.5.4	ESFUERZO CORTANTE.....	13
1.5.5	MOMENTO DE FLUENCIA $M_y$ Y MOMENTO PLÁSTICO $M_p$ .....	14
1.5.6	DEFORMACIONES DE VIGAS .....	16
1.5.6.1	Deflexión de vigas .....	16
1.5.6.2	Criterios límites de deflexión.....	17
1.6	CONCENTRACIÓN DE TENSIONES .....	17
1.6.1	FACTOR DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES .....	18
1.7	FALLA DE MATERIALES.....	19
1.7.1	FALLA POR RESISTENCIA .....	19
1.7.1.1	Criterio de falla de la máxima energía de distorsión o de Von Misses	19
1.7.2	FALLA POR DEFORMACIÓN .....	20
1.7.3	FALLA POR ESTABILIDAD .....	20
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>		<b>21</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>		<b>21</b>
2.1	MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	21
2.1.1	MATRIZ DE RIGIDEZ .....	22
2.1.2	SOFTWARE AUTODESK ALGOR SIMULATION 2011.....	23
2.1.2.1	Introducción.....	23
2.1.2.2	Interface .....	23
2.1.2.3	Pasos para realizar la simulación .....	24
2.1.2.4	Convergencia de la solución.....	25
2.2	DISEÑO ESTRUCTURAL .....	25
2.2.1	PARÁMETROS DE DISEÑO .....	25
2.2.1.1	Seguridad .....	25
2.2.1.2	Costo.....	25
2.2.1.2	Factibilidad .....	25

2.2.2	ESPECIFICACIONES DE DISEÑO .....	26
2.2.2.1	Diseño con factores de carga y resistencia (LRFD) .....	26
2.2.2.1.1	Fluencia.....	28
2.2.2.1.2	Pandeo lateral torsional.....	28
2.2.2.2	Diseño por esfuerzos permisibles (ASD) .....	31
2.2.2.3	Resistencia al corte .....	33
2.2.3	ESTUDIO DE CARGAS .....	34
2.2.3.1	Cargas Muertas (D) .....	34
2.2.3.2	Cargas vivas (L) .....	35
2.2.3.2.1	Carga viento (W) .....	36
2.2.3.2.2	Carga de sismo (E) .....	36
2.2.3.3.3	Cargas de Nieve (S).....	36
2.2.4	COMBINACIONES DE CARGA.....	37
2.2.4.1	Combinaciones ASD .....	37
2.2.4.2	Combinaciones LRFD .....	37
2.3	VIGAS DE ALMA ALIGERADA .....	38
2.3.1	INTRODUCCIÓN .....	38
2.3.2	VENTAJAS .....	39
2.3.3	TIPOS DE VIGAS .....	39
2.3.3.1	Vigas Estándar.....	39
2.3.3.2	Compuestas .....	40
2.3.4	FABRICACIÓN .....	40
2.3.4.1	Materiales.....	40
2.3.4.2	Proceso de fabricación .....	41
2.3.4.2.1	Corte por plasma.....	41
2.3.4.2.2	Separación de las T .....	41
2.3.4.2.3	Reconstrucción de la viga .....	41
2.3.5	FORMAS DE LOS ALVEOLOS .....	42
2.3.5.1	Circulares (Celulares).....	42
2.3.5.2	Hexagonales .....	42
2.3.5.3	Octogonales .....	43
2.3.5.4	Angelina .....	43
2.3.6	APLICACIONES .....	44
2.3.7	FUERZAS QUE ACTUAN SOBRE UNA ABERTURA .....	46
2.3.8	CONCENTRACIONES DE TENSIONES EN VIGAS.....	47
2.4	DISEÑO DE VIGAS CON ABERTURAS EN EL ALMA.....	49

2.4.1	REGLAS DE DISEÑO ACTUALES .....	49
2.4.2	CURVAS DE INTERACCIÓN MOMENTO CORTANTE .....	50
2.4.2.1	Capacidad de momento máximo bajo fuerza de corte cero, $M_m$ .....	51
2.4.2.1.1	Aberturas no reforzadas .....	51
2.4.2.1.2	Aberturas reforzadas .....	52
2.4.2.2	Capacidad de cortante máximo bajo momento flector cero, $V_m$ .....	53
2.4.2.3	Reforzamiento .....	55
2.4.2.3.1	Una sola barra de reforzamiento .....	55
2.4.2.4	Revisión de estabilidad .....	56
2.4.2.5	Ubicaciones posibles de las aberturas .....	56
2.4.2.5.1	Espaciamiento aberturas cuadradas y rectangulares .....	56
2.4.2.5.2	Espaciamiento aberturas circulares .....	56
2.4.2.5.3	Radio de acuerdo ( $r$ ): .....	57
2.4.2.5.4	Aberturas circulares .....	57
2.5	MODOS DE FALLA EN VIGAS DE ALMA ALIGERADA .....	57
2.5.1	FALLA POR FLEXIÓN .....	58
2.5.2	FALLA POR CORTE .....	59
2.5.3	PANDEO LATERAL TORSIONAL .....	59
2.5.4	FALLA POR LA FORMACIÓN DEL MECANISMO VIERENDEEL .....	60
2.5.4.1	Capacidad de la sección crítica .....	60
2.5.4.2	Esfuerzos de flexión totales en la secciones T ( $\sigma_x$ ) .....	62
2.5.5	FALLA POR PANDEO DEL POST-ALMA .....	63
2.5.5.1	Capacidades al pandeo y flexión del post-alma .....	64
2.5.5.1.1	Modelo de Ward .....	64
2.5.5.1.2	Modelo de Lawson .....	66
2.5.6	RUPTURA DE JUNTAS SOLDADAS .....	67
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>		<b>69</b>
<b>PLANTEAMIENTO Y ANÁLISIS DEL PROBLEMA .....</b>		<b>69</b>
3.1	ANÁLISIS DE VIGAS DE ALMA ALIGERADA POR ELEMENTOS FINITOS .....	69
3.1.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO .....	69
3.1.2	SELECCIÓN DEL TIPO DE PERFIL .....	70
3.1.2.1	Datos del problema .....	70
3.1.2.2	Determinación de las cargas .....	70
3.1.2.2.1	Carga muerta (D) .....	70

3.1.2.2.2 Carga viva (L).....	71
3.1.2.2.3 Carga de diseño factorada: qd .....	71
3.1.2.3 Diseño de la viga I de alma llena por ASD .....	71
3.1.2.4 Datos perfil seleccionado .....	75
3.1.2.4.1 Dimensiones.....	75
3.1.2.4.2 Propiedades .....	75
3.1.2.4.3 Criterios para sección compacta: .....	75
3.1.3 ANÁLISIS DE ESFUERZOS POR ELEMENTOS FINITOS .....	76
3.1.3.1 Geometría de la viga de alma aligerada .....	76
3.1.3.2 Distribución de los alveolos .....	78
3.1.3.2.1 Alveolos circulares .....	78
3.1.3.2.2 Alveolos hexagonales .....	79
3.1.3.2.3 Alveolos “Angelina” .....	79
3.1.3.2.4 Alveolos rectangulares .....	80
3.1.3.3 Condiciones del problema .....	81
3.1.3.3.1 Unidades .....	81
3.1.3.3.2 Sistema de coordenadas.....	81
3.1.3.3.3 Material .....	81
3.1.3.3.4 Tipo de mallado.....	82
3.1.3.3.5 Condiciones de contorno.....	82
3.1.3.3.6 Carga aplicada .....	82
3.2 RESULTADOS OBTENIDOS .....	83
3.2.1 ESFUERZOS ESTÁTICOS CON MATERIALES LINEALES .....	83
3.2.1.1 Perfil W30X99 alma llena .....	83
3.2.1.1.1 Deflexiones $\Delta Y$ .....	83
3.2.1.1.2 Esfuerzos $\sigma_{VM}$ .....	84
3.2.1.1.3 Esfuerzos $T_{zz}$ .....	84
3.2.1.1.4 Esfuerzos cortantes $T_{yz}$ .....	84
3.2.1.1.5 Factores de seguridad $T_{zz}$ .....	85
3.2.1.2 Alveolos circulares .....	85
3.2.1.2.1 Deflexiones $\Delta Y$ .....	85
3.2.1.2.2 Esfuerzos $\sigma_{VM}$ .....	85
3.2.1.2.3 Esfuerzos $T_{zz}$ .....	86
3.2.1.2.4 Esfuerzos cortantes $T_{yz}$ .....	86
3.2.1.2.5 Factores de seguridad $T_{zz}$ .....	86
3.2.2 CARGA CRÍTICA DE PANDEO.....	87
3.2.2.1 Perfil W30X99.....	87
3.2.2.2 Alveolos circulares.....	87

3.2.2.3	Convergencia de resultados.....	88
3.2.2.3.1	Perfil W 30X99 .....	88
3.2.2.3.2	Alveolos circulares .....	89
3.2.2.3.3	Alveolos hexagonales .....	90
3.2.2.3.4	Alveolos angelina .....	91
3.2.2.3.5	Alveolos rectangulares .....	92
3.2.2.4	Elección de la mejor configuración.....	93
3.2.2.4.1	Criterio falla por resistencia.....	93
3.2.2.4.2	Criterio falla por estabilidad.....	93
3.2.3	CONFIGURACIÓN CIRCULAR MEJORADA .....	94
3.2.3.1	Parámetros en una viga celular.....	95
3.2.3.2	Relación Hs/Do .....	95
3.2.3.3	Relación So/Do .....	96
3.2.3.4	Configuración seleccionada .....	96
3.2.3.4.1	Opción 1: Relación Hs/Do.....	96
3.2.3.4.2	Opción 2: Relación So/Do.....	96
3.2.4	CONCENTRACIÓN DE TENSIONES.....	97
3.3	SOLUCIÓN DEL PROBLEMA POR SOFTWARE PARA VIGAS DE ALMA ALIGERADA.....	99
3.3.1	GEOMETRÍA DE LA VIGA.....	99
3.3.2	ASIGNACIÓN DE CARGAS.....	100
3.3.3	RESULTADOS OBTENIDOS.....	100
3.3.3.1	Fuerzas .....	100
3.3.3.2	Resistencias (Estado limite último).....	101
3.3.3.3	Deflexiones (Estado Límite de Servicio).....	101
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>.....</b>	<b>102</b>
<b>MODOS DE FALLA EN VIGAS DE ALMA ALIGERADA</b>	<b>.....</b>	<b>102</b>
4.1	INTRODUCCIÓN.....	102
4.2	FORMACIÓN DEL MECANISMO VIERENDEEL.....	102
4.2.1	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN .....	104
4.2.1.1	Esfuerzos de Von Misses.....	104
4.2.1.2	Esfuerzos de corte $T_{yz}$ .....	105
4.2.1.3	Factores de seguridad Von Misses .....	106
4.3	FALLA POR PANDEO DEL POST-ALMA.....	106
4.3.1	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN .....	107

4.3.1.1	Falla por esfuerzos .....	107
4.3.1.1.1	Esfuerzos de Von Misses .....	107
4.3.1.1.2	Esfuerzos de corte Tyz.....	108
4.3.1.1.3	Esfuerzos principales máximos .....	109
4.3.1.1.4	Esfuerzos principales mínimos.....	109
4.3.1.1.5	Factores de seguridad Von Misses .....	110
4.3.1.2	Falla por pandeo.....	110
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>		<b>112</b>
<b>DISEÑO DE UNA VIGA DE ALMA ALIGERADA CON Y SIN REFORZAMIENTO</b>		<b>112</b>
5.1	INTRODUCCIÓN.....	112
5.1.1	FASE DE PREDIMENSIONAMIENTO .....	112
5.1.1.1	Determinación del canto de las vigas ACB.....	113
5.1.1.2	Tablas de rendimiento.....	114
5.2	EJEMPLO DE DISEÑO DE ABERTURAS EN EL ALMA .....	115
5.2.1	METODOLOGÍA .....	115
5.2.2	DATOS DEL PROBLEMA.....	116
5.2.3	ELECCIÓN DEL PERFIL .....	117
5.2.4	DIAGRAMAS DE MOMENTO Y CORTANTE.....	117
5.2.4.1	Cortante.....	117
5.2.4.2	Momento .....	117
5.2.5	PROPIEDADES DE LA SECCIÓN W30X99.....	118
5.2.6	PROPIEDADES DE LA T Y DE LA ABERTURA .....	118
5.2.7	REVISIÓN DE LAS GUÍAS DE PROPORCIÓN.....	119
5.2.7.1	Patín de compresión.....	119
5.2.7.2	Alma .....	119
5.2.7.3	Abertura.....	119
5.2.7.4	Capacidad de cortante plástico .....	119
5.2.7.5	Dimensiones de la abertura.....	120
5.2.7.6	Dimensiones de la T .....	120
5.2.8	CAPACIDAD DE MOMENTO MÁXIMO .....	120
5.2.9	CAPACIDAD DE CORTANTE MÁXIMO .....	121
5.2.9.1	T inferior .....	121
5.2.9.2	T superior .....	122
5.2.9.3	Capacidad de corte total.....	122
5.3	UBICACIONES DE LAS ABERTURAS RECTANGULARES .....	122

5.3.1	DISTRIBUCIÓN DE ABERTURAS .....	125
5.3.1.1	Aberturas rectangulares .....	125
5.3.1.2	Aberturas circulares.....	125
5.4	DISEÑO DE LOS REFORZAMIENTOS .....	126
5.4.1	REVISIÓN DE LA RESISTENCIA.....	127
5.4.2	SELECCIÓN DEL REFORZAMIENTO .....	129
5.4.3	REVISIÓN DE ESTABILIDAD.....	130
5.4.4	RESISTENCIA DE LA SOLDADURA.....	130
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>		<b>132</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>132</b>
6.1	CONCLUSIONES.....	132
6.2	RECOMENDACIONES .....	133
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>135</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>138</b>
	ANEXO A..RESULTADOS SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS.....	139
	ANEXO B PREDISEÑO DE VIGAS DE ALMA ALIGERADA USANDO SOFTWARE ACB 2.07.....	148
	ANEXO C PREDISEÑO DE VIGAS DE ALMA ALIGERADA USANDO EL..... SOFTWARE ANGELINA V 2.01.....	156
	ANEXO D ÁBACOS DE PREDIMENSIONAMIENTO PARA VIGAS ACB.....	164

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Estructura de acero .....	1
Figura 1.2	Diagrama esfuerzo-deformación del acero .....	5
Figura 1.3	Procesos de laminación .....	6
Figura 1.4	Laminación en caliente.....	7
Figura 1.5	Formas y secciones de vigas fabricadas comercialmente .....	8
Figura 1.6	Elemento sometido a flexión y corte.....	9
Figura 1.7	Partes de una viga .....	9
Figura 1.8	Estado general de esfuerzos en un punto.....	11
Figura 1.9	Soportes de estructuras planas.....	12
Figura 1.10	Esfuerzos de flexión .....	13
Figura 1.11	Distribución de esfuerzos cortantes en la sección de la viga .....	14
Figura 1.12	Comportamiento de una sección a flexión .....	15
Figura 1.13	Concentración de tensiones en placa con agujero.....	18
Figura 2.1	Análisis por MEF de un pistón.....	22
Figura 2.2	Ventana general de ALGOR .....	24
Figura 2.3	Pandeo lateral de una viga simplemente apoyada.....	28
Figura 2.4	Resistencia nominal al pandeo lateral en función de $L_b$ .....	29
Figura 2.5	Viga de alma aligerada.....	38
Figura 2.6	Viga estándar .....	40
Figura 2.7	Viga compuesta.....	40
Figura 2.8	Corte de la viga .....	41
Figura 2.9	Separación de las T .....	41
Figura 2.10	Reconstrucción – Soldadura .....	42
Figura 2.11	Parámetros geométricos de una viga celular .....	42
Figura 2.12	Parámetros geométricos de una viga con aberturas hexagonal .....	43
Figura 2.13	Viga con aberturas octogonales.....	43
Figura 2.14	Viga Angelina .....	43

Figura 2. 15	Alveolo sinusoidal “angelina” .....	44
Figura 2. 16	Integración de servicios.....	45
Figura 2. 17	Garaje de parqueo .....	45
Figura 2. 18	Estadio Stamford bridge, Londres .....	45
Figura 2. 19	Distribución de fuerzas en una viga con abertura en el alma .....	46
Figura 2. 20	Tamaño efectivo para una abertura circular .....	46
Figura 2. 21	Viga de sección rectangular con abertura circular.....	47
Figura 2. 22	Distribución de esfuerzos orificio pequeño.....	48
Figura 2. 23	Distribución de esfuerzos orificio grande.....	48
Figura 2. 24	Curvas de interacción momento-cortante de diseño .....	50
Figura 2. 25	Abertura no reforzada .....	51
Figura 2. 26	Abertura reforzada .....	52
Figura 2. 27	Falla por flexión de la sección perforada.....	58
Figura 2. 28	Falla por corte de la sección perforada .....	59
Figura 2. 29	Pandeo lateral torsional de una viga .....	59
Figura 2. 30	Formación del mecanismo Vierendeel en un abertura circular .....	60
Figura 2. 31	Enfoque de la viga curvada de Olander .....	61
Figura 2. 32	Análisis Vierendeel viga con abertura rectangular .....	62
Figura 2. 33	Pandeo del post-alma en una viga celular .....	64
Figura 2. 34	Fuerzas aplicadas en el post alma y sección crítica.....	65
Figura 2. 35	Curvas de diseño propuestas por Ward para revisar las capacidades de flexión y pandeo del post-alma.....	65
Figura 2. 36	Modelo de puntal propuesto por Lawson para pandeo del post-alma	66
Figura 2. 37	Conducta típica en el post-alma .....	66
Figura 2. 38	Modelo de puntal para el pandeo del post-alma .....	67
Figura 2. 39	Ruptura de las juntas soldadas en vigas de alma aligerada .....	68
Figura 3. 1	Descripción del modelo de aplicación .....	69
Figura 3. 2	Configuración del modelo.....	70
Figura 3. 3	Diagramas de momento y corte de la viga .....	71

Figura 3. 4	Perfil W30X99 seleccionado .....	75
Figura 3. 5	Análisis de una viga por elementos finitos .....	76
Figura 3. 6	Canto de la viga de alma aligerada .....	76
Figura 3. 7	Distribución de alveolos circulares .....	78
Figura 3. 8	Distribución de alveolos hexagonales .....	79
Figura 3. 9	Distribución de alveolos "Angelina" .....	79
Figura 3. 10	Distribución de alveolos rectangulares .....	80
Figura 3. 11	Sistema de coordenadas en Algor .....	81
Figura 3. 12	Modelo de mallado .....	82
Figura 3. 13	Analogía restricciones viga simplemente apoyada.....	82
Figura 3. 14	Asignación de la carga .....	83
Figura 3. 15	Valores de deflexiones perfil W30X99.....	83
Figura 3. 16	Valores de esfuerzos de Von Misses perfil W30X99.....	84
Figura 3. 17	Valores de esfuerzos normales Tzz perfil W30X99.....	84
Figura 3. 18	Valores de esfuerzos cortantes Tyz perfil W30X99.....	84
Figura 3. 19	Valores de factores de seguridad Tzz perfil W30X99.....	85
Figura 3. 20	Valores de deflexiones alveolos circulares.....	85
Figura 3. 21	Valores de esfuerzos de Von Misses alveolos circulares.....	85
Figura 3. 22	Valores de esfuerzos normales Tzz alveolos circulares.....	86
Figura 3. 23	Valores de esfuerzos cortantes Tyz alveolos circulares.....	86
Figura 3. 24	Valores de factores de seguridad Tzz alveolos circulares.....	86
Figura 3. 25	Modos de pandeo viga W30X99 .....	87
Figura 3. 26	Modos de pandeo viga alveolos circulares.....	87
Figura 3. 27	Convergencia esfuerzo Tzz central perfil W30x99 .....	89
Figura 3. 28	Convergencia esfuerzo Tzz central alveolos circulares.....	90
Figura 3. 29	Convergencia esfuerzo Tzz central alveolos hexagonales.....	91
Figura 3. 30	Convergencia esfuerzo Tzz central alveolos angelina .....	92
Figura 3. 31	Convergencia esfuerzo Tzz central alveolos rectangulares .....	93
Figura 3. 32	Nuevas condiciones de borde para estabilidad.....	94
Figura 3. 33	Nuevos modos de pandeo viga angelina .....	94
Figura 3. 34	Parámetros de una viga con alveolos circulares .....	95

Figura 3. 35 Geometría viga con alveolos circulares mejorada.....	97
Figura 3. 36 Distribución esfuerzos de flexión Tzz perfil W30x99 (Peralte 1100mm)97	
Figura 3. 37 Distribución esfuerzos de flexión perfil W30X99 con alveolos circulares (Peralte 1100 mm).....	98
Figura 3. 38 Geometría de la viga de alveolos circulares en ACB 2.07 .....	99
Figura 3. 39 Asignación de cargas ACB 2.07.....	100
Figura 4. 1 Viga a fallar en el software Algor.....	103
Figura 4. 2 Geometría de viga a fallar por formación del mecanismo Vierendeel.103	
Figura 4. 3 Esfuerzos de Von Misses para la formación del mecanismo Vierendeel.....	104
Figura 4. 4 Detalles de los esfuerzos de Von Misses para la formación del mecanismo Vierendeel.....	105
Figura 4. 5 Esfuerzos cortantes Tyz para la formación del mecanismo Vierendeel.....	105
Figura 4. 6 Detalles de los esfuerzos cortantes Tyz para la formación del mecanismo Vierendeel.....	105
Figura 4. 7 Factores de seguridad de Von Misses .....	106
Figura 4. 8 Geometría de la viga a fallar por pandeo del post alma.....	106
Figura 4. 9 Esfuerzos de Von Misses para el pandeo del post-alma.....	107
Figura 4. 10 Detalles de los esfuerzos de Von Misses para el pandeo del post-alma .....	108
Figura 4. 11 Esfuerzos de corte Tyz para el pandeo del post-alma .....	108
Figura 4. 12 Detalles de los esfuerzos de corte Tyz para el pandeo del post-alma	108
Figura 4. 13 Esfuerzos de principales máximos para el pandeo del post-alma.....	109
Figura 4. 14 Esfuerzos de principales mínimos para el pandeo del post-alma .....	109
Figura 4. 15 Factores de seguridad Von Misses para el pandeo del post-alma.....	110
Figura 4. 16 Pandeo del Post-alma: modo 1 .....	110
Figura 4. 17 Pandeo del Post-alma: modo 2 .....	111

Figura 5. 1	Viga alveolar .....	112
Figura 5. 2	Variables para la determinación del canto .....	113
Figura 5. 3	Canto de las vigas con alveolos circulares en función de la longitud ..	114
Figura 5. 4	Ábaco de predimensionamiento .....	114
Figura 5. 5	Zona neutral .....	116
Figura 5. 6	Viga simplemente apoyada y con carga uniforme.....	116
Figura 5. 7	Ábaco de predimensionamiento utilizado.....	117
Figura 5. 8	Detalles de la abertura no reforzada en el alma.....	118
Figura 5. 9	Relación de la resistencia a cortante nominal máxima a la resistencia plástica de una $T, \alpha v$ , versus la relación longitud a altura o relación longitud a profundidad efectiva de la $T, v$ . .....	121
Figura 5. 10	Curvas de iteración momento- cortante .....	122
Figura 5. 11	Ubicación de la zona neutra para W30X99 .....	124
Figura 5. 12	Distribución de las aberturas rectangulares .....	125
Figura 5. 13	Distribución de aberturas circulares .....	125
Figura 5. 14	Reforzamiento para las aberturas .....	126
Figura 5. 15	Valor de $V_u \phi V_n$ con el reforzamiento.....	127
Figura 5. 16	Revisión de la resistencia de corte máxima nominal a la resistencia de corte plástica de una $T, \alpha v$ , versus la relación longitud altura de una $T, v$ .....	128
Figura 5. 17	Detalles del reforzamiento a utilizarse.....	131

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. 1	Datos de los perfiles de acero estructural .....	3
Tabla 1. 2	Diversas secciones utilizadas para vigas (codificación europea) .....	10
Tabla 1. 3	Deflexiones máxima permisibles .....	17
Tabla 2. 1	Factores de resistencia característicos .....	27
Tabla 2. 2	Valores de pesos para contrapisos y cubiertas .....	34
Tabla 2. 3	Sobrecargas mínimas uniformemente distribuidas.....	35
Tabla 3. 1	Convergencia de resultados perfil W30X99 .....	88
Tabla 3. 2	Convergencia de resultados alveolos circulares .....	89
Tabla 3. 3	Convergencia de resultados alveolos hexagonales.....	90
Tabla 3. 4	Convergencia de resultados alveolos angelina .....	91
Tabla 3. 5	Convergencia de resultados alveolos rectangulares .....	92
Tabla 3. 6	Relación Hs/Do para viga con alveolos circulares.....	95
Tabla 3. 7	Relación So/Do para viga con alveolos circulares.....	96
Tabla 5. 1	Ubicaciones permitidas para las aberturas rectangulares .....	123

## SIMBOLOGÍA

$a_0$	Longitud de una abertura rectangular
$a$	Altura de una abertura sinusoidal
$A_r$	Área de la sección transversal del reforzamiento de la abertura
$A_f$	Área de la aleta a compresión
$A_w$	Área del alma
$A_0$	Área de la sección transversal en el centro de una abertura
$A_{WP}$	Es el área mínima del post-alma
$b$	Ancho de la sección a una altura $y$
$b_r$	Ancho del reforzamiento
$b_f$	Ancho del patín
$b_e$	Ancho efectivo del puntal
$B$	Distancia lateral entre vigas adyacentes
$c$	Distancia máxima del centroide a la fibra más externa
$C_b$	Coefficiente de gradientes de momento
$C_v$	Coefficiente de corte del alma
$C_1, C_2, C_3$	Constantes
$D_0$	Diámetro de una abertura circular
$D$	Carga muerta de la estructura
$\delta$	Desplazamientos nodales
$\varepsilon$	Deformación unitaria
$E$	Módulo de Young
$e$	Excentricidad de la abertura
$f$	Esfuerzo axial

$f_b$	Esfuerzo de flexión
$F_b$	Resistencia de flexión
$F_{cr}$	Esfuerzo crítico
$F_y$	Resistencia a la fluencia del acero
$h$	Altura del perfil base
$H_s, H_2$	Altura final de la viga de lama aligerada
$h_0$	Altura de la abertura rectangular
$h_{nz}$	Altura de la zona neutral
$h_i$	Diferencial de altura de la estructura
$I$	Momento de inercia centroidal
$I_b$	Índice de trabajo a flexión
$I_0$	Momento de inercia en el centro de una abertura
$I_s$	Momento de inercia de una sección I completa
$I_T$	Momento de inercia de una sección T
$J$	Constante Torsional
$K$	Matriz de rigidez
$K_c$	Factor de concentración de tensiones
$L$	Longitud del claro de la viga
$L_b, L_c$	Longitud sin arriostramiento de la viga
$L_p$	Longitud límite de volcamiento
$L_r$	Longitud límite de pandeo flexo-torsional inelástico
$l_1$	Distancia del reforzamiento más allá del lado de una abertura
$L_{nz}$	Longitud de la zona neutral
$L_1, L_2$	Distancia libres hacia los extremos de las vigas

$L_i$	Límite inferior de la relación de esbeltez a flexión
$L_s$	Límite superior de esbeltez a flexión
$L$	Carga viva de piso, incluyendo el impacto
$l_e$	Longitud efectiva del puntal
$\lambda_F$	Relación de esbeltez a flexión
$M$	Momento flector aplicado a la sección
$M_u$	Resistencia de flexión factorada
$M_n$	Resistencia de flexión nominal
$M_{max}$	Valor absoluto del momento máximo dentro del segmento sin soporte lateral
$M_A$	Valor absoluto del momento en un punto a un cuarto de la longitud del segmento sin soporte lateral
$M_B$	Valor absoluto del momento en un punto a la mitad de la longitud del segmento sin soporte lateral
$M_C$	Valor absoluto del momento en un punto a tres cuartas partes de la longitud del segmento sin soporte lateral
$M_m$	Resistencia de flexión nominal máxima en la ubicación de una abertura bajo flexión pura, esto ocurre cuando $V_u=0$ en la línea central de la abertura
$M_p$	Momento de flexión plástico de una viga de acero no perforada
$M_y$	Momento de flexión elástico de una viga de acero no perforada
$M_{max}$	Momento de flexión máximo
$M_1$ y $M_2$	Momentos en los extremos de la viga
$M_0$	Momento flector actuante en la sección crítica
$M_{t1}$	Momento de flexión Vierendeel en la T superior
$M_{b1}$	Momento de flexión Vierendeel en la T superior
$M_{MAX}$	Máximo momento permisible en el post-alma
$\phi$	Factor de resistencia

$\phi_b$	Factor de resistencia para flexión
$\phi_v$	Factor de resistencia para corte
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Esfuerzos principales
$\phi R_n$	Resistencia de diseño
$\Omega$	Factor de seguridad
$\sigma_{nom}$	Esfuerzo promedio
$\sigma_{max}$	Esfuerzo de flexión máximo
$\sigma_{VM}$	Esfuerzo de tensión equivalente de Von Misses
$\sigma_{per}$	Máximo esfuerzo de flexión permisible
$P_0$	Fuerza cortante actuante en la sección crítica
$q_d$	Carga diseño
$q_u$	Carga factorada
$q_{sls}$	Carga de servicio
$Q$	Momento de primer orden
$q, w$	Carga distribuida sobre una viga
$R_{wr}$	Resistencia requerida de la soldadura
$r_y$	Radio de giro en torno al eje y
$R$	Relación de la carga factorada/capacidad de diseño en una abertura.
$r_{ts}$	Radio de giro efectivo del patín de compresión
$r_T$	Radio de giro de una sección que comprende el patín de compresión
$r$	Radio de acuerdo del perfil
$r_{xo}$	Radio de giro de la sección central de una abertura
$R_u$	Resistencia requerida (LRFD)

$R_n$	Resistencia nominal
$S_s$	Módulo elástico de una sección I completa
$S$	Carga de techo de nieve, granizo, ceniza
$S_x$	Módulo elástico de la sección
$S$	Distancia entre centros de aberturas adyacentes
$S_0$	Distancia entre los lados de dos aberturas adyacentes
$s_b$	Altura de la T inferior
$s_t$	Altura de la T superior
$S_{req}$	Módulo elástico de la sección requerido
$t_r$	Espesor del reforzamiento
$T_{XX}, T_{YY}, T_{ZZ}$	Esfuerzos normales en las direcciones x, y y z respectivamente
$T_{xy}, T_{yz}, T_{xz}$	Esfuerzos cortantes en las direcciones xy, yz y xz respectivamente
$t_f$	Espesor del patín
$t_w$	Espesor del alma de la sección
$T_1$	Fuerza de tensión
$T_2$	Fuerza de compresión
$u$	Coefficiente de poisson del acero
$\mu$	Relación adimensional que relaciona las contribuciones secundarias de momento flector de hormigón y el reforzamiento de la abertura con el producto de la capacidad de corte de plástico de un T y la profundidad de la T
$U_d$	Energía de distorsión
$V$	Fuerza cortante en la viga
$V_{mt}$	Capacidad de corte de la sección T superior

$V_{mb}$	Capacidad de corte de la sección T inferior
$\bar{V}_p$	Capacidad de cortante plástica de una sección no perforada
$v$	Relación de aspecto de la T
$V_u$	Resistencia al corte requerido
$V_n$	Resistencia al corte nominal
$V_m$	Resistencia al corte nominal máximo en la ubicación de una abertura bajo cortante puro, esto ocurre cuando $M=0$ en la línea central de la abertura
$V_p$	Resistencia al corte plástico
$V_d$	Resistencia de diseño a corte
$V_{max}$	Fuerza cortante máxima
$V_v$	Fuerza de corte vertical en el post-alma
$W$	Cargas de viento
$X_0$	Es la distancia de la fuerza normal al patín
$y$	Distancia desde el eje neutro
$\Delta Y$	Desplazamiento en la dirección Y
$Z_x$	Módulo plástico de la sección

## RESUMEN

Las necesidades de tener una disminución del peso del material utilizado en todo proyecto estructural sin afectar su resistencia mecánica ha dado lugar a que las vigas de alma aligerada sean la mejor opción para salvar dichas necesidades ya que además de tener una buena apariencia estética en proyectos arquitectónicos, pueden llegar también a integrar servicios múltiples como ducterías en edificios, disminuyendo de esta forma la altura total de un edificio.

En el presente proyecto se estudia el comportamiento estructural de las vigas de acero de alma aligerada, específicamente la distribución de esfuerzos, análisis de estabilidad, para el caso de una aplicación específica de estas vigas. Se presentan además los modos de falla más frecuentes en estas vigas debido a la presencia de las aberturas en el alma y se finaliza este proyecto con el diseño de vigas con aberturas rectangulares y circulares en base a guías de diseño dadas por la AISC. Para estudiar el análisis de esfuerzos, análisis de estabilidad y las fallas más comunes se hace uso de un software de simulación por elementos finitos llamado Autodesk Algor Simulation Professional 2011. En los anexos también se incluye el prediseño de vigas de alma aligerada con aberturas circulares y sinusoidales en base a software especializado para el análisis aproximado de estas vigas y que se basan en la normativa dada por el Eurocódigo EN 1993-1-1.

## PRESENTACIÓN

Las vigas de alma aligerada se han venido utilizando en muchos proyectos alrededor del mundo. Más concretamente han tendido un repunte durante los últimos 10 años, esto se debe en gran parte a la relación resistencia peso mejorada, lo cual les han hecho ideales para ser aplicadas como vigas secundarias que salvan grandes luces. Sin embargo, no existen en la actualidad normas de diseño consistentes, tan solo métodos aproximados para este tipo de vigas. En este proyecto no se estudia la influencia del fuego, como una variable muy importante a considerar en el comportamiento estructural de este tipo de vigas.

En el Capítulo 1, se dan a conocer algunos antecedentes relacionados principalmente al uso del acero estructural, sus propiedades y la teoría de flexión de vigas.

En el Capítulo 2, se inicia el estudio con el principio del método de los elementos finitos, vigas de alma aligerada, diseño de aberturas en el alma y finalmente los modos de falla que en ellas se presentan.

En el Capítulo 3, se simula el comportamiento de vigas de alma aligerada con distintas configuraciones de los alveolos para de esta forma poder elegir la mejor configuración tomando ciertos criterios.

En el Capítulo 4, se revisan los tipos de fallas más comunes en las vigas de alma aligerada y se hace la simulación por elemento finitos de dos tipos de falla.

En el Capítulo 5, se hace el diseño de vigas con aberturas rectangulares y circulares en el alma de las vigas, a partir de métodos de diseño aproximados, que se basan en curvas de interacción momento-cortante.

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 EL ACERO COMO MATERIAL ESTRUCTURAL

El acero es uno de los materiales estructurales más usados en la construcción, ver figura 1.1. Este material es una aleación de hierro (mínimo 98%), con contenidos de carbono menores al 1% y otras pequeñas cantidades de minerales como manganeso, para mejorar su resistencia, y fósforo, azufre, sílice y vanadio para mejorar su soldabilidad y resistencia a la intemperie. Entre sus propiedades de particular importancia en los usos estructurales, están la alta resistencia y bajo peso, comparada con cualquier otro material disponible, y también su alta ductilidad.



**Figura 1.1** Estructura de acero<sup>1</sup>

#### 1.1.1 VENTAJAS DEL ACERO

- Alta resistencia por unidad de peso: implica que será relativamente bajo el peso de la estructura, pero con una alta resistencia mecánica.
- Uniformidad: las propiedades del acero no cambian apreciablemente en el tiempo como son el caso de las estructura de concreto reforzado.

---

<sup>1</sup> [http://es.made-in-china.com/co\\_bjcdph/product\\_Light-Steel-Structure-for-Warehouse-ZM-Series-\\_hyuunnsry.html](http://es.made-in-china.com/co_bjcdph/product_Light-Steel-Structure-for-Warehouse-ZM-Series-_hyuunnsry.html); [Consultado Enero 2013].

- Elasticidad: el acero sigue la ley de Hooke hasta esfuerzos bastante altos.
- Ductilidad: es la propiedad que tiene un material de soportar grandes deformaciones sin fallar bajo altas condiciones de esfuerzos. Un material que no tenga esta propiedad probablemente será duro y frágil y se romperá al someterlo a un golpe repentino.
- Tenacidad: la propiedad de un material para absorber energía en grandes cantidades hasta llegar a la fractura.

### **1.1.2 DESVENTAJAS DEL ACERO**

- Costo de mantenimiento: al estar expuesto al aire y al agua deben pintarse periódicamente para prevenir su corrosión.
- Costo de la protección contra el fuego: el acero es un excelente conductor de calor, por lo que necesita de una protección que evite la pérdida de ciertas propiedades a altas temperaturas.
- Susceptibilidad al pandeo: cuando más altos y esbeltos sean los miembros a compresión, será mayor el peligro de pandeo.
- Fatiga: su resistencia puede reducirse si está sometido a esfuerzos variables en el tiempo.
- Fractura frágil: bajo ciertas condiciones de trabajo, el acero puede fallar frágilmente en lugares donde existe concentración de esfuerzos.

## **1.2 CLASIFICACIÓN**

Los aceros estructurales se agrupan generalmente según varias clasificaciones principales de la ASTM en aceros estructurales al carbono y en aceros de alta resistencia y baja aleación, ver tabla 1.1.

**Tabla 1. 1** Datos de los perfiles de acero estructural<sup>2</sup>

Tipo	Denominación de la ASTM		Fy		Fu		Espesor de placas y barras		
			Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	pulg	mm	
Carbono	A-36		36	250	58-80	400-550	550	203	
Alta resistencia baja aleación	A-242		40	275	60	415	4 a 8	102 a 203	
	A-440		42	290	63	435	1,5 a 4	38 a 102	
	A-441		46	315	67	460	0,75 a 1,5	19 a 38	
			50	345	70	485	0,75	19	
	A -572	grado 42		42	290	60	415	hasta 6	hasta 152,4
		grado 45		45	310	60	415	hasta 2	hasta 50,8
		grado 50		50	345	65	450	hasta 2	hasta 50,8
		grado 55		55	380	70	485	hasta 1,5	hasta 38,1
		grado 60		60	415	75	520	hasta 1,25	hasta 31,8
		grado 65		65	450	80	550	hasta 1,25	hasta 31,8
	A-588	grado 42		42	290	63	435	5 a 8	127 a 203
		grado 46		46	315	67	460	4 a 5	102 a 127
		grado 50		50	345	70	485	hasta 4	hasta 102

### 1.2.1 ACEROS ESTRUCTURALES AL CARBONO

Los aceros al carbono son aquellos que tienen los siguientes elementos de aleación con el hierro en cantidades máximas de: 2% de carbono, 1.65% de manganeso, 0.60% de silicio y 0.60% de cobre. El acero más común de este grupo es el A36 con un esfuerzo mínimo de fluencia, Fy de 36 Ksi y es el más adecuado para fabricar estructuras para edificios y puentes a través de procesos de soldadura o empernado.

<sup>2</sup> Bowles, J. E. (1993). *Diseño de acero estructural*. Editorial LIMUSA; México. p20.

### **1.2.2 ACEROS ALTA RESISTENCIA Y BAJA ALEACIÓN**

En este tipo de aceros se aumenta la resistencia y otras propiedades por la adición, aparte del carbono y manganeso, de uno a más elementos aleantes como el cromo, vanadio, cromo, silicio, cobre, níquel y otros. Estos aceros generalmente tienen mucha mayor resistencia a la corrosión atmosférica que los aceros al carbono. El término baja aleación se usa para describir arbitrariamente aceros en los que el total de elementos aleantes no excede el 5% de la composición total del acero.

## **1.3 PROPIEDADES ESTRUCTURALES DEL ACERO**

Entre las propiedades estructurales más importantes del acero se tienen las siguientes:

### **1.3.1 RESISTENCIA DEL ACERO**

La resistencia del acero se determina a través de un ensayo de tracción realizado a una probeta de acero debidamente normalizada, mediante el cual se puede realizar un diagrama esfuerzo-deformación (ver figura 1.2), que posteriormente permitirá obtener los valores de esfuerzo de fluencia y de rotura para el acero.

El diagrama esfuerzo-deformación de todos los aceros, está caracterizado por la presencia de una zona inicial conocida como zona elástica, en la que esfuerzos y deformaciones están relacionados entre sí linealmente, seguida por la región plástica, donde tienen lugar deformaciones considerables sin incremento apreciable de esfuerzos, y finalmente se presenta una región de endurecimiento por deformación, en la cual un incremento en la deformación requiere un incremento de esfuerzo.

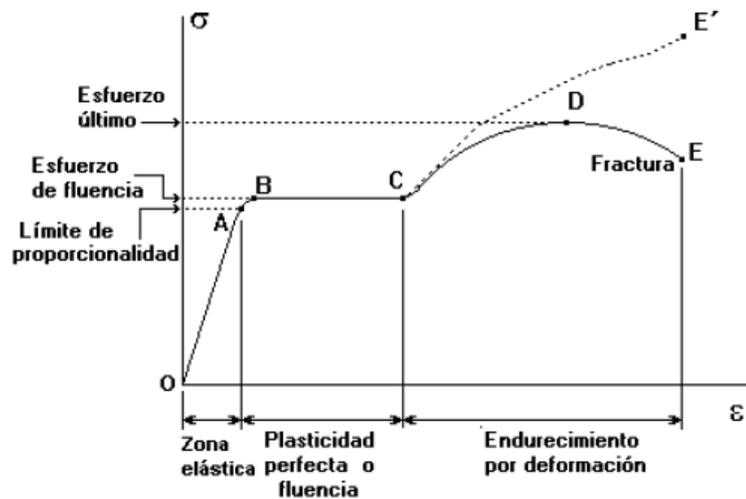


Figura 1. 2 Diagrama esfuerzo-deformación del acero<sup>3</sup>

### 1.3.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD (E)

El módulo de elasticidad o módulo de Young, es la pendiente del diagrama esfuerzo-deformación de la región elástica y se define por la siguiente ecuación.

$$E = \frac{f}{\varepsilon} = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación}} \quad (1.1)$$

Donde:

f : esfuerzo axial

$\varepsilon$ : deformación unitaria

E: módulo de Young

El rango típico del módulo de Young para todos los aceros es de 193000 a 207000 MPa (28000 a 30000 ksi). El valor de diseño se toma por lo general como 200000 MPa (29000 ksi).

<sup>3</sup> Gere, J. M. (2006). *Mecánica de materiales*. 6ta Edición. p15.

### 1.3.3 COEFICIENTE DE POISSON ( $\mu$ )

Es la relación entre la deformación transversal y la deformación longitudinal, bajo una carga axial. Para el acero típicamente se usa un valor de  $\mu \approx 0,3$ .

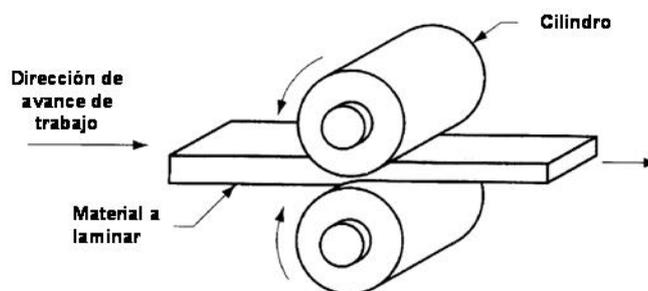
### 1.3.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD AL ESFUERZO CORTANTE (G)

Para aceros estructurales un valor conservador de 77000 Mpa (11000 Ksi) se utiliza en los cálculos de diseño como módulo cortante para todos los aceros estructurales. El módulo G puede calcularse con la ecuación 1.2:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (1.2)$$

## 1.4 PERFILES LAMINADOS

“Se define la laminación como el proceso de conformado mediante el cual se transforma el acero de forma de barras de sección cuadrada de varios metros de largo llamadas palanquillas en barras corrugadas, lisas o perfiles. La laminación es solamente un proceso de transformación del acero de una forma y longitud inicial a una forma final más pequeña y longitud mayor”<sup>4</sup>, ver figura 1.3.



**Figura 1. 3** Procesos de laminación<sup>5</sup>

La laminación se puede realizar en caliente o en frío. Con el proceso de laminación en caliente se obtienen las distintas formas de los perfiles de acero.

<sup>4</sup> Askeland, D. R. (1987). *La Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Editorial Iberoamérica. México.

<sup>5</sup> <http://faberprocesosymateriales.blogspot.com/2012/12/proceso-de-laminacion.html>; [Consultado Enero 2013].

#### 1.4.1 PERFILES LAMINADOS EN CALIENTE

Las palanquillas que vienen del proceso de fundición ingresan a hornos de gas para volverlos a calentar, hasta que alcancen una temperatura de trabajo uniforme de alrededor de 1200 °C. Las palanquillas entonces se llevan al tren de laminación en donde debido a la gran variedad de formas a realizar, son primero laminadas en formas intermedias, ver figura 1.4.



**Figura 1. 4** Laminación en caliente<sup>6</sup>

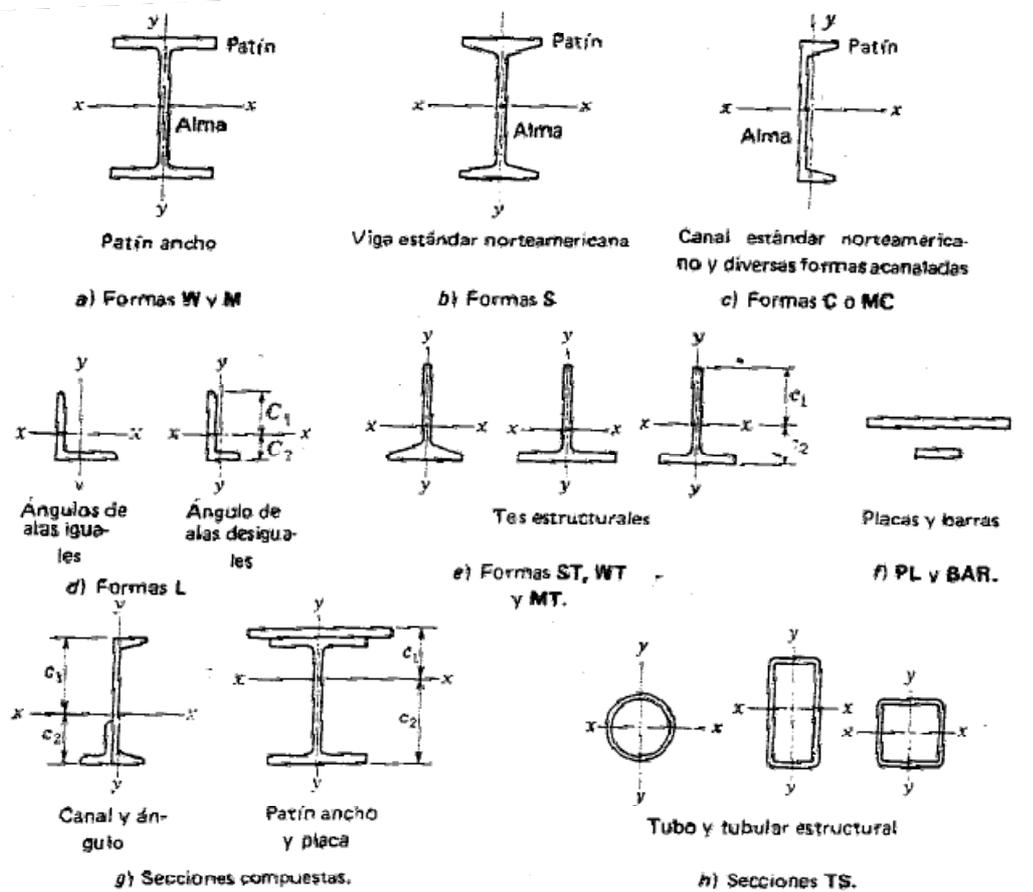
Finalmente los perfiles son enfriados para después ser cortados a la longitud requerida. El uso del agua para el enfriamiento (temple) da buenas propiedades mecánicas a los perfiles, como por ejemplo mejora la ductilidad y soldabilidad.

#### 1.4.2 DENOMINACIÓN DE PERFILES

Los perfiles de acero estructural se designan por la forma de sus secciones transversales, así tenemos: ángulos estándar (perfiles L), canales (perfiles C), vigas de patín ancho (perfiles W), vigas estándar estadounidenses (perfiles S), tubo estructural y tubería. La figura 1.5 muestra las secciones típicas para los perfiles de los elementos estructurales de acero.

---

<sup>6</sup> Valarezo, D., Villagrán, O. (2006). *Estudio de la optimización de procesos de fabricación de vigas y columnas metálicas soldadas para estructuras de edificios*. Tesis Ingeniero Mecánico Escuela Politécnica Nacional. p33.



**Figura 1. 5** Formas y secciones de vigas fabricadas comercialmente<sup>7</sup>

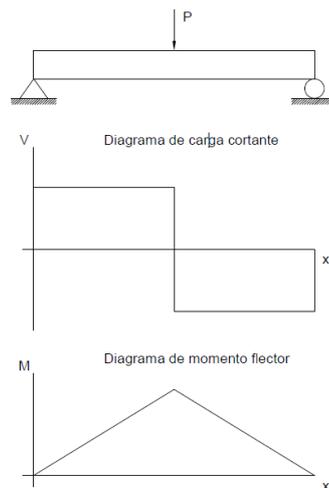
La denominación abreviada de estos perfiles está descrito en el Manual LRFD de la AISC 1993. Ejemplos de este sistema de abreviaturas son los siguientes:

- Una W30x173 es una sección W con 30 pulg. aproximadamente de peralte y peso de 114 lbs. por pie de longitud.
- Una L6x6x1/2 es un ángulo de lados iguales, cada uno de 6 pulg. de longitud y 1/2 pulg. de espesor.

<sup>7</sup> Crawley, W. (1992). *Estructuras de acero: análisis y diseño*. Editorial LIMUSA. 1ra edición México. p44.

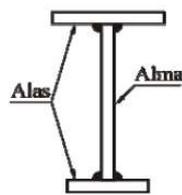
## 1.5 ESTÁTICA DE VIGAS

Una viga es un elemento prismático que resiste y transmite cargas perpendiculares a su eje longitudinal hacia otros elementos. Las vigas son elementos que trabajan a flexión, por lo que en sus secciones transversales se desarrollan esfuerzos normales (tracción y compresión) y cortantes. La figura 1.6 muestra el ejemplo más básico de este tipo de miembros, con sus diagramas de fuerza cortante y momento flector.



**Figura 1. 6** Elemento sometido a flexión y corte

Los patines de las vigas (alas) están unidos entre sí mediante una placa llena denominada alma (ver figura 1.7). Los patines de las vigas se podrían decir que resisten los esfuerzos normales de flexión, en tanto que el alma de la viga los esfuerzos cortantes.



**Figura 1. 7** Partes de una viga

Se puede utilizar una gran variedad de formas de sección para las vigas dependiendo de la magnitud de las cargas y de la luz, tal como se muestra en la Tabla 1.2.

**Tabla 1. 2** Diversas secciones utilizadas para vigas (codificación europea)<sup>8</sup>

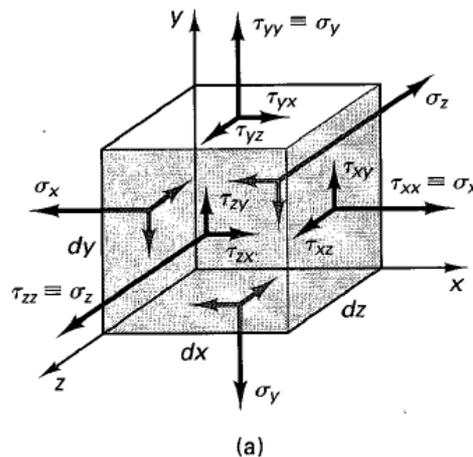
Tipo de sección	Rango de luces [m]	Notas
Angulares	3 a 6	Empleados para correas de cubierta, fachadas, etc. Allí donde se requiera soportar cargas ligeras
Perfiles conformados en frío	4 a 8	Empleados para correas de cubierta, fachadas, etc. Allí donde se requiera soportar cargas ligeras
Perfiles laminados IPE, UPN, HE, UB, UC, etc.	1 a 30	Resultan ser los tipos de sección más utilizados: las relaciones espesor-ancho de sus elementos están pensadas para evitar diversos tipos de fallos
Vigas de alma abierta	4 a 30	Se trata de vigas prefabricadas a partir de angulares o tubos como cordones y redondos para las diagonales del alma. Empleadas en lugar de perfiles laminados
Vigas de alma aligerada	6 a 40	Utilizadas para luces importantes y/o cargas ligeras, la altura del perfil de base se incrementa en un 50%.
Secciones compuestas p.e. IPE +UPN	5 a 15	Empleadas cuando un único perfil laminado no proporciona la suficiente capacidad resistente. A menudo se dispones de modo que sean capaces de desarrollar también buena resistencia a la flexión.
Vigas armadas en I	10 a 100	Elaboradas soldando 3 chapas (típico: alas + alma).La altura del alma puede llegar hasta los 3-4 metros. Con frecuencia precisan ser rigidizadas.
Vigas en cajón	15 a 200	Fabricadas a partir de chapas casi siempre rigidizadas. Utilizadas para puentes y mástiles de grúas dado su buen comportamiento a torsión y su elevada rigidez transversal.

<sup>8</sup> [http://ocw.uniovi.es/file.php/53/Teoria/Capitulo\\_VIII.pdf](http://ocw.uniovi.es/file.php/53/Teoria/Capitulo_VIII.pdf);[Consultado Septiembre 2012]

### 1.5.1 ESTADO DE ESFUERZOS

Para determinar el estado de esfuerzo en un punto dentro de un cuerpo que está transmitiendo fuerzas, imagínese que un elemento cúbico infinitesimal se aísla en el punto en cuestión como se indica en la figura 1.8. El estado de esfuerzo se describe entonces al establecer los valores de los esfuerzos normal y cortante, en las tres caras adyacentes del cubo, relativas al sistema coordenado asociado con el cubo.

Los esfuerzos normales  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$  y  $T_{zz}$  (ó también denominados  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ) están mostrados como positivos y representan tensión. Cuando actúan en sentido negativo, los esfuerzos normales representan compresión.



**Figura 1. 8** Estado general de esfuerzos en un punto<sup>9</sup>

Se muestran dos componentes de esfuerzo cortante para cada superficie del elemento. No hay diferencia física que distinga los esfuerzos cortantes positivos de los negativos.

Al aplicar las ecuaciones de equilibrio a las fuerzas que actúan sobre el elemento de la figura 1.8, se encuentra las siguientes relaciones importantes:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (1.3)$$

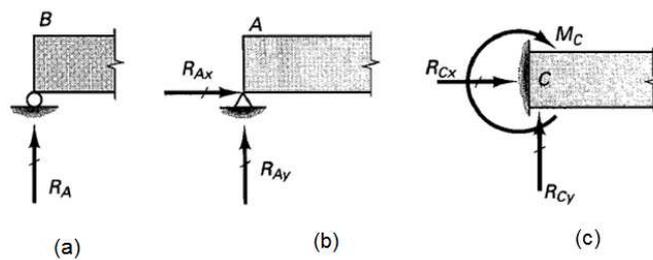
$$\tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (1.4)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} \quad (1.5)$$

<sup>9</sup> Popov, E. P. (1990). *Mecánica de sólidos*. Editorial Pearson. 2da Edición. p7.

### 1.5.2 CÁLCULO DE REACCIONES

Existen tres tipos básicos de soportes para las estructuras planas, los cuales se identifican por el tipo de resistencia que ofrecen a las fuerzas actuantes y necesariamente siguen ciertas convenciones. En la figura 1.9 se muestran dichos soportes.



**Figura 1. 9** Soportes para estructuras planas: a) Rodillo, b) Articulado, c) Empotrado

### 1.5.3 ESFUERZO DE FLEXIÓN

La relación entre el momento flector y el esfuerzo de flexión aplicado sobre el eje mayor de la viga se hace mediante la siguiente fórmula:

$$f_b = \frac{M \cdot y}{I} \quad (1.6)$$

Donde:

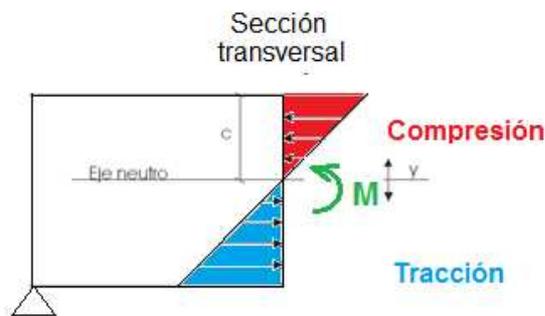
$f_b$ : esfuerzo normal de flexión

M: momento flector aplicado a la sección

y: distancia desde el eje neutro

I: momento de inercia centroidal

Esta ecuación indica que el esfuerzo de flexión es proporcional a la distancia al eje neutro, esta relación se puede observar en la figura 1.10, donde se muestra la distribución de esfuerzos en la sección de una viga sometida a un momento flector positivo.



**Figura 1. 10** Esfuerzos de flexión

El esfuerzo máximo se obtiene en los bordes superiores e inferiores de la viga, para  $y=c$ . Por lo tanto el esfuerzo máximo se expresa como:

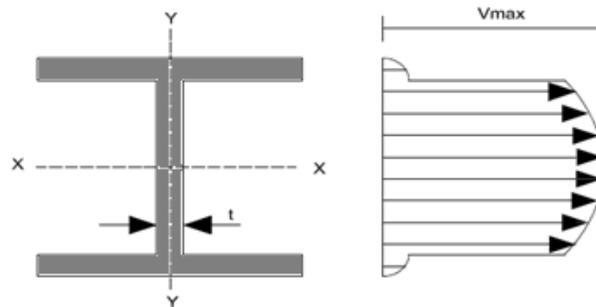
$$\sigma_{max} = \frac{M \cdot c}{I} \quad (1.7)$$

Para el prediseño de una viga por resistencia se hace uso del módulo elástico de la sección,  $S$ , de la viga. Se determina el módulo de sección mínimo requerido necesario para resistir la carga aplicada sobre la viga según la ecuación 1.8, con la cual se obtiene la sección de la viga a ser empleada para un esfuerzo permisible establecido según el material a utilizar.

$$S_{req} = \frac{I}{c} \geq \frac{M}{\sigma_{per}} \quad (1.8)$$

#### 1.5.4 ESFUERZO CORTANTE

Son esfuerzos a los que está sometida una viga cuando las fuerzas aplicadas tienden a cortarla o “desgarrarla”. Dichos esfuerzos no son constantes a lo largo de la sección transversal de la viga, su valor es cero en la fibra más alejada y es máxima en el eje neutro, tal como se muestra en la figura 1.11.



**Figura 1. 11** Distribución de esfuerzos cortantes en la sección de la viga

La Ecuación 1.9 permite obtener el valor de los esfuerzos cortantes para cualquier punto a lo largo de la viga.

$$\tau = \frac{VQ}{bl} \quad (1.9)$$

Donde:

- $\tau$ : esfuerzo cortante
- V: fuerza cortante en la viga
- Q: momento de primer orden
- b: ancho de la sección a una altura y
- I: momento de inercia

### 1.5.5 MOMENTO DE FLUENCIA $M_y$ Y MOMENTO PLÁSTICO $M_p$ <sup>10</sup>

Cuando la sección transversal de una viga I está sometida a un momento flexionante, M, que aumenta gradualmente, se tiene una distribución de esfuerzos normales en su sección transversal (ver figura 1.12) en la que se presentan las siguientes etapas:

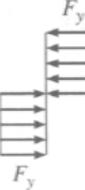
Etapa I: el momento M inicial crea un esfuerzo,  $f$ , menor que el esfuerzo de fluencia  $F_y$  del acero.

Etapa II: cuando M aumenta hasta hacer que las fibras externas de la sección transversal alcancen el esfuerzo de fluencia  $F_y$  del acero, se dice que la viga ha alcanzado el momento de fluencia  $M_y$ .

<sup>10</sup> Vinnakota, S. (2006). *Estructuras de acero: comportamiento y LRFD*. Primera Edición; Editorial McGraw-Hill; México. p459.

Etapa III: sí el momento  $M$  sigue aumentando, algunas zonas de la sección transversal de la viga alcanzan un esfuerzo constante e igual al esfuerzo de fluencia  $F_y$ , y se denominan zonas plásticas. El resto de las zonas donde el esfuerzo varía linealmente se denominan zonas elásticas.

Etapa IV: el proceso de fluencia sucesiva de las fibras al aumentar el momento flexionante, se denomina plastificación de la sección transversal. Este proceso continuará hasta que se tenga una distribución del esfuerzo bi-rectangular en toda la sección. El momento  $M_p$ , que produce la plastificación de toda la sección se conoce como Momento plástico.

Etapa	I	II	III	IV
Zonas plásticas				
Distribución de esfuerzos				

**Figura 1. 12** Comportamiento de una sección a flexión

Los momentos elásticos y plásticos se los calcula de la siguiente manera:

$$M_y = S_x * F_y \quad (1.10)$$

$$M_p = Z_x * F_y \quad (1.11)$$

Donde:

$S_x$ : módulo elástico de la sección alrededor del eje  $x$

$Z_x$ : módulo plástico de la sección alrededor del eje  $x$

## 1.5.6 DEFORMACIONES DE VIGAS

“Además de ser segura, una estructura debe tener buenas propiedades de servicio. Una estructura con buenas propiedades de servicio es una que funciona satisfactoriamente, sin causar ninguna incomodidad o percepciones de inseguridad a los ocupantes de la estructura. Para una viga esto usualmente significa que las deformaciones, principalmente la deflexión vertical, deben ser limitadas. Una deflexión excesiva es usualmente una indicación de que se trata de una viga muy flexible, que puede conducir a problemas de carácter vibratorio”<sup>11</sup>.

### 1.5.6.1 Deflexión de vigas

Para el caso común de una viga simplemente apoyada y con una carga uniformemente distribuida, la deflexión máxima vertical (en el centro de la viga) es:

$$y_{max} = \frac{5wl^4}{384EI} \quad (1.12)$$

Donde:

- L: longitud del claro
- w : carga total de servicio
- E : módulo de la sección
- I: momento de inercia

- Para una carga concentrada en el centro

$$y_{max} = \frac{Ql^3}{48EI} \quad (1.13)$$

Los voladizos suelen estar sometidos a grandes deflexiones. En una viga en voladizo con una sección transversal constante, la flecha máxima en el extremo libre es:

- Para una carga distribuida uniformemente

$$y_{max} = \frac{wl^4}{8EI} \quad (1.14)$$

---

<sup>11</sup> Segui, W. (2000). *Diseño de estructuras de acero con LRFD*. 2da edición. p174.

- Para una carga concentrada en el extremo

$$y_{max} = \frac{QL^3}{3EI} \quad (1.15)$$

### 1.5.6.2 Criterios límites de deflexión

La deflexión es un estado límite de servicio, no de resistencia, por lo que para calcular las deflexiones de la viga, se deben usar las cargas de servicio y mas no cargas factoradas.

El límite para la deflexión máxima depende de la función de la viga y de la probabilidad del daño resultante de la deflexión. La tabla 1.3, muestra los valores típicos de deflexiones máximas permisibles totales (Carga muerta de servicio más carga viva de servicio).

**Tabla 1. 3** Deflexiones máxima permisibles<sup>12</sup>

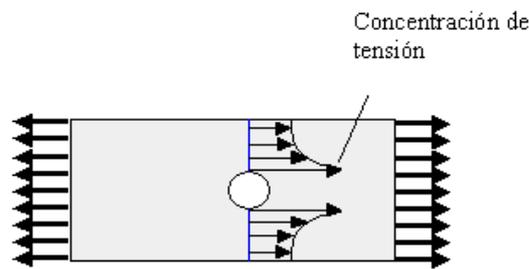
Tipo	Máxima Deflexión Permisible
Construcción enyesada	L/360
Construcción de piso no enyesado	L/240
Construcción de techo no enyesado	L/180

Donde: L es la longitud del claro de la viga [mm]

## 1.6 CONCENTRACIÓN DE TENSIONES

Siempre que ocurre la falla del material en una estructura, es casi seguro que el fenómeno de concentración de tensiones tuvo que estar presente: El término concentración de tensiones se aplica a una condición en la que se producen altos esfuerzos en una región localizada de cierto elemento mecánico como resultado de su geometría (forma) principalmente, ver figura 1.13.

<sup>12</sup> Segui, W. (2000). *Diseño de estructuras de acero con LRFD*. 2da edición. p174.



**Figura 1. 13** Concentración de tensiones en placa con agujero<sup>13</sup>

Los esfuerzos que existen en las concentraciones de esfuerzo se pueden determinar, ya sea con métodos experimentales o con métodos avanzados de análisis, incluyendo el método de los elementos finitos.

### 1.6.1 FACTOR DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES

El factor de concentración de tensiones se define como la relación entre el esfuerzo local máximo a el esfuerzo nominal o promedio.

$$K_c = \frac{\textit{Tensión máxima puntual}}{\textit{Tensión promedio puntual}} \quad (1.16)$$

De manera que el estado tensional en un punto viene dado por la siguiente expresión:

$$\sigma_{max} = K_c \sigma_{nom} \quad (1.17)$$

Donde:

$\sigma_{Max}$ : esfuerzo que se pretende valorar en la zona concentradora de tensiones

$K_C$ : coeficiente concentrador de tensiones, y

$\sigma_{Nom}$ : esfuerzo promedio obtenida.

<sup>13</sup> [http://www.mecapedia.uji.es/concentracion\\_de\\_tensiones.htm](http://www.mecapedia.uji.es/concentracion_de_tensiones.htm); [Consultado Enero 2013]

## 1.7 FALLA DE MATERIALES

### 1.7.1 FALLA POR RESISTENCIA

En la falla por resistencia se producen altos esfuerzos que superan los límites de resistencia del material. Estos límites están dados por la fluencia en materiales dúctiles y por la rotura en materiales frágiles. En los materiales dúctiles se considera que la falla se presenta cuando el material empieza a fluir (falla por deformación).

#### 1.7.1.1 Criterio de falla de la máxima energía de distorsión o de Von Mises

Como sabemos, un cuerpo que está sometido a fuerzas externas, se encuentra en un estado de tensiones complejo, y generalmente la única información que disponemos de él es su esfuerzo de fluencia,  $F_y$ , es por esto que surge la necesidad de encontrar un estado monoaxial equivalente al estado triple real y así hacer posible la comparación de esta tensión equivalente con el límite elástico del material.

La Teoría de la Máxima Distorsión, también conocida como el Criterio de Falla de Von Mises-Hencky, postula que la fluencia ocurrirá cuando la energía de distorsión de un volumen unitario sea igual a la energía de distorsión del mismo volumen cuando se lo someta a un esfuerzo uniaxial hasta la resistencia a la fluencia. Para un ensayo de tracción se cumple que los esfuerzos principales son  $\sigma_1 = \sigma_{VM}$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ , y:

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_{VM}^2 \quad (1.18)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}{2} + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (1.19)$$

Donde:

$U_d$ : energía de la distorsión

$\sigma_{VM}$ : tensión de Von Mises

### **1.7.2 FALLA POR DEFORMACIÓN**

Para este tipo de falla el elemento supera las deformaciones permisibles sin todavía haber alcanzado los límites de resistencia del material. Un cálculo por rigidez del elemento evita que se produzca una falla por deformación.

### **1.7.3 FALLA POR ESTABILIDAD**

En este tipo de falla el elemento al ser muy esbelto no podría llegar a alcanzar su esfuerzo de fluencia pero alcanza un nivel de inestabilidad tal, que se produce un cambio brusco a un nivel de equilibrio más estable. Este cambio va acompañado generalmente de grandes deformaciones que hacen que el elemento colapse. Elementos esbeltos sometidos a compresión son los que generalmente sufren este tipo de fallo.

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEORICO

#### 2.1 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

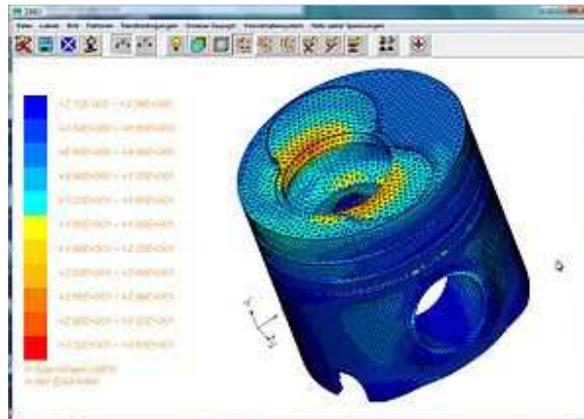
“El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama «malla»<sup>14</sup>.

Actualmente la mayor aplicación industrial del MEF es el cálculo de tensiones en sólidos y estructuras. Dentro del cálculo de tensiones cabe señalar que el análisis lineal es predominante sobre el no lineal. El cálculo lineal de tensiones, tanto estático como dinámico, se utiliza sobre todo en la fase de diseño o de proyecto, donde se busca hacer un uso eficiente del material.

Una aplicación del MEF para el análisis tensional se muestra en la figura 2.1, la cual corresponde a la cabeza de un pistón de un motor de combustión interna.

---

<sup>14</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo\\_de\\_los\\_elementos\\_finitos](http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos);[Consultado Diciembre 2012]



**Figura 2. 1** Análisis por MEF de un pistón

### 2.1.1 MATRIZ DE RIGIDEZ

El MEF implica la creación de una matriz que exprese la relación entre las fuerzas y los desplazamientos en un elemento mecánico. A esta matriz se le conoce como matriz de rigidez y se la representa con la siguiente ecuación:

$$\{F\} = [K]\{\delta\} \quad (2.1)$$

Donde:

K: matriz de rigidez

$\delta$ : desplazamientos nodales

F: fuerzas aplicadas al sistema

Se deberá tomar en cuenta que tanto los desplazamientos como las fuerzas representan vectores de orden igual al número de grados de libertad de los nodos.

La solución de este sistema matricial generalmente nos arroja el valor de los desplazamientos de cada nodo de la malla, ya que el vector fuerza es conocido y la matriz de rigidez está determinada por la geometría y propiedades del material.

## **2.1.2 SOFTWARE AUTODESK ALGOR SIMULATION 2011**

### **2.1.2.1 Introducción**

ALGOR es un software utilizado para el análisis y resolución de problemas de ingeniería por el método de los elementos finitos (FEA). En los ámbitos de la ingeniería mecánica este programa posee una amplia gama de capacidades de simulación que incluyen la tensión estática y la simulación de eventos mecánicos (MES) con modelos lineales y no lineales.

La simulación en ALGOR requiere seguir ciertos pasos mediante los cuales se añade información del modelo, parámetros del problema, condiciones del fenómeno y presentación de resultados. Dichos pasos reciben los nombres de pre procesamiento, procesamiento y post procesamiento.

### **2.1.2.2 Interface**

La interface de ALGOR 2011 permite interactuar con el modelo de simulación de una manera sencilla, agregando condiciones de contorno, propiedades del material y cargas. La etapa de procesamiento es completamente invisible a usuario ya que el módulo de ALGOR que se encarga de generar las matrices para la resolución del sistema y resolverlas en forma iterativa en un segundo plano.

La interface se compone de los siguientes módulos los cuales se muestran en la figura 2.2.

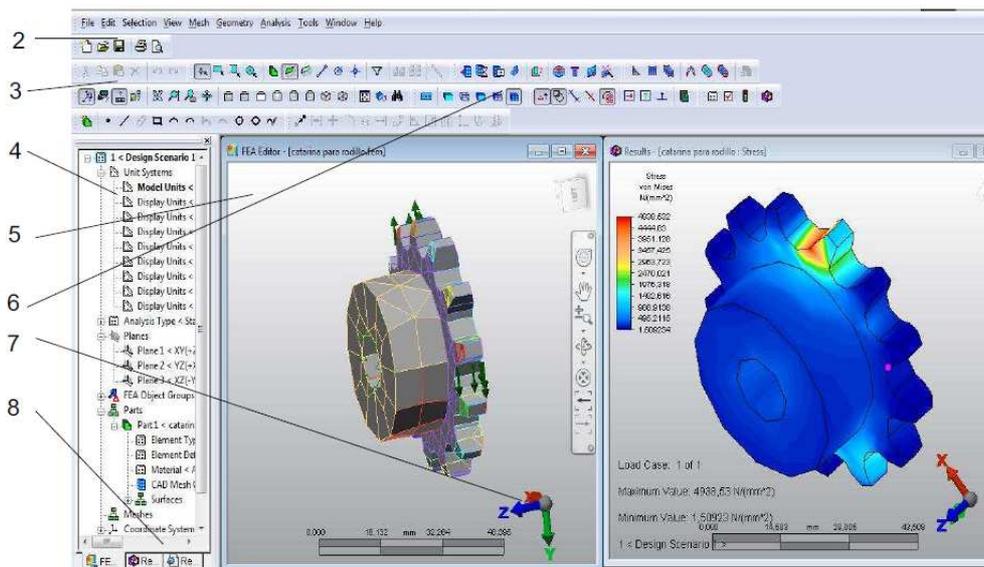
1. Barra de Título.
2. Barra de Menú: contiene diferentes opciones menús de opciones y herramientas diversas.
3. Barra de Herramientas: ubicada debajo de la barra menú, provee un acceso rápido a los comandos de ALGOR con ayuda de iconos gráficos.
4. Árbol de Modelado: muestra los parámetros que serán empleados en el análisis.
5. Espacio de Trabajo: en esta área se lleva a cabo el proceso de modelación.

La barra de título de esta aplicación, muestra el componente a estudiar.

6. Interface CAD: en esta interface el usuario puede seleccionar y crear el tipo de malla que se desea emplear en un determinado modelo en CAD para el posterior análisis.

7. Eje de Coordenadas: el eje de coordenadas ayudan a la ubicación espacial de las vistas del espacio de trabajo.

8. Barra de Estado: los mensajes enviados por el sistema, son localizados en esta área.



**Figura 2. 2** Ventana general de ALGOR<sup>15</sup>

### 2.1.2.3 Pasos para realizar la simulación

En general se realizan los siguientes pasos para la simulación de los diferentes elementos que conforman la máquina.

Crear el modelo 3D en Inventor o AutoCAD y guardarlo como formato sat.

Importar el modelo al software ALGOR.

Seleccionar el tipo de análisis para este caso es lineal de esfuerzos

Seleccionar el tipo de elemento a usarse para el análisis

Crear la malla.

Seleccionar el material.

Colocar cargas y condiciones de frontera.

Simulación.

Visualización de resultados

<sup>15</sup> Villacís, D. (2011). *Diseño y simulación por computador de una máquina peladora de soya hidratada con una capacidad de 50 kilogramos por hora*. Tesis EPN. p169.

#### **2.1.2.4 Convergencia de la solución**

Una vez obtenidos los resultados del análisis, por ejemplo tensiones, se debe volver a reanalizar el modelo pero esta vez con un tamaño de malla más pequeño (mayor número de elementos finitos creados) con el fin de obtener una solución definitiva, es decir una solución que ya no varía muy significativamente de otra obtenida con una cantidad distinta elementos.

## **2.2 DISEÑO ESTRUCTURAL**

### **2.2.1 PARÁMETROS DE DISEÑO<sup>16</sup>**

El ingeniero estructural debe saber distribuir y proporcionar las partes de las estructuras de manera que puedan montarse de forma práctica, que tengan la resistencia suficiente y que sean económicas. Los factores más importantes que se deben tener en cuenta para el diseño son:

#### **2.2.1.1 Seguridad**

Las estructuras no solo deben soportar las cargas impuestas (límite de falla), sino que además las deflexiones y vibraciones resultantes, no sean excesivas alarmando a los ocupantes o causen grietas en ella.

#### **2.2.1.2 Costo**

El proyectista debe siempre tratar de procurar abatir los costos de la construcción, sin sacrificar la resistencia. Pudiendo usar elementos y materiales que no requieran de un mantenimiento excesivo a través del tiempo.

#### **2.2.1.2 Factibilidad**

Las estructuras diseñadas deben fabricarse y montarse sin problemas, para ello el proyectista necesita conocer los métodos de fabricación y deben adaptar su diseño a las instalaciones disponibles y todo lo relativo al detallado y al montaje de las estructuras. Entre más se conozca sobre los problemas, tolerancias y márgenes de taller y campo, mayor puede ser la posibilidad de que los diseños resulten razonables, prácticos y económicos. Las especificaciones sobre la instalación se

---

<sup>16</sup> McCormac, J. (2002). *Diseño de Estructuras de Acero*. 2da Edición. Editorial Alfa Omega.p30.

deben realizar de tal manera que el proyectista se sienta capaz de fabricar y montar la estructura que se diseñó.

## 2.2.2 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

### 2.2.2.1 Diseño con factores de carga y resistencia (LRFD)

El diseño LRFD se basa en los conceptos de estado límite, dicho estado se usa para describir una condición en la que una estructura o parte de ella deja de cumplir su pretendida función. Existen dos tipos de estados límite: los de resistencia y los de servicio.

- Estados límite de resistencia: se basan en la seguridad o capacidad de carga de las estructuras e incluyen las resistencias plásticas, de pandeo, de fractura, de fatiga, de volteo, etc.
- Estados límite de servicio: se refiere al comportamiento de las estructuras bajo cargas normales de servicio y tienen que ver con aspectos asociados con el uso y ocupación, tales como deflexiones excesivas, deslizamientos, vibraciones y agrietamientos.

Para el diseño LRFD se debe cumplir la siguiente condición:

$$R_u \leq \phi R_n$$

Donde:

$R_u$ : resistencia requerida (LRFD)

$R_n$ : resistencia nominal

$\phi$  : factor de resistencia

$\phi R_n$ : resistencia de diseño

En términos de resistencia de corte y flexión requeridas y de diseño, tenemos que:

$$V_d = \phi_b V_n \geq V_{req} \quad y \quad M_d = \phi_b M_n \geq M_{req}$$

En la Tabla 2.1 se dan los valores de los factores de resistencia característicos de la Especificación LRFD:

**Tabla 2. 1** Factores de resistencia característicos<sup>17</sup>

Factor de resistencia	Situaciones
1	Aplastamiento en áreas proyectantes de pasadores, fluencia del alma bajo cargas concentradas, cortante en tornillos en juntas tipo fricción.
0,9	Vigas sometidas a flexión y corte, filetes de soldadura con esfuerzos paralelos al eje de la soldadura, soldaduras de ranura en el metal base, fluencia de la sección total de miembros a tensión
0,85	Columnas, aplastamiento del alma, distancia al borde y capacidad de aplastamiento en agujeros
0,8	Cortante en el área efectiva de soldaduras de ranura con penetración completa, tensión normal al área efectiva de soldaduras de ranura con penetración parcial.
0,75	Tornillos a tensión, soldaduras de tapón o muesca, fractura en la sección neta de miembros a tensión
0,65	Aplastamiento en tornillos (Que no sean tipo A307)
0,6	Aplastamiento en cimentaciones de concreto

En el cálculo de la resistencia de diseño en flexión,  $\phi_b M_n$ , la resistencia nominal a flexión para miembros compactos de sección H de simetría doble y canales flectados en torno a su eje mayor, que tienen almas compactas y alas compactas debe ser el menor valor obtenido de acuerdo a los siguientes estados límite.

<sup>17</sup> McCormac, J. (2002). *Diseño de estructuras de acero Método LRFD*. 2da Edición. Editorial Alfa Omega. México. p57.

### 2.2.2.1.1 Fluencia

$$M_n = M_p = F_y Z_x \quad (2.2)$$

Donde:

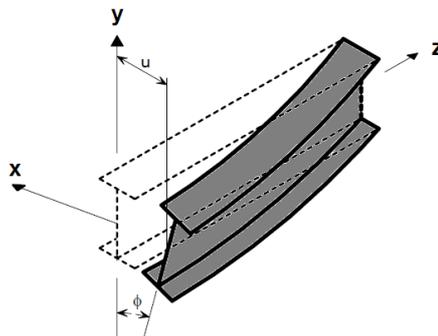
$M_n$ : resistencia nominal a flexión

$M_p$ : momento de flexión plástico

$Z_x$ : módulo de sección plástica en torno al eje  $x$

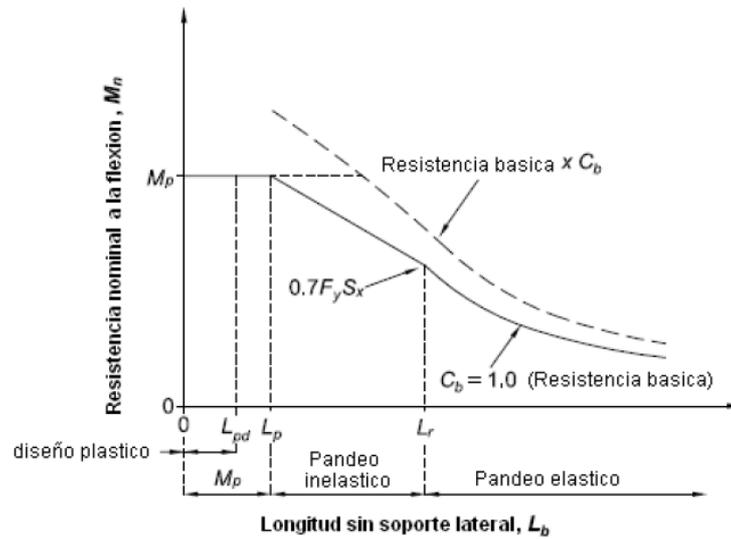
### 2.2.2.1.2 Pandeo lateral torsional

Si una viga larga de longitud  $L_b$  y de sección  $I$ , con su patín de compresión soportado lateralmente sólo en los extremos, se carga gradualmente; el patín superior se pandeará fuera del plano de carga y se torcerá (ver figura 2.3). Esto se debe generalmente a que la viga tiene un soporte lateral inadecuado.



**Figura 2. 3** Pandeo lateral de una viga simplemente apoyada

La tendencia de una viga flexionada cargada en su eje mayor a pandearse alrededor de su eje menor se conoce como pandeo lateral torsional o pandeo lateral de la viga. El pandeo lateral puede ocurrir antes que el momento en la sección crítica alcance el momento de fluencia  $M_y$ . Son tres los rangos de comportamiento de la resistencia nominal al pandeo lateral de acuerdo a la longitud sin soporte lateral  $L_b$ , tal como se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2. 4** Resistencia nominal al pandeo lateral en función de  $L_b$

- a) Para  $L_b \leq L_p$ , el estado límite de pandeo lateral-torsional no aplica  
 b) Para  $L_r < L_b \leq L_r$

$$M_n = C_b \left[ M_p - (M_p - 0,7F_y S_x) \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (2.3)$$

$$C_b = \frac{12,5M_{max}}{2,5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} R_m \leq 3 \quad (2.4)$$

- c) Para  $L_b > L_r$

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p \quad (2.5)$$

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left( \frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2} \sqrt{1 + 0,078 \frac{J_c}{S_x h_o} \left( \frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2} \quad (2.6)$$

Donde:

$L_b$ : longitud no arriostrada lateralmente del patín de compresión

$L_p$ : longitud límite de volcamiento

$L_r$ : longitud límite de pandeo flexo-torsional inelástico

$S_x$ : módulo de sección elástico en torno al eje X

$F_{cr}$ : esfuerzo critico

$C_b$ : coeficiente de gradientes de momento.  $C_b = 1$

$R_m$ : parámetro de sección transversal,  $R_m = 1$  para vigas I doblemente simétricas.

$M_{max}$ : valor absoluto del momento máximo dentro del segmento sin soporte lateral (incluidos puntos extremos).

$M_A$ : valor absoluto del momento en un punto a un cuarto de la longitud del segmento sin soporte lateral

$M_B$ : valor absoluto del momento en un punto a la mitad de la longitud del segmento sin soporte lateral.

$M_C$ : valor absoluto del momento en un punto a tres cuartas partes de la longitud del segmento sin soporte lateral.

Las longitudes limites  $L_p$  y  $L_r$ , se determinan con las siguientes ecuaciones:

$$L_p = 1,76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.7)$$

$$L_r = 1,95r_{ts} \frac{E}{0,7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6 - 76 \left( \frac{0,7F_y S_x h_o}{EJc} \right)^2}}} \quad (2.8)$$

Donde:

J: constante Torsional

c: constante para secciones H con simetría doble

$h_o$ : distancia entre centroides de los patines

$r_y$ : radio de giro en torno al eje y

$r_{ts}$ : radio de giro efectivo del patín de compresión

E: módulo de elasticidad del acero (200000 Mpa)

$F_y$ : esfuerzo de fluencia del material

### 2.2.2.2 Diseño por esfuerzos permisibles (ASD)<sup>18</sup>

Este método dice que la resistencia requerida de un elemento no debe exceder la resistencia admisible de diseño permitida por las especificaciones:

$$R_a \leq \frac{R_n}{\Omega}$$

Donde:

R<sub>a</sub>: resistencia requerida (ASD)

R<sub>n</sub>: resistencia nominal

Ω: factor de seguridad

R<sub>n</sub> / Ω: resistencia admisible

El esfuerzo de flexión admisible para una sección compacta depende de la longitud no apoyada lateralmente  $L_b$  del patín de compresión. El esfuerzo de flexión admisible también depende de la rigidez de la parte en compresión de la sección transversal, medida por su esbeltez  $\lambda_F = \frac{L}{r_T}$ . La mayor resistencia de flexión,  $F_b$ , permitido para una sección compacta simétrica y cargada en el plano de su eje mayor es:

- Si  $L_b < L_c$

$$F_b = 0.66 F_y \quad (2.9)$$

En el que  $L_c$ , es el mínimo valor entre las dos siguientes ecuaciones.

$$L_c = \frac{76b_f}{\sqrt{F_y}} \quad (2.10)$$

$$L_c = \frac{20000}{\left(\frac{d}{A_f}\right)F_y} \quad (2.11)$$

Donde:

$b_f$ : ancho de la aleta

d : altura nominal de la viga

---

<sup>18</sup> AISC Manual, (1989). *Allowable Stress Design and Plastic Design*. Capitulo F. Beams and other flexural members.

$A_f$ : área de la aleta a compresión

$F_y$ : esfuerzo de cadencia mínimo especificado

$L_c$ : longitud no arriostrada máxima, en pies, del patín de compresión

- Si  $L_b > L_c$

El esfuerzo admisible de flexión en tensión para secciones compactas o no compactas es determinado por la siguiente ecuación:

$$F_b = 0,60F_y \quad (2.12)$$

Mientras que el esfuerzo admisible de flexión en compresión, será escogido como el más grande valor, entre las siguientes ecuaciones:

- Cuando  $L_i = \sqrt{\frac{102 \times 10^3 C_b}{F_y}} \leq \lambda_F \leq \sqrt{\frac{510 \times 10^3 C_b}{F_y}} = L_s$

$$F_b = \left[ \frac{2}{3} - \frac{F_y(\lambda_F)^2}{1530 \times 10^3 C_b} \right] F_y \leq 0,60F_y \quad (2.13)$$

$$C_b = 1,75 + 1,05 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) + 0,3 \left( \frac{M_1}{M_2} \right)^2 \leq 2,3 \quad (2.14)$$

- Cuando  $\lambda_F \geq \sqrt{\frac{510 \times 10^3 C_b}{F_y}}$

$$F_b = \frac{170 \times 10^3 C_b}{(\lambda_F)^2} \leq 0,60F_y \quad (2.15)$$

- Para cualquier valor de  $\lambda_F$

$$F_b = \frac{12 \times 10^3 C_b}{\frac{L_d}{A_f}} \leq 0,60F_y \quad (2.16)$$

Donde:

$\lambda_F$ : relación de esbeltez a flexión

$L_i$ : límite inferior de la relación de esbeltez a flexión

$L_s$ : límite superior de esbeltez a flexión

$r_T$ : radio de giro de una sección que comprende el patín de compresión, mas 1/3 de el área del alma de compresión.

$M_1$  y  $M_2$ : momentos en los extremos de la viga

### 2.2.2.3 Resistencia al corte

Para el caso de vigas I flexionadas a lo largo de su eje mayor, se supone que el alma resiste el cortante y que la intensidad de esfuerzos cortantes es uniforme en todo el peralte. El capítulo F2 de la especificación AISC LRFD 1994 determina que se debe tomar el área del alma como el peralte total por el espesor del alma. Y estado límite de fluencia por cortante del alma para almas rigidizadas y no rigidizadas está dado por:

$$V_d = \phi_v V_n \quad (2.17)$$

$$\text{Si: } \frac{h}{t_w} \leq 2,24 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$V_n = 0,6 F_y A_w C_v \quad (2.18)$$

Donde:

$V_d$ : resistencia de diseño a corte

$\phi_v$ : factor de resistencia a corte = 0,9

$F_y$ : esfuerzo de fluencia del material

$A_w$ : área del alma

$h$ : distancia libre entre los patines menos el filete en cada patín.

$t_w$ : espesor del alma de la viga

$C_v$ : coeficiente de corte del alma, C = 1 para secciones I simétricas.

### 2.2.3 ESTUDIO DE CARGAS

“Las cargas son fuerzas u otras acciones que resultan del peso propio de los materiales de construcción del edificio, de sus ocupantes y pertenencias, efectos del medioambiente, diferenciales de movimiento, y cambios dimensionales moderados”.<sup>19</sup>

#### 2.2.3.1 Cargas Muertas (D)

Las cargas muertas permanentes están constituidas por los pesos de todos los elementos estructurales, tales como: muros, tabiques, recubrimientos, instalaciones sanitarias, eléctricas, de acondicionamiento, maquinas y todo artefacto integrado permanentemente a la estructura.

En la tabla 2.2 se muestran valores de pesos para materiales de uso más frecuentes dadas por la Norma Ecuatoriana de la construcción 2011 en su Capítulo 4.

**Tabla 2. 2** Valores de pesos para contrapisos y cubiertas<sup>20</sup>

<b>G. Contrapisos y recubrimientos</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>
Baldosa de mármol reconstituido, con mortero de cemento: por cada cm, de espesor	0,22
Baldosa de cerámica, con mortero de cemento: por cada cm., de espesor	0,20
Contrapiso de hormigón ligero simple, por cada cm., de espesor	0,16
Contrapiso de hormigón simple, por cada cm., de espesor	0,22

<sup>19</sup> ASCE, (2005). *ASCE/SEI 7-05 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Estados Unidos. p1.

<sup>20</sup> NEC, (2011). *Capítulo 1: Cargas y materiales*. Ecuador. p4 y 6.

### 2.2.3.2 Cargas vivas (L)<sup>21</sup>

Las cargas vivas son aquellas que pueden cambiar de lugar y magnitud. Las cargas que se mueven bajo su propio impulso como camiones, gente, grúas, etc., se denominan cargas móviles y aquellas que pueden ser desplazadas, como muebles, materiales en un almacén, nieve, etc., se denominan cargas movibles. Otras cargas vivas son aquellas causadas al construir, viento, lluvia, sismo, voladuras, suelos y cambios de temperatura. En la Tabla 2.3 se dan ciertos valores de sobrecargas mínimas.

**Tabla 2. 3** Sobrecargas mínimas uniformemente distribuidas<sup>22</sup>

OCUPACIÓN O USO	Carga uniforme KN/m <sup>2</sup>	Carga concentrada KN
Edificios de oficinas		
Salas de archivo y computación (se diseñará para la mayor carga prevista)		
Áreas de recepción y corredores del primer piso	4,8	9,0
Oficinas	2,4	9,0
Corredores sobre el primer piso	4,0	9,0
Escaleras fijas	Ver sección 4,5 ASCE/SEI 7-10	
Escaleras y rutas de escape	4,8	
Únicamente residenciales unifamiliares y bifamiliares	2,0	
Estadios y coliseos		
Graderíos	4,8	
Asientos fijos	3,0	
Fabricas/Industria/Manufactura		
Livianas	6,0	9,0
Pesadas	12,0	13,4
Garaje(Únicamente vehículos para pasajeros)	2,0 (a,b)	
Camiones y buses	(a,b)	
Gimnasios	4,8	

<sup>21</sup> McCormac, J. (2002). *Diseño de estructuras de acero Método LRFD*. 2da Edición. Editorial AlfaOmega. México. p41.

<sup>22</sup> NEC, (2011). *Capítulo 1: Cargas y materiales*. Ecuador. p8-9.

a) Los pisos de los estacionamientos o partes de los edificios utilizados para almacenamiento de vehículos, serán diseñadas para las cargas vivas uniformemente distribuidas de la tabla 3.3, o para las siguientes cargas concentradas:

- Para vehículos particulares (hasta 9 pasajeros) actuando en una superficie de 100 mm por 100 mm, 13.4 kN; y
- Para losas en contacto con el suelo que son utilizadas para el almacenamiento de vehículos particulares, 10 kN por rueda.

b) Los estacionamientos para camiones y buses serán diseñados por algún método recomendado por AASHTO, MTOP, que contenga las especificaciones para cargas de camiones y buses.

#### 2.2.3.2.1 *Carga viento (W)*

Las magnitudes de las cargas de viento varían con la localidad geográfica, las alturas sobre el nivel del terreno, los tipos de terrenos que rodean a los edificios, incluyendo otras estructuras y algunos otros factores.

#### 2.2.3.2.2 *Carga de sismo (E)*

Los sismos producen cargas sobre una estructura por medio de la interacción del movimiento del suelo y las características de respuesta de la estructura. .Sus magnitudes dependen de la cantidad y tipo de aceleraciones del suelo, así como la masa y rigidez de la estructura.

#### 2.2.3.3.3 *Cargas de Nieve (S)*

Estas cargas se acumulan principalmente en los techos de las edificaciones y para el diseño suelen utilizarse valores de estas cargas dentro de rangos determinados dependiendo de la localidad y estudios del efecto de este agente ya que la nieve es una carga variable que puede cubrir todo un techo o solo partes de él, la magnitud depende principalmente de la pendiente y en menor grado de la índole de superficie de ésta del techo, además el viento puede acumularla cerca de los muros.

## 2.2.4 COMBINACIONES DE CARGA

### 2.2.4.1 Combinaciones ASD

- D
- $D+L+(Lr \text{ o } S \text{ o } R)$
- $0,75 [D+L+(Lr \text{ o } S \text{ o } R)+T]$
- D+A
- $0,75 [D+(W \text{ o } E)]$
- $0,75 [D+(W \text{ o } E)+T]$
- $D+A+(S \text{ o } 0,5W \text{ o } E)$
- $0,75 [D+L+(Lr \text{ o } S \text{ o } R)+(W \text{ o } E)]$
- $0,75 (D+L+W+0.5S)$
- $0,75 (D+L+0,5W \text{ o } S)$
- $0,66 [D+L+(Lr \text{ o } S \text{ o } R)+(W \text{ o } E)+T]$

Donde:

D = carga muerta de la estructura

L = carga viva de piso, incluyendo el impacto

Lr = carga viva de techo de la estructura

A = cargas provenientes de grúas y sistemas de manejo de materiales

S = carga de techo de nieve, granizo, ceniza

R = carga de lluvia

W = cargas de viento

E = carga sísmica

T = cargas de restricción sobre la estructura

### 2.2.4.2 Combinaciones LRFD

- 1,4D
- $1,2 D+1,6 L+0,5 (Lr \text{ o } S \text{ o } R)$
- $1,2D+1,6(Lr \text{ o } S \text{ o } R)+(0,5L \text{ o } 0,8W)$
- $1,2D+1,3W+0,5L+0,5(Lr \text{ o } S \text{ o } R)$

- $1,2D+1,5E+(0,5L \text{ o } 0,2S)$
- $0,9D-(1,3W \text{ o } 1,5E)$

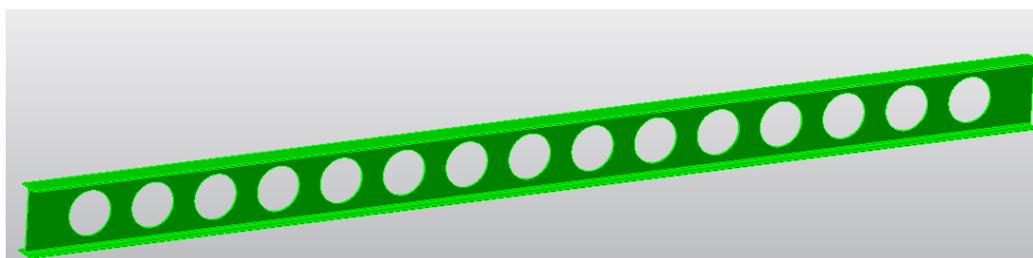
En estas combinaciones, R es la carga debida al agua de lluvia o hielo inicial, exclusivo del empozamiento.

## 2.3 VIGAS DE ALMA ALIGERADA

### 2.3.1 INTRODUCCIÓN<sup>23</sup>

Las vigas de alma aligerada o conocidas también como vigas Boyd (figura 2.5) fueron inventadas por Geoffrey Murray Boyd en la década de los años 30 del siglo pasado, cuando trabajaba en la construcción de una grúa mono carril. Las vigas que tenía en stock para realizar el trabajo tenían el ancho de ala requerido para que la grúa pudiera desplazarse, pero ninguna tenía la suficiente rigidez como para poder salvar la luz que necesitaba abarcar.

Boyd entonces decidió cortar las vigas doble T que tenía mediante una línea quebrada de tal manera que las dos partes resultantes podían superponerse y soldarse, creando una nueva viga de más canto con huecos en el alma. El aumento de canto aumentaba la rigidez, mientras que el peso por unidad de longitud permanecía constante. Es decir el producto estructural así obtenido es más eficiente, ya que presentaba una relación inercia-peso mejorada.



**Figura 2. 5** Viga de alma aligerada

<sup>23</sup> <http://www.arktec.com/espana/newsletter1210/vigasboyd.htm>;[Consultado Octubre 2012]

Tiene por tanto, la gran ventaja de tener el mismo peso por unidad de longitud que el perfil original pero con un mayor peralte, con el que aumenta el momento resistente, y por lo tanto se producirá un mejor aprovechamiento del material. En las zonas con altas sollicitaciones de cortante, las aberturas pueden ser fácilmente rellenadas o rigidizadas.

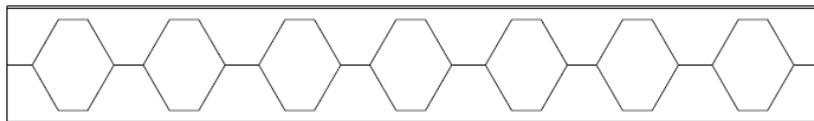
### **2.3.2 VENTAJAS**

- Son vigas aptas para cubrir grandes luces en construcción ligera.
- Permiten acomodar servicios del edificio en zona estructural. Así el canto total es inferior. (El ahorro puede llegar a los 500 mm por piso).
- Tienen una relación adecuada entre capacidad de carga y peso.
- Presentan un aspecto más ligero de la construcción.
- Permiten dar una contraflecha dada desde el momento de la fabricación.
- El peso reducido incide en el resto del conjunto estructural formado por pilares, cimentación, etc., y permite cierta economía en su transporte y montaje.
- Posibilidad de adaptación a diferentes peraltes por medio de placas intermedias y lograr una altura determinada.
- Las vigas en relación a su peso presentan gran rigidez por lo cual las deformaciones son poco apreciables.
- Menor superficie para pintar.
- Mejores soluciones estéticas y novedosas para diseños arquitectónicos.

### **2.3.3 TIPOS DE VIGAS**

#### **2.3.3.1 Vigas Estándar**

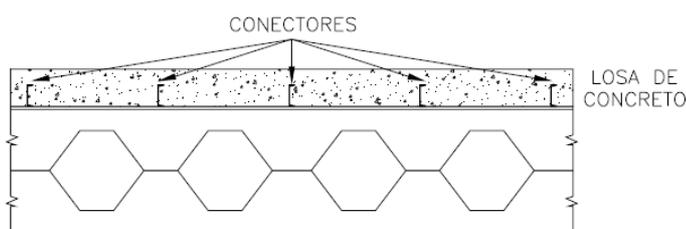
Son vigas simplemente apoyadas, de patines paralelos, cuyas secciones T parten de un mismo perfil y soportan cargas uniformes de cubierta o entrepiso, ver figura 2.6.



**Figura 2. 6** Viga estándar

### 2.3.3.2 Compuestas

Las vigas compuestas se adaptan al funcionamiento en modo mixto en combinación con la losa. Las secciones trabajan en conjunto, absorbiendo el concreto los esfuerzos de compresión y el área de acero inferior los esfuerzos de tensión (figura 2.7). Al diseño propio de la viga se agregan conectores que trasladan el cortante del concreto al acero, logrando con esto una sola sección con capacidad de soportar grandes esfuerzos a compresión y tensión.



**Figura 2. 7** Viga compuesta

## 2.3.4 FABRICACIÓN

La fabricación de estas vigas no es muy costosa si se la realiza en serie. En la mayoría de los casos el proceso de corte es el plasma en vez del oxicorte debido a su mejor acabado y mayores velocidades de corte. Sin embargo, este proceso aumenta considerablemente el costo de la mano de obra, por lo que es importante realizar un estudio económico antes de decidir el empleo de este tipo de vigas.

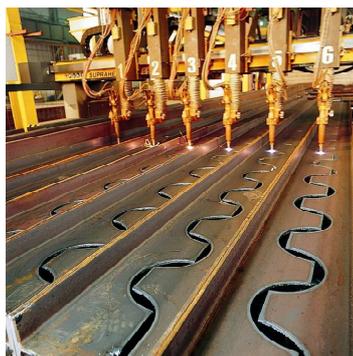
### 2.3.4.1 Materiales

Los materiales usados para la fabricación son en la mayor parte de las aplicaciones aceros de baja aleación y alta resistencia y cumplen con las especificaciones del ASTM. Los grados de acero que comúnmente se manejan son los ASTM A 572-Gr50, ASTM A 529-Gr50 y ASTM A36-Gr50, mientras que las secciones pueden variar según su disponibilidad en el mercado.

### 2.3.4.2 Proceso de fabricación

#### 2.3.4.2.1 Corte por plasma

El perfil original es cortado siguiendo un patrón de corte especificado en la codificación interna de la maquina cortadora por plasma, ver figura 2.8.



**Figura 2. 8** Corte de la viga<sup>24</sup>

#### 2.3.4.2.2 Separación de las T

Las secciones T superior e inferior formadas por el corte son separadas y luego son alineadas (figura 2.9), de tal forma de estar lista para la última etapa.



**Figura 2. 9** Separación de las T

#### 2.3.4.2.3 Reconstrucción de la viga

En esta etapa, por medio de soldadura eléctrica manual o automática se vuelve a reconstruir la viga (figura 2.10), teniendo de esta forma aberturas formadas en el alma a lo largo de su longitud, consecuentemente con un aumento del canto de la viga.

<sup>24</sup> Vassart, O. (2010). *Development of new types of curved and tapered cellular beams*. ARCELOR MITTAL. Journée Construction Acier.

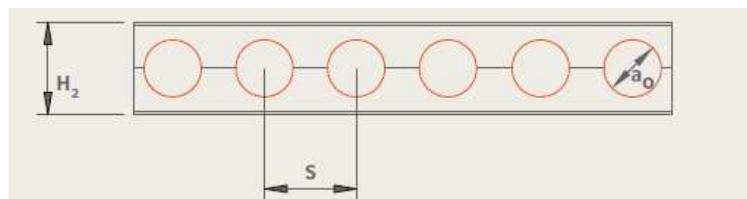


**Figura 2. 10** Reconstrucción – Soldadura

## 2.3.5 FORMAS DE LOS ALVEOLOS

### 2.3.5.1 Circulares (Celulares)<sup>25</sup>

A partir de un perfil de partida, existe una gran cantidad de combinaciones posibles de diámetros y de distancias entre ejes de los alveolos (figura 2.11). Estas dimensiones son específicamente para aplicaciones de forjados.



**Figura 2. 11** Parámetros geométricos de una viga celular

Donde:

$$a_0 = 0,8 a 1,3 h \quad (2.19)$$

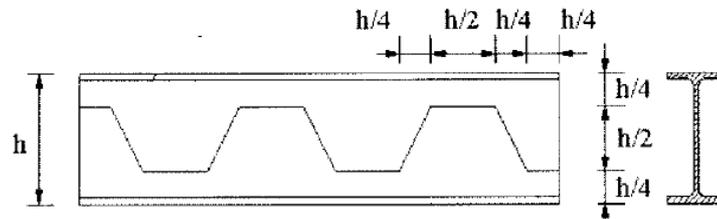
$$S = 1,2 a 1,7 a_0 \quad (2.20)$$

$$H_2 = 1,3 a 1,5 h \quad (2.21)$$

### 2.3.5.2 Hexagonales

Este tipo de configuración para los alveolos formalmente tiene como medidas de corte las que se muestran en la figura 2.12. Sin embargo, se la puede obtener de dibujar un hexágono inscrito o circunscrito en una circunferencia, de tal forma que solo se necesita definir un apropiado diámetro de dicha circunferencia. A este tipo de vigas, también se las conoce también como vigas casteladas.

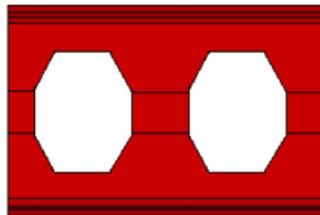
<sup>25</sup> ARCELOR MITTAL, (2008). *Artículo técnico: Vigas Alveolares ACB*. p9.



**Figura 2. 12** Parámetros geométricos de una viga con aberturas hexagonal<sup>26</sup>

### 2.3.5.3 Octogonales

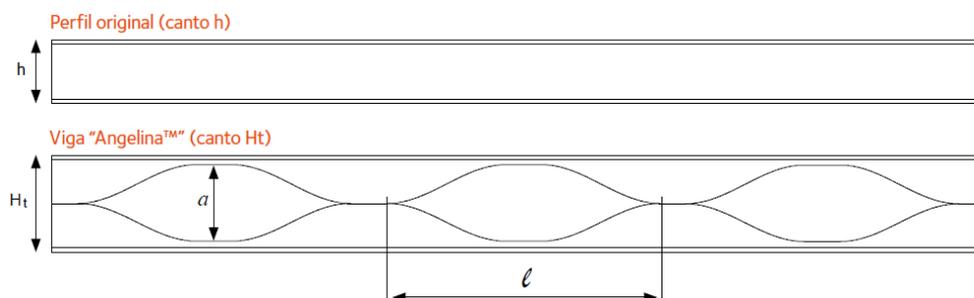
La forma de obtener las aberturas octogonales es la misma que para las aberturas hexagonales, pero añadiendo una pletina supletoria que aumenta aún más el canto de la viga (figura 2.13). Son menos usados por resultar en almas demasiadas esbeltas, propensas a desarrollar problemas de inestabilidad.



**Figura 2. 13** Viga con aberturas octogonales

### 2.3.5.4 Angelina

Recientemente creada por la empresa Arcelor Mittal en el año 2001. La forma del alveolo Angelina generalmente sigue un patrón sinusoidal, figura 2.14.



**Figura 2. 14** Viga Angelina<sup>27</sup>

<sup>26</sup> Raftoyiannis, L. G., Ioannidis, G. (2006). *Deflection of Castellated I-beams under transverse Loading*. Grecia. p32.

Los parámetros geométricos de una viga varían dependiendo de la aplicación a la que va estar sujeta, pero se toma como referencia las siguientes ecuaciones:

$$a[\text{mm}] = 2h - 4(t_f + 20) \quad (2.22)$$

$$H_t = 1,4 a \text{ a } 1,7h \quad (2.23)$$

$$l = 3 a \text{ a } 5a \quad (2.24)$$

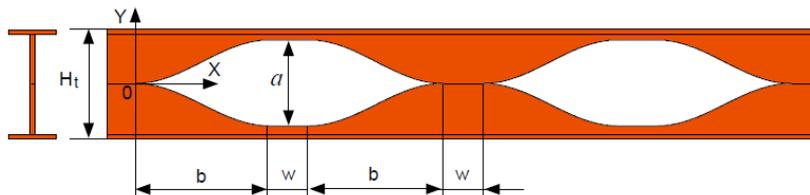
Donde:

r: radio de acuerdo de la viga

$t_f$ : espesor del patín

a: altura de una abertura sinusoidal

- Ecuación de la senoide



**Figura 2. 15** Alveolo sinusoidal “angelina”<sup>28</sup>

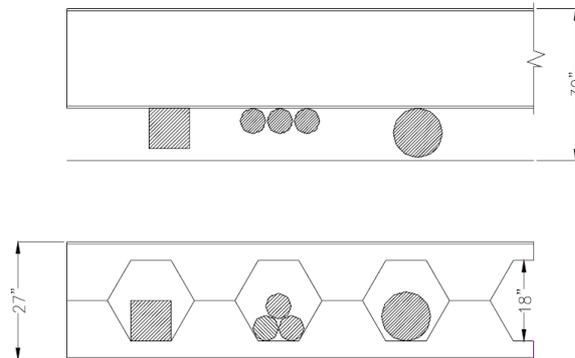
$$y = \left(0,5 \frac{a}{2}\right) \sin \left[ \pi \left( \frac{x}{b} + \frac{3}{2} \right) \right] + \frac{a}{4} \quad (2.25)$$

### 2.3.6 APLICACIONES

La aplicación en edificios modernos, soluciona el gran problema de la instalación de los servicios varios (calefacción, ventilación, aire acondicionado, etc.), los cuales se ubican atravesando el alma de la viga, dejando espacio libre debajo del patín, tal como se muestra en la figura 2.16.

<sup>27</sup> ARCELOR MITTAL, (2008). *Viga Angelina*. Long Carbon Europe. p4.

<sup>28</sup> ARCELOR MITTAL, (2008). *Viga Angelina*. Long Carbon Europe. p3.



**Figura 2. 16** Integración de servicios

El uso de este tipo de vigas se puede extender a diversas ocupaciones de cubiertas o entresijos, tales como: construcciones de múltiples niveles, estacionamientos de autos, estadios, centros de convenciones, arcos y formas cónicas, etc., ver figuras 2.17.y 2.18.



**Figura 2. 17** Garaje de parqueo

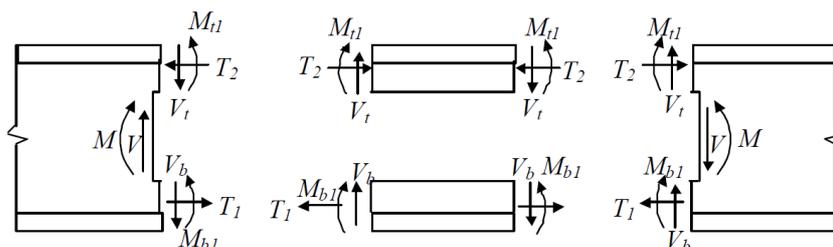


**Figura 2. 18** Estadio Stamford bridge, Londres<sup>29</sup>

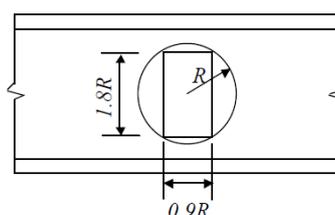
<sup>29</sup> WESTOK, (2008). *Cellular Beams*. Engineers Design Guide.

### 2.3.7 FUERZAS QUE ACTUAN SOBRE UNA ABERTURA<sup>30</sup>

Las fuerzas que actúan sobre los extremos de una abertura en el alma, por ejemplo una de forma rectangular se muestra en la figura 2.19. Para aberturas circulares con almas gruesas Redwood propuso un tamaño efectivo equivalente para la abertura circular con la rectangular, donde R es el radio (figura 2.20).



**Figura 2. 19** Distribución de fuerzas en una viga con abertura en el alma



**Figura 2. 20** Tamaño efectivo para una abertura circular

A partir de la figura 2.19, observamos que el momento de flexión principal, M, que actúa sobre la sección de la abertura es resistido por la fuerza de compresión T2, de la sección T superior y por la fuerza de tensión T1, de la sección T inferior, formándose una pareja separadas por una distancia d.

Dichas secciones T también contienen pequeños momentos Mt1 y Mb1, llamados momentos Vierendeel o secundarios, los cuales son generados a causa de la transferencia del esfuerzo cortante a través de las secciones T superior e inferior. Finalmente la fuerza cortante principal V es resistida por las fuerzas cortantes parciales, Vb y Vt, localizadas en las secciones T por debajo y arriba de la abertura, respectivamente.

<sup>30</sup> <http://www.steel-insdag.org/teachingmaterial/chapter28.pdf>;[Consultado Septiembre 2012]

Para condiciones de equilibrio, tenemos que:

$$V = V_t + V_b \quad (2.26)$$

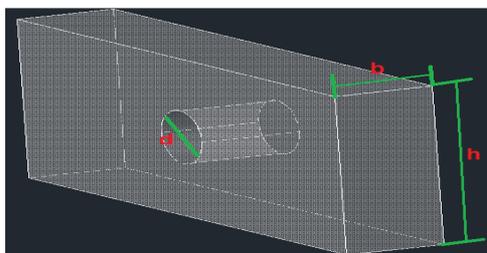
$$T_1 = T_2 \quad (2.27)$$

$$M = (T_1 \text{ ó } T_2) * h + M_{tl} + M_{bl} \quad (2.28)$$

Los momentos Vierendeel a través de la abertura son resistidos por las capacidades de momento plástico de las secciones T, las cuales deben ser diseñadas satisfactoriamente para un desempeño seguro de una viga (esto se lo hará en el Capítulo 5 de este proyecto).

### 2.3.8 CONCENTRACIONES DE TENSIONES EN VIGAS<sup>31</sup>

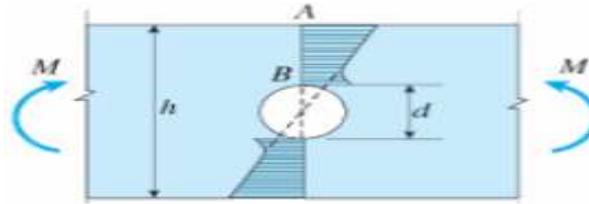
Las ecuaciones de flexión y cortante analizadas en el capítulo anterior son válidas para vigas sin orificios, muescas u otros cambios abruptos en sus dimensiones. Cuando se presentan tales discontinuidades, se producen concentraciones de esfuerzos altamente localizados. La figura 2.21 muestra una viga de sección transversal rectangular con una abertura circular concéntrica al eje neutro de la viga. Dicha viga tiene una peralte  $h$  y espesor  $b$  y está sometida a flexión pura debido a la acción de momentos flectores  $M$  sobre ella.



**Figura 2. 21** Viga de sección rectangular con abertura circular

Si el diámetro,  $d$ , del orificio es pequeño en comparación con el peralte,  $h$ , la distribución de esfuerzos sobre la sección transversal que pasa por el edificio es aproximadamente igual a la mostrada en la figura 2.22. La línea segmentada muestra la distribución de esfuerzos sin agujero.

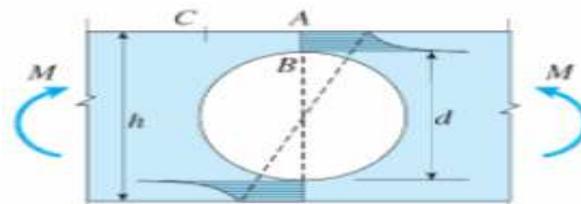
<sup>31</sup> Gere, J. (2006). *Mecánica de materiales*. 6ta Edición. p364.



**Figura 2. 22** Distribución de esfuerzos orificio pequeño

En el punto B sobre el borde del edificio, el esfuerzo es mucho mayor que el esfuerzo que existiría en ese punto si no hubiera tal. Sin embargo, si nos movemos hacia los bordes exteriores de la viga, la distribución de esfuerzos varía en sentido lineal con la distancia desde el eje neutro y la presencia del agujero solo la afecta ligeramente.

Ahora cuando el agujero es relativamente grande, la distribución de esfuerzos es muy parecida a la mostrada en la figura 2.23.



**Figura 2. 23** Distribución de esfuerzos orificio grande

Se tiene un gran incremento del esfuerzo en el punto B y solo un pequeño cambio del esfuerzo en el punto A. El esfuerzo en el punto C es mayor que el esfuerzo en A y menor que el esfuerzo en B.

Varias investigaciones han mostrado que el esfuerzo en el punto B es alrededor del doble del esfuerzo nominal en dicho punto. El esfuerzo nominal se calcula con la ecuación 1.6, en donde  $y$  es la distancia  $d/2$  desde el eje neutro al punto B e  $I$  es el momento de inercia de la sección transversal neta en el orificio. A continuación se presenta la ecuación aproximada para calcular el esfuerzo normal en el punto B.

$$\sigma_B \approx 2 \frac{My}{I} = 12 \frac{Md}{b(h^3 - d^3)} \quad (2.29)$$

En el borde exterior de la viga (punto C), el esfuerzo normal es aproximadamente igual al esfuerzo nominal (no al esfuerzo real) en el punto A (para  $y=h/2$ ):

$$\sigma_C \approx \frac{My}{I} = \frac{6Mh}{b(h^3-d^3)} \quad (2.30)$$

De las ecuaciones 2.29 y 2.30 vemos que la razón  $\sigma_B/\sigma_C$  es aproximadamente  $2d/h$ ; por lo tanto concluimos que cuando la razón  $d/h$  excede  $1/2$ , el esfuerzo máximo ocurre en el punto B, mientras que cuando es menor que  $1/2$ , el esfuerzo máximo se presentara en C.

## 2.4 DISEÑO DE VIGAS CON ABERTURAS EN EL ALMA<sup>32</sup>

En la actualidad existen pocos ensayos experimentales, técnicas de análisis y métodos de diseño disponibles para el estudio de este tipo de vigas, muchas de estas son usualmente simples y empíricas.

A continuación se presenta un procedimiento de diseño para determinar la resistencia de vigas de acero con aberturas en el alma. Las aberturas pueden ser reforzadas o no reforzadas. Este procedimientos de diseño está limitado a miembros con esfuerzo de fluencia  $F_y \leq 65 \text{ Ksi}$  y que cumplen los criterios de la AISC para secciones compactas (AISC 1994b). Otras limitaciones sobre las propiedades de la sección y guías de proporción para las vigas y sus aberturas serán presentadas posteriormente.

### 2.4.1 REGLAS DE DISEÑO ACTUALES

Los métodos de diseño por resistencia para vigas con aberturas que se basan en el análisis de esfuerzos plásticos, pueden ser clasificados en dos categorías.

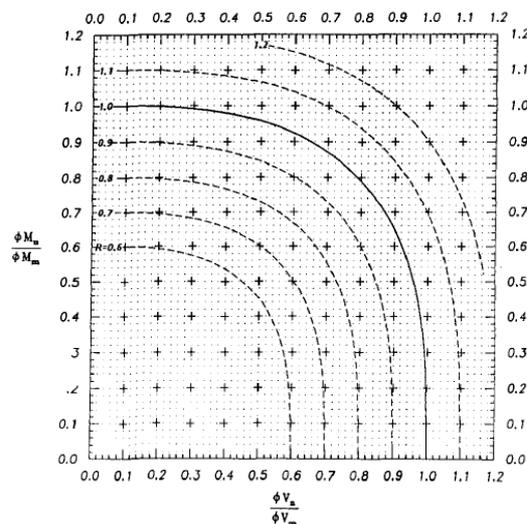
- a) Métodos de diseño que utilizan curvas de interacción momento-cortante sobre las secciones perforadas.
- b) Métodos de diseño basados en interacción de fuerza cortante, fuerza axial, y momento flector actuantes sobre las secciones T.

---

<sup>32</sup> Darwin, D. (1990). *Steel and Composite Beams with Web Openings*. Design Guide 2. American Institute of Steel Construction. Chicago.

### 2.4.2 CURVAS DE INTERACCIÓN MOMENTO CORTANTE

Este método implica el cálculo de la capacidad de momento máximo bajo fuerza cortante cero y la capacidad de corte máxima bajo momento flector cero en la sección perforada. Entre todos los métodos de diseño que siguen este enfoque, uno desarrollado por Darwin y Lucas en 1990 permanece como el más fácil de aplicar y es el más comprensivo y exacto. Las curvas de interacción entonces son la técnica de diseño principal en los estándares de la SEI/ASCE. Un modelo de curvas de interacción momento-cortante se muestra en la figura 2.24.



**Figura 2. 24** Curvas de interacción momento-cortante de diseño

A partir de la figura 2.24 se puede mostrar la interacción entre las resistencias de diseño a corte y a flexión,  $\phi V_n$  y  $\phi M_n$ , respectivamente. La curva con trazado sólido presenta la siguiente ecuación matemática:

$$\left(\frac{\phi M_n}{\phi M_m}\right)^3 + \left(\frac{\phi V_n}{\phi V_m}\right)^3 = R^3, R = 1 \quad (2.31)$$

$$R = \frac{V_u}{\phi V_n} = \frac{M_u}{\phi M_n} \quad (2.32)$$

Donde:

R: relación de la carga factorada a la capacidad de diseño en una abertura.

Varias curvas adicionales también son incluidas en la figura 2.24 con valores de  $R$  en un rango de 0,6 a 1,2. El valor de  $R$  en el punto  $(\frac{V_u}{\phi V_m}, \frac{M_u}{\phi M_m})$ , también permite obtener  $\phi V_n$  y  $\phi M_n$  de las cargas aplicadas.

$$\phi V_n = \frac{V_u}{R} \quad (2.33)$$

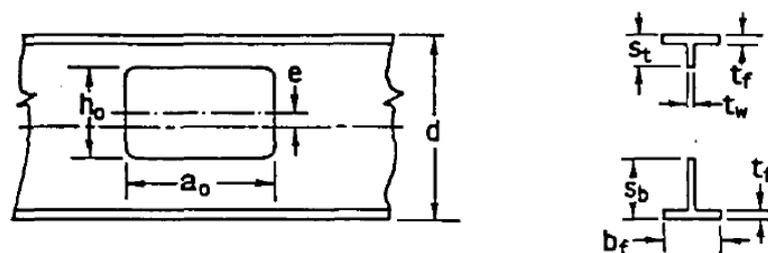
$$\phi M_n = \frac{M_u}{R} \quad (2.34)$$

Por último, las ecuaciones anteriores son presentadas para aberturas rectangulares. Posteriormente se presentaran guías de proporción para permitir que dichas expresiones puedan también ser utilizadas para aberturas circulares. Las aberturas rectangulares son de longitud  $a_0$ , y altura  $h_0$  y pueden tener una excentricidad,  $e$ , la cual es medida desde la línea central de la sección. Para miembros de acero,  $e$  es positivo, sin importar si la abertura está arriba o debajo de la línea central. La porción de la sección arriba de la abertura (T superior) tiene una altura  $s_t$  mientras que la T inferior tiene una altura de  $s_b$ .

#### 2.4.2.1 Capacidad de momento máximo bajo fuerza de corte cero, $M_m$

##### 2.4.2.1.1 Aberturas no reforzadas

Dependiendo de las configuraciones de las aberturas, las expresiones para el cálculo de la capacidad de momento máximo pueden tomar varias formas. La expresión de diseño para la resistencia de momento máximo  $M_m$ , de las vigas de acero con aberturas en el alma rectangulares no reforzadas (figura 2.25), está dada por:



**Figura 2. 25** Abertura no reforzada

$$M_m = M_p \left[ 1 - \frac{\Delta A_s \left( \frac{h_0}{4} + e \right)}{Z_x} \right] \quad (2.35)$$

$$\Delta A_s = h_0 * t_w \quad (2.36)$$

$$M_p = F_y * Z_x \quad (2.37)$$

Donde:

ho: altura de la abertura

tw: espesor del alma de la viga

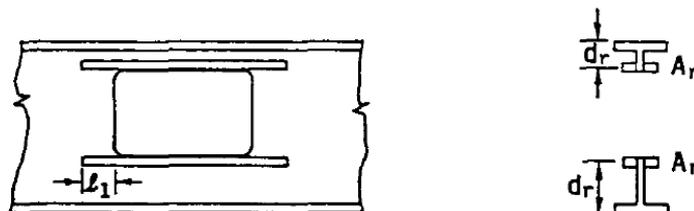
Z<sub>x</sub>: modulo plástico de la sección no perforada

F<sub>y</sub>: resistencia de fluencia del material

e: excentricidad de la abertura

#### 2.4.2.1.2 Aberturas reforzadas

Un modelo de reforzamiento usado para las aberturas, es el que se muestra en la figura 2.26, este reforzamiento tiene la forma de barras, arriba y abajo de las aberturas, soldada a uno o dos lados del alma.



**Figura 2. 26** Abertura reforzada

Entonces, para miembros con aberturas reforzadas:

- Si  $t_w e < A_r$

$$M_m = M_p \left[ 1 - \frac{t_w \left( \frac{h_0^2}{4} + h_0 e - e^2 \right) - A_r h_0}{Z_x} \right] \leq M_p \quad (2.38)$$

- Si  $t_w e \geq A_r$

$$M_m = M_p \left[ 1 - \frac{\Delta A_s \left( \frac{h_0}{4} + e - \frac{A_r}{2t_w} \right)}{Z_x} \right] \leq M_p \quad (2.39)$$

$$\Delta A_s = h_0 t_w - 2A_r \quad (2.40)$$

Donde:

$A_r$ : Área de la sección transversal del reforzamiento arriba o debajo de la abertura.

#### 2.4.2.2 Capacidad de cortante máximo bajo momento flector cero, $V_m$

La capacidad de corte nominal máxima en una abertura,  $V_m$ , es la suma de las capacidades de las T superior e inferior.

$$V_m = V_{mt} + V_{mb} \leq \frac{2}{3} \bar{V}_p \quad (2.41)$$

$$\bar{V}_p = \frac{F_y t_w d}{\sqrt{3}} \quad (2.42)$$

Donde:

$V_{mt}$ : capacidad de corte de la sección T superior

$V_{mb}$ : capacidad de corte de la sección T inferior

$\bar{V}_p$ : capacidad de cortante plástica de una sección no perforada

Las expresiones anteriores pueden expresarse en términos de la resistencia de cortante plástica de las secciones T de acero  $V_{pt}$  o  $V_{pb}$ , de la siguiente manera:

$$\alpha_v = \frac{V_{mb}}{V_{pb}} = \frac{V_{mt}}{V_{pt}} = \frac{\sqrt{6} + \mu}{v + \sqrt{3}} \leq 1 \quad (2.41)$$

$$V_{pb} = \frac{F_y t_w s_b}{\sqrt{3}} \quad (2.42)$$

$$V_{pt} = \frac{F_y t_w s_t}{\sqrt{3}} \quad (2.43)$$

- Para T sin concreto:
  - T inferior

$$\mu = \frac{2P_r d_r}{V_{pb} s_b} \quad (2.44)$$

$$P_r = F_y A_r \leq \frac{F_y t_w a_o}{2\sqrt{3}} \quad (2.45)$$

- T superior

$$\mu = \frac{2P_r d_r}{V_{pt} s_t} \quad (2.46)$$

- Para T sin concreto y sin reforzamiento,  $\mu = 0$
- Para aberturas excéntricas  $s_b \neq s_t$  y  $v_b \neq v_t$

Donde:

$s$ : altura de la T,  $s_b$  o  $s_t$

$\bar{s} = s - \frac{A_r}{2b_f}$ , Usado para calcular  $v$  cuando existe reforzamiento

$v$ : relación de aspecto de la T ( $v = \frac{a_o}{s}$ , o  $v = \frac{a_o}{\bar{s}}$ )

$t_w$ : espesor del alma

$b_f$ : ancho del patín

$a_o$ : longitud de la abertura

$P_r$ : fuerza en el reforzamiento a lo largo del lado de la abertura

$\mu$ : relación adimensional que relaciona las contribuciones secundarias de momento flector de hormigón y el reforzamiento de la abertura con el producto de la capacidad de corte de plástico de un T y la profundidad de la T.

### 2.4.2.3 Reforzamiento

El reforzamiento debería ser ubicado tan cerca de una abertura como sea posible, dejando suficiente espacio para las soldaduras de filete, si se requiere sobre ambos lados del reforzamiento. La resistencia requerida de la soldadura dentro de la longitud de la abertura es:

$$R_{wr} = \phi 2P_r \quad (2.47)$$

Donde:

$R_{wr}$ : resistencia requerida de la soldadura

$\phi$ : 0.90 para vigas de acero y 0,85 para vigas compuestas

$$P_r = F_y A_r \leq \frac{F_y t_w a_0}{2\sqrt{3}} \quad (2.48)$$

El reforzamiento debería ser extendido más allá de la abertura una distancia  $\ell_1$  sobre cada lado de la abertura.

$$\ell_1 = \frac{a_0}{4} \quad (2.49)$$

$$\ell_1 = \frac{A_r \sqrt{3}}{2t_w} \quad (2.50)$$

Dentro de cada extensión, La resistencia de la soldadura es:

$$R_{wr} = \phi F_y A_r \quad (2.51)$$

#### 2.4.2.3.1 Una sola barra de reforzamiento

Para que las barras de reforzamiento puedan ser usadas sólo sobre un lado del alma, la sección debería cumplir los siguientes requisitos.

- a)  $A_r \leq \frac{A_f}{3}$
- b)  $\frac{a_0}{h_0} \leq 2,5$
- c)  $\frac{s_t}{t_w} \text{ ó } \frac{s_b}{t_w} \leq \frac{140}{\sqrt{F_y}}$
- d)  $\frac{M_u}{V_u d} \leq 20$

#### 2.4.2.4 Revisión de estabilidad

Para asegurar que el pandeo local del reforzamiento de compresión no ocurra y de esta forma asegurar una estabilidad en el pandeo de la viga, el criterio para secciones compactas de la AISC 1986b se debería cumplir también para los reforzamientos.

$$\frac{b_r}{t_r} \leq \frac{140}{\sqrt{F_y}}$$

Donde:

$b_r$ : ancho del reforzamiento

$t_r$ : espesor del reforzamiento

#### 2.4.2.5 Ubicaciones posibles de las aberturas

Una vez realizada esta curva, las cargas factoradas en la línea central de una abertura a lo largo de toda la viga  $V_u$  y  $M_u$  son revisadas cuando ubicamos los puntos  $(\frac{V_u}{\phi V_m}, \frac{M_u}{\phi M_m})$  en la curva de interacción. Si dichos puntos cae debajo de la curva de interacción ( $R \leq 1$ ), entonces el diseño es estructuralmente adecuado.

Cuando la viga tiene más de una abertura, el espaciamiento mínimo entre los lados de dos aberturas adyacentes,  $S$ , debe estar en concordancia con el siguiente criterio para evitar la interacción entre aberturas<sup>33</sup>.

##### 2.4.2.5.1 Espaciamiento aberturas cuadradas y rectangulares

$$s \geq h_0 \quad \text{ó} \quad s \geq a_0 \left( \frac{V_u}{\phi V_p - V_u} \right)$$

##### 2.4.2.5.2 Espaciamiento aberturas circulares

$$s \geq 1,5D_0 \quad \text{ó} \quad s \geq D_0 \left( \frac{V_u}{\phi V_p - V_u} \right)$$

<sup>33</sup> Darwin, D. (1990). *Steel and Composite Beams with Web Openings*. Design Guide 2. American Institute of Steel Construction. Chicago. Section 3.7b.

#### 2.4.2.5.3 Radio de acuerdo ( $r$ ):

Las esquinas de las aberturas deberían tener un mínimo radio de acuerdo de 2 veces el espesor del alma o 5/8 in, el cual aún es más grande.

#### 2.4.2.5.4 Aberturas circulares

Las aberturas circulares de diámetro  $D_0$ , pueden ser diseñadas usando las mismas expresiones que para el diseño de las aberturas rectangulares, pero haciendo las siguientes substituciones para  $h_0$  y  $a_0$ .

- Aberturas circulares no reforzadas

$$h_0 = D_0 \quad \text{para flexión} \quad (2.52)$$

$$h_0 = 0,9D_0 \quad \text{para corte} \quad (2.53)$$

$$a_0 = 0,45D_0 \quad (2.54)$$

- Aberturas circulares reforzadas

$$h_0 = D_0 \quad \text{para flexión y corte} \quad (2.55)$$

$$a_0 = 0,45D_0 \quad (2.56)$$

## 2.5 MODOS DE FALLA EN VIGAS DE ALMA ALIGERADA

“La resistencia y rigidez de una viga con aberturas en el alma son frecuentemente reducidas, si las comparamos con su contra parte las vigas de alma llena, y la reducción es una función de la configuración de la abertura tales como”<sup>34</sup>:

- Formas y tamaños de las aberturas
- Ubicación de las aberturas en el alma a lo largo del claro de la viga
- Espaciamiento entre aberturas adyacentes
- Existencia de reforzamiento o placas rigidizadoras alrededor de la abertura, y
- Posición de las aberturas con respecto al eje neutro de la viga de acero

---

<sup>34</sup> Ko Chi Hang, (2002). A Unified approach for steel and composite beams with web openings. The Hong Kong Polytechnic University. p13.

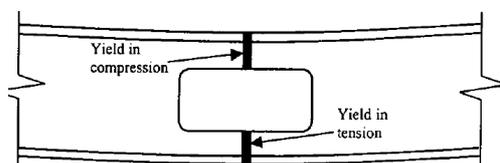
En ausencia de fenómenos de inestabilidad local o total, existen 6 diferentes modos de falla para las vigas de alma aligerada.

- Falla por flexión pura
- Falla por corte
- Formación de un mecanismo vierendeel
- Pandeo del post alma
- Pandeo lateral torsional del post-alma
- Ruptura de la junta soldada

El pandeo del post-alma y el mecanismo vierendeel han atraído más la atención de los investigadores, no solamente porque son los modos de falla más dominantes de las vigas alveolares, sino también porque han demostrado ser más complejos de formular y codificar a través de un método de diseño sencillo fiable comparado con los otros modos de falla.

### 2.5.1 FALLA POR FLEXIÓN

Bajo condiciones de flexión pura, siempre que la sección sea compacta, lo cual significa que la viga no presenta comportamiento de pandeo, se tiene que las secciones T por encima y por debajo de las aberturas fluirán en tensión y compresión hasta ellas lleguen a ser completamente plásticas. Este modo de falla fue reportada en los trabajos de Toprac y Cooke en 1959<sup>35</sup>. Ellos concluyeron que la fluencia en las secciones T arriba y abajo de las aberturas de una viga de alma aligerada fue similar a la de una viga sólida original bajo fuerzas de flexión pura aplicadas (figura 2.27).



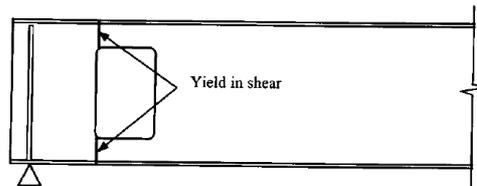
**Figura 2. 27** Falla por flexión de la sección perforada<sup>36</sup>

<sup>35</sup> Toprac, A.A., Cooke B.R. (1959). *An experimental investigation of open web beams*. Welding Research Council Bulletin. New York. Vol.47. p1-10.

<sup>36</sup> Ko Chi Hang, (2002). *A Unified approach for steel and composite beams with web openings*. The Hong Kong Polytechnic University. p13.

### 2.5.2 FALLA POR CORTE

En ciertos casos cuando la sección perforada está sujeta a fuerzas de corte y estas son muy altas y se tiene además que la altura de la abertura es grande pero la longitud es corta, la sección perforada puede exhibir una falla por cortante puro tal como se muestra en la figura 2.28.



**Figura 2. 28** Falla por corte de la sección perforada

### 2.5.3 PANDEO LATERAL TORSIONAL

Este modo de falla es principalmente provocado por movimientos fuera del plano de flexión de la viga, sin distorsionar el alma de las vigas originales. El pandeo lateral torsional se asocia generalmente con vigas de luces de tramos grandes con inadecuado apoyos laterales en el patín de compresión. La reducción de la rigidez torsional de la viga de alma aligerada, es resultado de las propiedades de la sección relativamente más largas y delgadas, contribuyendo de esta forma a un efecto de pandeo lateral en la viga (figura 2.29).

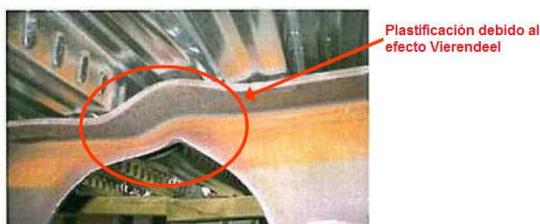


**Figura 2. 29** Pandeo lateral torsional de una viga<sup>37</sup>

<sup>37</sup> Erdal, F. (2011). *Ultimate Load capacity of Optimally Designed Cellular Beams*. Thesis Middle East Technical University. 2011. p29.

#### 2.5.4 FALLA POR LA FORMACIÓN DEL MECANISMO VIERENDEEL

El mecanismo de Vierendeel es la falla que se produce debido a la formación de “bisagras” plásticas en las T superior e inferior de las aberturas (figura 2.30). Este modo de fallo está asociado con la transferencia de elevadas fuerzas de corte a través de las aberturas, en paralelo con la razón de cambio de momento flector a lo largo de la viga.



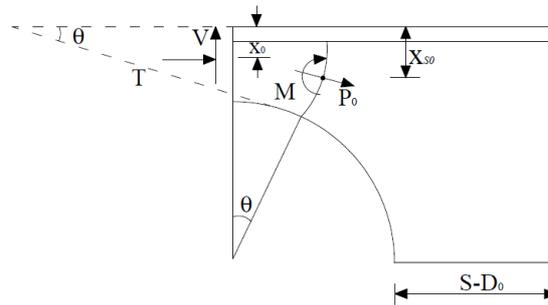
**Figura 2. 30** Formación del mecanismo Vierendeel en un abertura circular

Cuando una viga de alma aligerada se somete a un esfuerzo cortante, las secciones T superior e inferior deben transportar el cortante aplicado, así como los esfuerzos primarios y secundarios. El esfuerzo primario es el formal momento flector en la sección transversal de la viga. Este esfuerzo es aplicado de manera uniforme sobre las zonas de la parte superior e inferior de la T. El esfuerzo secundario, (Vierendeel), proviene de la transferencia de la fuerza cortante en las secciones T sobre la longitud horizontal de la abertura. El esfuerzo resultante total es la suma de los ambos esfuerzos. La formación de un mecanismo Vierendeel a menudo se produce en vigas de alma aligerada con grandes longitudes horizontales de las aberturas.

##### 2.5.4.1 Capacidad de la sección crítica

La capacidad a flexión de las T superior e inferior bajo la acción de momentos Vierendeel es crítica. Los esfuerzos de flexión Vierendeel alrededor de la abertura, pueden ser calculados usando el enfoque de Olander<sup>38</sup>. Olander utilizó una sección circular para la posición de la sección crítica y el cálculo de la resistencia última de las T, ver figura 2.31.

<sup>38</sup> Olander, H.C. (1953). *A method of calculating stresses in rigid frame corners*. Journal of ASCE. August 1953.



**Figura 2. 31** Enfoque de la viga curvada de Olander<sup>39</sup>

Para secciones simétricas, la fuerza de corte es dividida igualmente entre las secciones superiores e inferiores del alma. La interacción entre el momento de flexión y la fuerza normal para la sección crítica en la T, deberían cumplir la siguiente relación:

$$\frac{P_0}{P_u} + \frac{M_0}{M_p} \leq 1$$

$$P_0 = T \sin \theta - \frac{V}{2} \left( \frac{H_s}{2} - x_{s0} \right) \quad (2.57)$$

$$P_u = \text{Área sección crítica} * F_y \quad (2.58)$$

$$M_p = Z_x F_y \quad (2.59)$$

Donde:

$P_0$ : fuerza cortante actuante en la sección crítica

$M_0$ : momento flector actuante en la sección crítica

$P_u$ : capacidad de corte máxima en la sección crítica

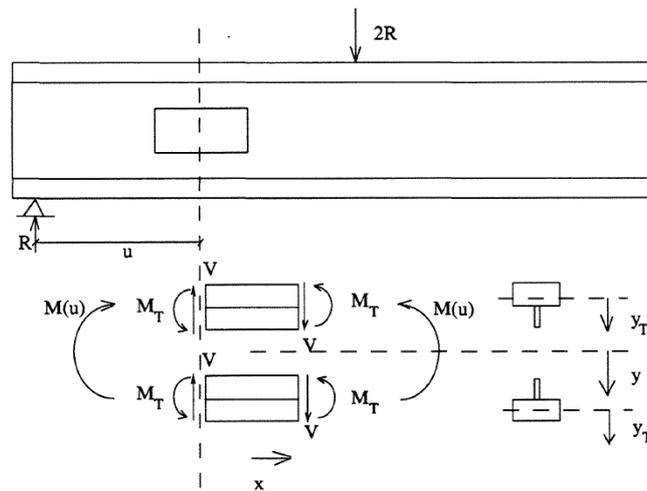
$M_p$ : capacidad de momento máximo en la sección crítica= momento plástico

$Z_x$ : módulo plástico de la sección

<sup>39</sup> Erdal, F. (2011). *Ultimate Load capacity of Optimally Designed Cellular Beams*. Thesis Middle East Technical University. 2011. p38.

### 2.5.4.2 Esfuerzos de flexión totales en las secciones T ( $\sigma_x$ )<sup>40</sup>

La figura 2.32 muestra una viga simplemente apoyada bajo una carga puntual ( $2R$ ) aplicada en el centro de su longitud. Una abertura rectangular está centrada sobre el eje centroidal de la viga. El diagrama de cuerpo libre de las secciones T se muestra al cortar la viga en los topes de la abertura.



**Figura 2. 32** Análisis Vierendeel viga con abertura rectangular

En primer lugar se asume que la fuerza cortante será transportada igualmente por las secciones T arriba y debajo de la abertura, es decir:

$$V = 0.5R \quad (2.60)$$

Asumiendo que un punto de contraflexión ocurre en el centro de la abertura, entonces el momento secundario o vierendeel,  $M_T$ , puede ser determinado por:

$$M_T = V \cdot x \quad (2.61)$$

El momento positivo causa compresión en la parte superior de la viga. Los esfuerzos normales de flexión secundarios causados por  $M_T$ , pueden ser calculados con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{XT} = \frac{V \cdot x \cdot y_T}{I_T} \quad (2.62)$$

<sup>40</sup> Wang, S., Cheng J.J. (1995). *Shear behaviour of osbwood composite i-beams with web openings*. Canada.

Donde:

$I_T$ : momento de inercia de una sección T

$y_T$ : distancia transversal desde el centroide de la sección T.

De la estática, se tiene que el momento flector primario está dado por:

$$M(u) = R \cdot u = 2V \cdot u \quad (2.63)$$

Entonces el esfuerzo de flexión primario está dado por:

$$\sigma_P = \frac{M(u) \cdot y}{I_n} \quad (2.64)$$

Donde:

$I_n$  : momento de inercia de la sección transversal neta de la viga sobre su eje centroidal

$y$  : distancia transversal desde el eje centroidal de la viga.

Las ecuaciones 2.62 y 2.64 son sumadas para obtener el esfuerzo de flexión total  $\sigma_x$ . Un valor positivo de  $\sigma_x$  significa que el esfuerzo de flexión está de tensión.

$$\sigma_x = \frac{V \cdot x \cdot y_t}{I_T} + \frac{M(u) \cdot y}{I_n} \quad (2.65)$$

### 2.5.5 FALLA POR PANDEO DEL POST-ALMA<sup>41</sup>

El pandeo del post-alma es el modo de fallo más común en las vigas con alveolos circulares especialmente a temperaturas elevadas, ya que el acero pierde su rigidez en una relación más grande que su resistencia. Este tipo de falla es causada también por la acción de cargas concentradas directamente sobre el post-alma de una viga.

El pandeo del alma también está relacionado con el espesor del alma y la relación entre la separación de las aberturas y el diámetro. El primer borde inclinado de la abertura está bajo tensión y el otro borde en compresión, resultado de esto se tiene un efecto de torsión del post-alma a lo largo de su altura, tal como se muestra en la figura 2.33.

---

<sup>41</sup> Thesis. *Cellular Beams at Ambient and Elevated Temperatures*. p51-55.



**Figura 2. 33** Pandeo del post-alma en una viga celular

### 2.5.5.1 Capacidades al pandeo y flexión del post-alma

#### 2.5.5.1.1 Modelo de Ward<sup>42</sup>

El método de diseño robusto para el análisis del pandeo del post-alma presentado por Ward en 1990, formula que la resistencia última del post-alma se rige por dos modos, ya sea por falla de flexión causada por el desarrollo de una bisagra plástica en un post-alma, o por pandeo en sí del post-alma. Ward llevo a cabo una serie de análisis con elementos finitos no lineales para desarrollar las curvas de diseño para el post-alma, la cual dió lugar a proponer la siguiente fórmula para la capacidad de pandeo y flexión del post-alma.

$$\frac{M_{MAX}}{M_E} = \left[ C_1 \left( \frac{S}{D_0} \right) - C_2 \left( \frac{S}{D_0} \right)^2 - C_3 \right] \quad (2.66)$$

$$M_E = S_x F_y \quad (2.67)$$

$$C_1 = 5,097 + 0,1464 \left( \frac{D_0}{t_w} \right) - 0,00174 \left( \frac{D_0}{t_w} \right)^2 \quad (2.68)$$

$$C_2 = 1,441 + 0,0625 \left( \frac{D_0}{t_w} \right) - 0,000683 \left( \frac{D_0}{t_w} \right)^2 \quad (2.69)$$

$$C_3 = 3,645 + 0,0853 \left( \frac{D_0}{t_w} \right) - 0,00108 \left( \frac{D_0}{t_w} \right)^2 \quad (2.70)$$

Donde:

$M_{MAX}$ : máximo momento permisible en el post-alma

<sup>42</sup> Ward, J.K. (1990). *Design of composite and non-composite cellular beams*. The Steel Construction Institute. SCI Publication 100.

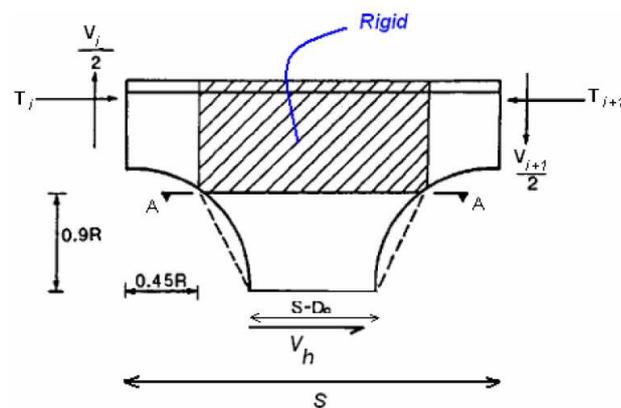
$M_E$ : capacidad de momento en la sección A-A de la figura 2.34

$S$ : distancia entre centros de las aberturas circulares

$S_x$ : módulo elástico de la sección

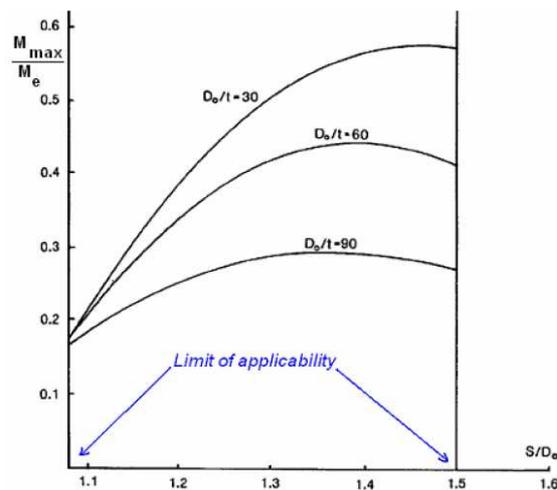
$C_1, C_2, C_3$ : constantes

$t_w$ : espesor del alma



**Figura 2. 34** Fuerzas aplicadas en el post alma y sección crítica

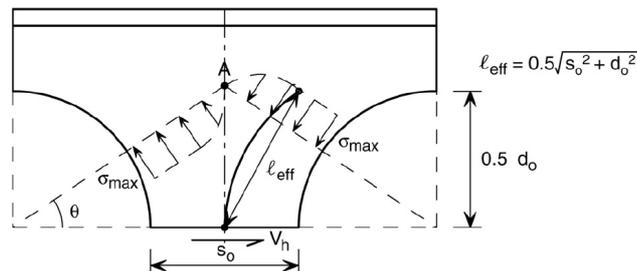
El método de diseño de Ward presenta curvas de diseño simples dadas en la figura 2.35 para examinar las capacidades de pandeo y flexión del post-alma.



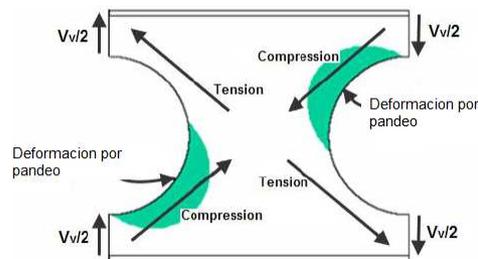
**Figura 2. 35** Curvas de diseño propuestas por Ward para revisar las capacidades de flexión y pandeo del post-alma

### 2.5.5.1.2 Modelo de Lawson<sup>43</sup>

Uno de los inconvenientes del método presentado por Ward fue que era sólo aplicable a vigas simétricas. Lawson en el año 2002 propuso un nuevo enfoque basado en una zona de compresión o "Modelo Puntal" (figura 2.36). Una de las complejidades de este enfoque fue establecer una razonable longitud efectiva para el puntal en pandeo, debido al patrón de esfuerzos compuestos alrededor de la abertura.



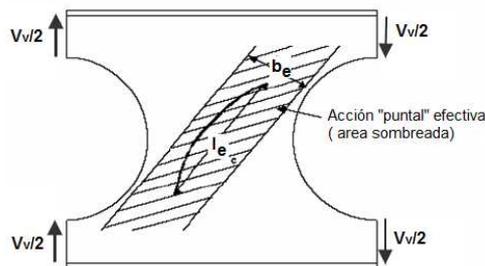
**Figura 2. 36** Modelo de "puntal" propuesto por Lawson para el pandeo del post-alma. Según este enfoque fuerzas de compresión y de tracción actúan a través del post alma sobre diagonales opuestas. La falla se produce cuando se forma un pandeo local del alma adyacente a la abertura, ver figura 2.37.



**Figura 2. 37** Conducta típica en el post-alma

Los esfuerzos de compresión que actúan sobre el puntal fueron calculados usando la fuerza en la sección T superior o también como la mitad de la fuerza de corte vertical aplicada sobre una abertura ubicada simétricamente. El ancho efectivo del post-alma que resiste esfuerzos de compresión fue tomado como la mitad total del ancho del post-alma ( $b_e = \frac{s_0}{2}$ ), ver figura 2.38.

<sup>43</sup> Lawson, R.M, Hicks S.J. (2006). *Design of beams with large openings for services*. Published by Steel Construction Institute. SCI Pre-Publication draft. p355.



**Figura 2. 38** Modelo de puntal para el pandeo del post-alma

Esta asunción es solamente para evaluar la resistencia a compresión de un perfil y se basa en observaciones empíricas<sup>44</sup>. Los esfuerzos de compresión que actúan sobre el puntal se los calcula así:

$$\sigma = \frac{V_v}{2\left(\frac{S_0}{2}\right)t_w} = \frac{V_v}{S_0 t_w} \quad (2.71)$$

Donde:

$b_e$ : ancho efectivo del puntal

$l_e$ : longitud efectiva del puntal

$S_0$ : ancho del post-alma

$V_v$ : fuerza de corte vertical en el post-alma

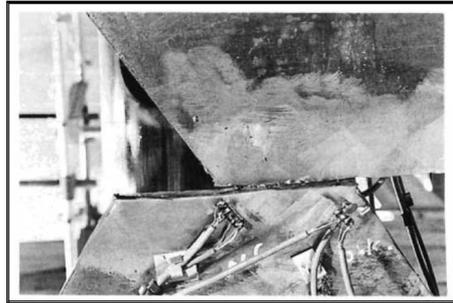
$t_w$ : espesor del alma

## 2.5.6 RUPTURA DE JUNTAS SOLDADAS<sup>45</sup>

Este modo de falla depende de la longitud de la junta soldada. Hussain y Speirs han encontrado este modo después de probar seis vigas alveolares con pequeñas gargantas de soldadura. Estas pruebas mostraron que si los esfuerzos de corte horizontales superan el límite elástico de la garganta de la soldadura, la altura de la junta soldada del alma entra dos aberturas se podría romper.

<sup>44</sup> FABSEC Ltd, (2006). *Design of FABSEC Cellular Beams in Non-composite and Composite Applications for both normal temperature and fire engineering conditions.*

<sup>45</sup> Husain M.U., Speirs W.G. (1971). *Failure of castellated beams due to rupture of welded joints.* Acier-Stahl-Steel. Volume 1.



**Figura 2. 39** Ruptura de las juntas soldadas en vigas de alma aligerada<sup>46</sup>

La figura 2.39 muestra la falla de las uniones soldadas debido a las altas fuerzas cortantes horizontales y cortas longitudes de soldadura en vigas de alma aligerada. La longitud horizontal de las aberturas es igual a la longitud de la soldadura, y si la distancia entre estas aberturas se reduce para disminuir momentos secundarios, la garganta de soldadura del post-alma será más vulnerable de fallar de este modo.

---

<sup>46</sup> Erdal, F. (2011). *Ultimate Load capacity of Optimally Designed Cellular Beams*. Thesis Middle East Technical University. 2011. p31.

## CAPÍTULO 3

### PLANTEAMIENTO Y ANÁLISIS DEL PROBLEMA

#### 3.1 ANÁLISIS DE VIGAS DE ALMA ALIGERADA POR ELEMENTOS FINITOS

##### 3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

La figura 3.1 muestra un ejemplo de aplicación práctica para las vigas de alma aligerada. Se trata de vigas secundarias de entrepiso de un garaje de parqueo. Son vigas I de acero ASTM-A-572 simplemente apoyadas, con un claro entre sus extremos de 12 metros y una separación entre vigas de 2,5 metros. La viga trabajara como una viga secundaria, que deberá soportar la carga proveniente de automóviles livianos, así como de la losa.

Primero se deberá diseñar el tipo de viga de alma llena (sección del perfil), que se va a utilizar para nuestra aplicación.

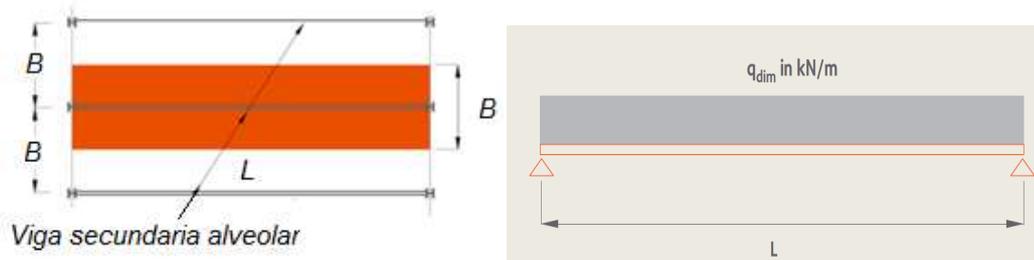


**Figura 3. 1** Descripción del modelo de aplicación

### 3.1.2 SELECCIÓN DEL TIPO DE PERFIL

#### 3.1.2.1 Datos del problema

Se trata de una viga simplemente apoyada, la cual se la podría imaginar como la viga de la figura 3.2.



**Figura 3. 2** Configuración del modelo

Donde:

$$L = 12 \text{ m} \quad B = 2,5 \text{ m}$$

- Material: Acero ASTM A-572 Grado 50

$$F_y = 345 \text{ Mpa} = 50 \text{ Ksi} ; F_u = 450 \text{ MPa} = 65 \text{ Ksi} ; E = 200 \text{ GPa}$$

#### 3.1.2.2 Determinación de las cargas

##### 3.1.2.2.1 Carga muerta (D)

La carga muerta consiste en el peso en sí de la viga más el peso de la losa sobre la viga. De la tabla 2.2, seleccionamos la carga que tendría una losa o contrapiso de hormigón ligero simple y de 10 cm de altura.

$$\text{Losa: } \left( \frac{0,16 \frac{KN}{m^2}}{cm} * 10cm \right) * B = 1,6 \frac{KN}{m^2} * 2,5m = 4 \quad \left[ \frac{KN}{m} \right]$$

$$\text{Suponemos peso de la viga: } 1,22 \quad \left[ \frac{KN}{m} \right]$$

$$D = (4 + 1,22) = 5,22 \quad \left[ \frac{KN}{m} \right]$$

### 3.1.2.2.2 Carga viva ( $L$ )

Como se trata de un garaje de parqueo para vehículos livianos, según la tabla 2.3, obtenemos el valor de la carga viva correspondiente.

$$\text{Vehículos livianos: } L = 2.0 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} * 2,5\text{m} = 5 \left[ \frac{\text{KN}}{\text{m}} \right]$$

### 3.1.2.2.3 Carga de diseño factorada: $q_d$

- Combinación LRFD

$$q_d = (1,2D + 1,6L) = \left( 1,2 * 5,22 \frac{\text{KN}}{\text{m}} + 1,6 * 5 \frac{\text{KN}}{\text{m}} \right) = 14,26 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

- ASD

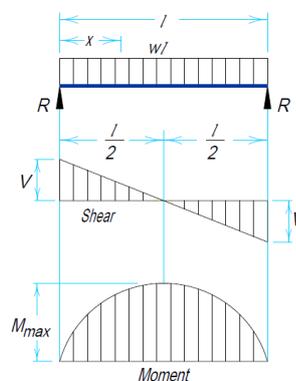
$$q = (1,0D + 1,0L) = \left( 1,0 * 5,22 \frac{\text{KN}}{\text{m}} + 1,0 * 5 \frac{\text{KN}}{\text{m}} \right) = 10,22 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

Para la carga de diseño debemos considerar además un cierto porcentaje por seguridad:

$$q_d = 10,22 + 30\%(q) \cong 14 \left[ \frac{\text{KN}}{\text{m}} \right]$$

### 3.1.2.3 Diseño de la viga I de alma llena por ASD

Obtenemos en primer lugar los diagramas de momento y corte para nuestra aplicación (figura 3.3), determinando luego sus valores máximos.



**Figura 3. 3** Diagramas de momento y corte de la viga

$$L = 12m = 39,37ft = 472,4 \text{ pulg}$$

$$w = 14 \left[ \frac{KN}{m} \right] V_{max} = \frac{w * l}{2} = 84 [KN] M_{max} = \frac{w * l^2}{8} = 252 [KN.m] = [2182,7 \text{ klb} - \text{pulg}]$$

Asumimos una resistencia a flexión  $F_b = 0,6F_y$

$$F_b = 0,6F_y = 0,6 * 50ksi = 30Ksi = 30 \frac{Klb}{pulg^2}$$

$$f_b = \frac{M_{max}}{S_x}$$

$$\text{Entonces: } S_x \geq \frac{M}{f_b} \geq \frac{2182,7 \text{ klb.pulg}}{30 \frac{klb}{pulg^2}} \geq 72,75 [pulg^3]$$

Seleccionamos un perfil W16x50:

$$r_T = 1,84 \text{ pulg} ; S_x = 81 \text{ pulg}^3; \frac{d}{A_f} = 3,65 \quad (\text{Manual de la AISC, pág. 1-18})$$

$$L_c = 6,3 \text{ ft} \quad ; \quad L_u = 9,1 \text{ ft} \quad (\text{Manual de la AISC, pág. 2-8})$$

Como  $L = 39,37ft > L_u = 9,1 \text{ ft}$ , Entonces:  $F_b < 0,6F_y$

$$\lambda_F = \frac{L}{r_T} = \frac{472,4 \text{ pulg}}{1,84 \text{ pulg}} = 256,74$$

Como la viga es simplemente apoyada, los momentos en los extremos son nulos:

$$M_1(0) = 0, \quad M_2(L) = 0$$

Entonces:  $C_b = 1,75$  (manual AISC, pág 5-22)

$$L_i = \sqrt{\frac{102 * 10^3 * C_b}{F_y}} = \sqrt{\frac{102 * 10^3 * 1,75}{50}} = 59,75$$

$$L_s = \sqrt{\frac{510 * 10^3 * C_b}{F_y}} = \sqrt{\frac{102 * 10^3 * 1,75}{50}} = 133,6$$

Como:  $\lambda_F > L_s$ , Entonces:

$$F_b = \frac{170 * 10^3 * C_b}{\lambda_F^2} = \frac{170 * 10^3 * 1,75}{256,74^2} = 4,51 \text{ [ksi]}$$

$$F_b = \frac{12 * 10^3 * C_b}{L * \frac{d}{A_f}} = \frac{12 * 10^3 * 1,75}{472,4 * 3,65} = 12,12 \text{ [ksi]}$$

Se escoge el menor:  $F_b = 4,51 \text{ [ksi]}$

Entonces:

$$f_b = \frac{M_{max}}{S_x} = \frac{2182,7 \text{ klb.pulg}}{81 \text{ pulg}^3} = 26,9 \text{ ksi} \gg F_b = 4,51 \text{ ksi} \rightarrow \text{Falla}$$

Se busca:  $\lambda_F < L_s$

$$\text{Es decir: } \frac{L}{r_T} < L_s, \quad r_T > \frac{L}{L_s} = \frac{472,4 \text{ in}}{133,6} = 3,54 \text{ pulg}$$

Seleccionamos: Perfil W30x173

$$r_T = 3,94 \text{ pulg} ; S_x = 539 \text{ pulg}^3 \quad (\text{Manual de la AISC, pág. 1-16})$$

$$\lambda_F = \frac{472,4 \text{ pulg}}{3,94 \text{ pulg}} = 120$$

$$L_s = 133,6$$

$\lambda_F < L_s$ , Entonces:

$$F_b = \left[ \frac{2}{3} - \frac{F_y * \lambda_F^2}{1530 * 10^3 * C_b} \right] F_y = \left[ \frac{2}{3} - \frac{50 * 120^2}{1530 * 10^3 * 1,75} \right] * 50 = 20 \text{ [ksi]}$$

Finalmente

$$f_b = \frac{M_{max}}{S_x} = \frac{2182,7 \text{ klb.pulg}}{539 \text{ pulg}^3} = 4,05 < F_b = 20 \text{ ksi} \rightarrow \text{OK}$$

Índice de trabajo  $I_b$ :

$$I_b = \frac{f_b}{F_b} = \frac{4,05}{20} = 0,2 \leq 1$$

Sin embargo el perfil W30x173 es muy pesado (173 *lb/ft*), y además el índice de trabajo es muy bajo, por lo que es necesario escoger otro perfil, tal como:

W30x99:  $r_T = 2,57 \text{ pulg}$  ;  $S_x = 269 \text{ pulg}^3$  ;  $\frac{d}{A_f} = 4,23$  (Manual AISC, pág. 1-14)

$$\lambda_F = \frac{L}{r_T} = \frac{472,4}{2,57} = 183,8 > L_s = 133,6$$

Entonces:

$$F_b = \frac{170 * 10^3 * C_b}{\lambda_F^2} = \frac{170 * 10^3 * 1,75}{183,8^2} = 8,8 \text{ [ksi]}$$

$$F_b = \frac{12 * 10^3 * C_b}{L * \frac{d}{A_f}} = \frac{12 * 10^3 * 1,75}{472,4 * 4,23} = 10,5 \text{ [ksi]}$$

Se escoge el menor:  $F_b = 8,8 \text{ [ksi]}$

Entonces:

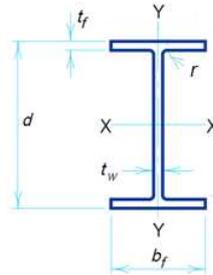
$$f_b = \frac{M_{max}}{S_x} = \frac{2182,7 \text{ klb.pulg}}{269 \text{ pulg}^3} = 8,1 \text{ ksi} < F_b = 8,8 \text{ ksi} \rightarrow OK$$

Índice de trabajo  $I_b$ :

$$I_b = \frac{f_b}{F_b} = \frac{8,1}{8,8} = 0,92 \leq 1$$

Por lo tanto se seleccionará un perfil W30x99

### 3.1.2.4 Datos perfil seleccionado



**Figura 3. 4** Perfil W30X99 seleccionado

#### 3.1.2.4.1 Dimensiones

$$d = 29,65 \text{ in} = 753 \text{ mm}$$

$$t_w = 0,52 \text{ in} = 13,2 \text{ mm}$$

$$t_f = 0,67 \text{ in} = 17 \text{ mm}$$

$$b_f = 10,45 \text{ in} = 265 \text{ mm}$$

$$r = 0,67 \text{ in} = 17 \text{ mm}$$

#### 3.1.2.4.2 Propiedades

$$G = 147 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} \text{ (Peso propio)}$$

$$I_x = 3990 \text{ in}^4$$

$$S_x = 269 \text{ in}^3$$

$$r_x = 11,7 \text{ in}$$

$$Z_x = 312 \text{ in}^3$$

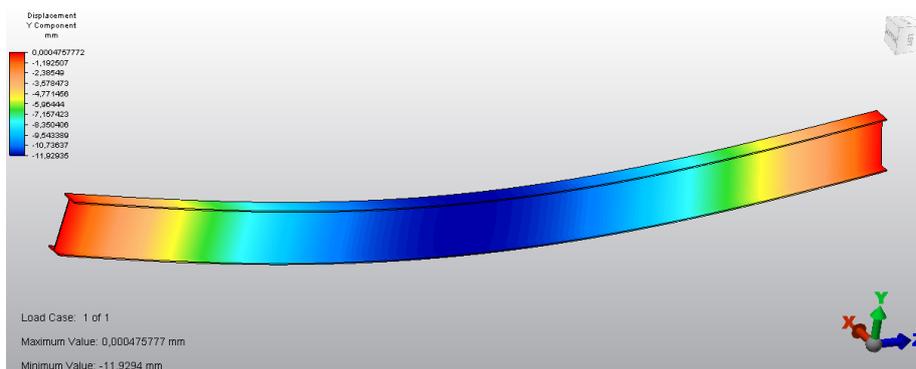
#### 3.1.2.4.3 Criterios para sección compacta:

$$\frac{b_f}{2t_f} = 7,8 \leq \frac{65}{\sqrt{F_y}} = 9,19 \quad \text{OK}$$

$$\frac{h}{t_w} = 51,9 \leq \frac{970}{\sqrt{F_y}} = 137,17 \quad \text{OK}$$

### 3.1.3 ANÁLISIS DE ESFUERZOS POR ELEMENTOS FINITOS

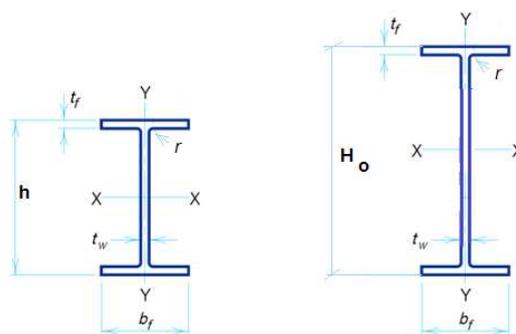
Al no existir actualmente métodos o criterios aceptables para calcular distribuciones de esfuerzos, deformaciones y análisis de estabilidad en vigas de alma aligerada, se recurrirá al uso de un programa que utilice el principio de los elementos finitos, tal como lo es Autodesk Algor Simulation 2011, ver figura 3.5.



**Figura 3. 5** Análisis de una viga por elementos finitos

#### 3.1.3.1 Geometría de la viga de alma aligerada

Primero se va a determinar el canto final de la viga de alma aligerada,  $H_o$ , (figura 3.6), y luego se determinara sus nuevos valores para las propiedades de la sección.



**Figura 3. 6** Canto de la viga de alma aligerada

$$H_o \approx 1,5h = 1,5 * 29,65 \text{ in} = 44,47 \text{ in} \approx 1100 \text{ [mm]}$$

Las siguientes fórmulas son aproximadas y las usaremos para el cálculo de las nuevas propiedades de la viga de alma aligerada en la línea central de una abertura. La altura de una abertura, sea de cualquier tipo se asume como  $d_0$ .

- Área de la sección transversal

$$A_0 = A - A_{perf} \quad (3.1)$$

- Momento de inercia

$$I_0 = I_x - \left( \frac{t_w d_0^3}{12} \right) \quad (3.2)$$

- Radio de giro

$$r_{xo} = \sqrt{\frac{I_s}{A_s}} \quad (3.3)$$

- Módulo elástico de la sección

$$S_o = \frac{I_s}{c} \quad (3.4)$$

$$c = \frac{H_o}{2} \quad (3.5)$$

El módulo elástico de la sección en una región de la viga de alma aligerada con alma llena, se calcula con siguiente fórmula.

$$S_s = \frac{I_s}{c} \quad (3.6)$$

$$I_s = (I_{alma} + Ad_y^2) + 2(I_{patin} + Ad_y^2) \quad (3.7)$$

El nuevo valor para dicho módulo es más grande que el módulo de la sección original de la viga, lo cual se puede interpretar como que la capacidad a flexión de la viga de alma aligerada se ha incrementado, pero solo para dichas regiones completas.

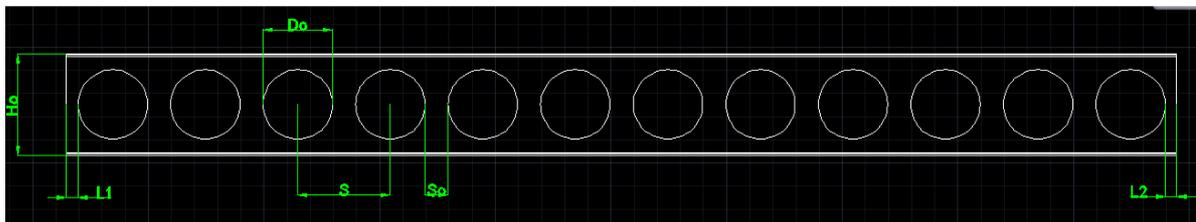
Nuevas propiedades de la viga de alma aligerada.

- $A_o = (29,1 - t_w d_o) = (29,1 - 0,52 * 29,53)in^2 = 13,75in^2 = 8871 [mm^2]$
- $I_o = 3990 - \left(\frac{0,52 * 29,53^3}{12}\right) = 2874,13[in^4] = 1486 * 10^3 [mm^2]$
- $r_{xo} = \sqrt{\frac{2874,13}{13,75}} = 14,45 [in]$
- $S_o = \frac{2874,13}{44,47/2} = 64,63 [in^3]$
- $I_s = \left(\frac{t_w(H_o - 2t_f)^3}{12} + 0\right) + 2 \left[\frac{b_f t_f^3}{12} + t_f b_f * \left(\frac{H_o}{2} - t_f\right)^2\right] = 9990 [in^4]$
- $S_s = \frac{9990}{44,47/2} = 449,2 [in^3]$

### 3.1.3.2 Distribución de los alveolos

A continuación se da a conocer las formas de los alveolos o aberturas a fabricarse y su distribución a lo largo de alma del perfil W30x99 mediante la codificación de ciertos parámetros. Los modelos sólidos para cada viga se los realizó mediante AutoCAD 3D y son exportados al programa ALGOR como archivos de extensión (.sat). Luego se comparará los resultados obtenidos del análisis para las distintas configuraciones con el fin elegir la mejor forma para los alveolos, tomando en cuenta criterios como distribución de esfuerzos, factores de seguridad, etc.

#### 3.1.3.2.1 Alveolos circulares



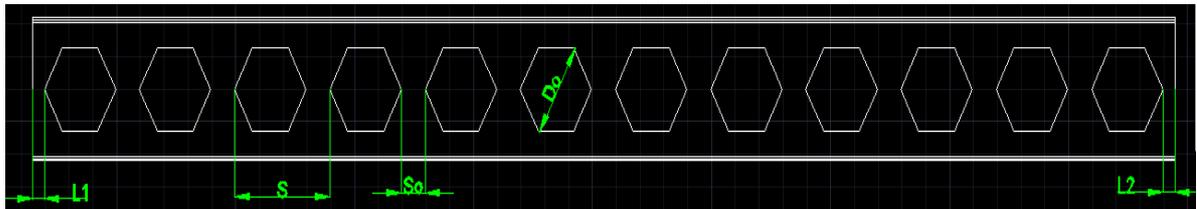
**Figura 3. 7** Distribución de alveolos circulares

$$H_0 \approx 1,4h \cong 1100 [mm]$$

(Altura de la viga)

$D_o \approx h \cong 750 [mm]$	(Diámetro de la abertura)
$S = 1,33D_o \cong 1000[mm]$	(Separación entre centros de las aberturas)
$s_o \cong 250 [mm]$	(Separación entre aberturas)
$L_1 = L_2 = 125 [mm]$	(Distancia libre a los extremos de la viga)

### 3.1.3.2.2 Alveolos hexagonales

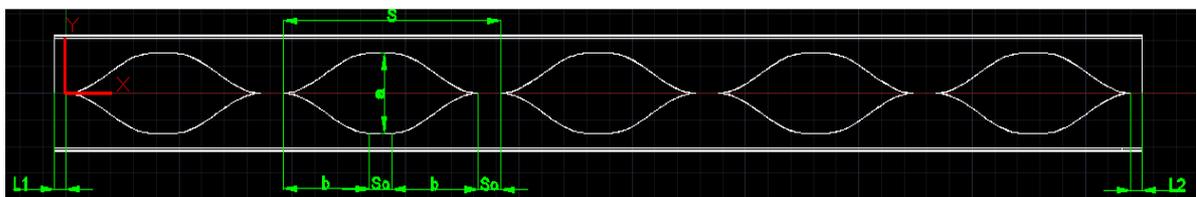


**Figura 3. 8** Distribución de alveolos hexagonales

Los alveolos hexagonales podrían estar contenidos en una circunferencia inscrita o circunscrita, pero para nuestro caso elegimos inscritos en un círculo, por el motivo de tener equivalentes dimensiones con la viga de alveolos circulares.

$D_o \approx h \cong 750 [mm]$	(Diámetro de la abertura)
$S = 1,33D_o \cong 1000[mm]$	(Separación entre centros de las aberturas)
$s_o \cong 250 [mm]$	(Separación entre aberturas)
$L_1 = L_2 = 125 [mm]$	(Distancia libre a los extremos de la viga)

### 3.1.3.2.3 Alveolos “Angelina”



**Figura 3. 9** Distribución de alveolos “Angelina”

$a = 750 [mm]$	(Altura de la abertura)
----------------	-------------------------

$$b = 950 \text{ [mm]}$$

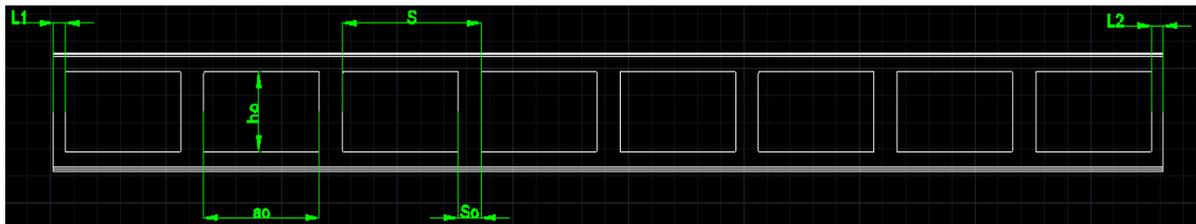
$$S = 1,33D_0 \cong 2400 \text{ [mm]} \quad (\text{Separación entre centros de las aberturas})$$

$$s_0 \cong 250 \text{ [mm]} \quad (\text{Separación entre aberturas})$$

$$L_1 = L_2 = 125 \text{ [mm]} \quad (\text{Distancia libre a los extremos de la viga})$$

$$y = 187,5 \sin \left[ \pi \left( \frac{x}{950} + 1,5 \right) \right] + 187,5 \quad \text{[mm]} \quad (\text{Ecuación del perfil angelina})$$

#### 3.1.3.2.4 Alveolos rectangulares



**Figura 3. 10** Distribución de alveolos rectangulares

$$h_0 = 750 \text{ [mm]} \quad (\text{Altura de la abertura})$$

$$a_0 = 1500 \text{ [mm]} \quad (\text{Longitud de la abertura})$$

$$S = 1,33D_0 \cong 1750 \text{ [mm]} \quad (\text{Separación entre centros de las aberturas})$$

$$s_0 \cong 250 \text{ [mm]} \quad (\text{Separación entre aberturas})$$

$$L_1 = L_2 = 1255 \text{ [mm]} \quad (\text{Distancia libre a los extremos de la viga})$$

$$r = 17 \text{ [mm]} \quad (\text{Radio de acuerdo})$$

### 3.1.3.3 Condiciones del problema

Las condiciones de problema tienen que ver con la asignación del material, condiciones de contorno, tipo de mallado, valores de carga, tipo de unidades y sistema de coordenadas en el software ALGOR. Los tipos de análisis que se va a realizar en ALGOR son dos:

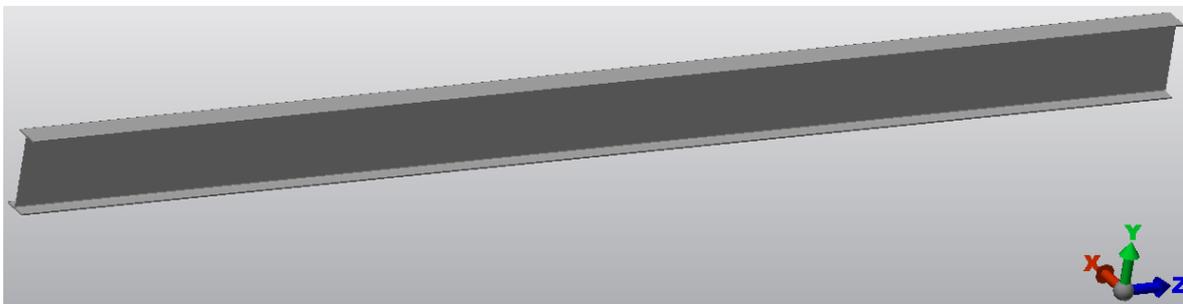
- Esfuerzos Estáticos con Modelos de materiales lineales (Static Stress with Linear Material Models)
- Carga Crítica de Pandeo (Buckling Critical Load)

#### 3.1.3.3.1 Unidades

Las unidades a utilizarse son las dadas por el sistema métrico, donde la longitud esta en metros (m), la temperatura en grados centígrados (°C) y la fuerza en Newton (N).

#### 3.1.3.3.2 Sistema de coordenadas

El sistema de coordenadas es el cartesiano en 3 dimensiones x, y,z, cuya disposición con la viga es la siguiente.



**Figura 3. 11** Sistema de coordenadas en Algor

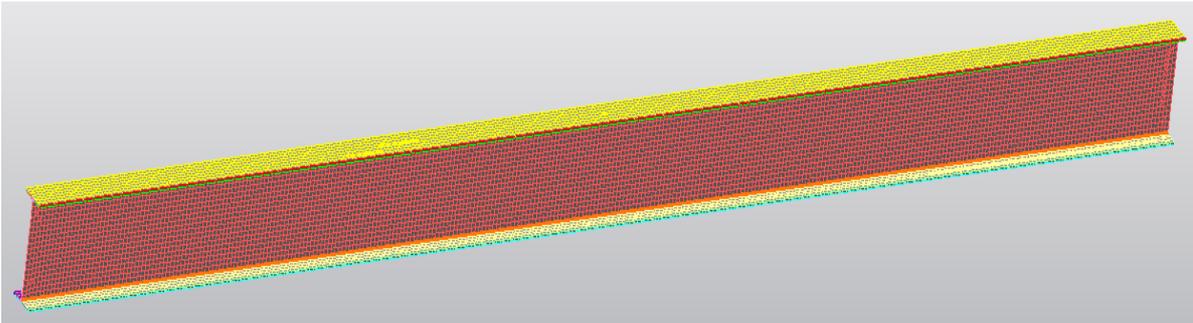
#### 3.1.3.3.3 Material

El material a emplearse es un acero de alta resistencia y baja aleación ASTM A-572, cuyas propiedades mecánicas son las siguientes:

- Resistencia:  $S_y = 345 \text{ MPa}$  ,  $S_{ut} = 450 \text{ MPa}$ ,
- Modulo de elasticidad:  $E = 200000 \text{ Mpa}$

#### 3.1.3.3.4 Tipo de mallado

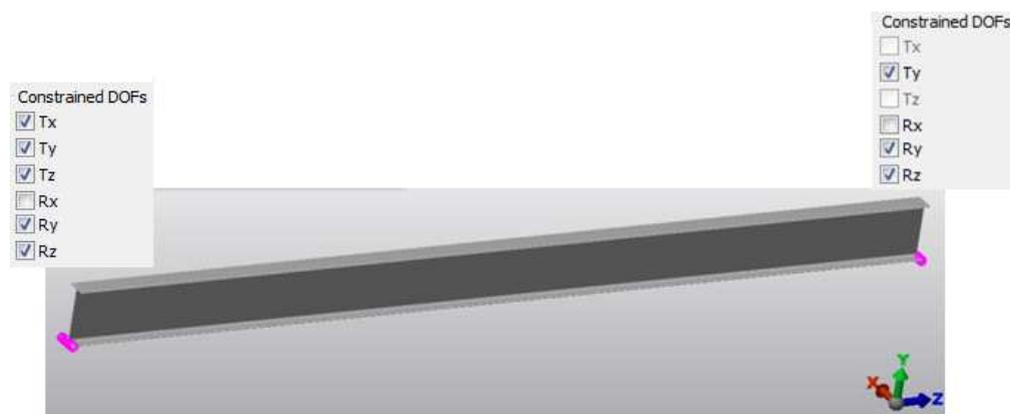
La malla consiste de elementos sólidos tipo brick y tetraedros, cuyo tamaño se irá variando para encontrar la convergencia de la solución.



**Figura 3. 12** Modelo de mallado

#### 3.1.3.3.5 Condiciones de contorno

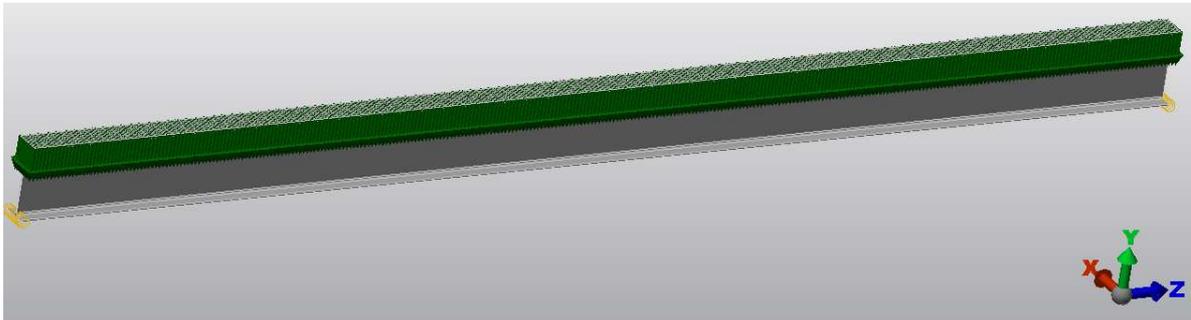
Como se trata de una viga simplemente apoyada, se debe hacer la analogía con las restricciones de pasador y de rodillo en cada extremo de la viga. Estas restricciones se las fijara sobre una línea, tal como se ve en la figura 3.13.



**Figura 3. 13** Analogía restricciones viga simplemente apoyada

#### 3.1.3.3.6 Carga aplicada

La carga a aplicarse tiene un valor  $Q$ , y se la aplica sobre la superficie del patín de compresión de la viga, tal como se muestra en la Figura 3.14.



**Figura 3. 14** Asignación de la carga

$$q = 14 \frac{KN}{m} * 12m = 168 [KN]$$

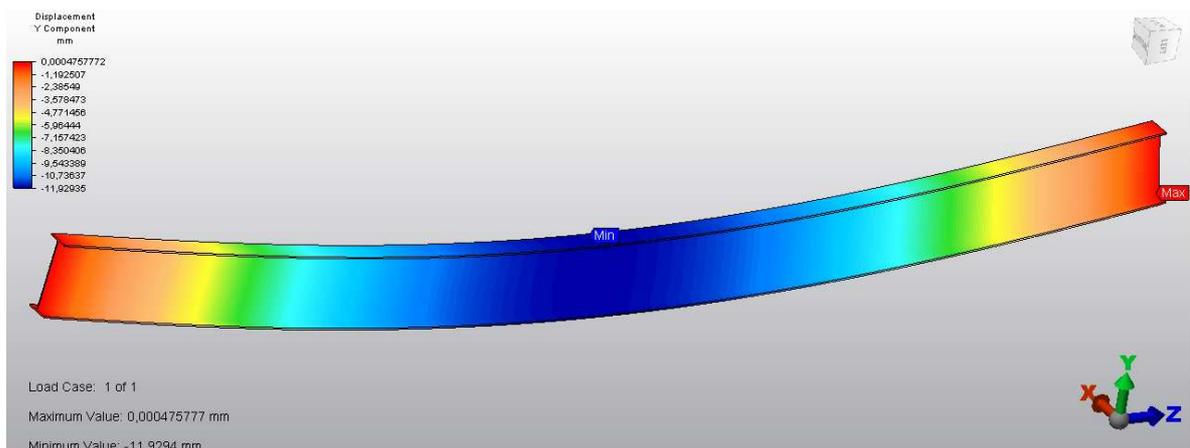
## 3.2 RESULTADOS OBTENIDOS

### 3.2.1 ESFUERZOS ESTÁTICOS CON MATERIALES LINEALES

Dependiendo del tamaño de la malla que se defina para cada simulación se tendrán distintos resultados. A continuación se presentan algunos resultados de la simulación con un tamaño de malla para el cual la solución ha convergido.

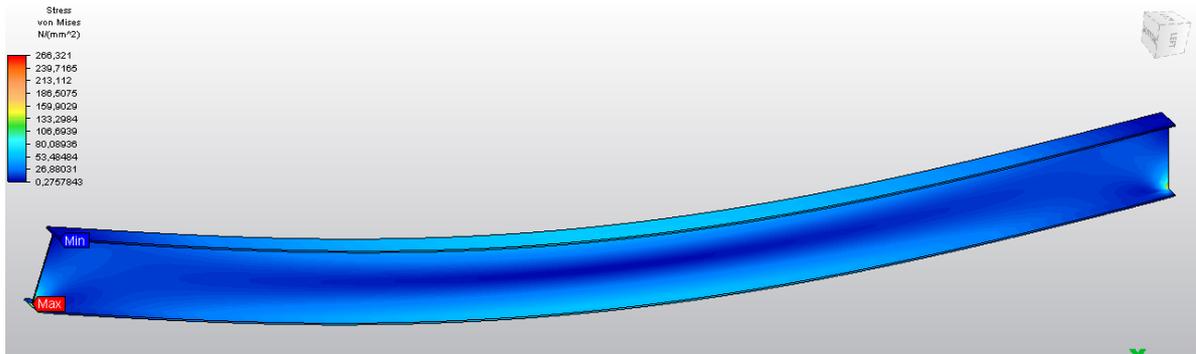
#### 3.2.1.1 Perfil W30X99 alma llena

##### 3.2.1.1.1 Deflexiones $\Delta Y$



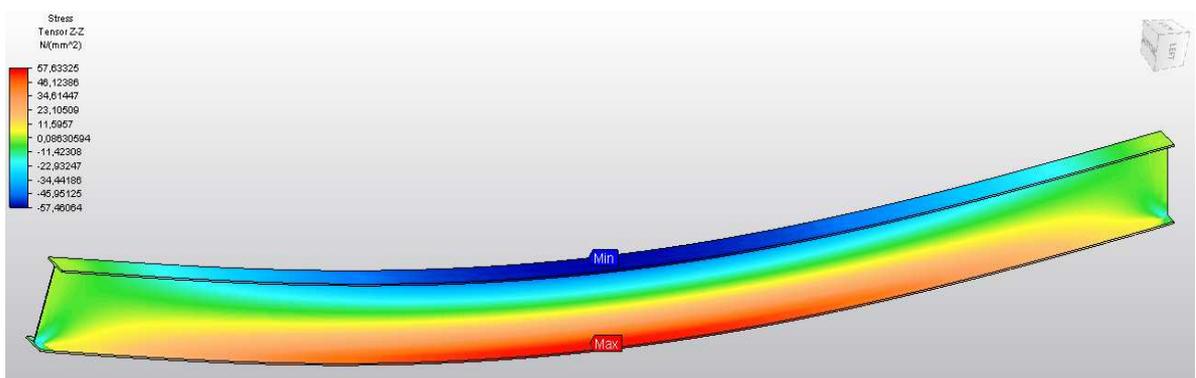
**Figura 3. 15** Valores de deflexiones perfil W30X99

### 3.2.1.1.2 Esfuerzos $\sigma_{VM}$



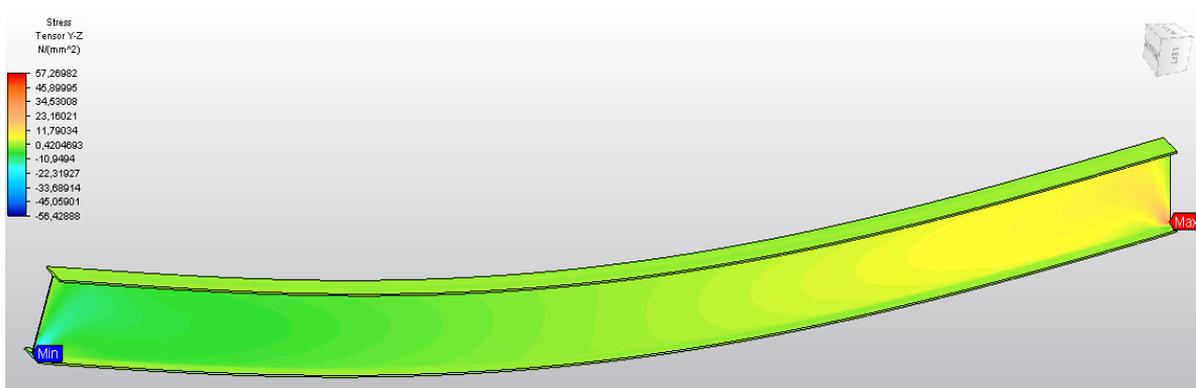
**Figura 3. 16** Valores de esfuerzos de Von Misses perfil W30X99

### 3.2.1.1.3 Esfuerzos $T_{zz}$



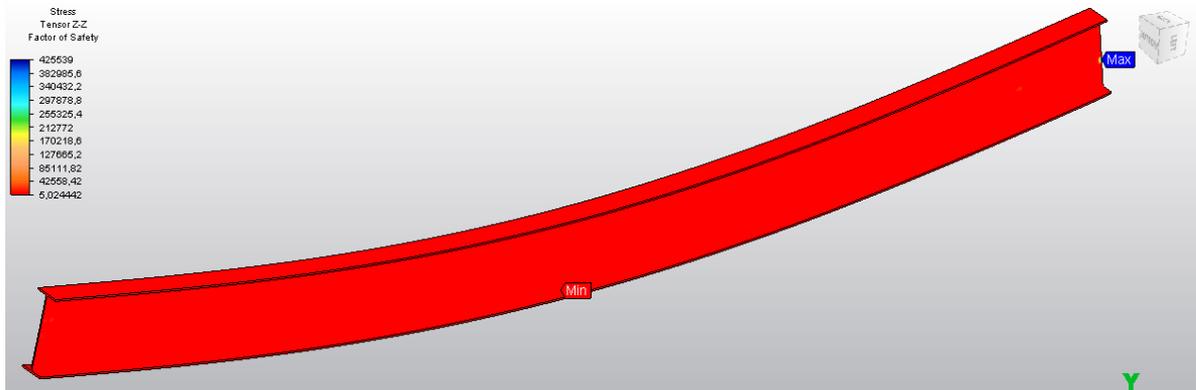
**Figura 3. 17** Valores de esfuerzos normales Tzz perfil W30X99

### 3.2.1.1.4 Esfuerzos cortantes $T_{yz}$



**Figura 3. 18** Valores de esfuerzos cortantes Tyz perfil W30X99

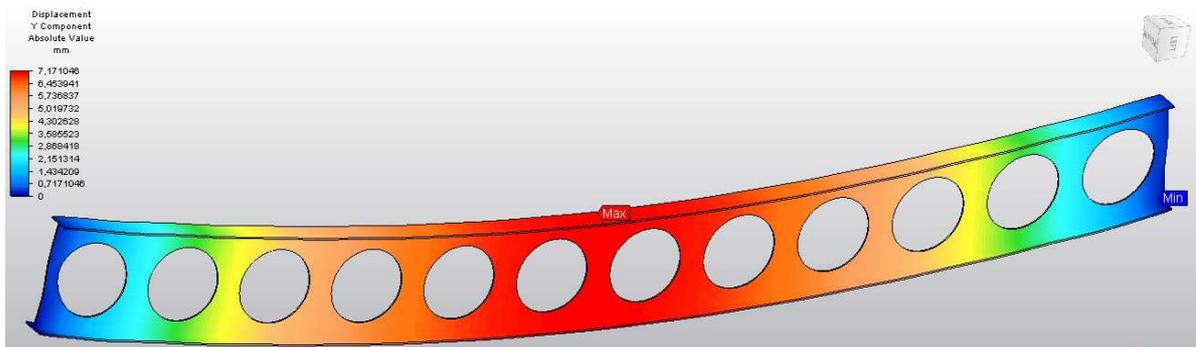
### 3.2.1.1.5 Factores de seguridad $T_{zz}$



**Figura 3. 19** Valores de factores de seguridad  $T_{zz}$  perfil W30X99

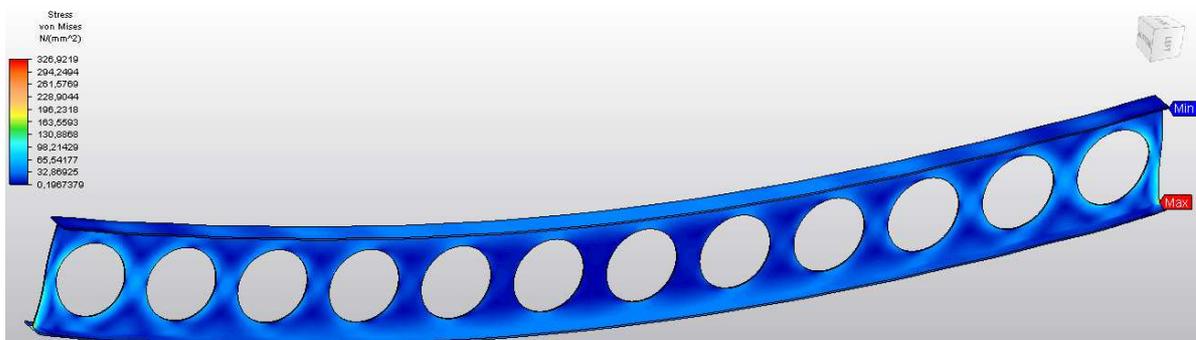
### 3.2.1.2 Alveolos circulares

#### 3.2.1.2.1 Deflexiones $\Delta Y$



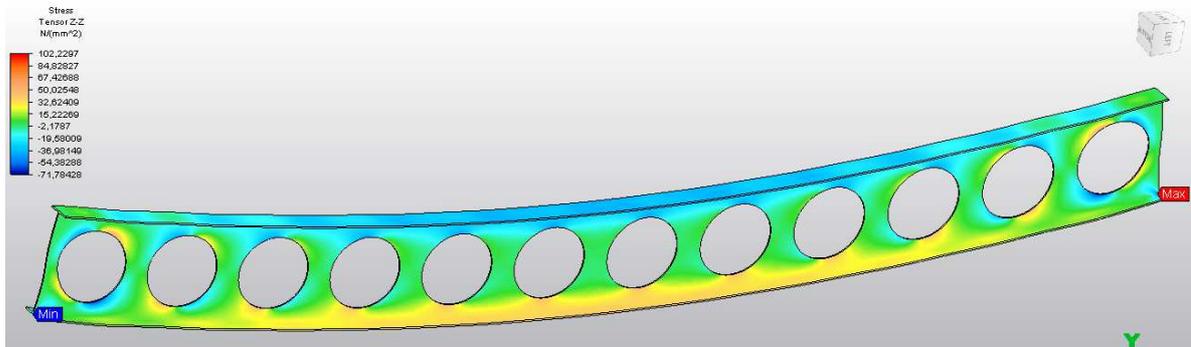
**Figura 3. 20** Valores de deflexiones alveolos circulares

#### 3.2.1.2.2 Esfuerzos $\sigma_{VM}$



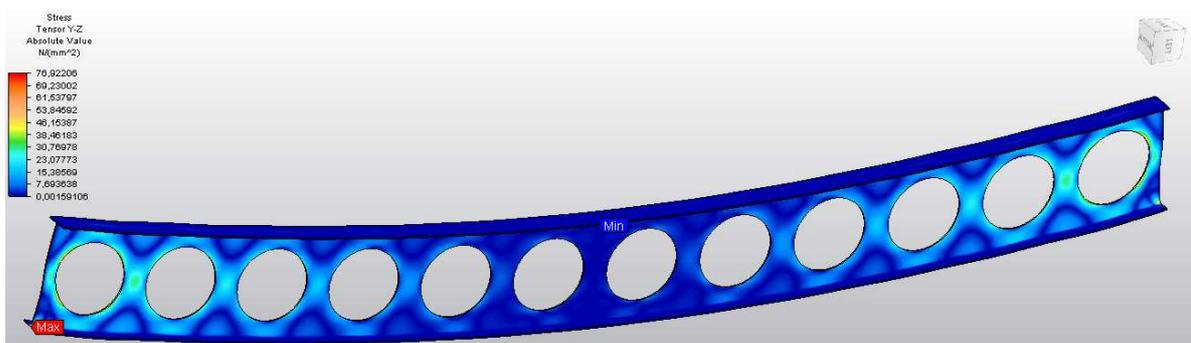
**Figura 3. 21** Valores de esfuerzos de Von Misses alveolos circulares

### 3.2.1.2.3 Esfuerzos $T_{zz}$



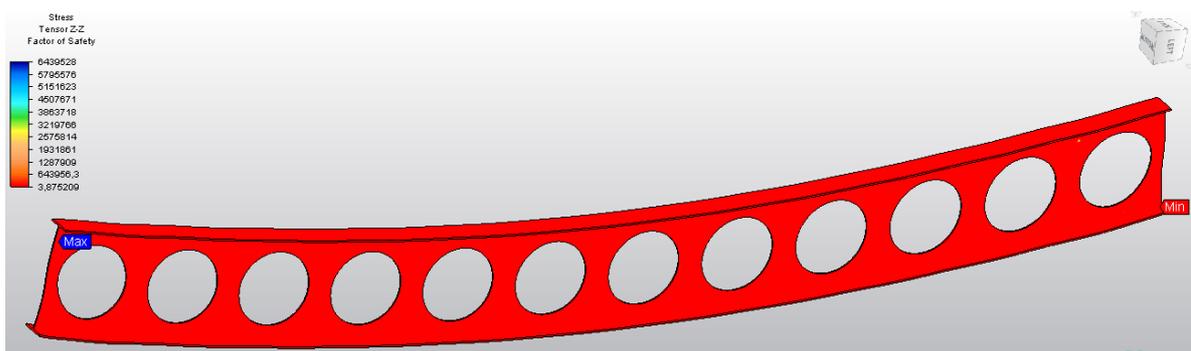
**Figura 3. 22** Valores de esfuerzos normales  $T_{zz}$  alveolos circulares

### 3.2.1.2.4 Esfuerzos cortantes $T_{yz}$



**Figura 3. 23** Valores de esfuerzos cortantes  $T_{yz}$  alveolos circulares

### 3.2.1.2.5 Factores de seguridad $T_{zz}$



**Figura 3. 24** Valores de factores de seguridad  $T_{zz}$  alveolos circulares

### 3.2.2 CARGA CRÍTICA DE PANDEO

#### 3.2.2.1 Perfil W30X99

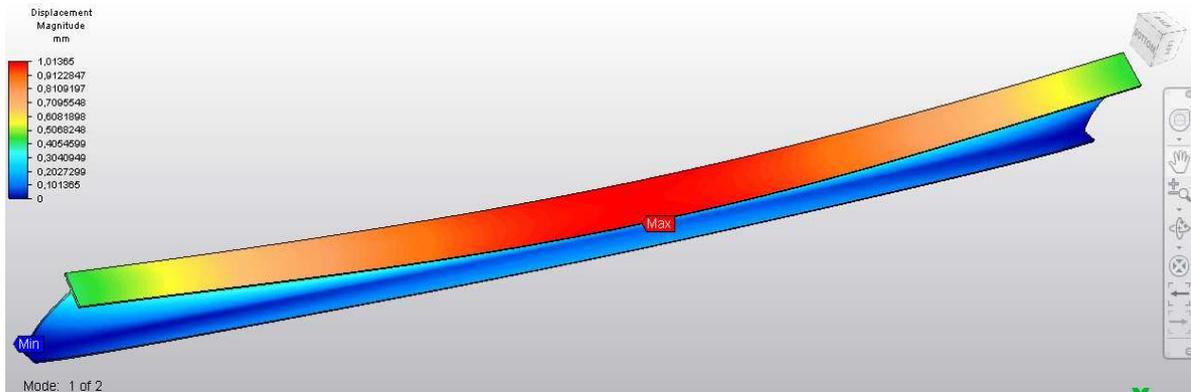


Figura 3. 25 Modos de pandeo viga W30X99

#### 3.2.2.2 Alveolos circulares

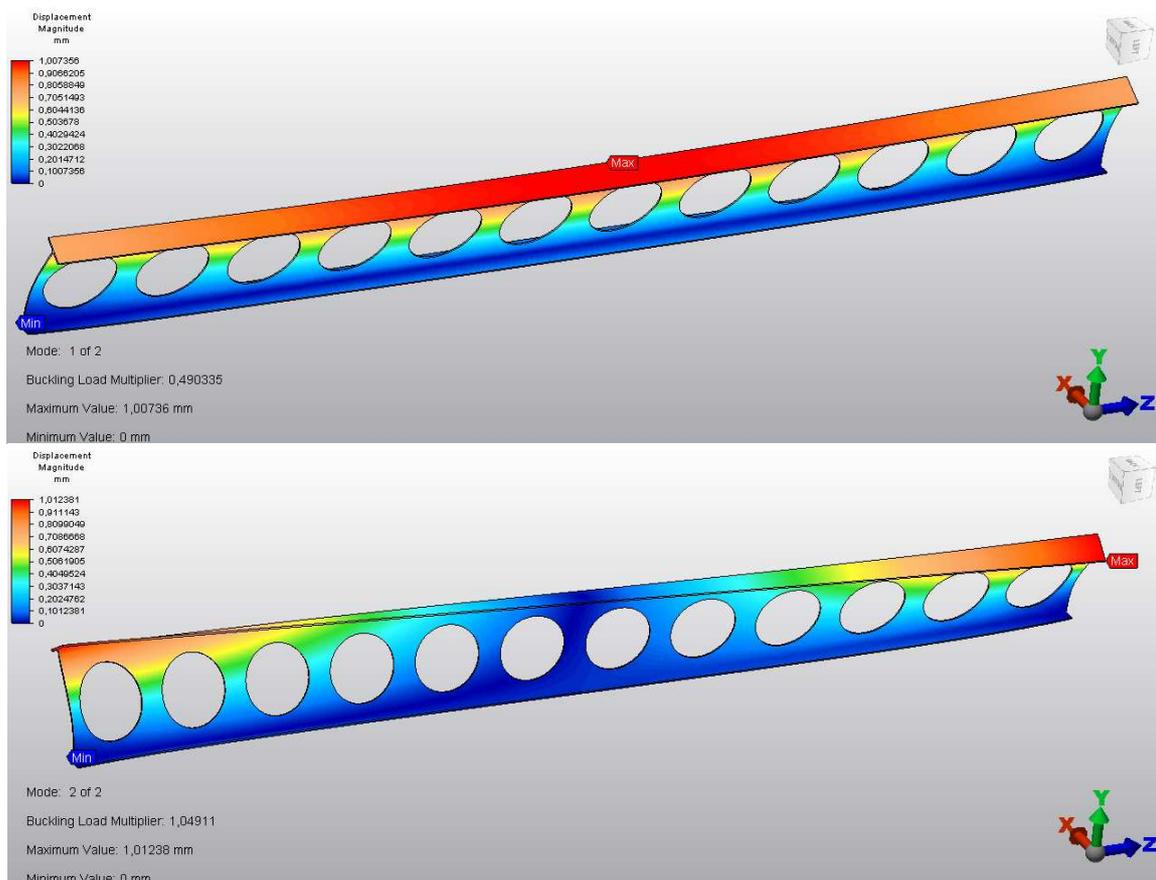


Figura 3. 26 Modos de pandeo viga alveolos circulares

Los resultados de las demás simulaciones de las configuraciones de los alveolos, tanto del análisis lineal de esfuerzos estáticos como del análisis de pandeo se los presentan en el anexo A de este proyecto.

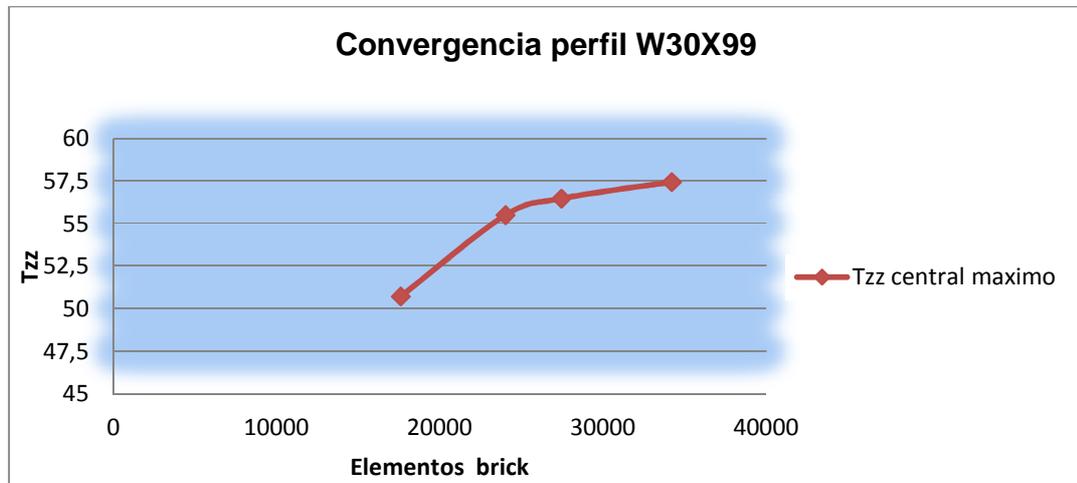
### 3.2.2.3 Convergencia de resultados

En las siguientes tablas se muestra la convergencia del factor de seguridad Tzz para cada viga, para una ubicación central de la viga, ya que para esta posición son mayores los esfuerzos de flexión. Dichos resultados se obtiene refinando la malla del modelo, es decir aumentando el número de elementos brick creados en la malla por cada simulación.

#### 3.2.2.3.1 Perfil W 30X99

**Tabla 3. 1** Convergencia de resultados perfil W30X99

TIPO DE ANALISIS	REFINAMIENTO DE LA MALLA				
		W30X99			
ESFUERZOS ESTÁTICOS CON MODELOS DE MATERIALES LINEALES	Tamaño de la malla	30%	20%	10%	8%
	Elementos superficie creados	3845	7924	25589	38316
	Elementos sólidos creados	17616	24041	34223	39267
	Esfuerzo VM máx. [Mpa]	122,7	141,23	266,27	288,54
	F.S. Von Misses mín.	2,83	2,466	1,33	1,218
	Y máx. [mm]	9,29	11,534	11,92	11,93
	Tyz máx. [Mpa]	21,74	26,23	57,13	64,49
	Tzz mitad de la viga máx. [Mpa]	50,73	55,51	56,85	57,11
	F.S. Tzz mitad de la viga	6,8	6,24	6,05	6,05
CARGA CRÍTICA DE PANDEO	Multiplicador 1	69,796	14,5	1,447	0,931
	Multiplicador 2	229,94	44,5	3,665	2,225

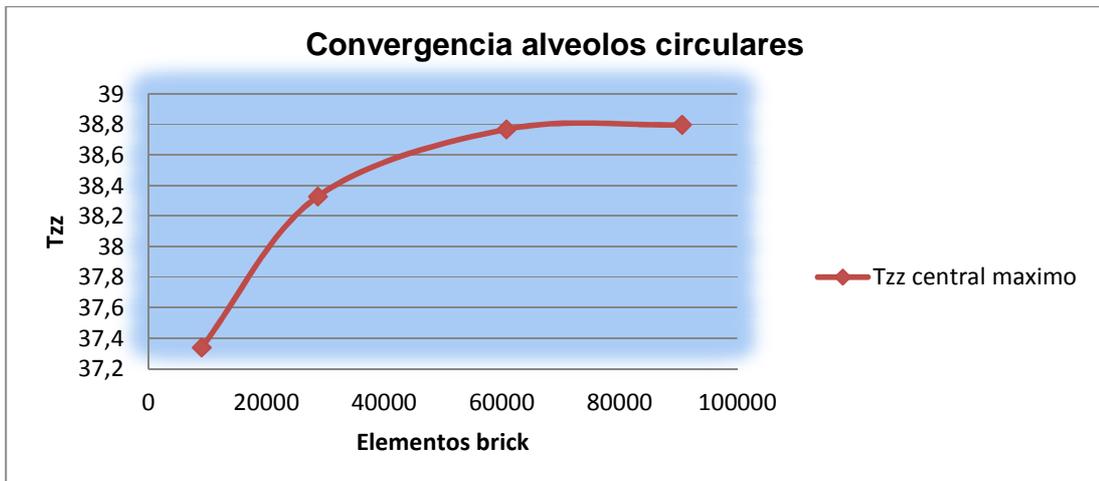


**Figura 3. 27** Convergencia esfuerzo Tzz central perfil W30x99

### 3.2.2.3.2 Alveolos circulares

**Tabla 3. 2** Convergencia de resultados alveolos circulares

TIPO DE ANÁLISIS	REFINAMIENTO DE LA MALLA				
		Círculos			
ESFUERZOS ESTÁTICOS CON MODELOS DE MATERIALES LINEALES	Tamaño de la malla	30%	15%	10%	8%
	Elementos superficie creados	9022	28765	60799	90637
	Elementos sólidos creados	25355	39201	60359	83122
	Esfuerzo VM máx. [Mpa]	151,08	239,63	270,02	326,92
	F.S. Von Misses mín.	2,30	1,45	1,287	1,065
	Y máx. [mm]	6,788	7,123	7,155	7,172
	Tyz máx. [Mpa]	46,34	52,02	68,63	76,92
	Tzz mitad de la viga máx. [Mpa]	37,34	38,33	38,77	38,80
	F.S. Tzz mitad de la viga	9,27	9	8,895	8,89
CARGA CRÍTICA DE PANDEO	Multiplicador 1	2,451	0,688	0,55	0,49
	Multiplicador 2	9,696	1,85	1,205	1,049

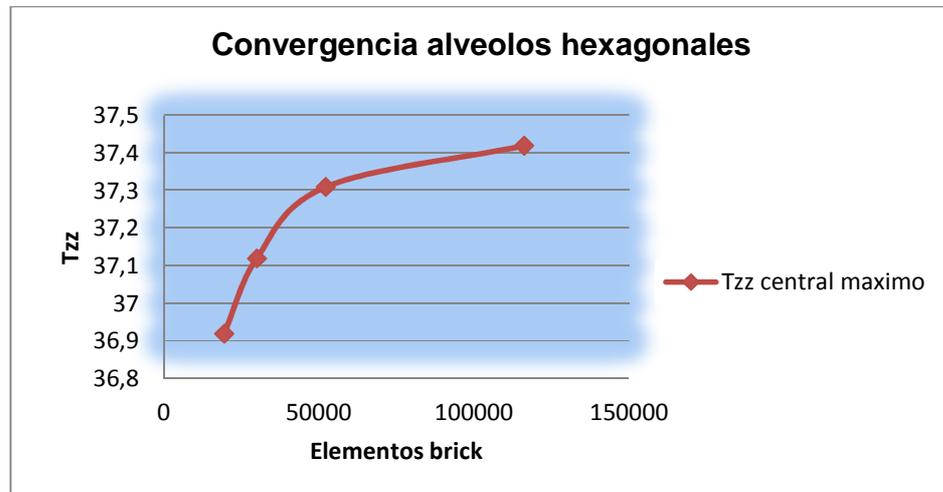


**Figura 3. 28** Convergencia esfuerzo Tzz central alveolos circulares

### 3.2.2.3.3 Alveolos hexagonales

**Tabla 3. 3** Convergencia de resultados alveolos hexagonales

TIPO DE ANÁLISIS	REFINAMIENTO DE LA MALLA				
		Hexágonos			
ESFUERZOS ESTÁTICOS CON MODELOS DE MATERIALES LINEALES	Tamaño de la malla	50%	40%	30%	20%
	Elementos superficie creados	19550	30056	52244	116198
	Elementos sólidos creados	38283	34971	39990	99395
	Esfuerzo VM. Máx. [Mpa]	222,38	247,45	302,29	342,86
	F.S. Von Misses mín.	1,6	1,409	1,143	1
	Y máx. [mm]	6,33	6,41	6,437	6,45
	Tyz máx. [Mpa]	-53,7	-46,42	-56,97	-64,74
	Tzz mitad de la viga máx. [Mpa]	36,92	37,12	37,31	37,42
	F.S Tzz mitad de la viga	9,2	9,23	7,76	9,23
CARGA CRÍTICA DE PANDEO	Multiplicador 1	1,495	0,799	0,564	0,526
	Multiplicador 2	3,63	1,808	1,007	1,124

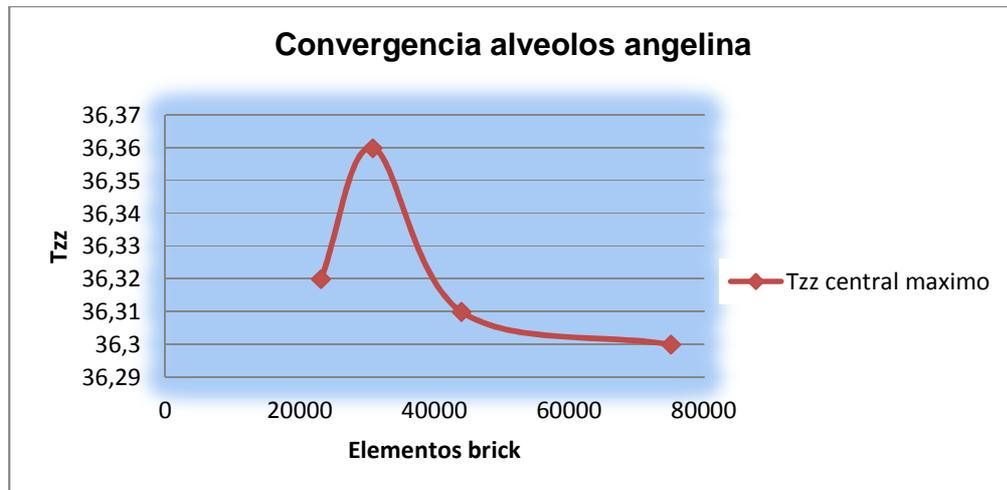


**Figura 3. 29** Convergencia esfuerzo Tzz central alveolos hexagonales

#### 3.2.2.3.4 Alveolos angelina

**Tabla 3. 4** Convergencia de resultados alveolos angelina

TIPO DE ANÁLISIS	REFINAMIENTO DE LA MALLA				
	Angelina				
ESFUERZOS ESTÁTICOS CON MODELOS DE MATERIALES LINEALES	Tamaño de la malla	30%	25%	20%	15%
	Elementos superficie creados	23120	30817	43986	75121
	Elementos sólidos creados	60180	57077	55769	95227
	Esfuerzo VM. máx. [Mpa]	201,79	270	245,16	303,95
	F.S. Von Misses mín.	1,729	1,312	1,419	1,136
	Y máx. [mm]	7,176	7,26	7,307	7,321
	Tyz máx. [Mpa]	42,26	56,88	51,89	72,88
	Tzz mitad de la viga máx. [Mpa]	36,32	36,36	36,31	36,30
	F.S. Tzz mitad de la viga	9,5	9,47	9,5	9,49
CARGA CRÍTICA DE PANDEO	Multiplicador 1	1,888	1,116	0,722	0,573
	Multiplicador 2	5,099	2,937	1,609	1,337

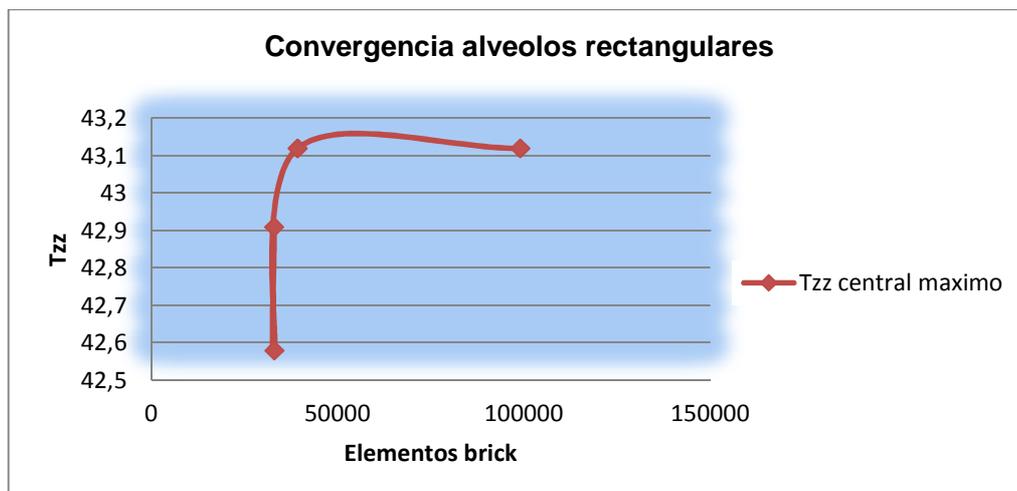


**Figura 3. 30** Convergencia esfuerzo Tzz central alveolos angelina

### 3.2.2.3.5 Alveolos rectangulares

**Tabla 3. 5** Convergencia de resultados alveolos rectangulares

TIPO DE ANÁLISIS	REFINAMIENTO DE LA MALLA				
	Rectángulos				
ESFUERZOS ESTÁTICOS CON MODELOS DE MATERIALES LINEALES	Tamaño de la malla	50%	40%	30%	20%
	Elementos superficie creados	17806	26628	43621	90178
	Elementos sólidos creados	33009	33042	39284	99023
	Esfuerzo VM. Máx. [Mpa]	577,69	766,46	808,86	880,94
	F.S. Von Misses mínimo	0,606	0,45	0,426	0,391
	Y máx. [mm]	20	20,53	20,73	20,85
	Tyz máx. [Mpa]	193,14	297,02	314,6	336,23
	Tzz mitad de la viga máx. [Mpa]	42,91	42,58	43,12	43,12
	F.S. Tzz mitad de la viga	8,04	8,1	7,99	8
CARGA CRÍTICA DE PANDEO	Multiplicador 1	0,623	0,509	0,354	0,391
	Multiplicador 2	1,413	1,063	0,741	0,808



**Figura 3. 31** Convergencia esfuerzo Tzz central alveolos rectangulares

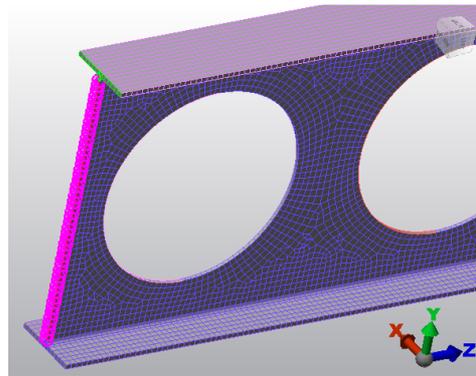
### 3.2.2.4 Elección de la mejor configuración

#### 3.2.2.4.1 Criterio falla por resistencia

En base a los resultados obtenidos, para las distintas formas de los alveolos se llega a la conclusión de que bajo similares configuraciones geométricas de carga y condiciones de borde, para todas las aberturas, la mejor elección de los alveolos a fabricarse en el alma de la viga, son del tipo ANGELINA, debido principalmente a que presenta el mayor Factor de seguridad  $T_{zz}$  mínimo de aproximadamente 9,5 lo cual se traduce en un diseño seguro a flexión de la viga para nuestra aplicación, aparte de presentar una mejor forma estética.

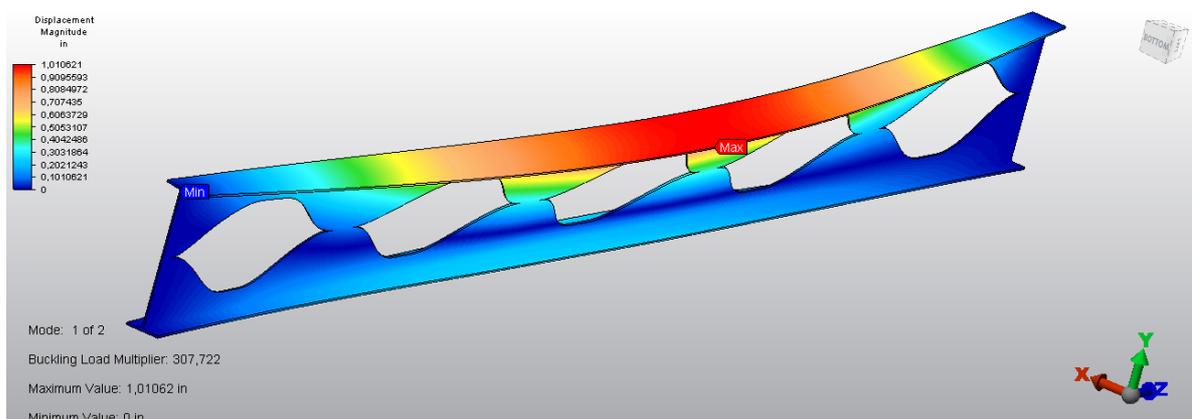
#### 3.2.2.4.2 Criterio falla por estabilidad

Tomando en cuenta los resultados del efecto del pandeo global que presentan las vigas de alma aligerada analizadas, se observa que ninguna configuración cumple con los requerimientos de estabilidad, esto debido principalmente a que las condiciones de borde de las vigas no son las apropiadas. Una buena aproximación de las condiciones de borde de la viga que den un mejor desempeño de la viga para propósitos de estabilidad y que se asemeje más a la realidad de la unión viga-columna sería la misma condición de viga simplemente apoyada pero con las restricciones sobre las superficies laterales del alma de la viga, ver figura 3.32.



**Figura 3. 32** Nuevas condiciones de borde para estabilidad

La figura 3.33 muestran los nuevos modos de pandeo para la viga con alveolos angelina con esta nueva condición de borde. Los multiplicadores de carga crítica son mayores que 1 (307.722), lo cual significa que no existirán fenómenos de inestabilidad local o global.

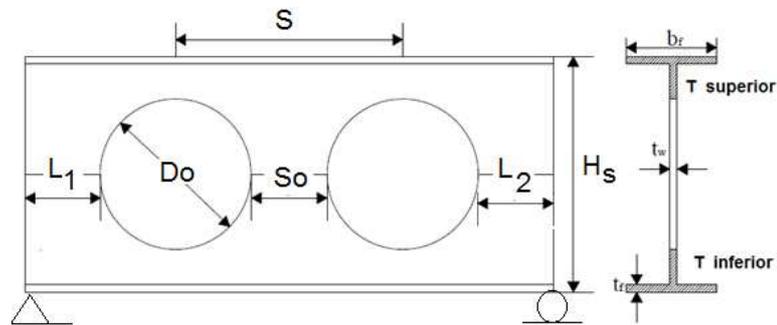


**Figura 3. 33** Nuevos modos de pandeo viga angelina

### 3.2.3 CONFIGURACIÓN CIRCULAR MEJORADA

En este caso, para poder utilizar una viga con alveolos circulares, como viga de alma aligerada en nuestra aplicación, vamos a encontrar la mejor disposición y tamaño de las aberturas circulares en la viga, con el fin de incrementar el valor de factor de seguridad. Esto se hace relacionando ciertos parámetros que definen el diseño de este tipo de vigas.

### 3.2.3.1 Parámetros en una viga celular



**Figura 3. 34** Parámetros de una viga con alveolos circulares

### 3.2.3.2 Relación Hs/Do

En la tabla 3.6 se dan varios valores para la relación entre la altura total de la viga Hs, y el diámetro, Do, de las aberturas.

**Tabla 3. 6** Relación Hs/Do para viga con alveolos circulares

VIGA CON ALVEOLOS CIRCULARES (Hs=1100mm, S=1000mm)						
	Relación (Hs/Do)					
	1,157	1,294	1,467	1,692	2	2,445
<b>RESULTADOS</b>						
L1 = L2 [mm]	725	75	125	275	125	175
Elementos brick	30607	46319	8%(90637)	60341	65704	67383
Esfuerzo VM. máx. [Mpa]	520,39	262,47	331,6	303,68	278,77	338,33
Y máx. [mm]	17,318	8,336	7,172	5,875	5,493	5,287
Tzz máx. [Mpa]	226,1	85,85	112,1	77,85	65,23	100,52
Tyz máx. [Mpa]	106,35	50,83	62,77	62,74	53,21	82,33
F.S. VM. Min.	0,663	1,336	1,05	1,142	1,256	1,019

### 3.2.3.3 Relación So/Do

**Tabla 3. 7** Relación So/Do para viga con alveolos circulares

<b>VIGA CON ALVEOLOS CIRCULARES (Hs=1100mm, So=250mm)</b>						
	<b>Relación (So/Do)</b>					
<b>RESULTADOS</b>	0,263	0,294	0,334	0,384	0,454	0,556
L1 = L2 [mm]	525	575	125	675	725	775
Elementos brick	40143	42038	8%(90637)	53651	84851	132911
Esfuerzo VM. máx. [Mpa]	258,16	312,14	331,6	327,93	332,03	397
Y máx. [mm]	9,47	8,77	7,172	6,244	5,962	5,6
Tzz máx. [Mpa]	158,66	117,47	112,1	83,06	111,41	124,55
Tyz máx. [Mpa]	63,21	82,575	62,77	70,62	64,31	70,87
F.S. VM. Min.	1,347	1,106	1,05	1,052	1,048	0,872

### 3.2.3.4 Configuración seleccionada

El criterio que a seguir para poder seleccionar la mejor configuración de viga con aberturas circulares es que debe tener el mayor factor de seguridad de Von Misses y también debe tener el mayor número de elementos brick creados en la simulación. De esta forma tenemos que las posibles configuraciones son:

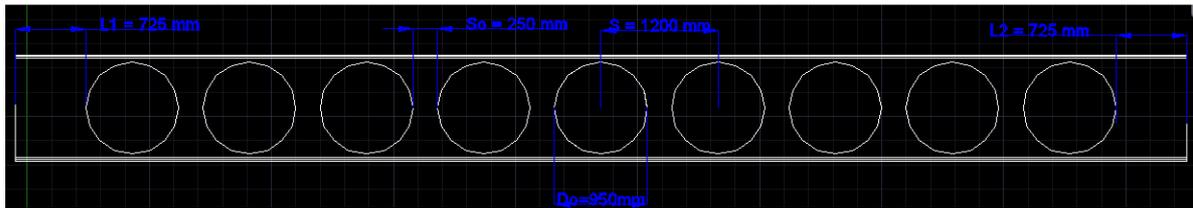
#### 3.2.3.4.1 Opción 1: Relación Hs/Do

$$\frac{H_s}{D_0} = 2$$

#### 3.2.3.4.2 Opción 2: Relación So/Do

$$\frac{S_0}{D_0} = 0,263$$

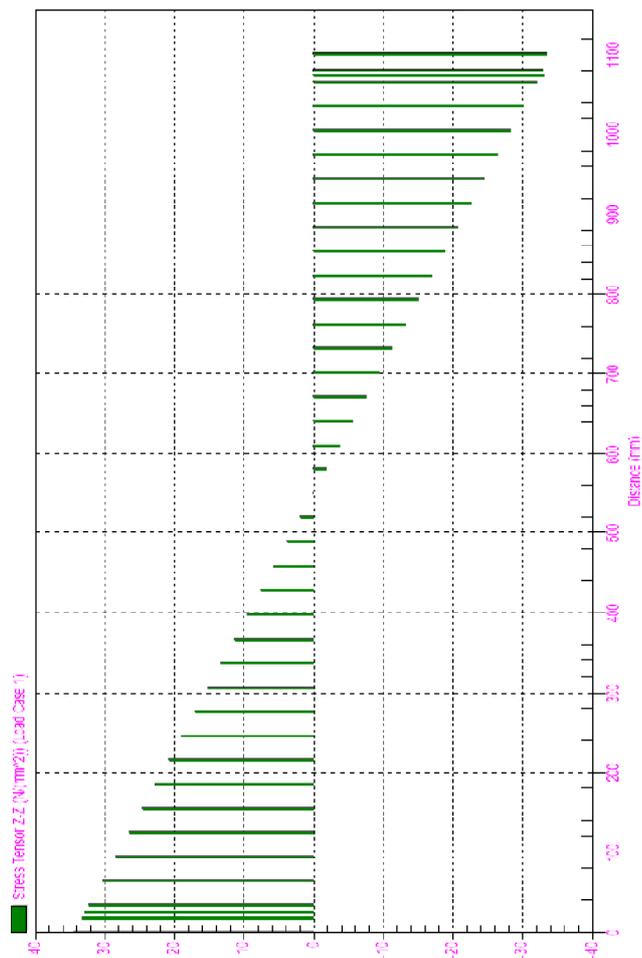
En la figura 3.35 se muestra la configuración que tendría la opción 2, si deseáramos usarla para nuestro ejemplo.



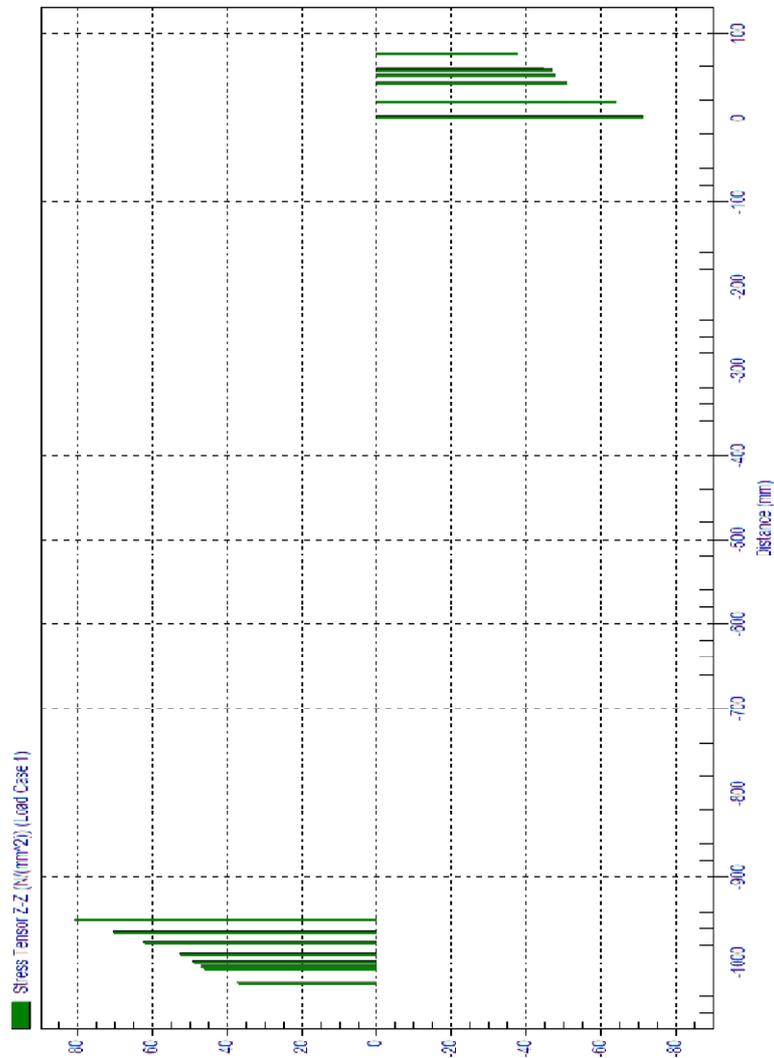
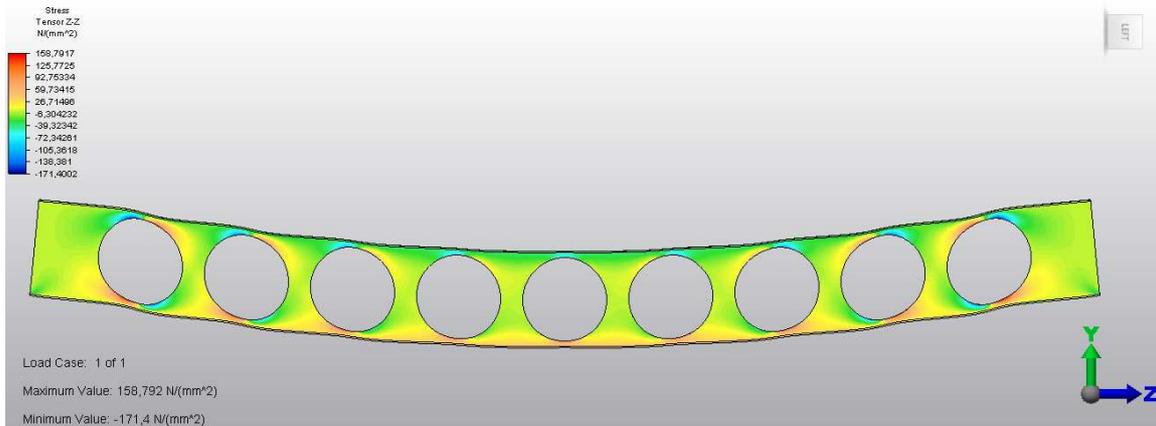
**Figura 3. 35** Geometría viga con alveolos circulares mejorada

### 3.2.4 CONCENTRACIÓN DE TENSIONES

A continuación se procede hacer una comparación entre distribuciones de esfuerzos de flexión  $T_{zz}$  de la viga W30x99 de canto aumentado ( $H=1100\text{mm}$ ) y la viga con alveolos circulares mejorada (figura 3.36) a través de la línea central de la abertura media.



**Figura 3. 36** Distribución esfuerzos de flexión  $T_{zz}$  perfil W30x99 (Peralte 1100 mm)



**Figura 3. 37** Distribución esfuerzos de flexión perfil W30X99 con alveolos circulares (Peralte 1100 mm)

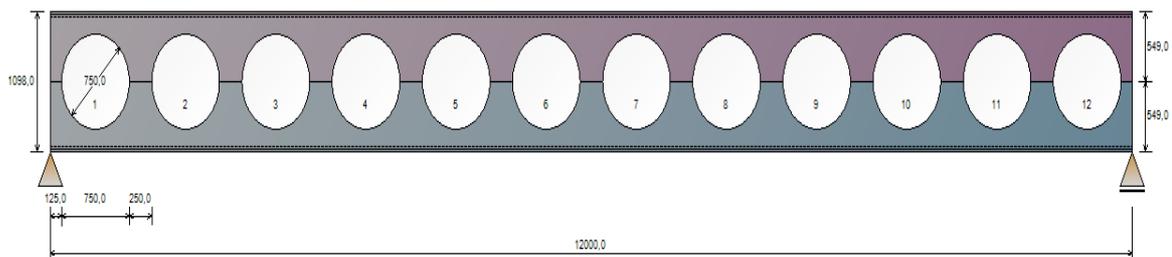
De la figura 3.37, debido a que la configuración de los alveolos circulares es tal que la razón D/H es mayor que  $\frac{1}{2}$  (0,8636), se tiene que el máximo esfuerzo de flexión está presente en el borde de la abertura sometida a compresión y es aproximadamente igual a 80 Mpa, por lo que el factor de concentración de tensiones para esta región de la viga será igual a:

$$K_c = \frac{\text{Tensión máxima puntual}}{\text{Tensión promedio puntual}} = \frac{80 \text{ Mpa}}{25 \text{ Mpa}} = 3,2$$

### 3.3 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA POR SOFTWARE PARA VIGAS DE ALMA ALIGERADA

En esta sección, vamos a prediseñar vigas de alma aligerada, específicamente con alveolos circulares y “angelina” usando un software existente en el mercado, dado por la Empresa Europea Arcelor Mittal. Las normativa que utilizan estos software para el prediseño son las dadas por el Eurocódigo EN 1993 1-1 (Diseño de estructuras de acero). A continuación se presenta los resultados del prediseño realizado en el software ACB 2.07. El resto del procedimiento de prediseño a seguir y los resultados obtenidos se muestran en los anexos B y C de este proyecto.

#### 3.3.1 GEOMETRÍA DE LA VIGA



**Figura 3. 38** Geometría de la viga de alveolos circulares en ACB 2.07



### 3.3.3.2 Resistencias (Estado limite último)

#### ULTIMATE LIMIT STATES (ULS)

Note: the calculation method applies to steel rolled profiles only.

##### Summary of the criteria

S = Satisfactory NS = Not satisfactory

##### Checkings of net sections at openings

Resistance to bending moment (Open. no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{M,max}$	= 0,157	< 1	S
Resistance to normal force (Open. no 6 - Comb. U1) :	$\Gamma_{N,max}$	= 0,116	< 1	S
Resistance to shear force (Open. no 5 - Comb. U1) :	$\Gamma_{V,max}$	= 0,090	< 1	S
Resistance to M+N interaction (Open. no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{MN,max}$	= 0,164	< 1	S
Resistance to N+V interaction (Open. no 6 - Comb. U1) :	$\Gamma_{NV,max}$	= 0,116	< 1	S
Resistance to M+V interaction (Open. no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{MV,max}$	= 0,157	< 1	S
Resistance to M+N+V interaction (Open. no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{MNV,max}$	= 0,164	< 1	S

##### Web checkings

Shear buckling check required (Post no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{Vbw,max}$	= 0,038	< 1	S
--	--------------------	---------	-----	---

##### Posts checkings

Resistance to shear (Post no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{Vh,max}$	= 0,114	< 1	S
Resistance to buckling (Post no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{b,max}$	= 0,139	< 1	S
Minimum throat thickness (Post no 1 - Comb. U1) :	$a_{min}$	= 0,59 mm		
Warning : the throat thickness of the fillet weld must be at least 3 mm (EC3)				

##### Gross sections checkings

Resistance to bending (Post no 6 - Comb. U1) :	$\Gamma_{Mg,max}$	= 0,109 (Classe 3)	< 1	S
Resistance to shear (Left end - Comb. U1) :	$\Gamma_{Vg,max}$	= 0,031	< 1	S

##### Other checkings

Resistance to lateral torsional buckling	$\Gamma_{LT,max}$	= 0,782	< 1	S
--	-------------------	---------	-----	---

### 3.3.3.3 Deflexiones (Estado Límite de Servicio)

#### Deflections

v : Maximum vertical deflection of the beam

##### Under elementary load cases

Permanent loads (G) :	v = 2,87 mm (S13)	= L / 4176
Live loads 1 (Q1) :	v = 2,34 mm (S13)	= L / 5132

##### Under SLS Combinations

S1 = 1,00 G + 1,00 Q1 :	v = 5,21 mm (S13)	= L / 2302
S2 = 1,00 G + 1,00 Q1 :	v = 5,21 mm (S13)	= L / 2302
S3 = 1,00 G :	v = 2,87 mm (S13)	= L / 4176
S4 = 1,00 G + 1,00 Q1 :	v = 5,21 mm (S13)	= L / 2302

The user has to check whether the deflections are acceptable according to the project requirements and to consider a precambering if necessary.

De los resultados obtenidos, se concluye por lo tanto que el prediseño de las vigas de alma aligerada con alveolos circulares usando el software ACB 2.07 es satisfactorio.

## **CAPÍTULO 4**

### **MODOS DE FALLA EN VIGAS DE ALMA ALIGERADA**

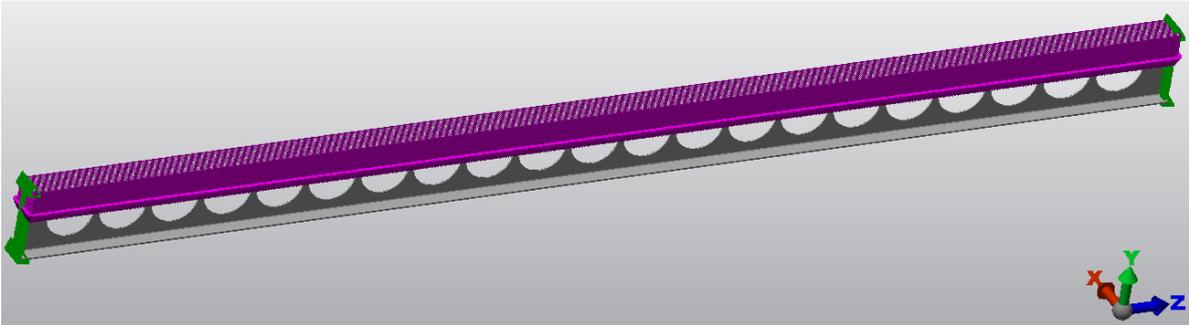
#### **4.1 INTRODUCCIÓN**

En este capítulo avanzaremos en nuestro estudio de las vigas de alma aligerada, esta vez con relación a las fallas más frecuentes que en estas se presentan. La simulación de las fallas más frecuentes se las realizará en vigas de alma aligerada cuya configuración geométrica, de carga o condiciones de borde sean tales que den origen las fallas de formación del mecanismo Vierendeel ó por el pandeo del post-alma. El análisis de cada una de las fallas se las realizará en base a los resultados obtenidos de la simulación de esfuerzos estáticos con modelos lineales y de carga crítica de pandeo realizados en ALGOR.

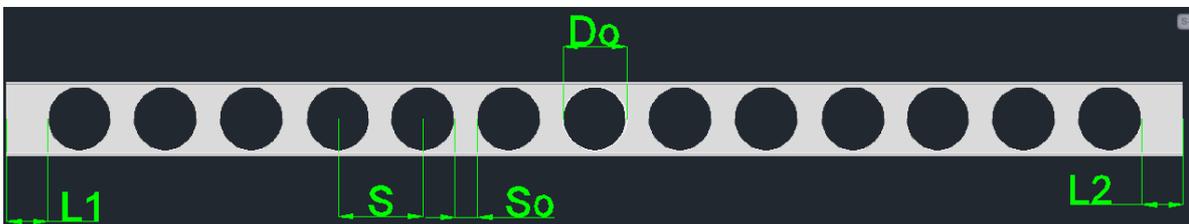
La viga utilizada para este tipo de falla tiene la misma sección que la del ejemplo de aplicación del capítulo 3, W30x99 (claro de 12m, distancia entre vigas de 2.5 m, material Acero ASTM A-572), pero con las diferencia de que para el caso de falla, la viga va estar fijamente apoyada en sus extremos (viga empotrada) y que la sobre carga de uso del parqueadero va ser excesiva, es decir la carga de diseño para la viga va tener un valor muy alto que inevitablemente hará fallar a la viga

#### **4.2 FORMACIÓN DEL MECANISMO VIERENDEEL**

Debido a que esta falla se produce por la transferencia de esfuerzos cortantes muy elevados a través de las secciones T, debemos tener una configuración con altas fuerzas cortantes cerca a los apoyos, lo cual se consigue principalmente aumentando el valor de la carga de diseño. Los detalles del empotramiento y carga a asignarse en el software ALGOR se muestran en la figura 4.1, mientras que los parámetros se muestran en la figura 4.2.



**Figura 4. 1** Viga a fallar en el software Algor



**Figura 4. 2** Geometría de la viga a fallar por formación del mecanismo Vierendeel

Donde los parámetros geométricos que la definen son:

$$H_s = 750 \text{ [mm]}$$

$$L = 12m$$

$$w_d = 20 \frac{KN}{m}$$

$$D_0 = 650 \text{ [mm]}$$

$$S_0 = 225 \text{ [mm]}$$

$$S = 875 \text{ [mm]}$$

$$L_1 = L_2 = 425 \text{ [mm]}$$

Relación  $H_s/D_0$

$$\frac{H_s}{D_0} = \frac{750}{650} = 1,153$$

Relación  $S/D_0$

$$\frac{S}{D_0} = \frac{875}{650} = 1,346$$

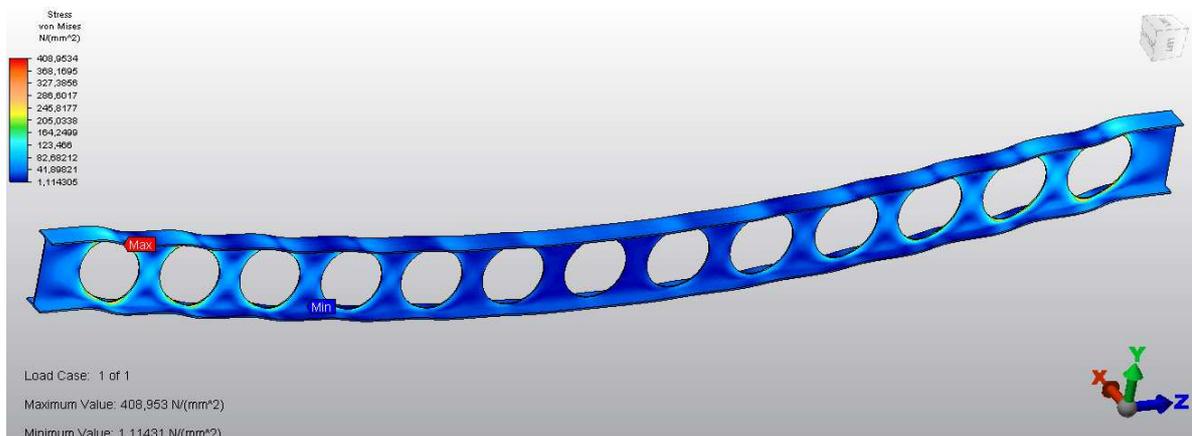
Relación  $S_0/D_0$

$$\frac{S_0}{D_0} = \frac{225}{650} = 0,346$$

#### 4.2.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

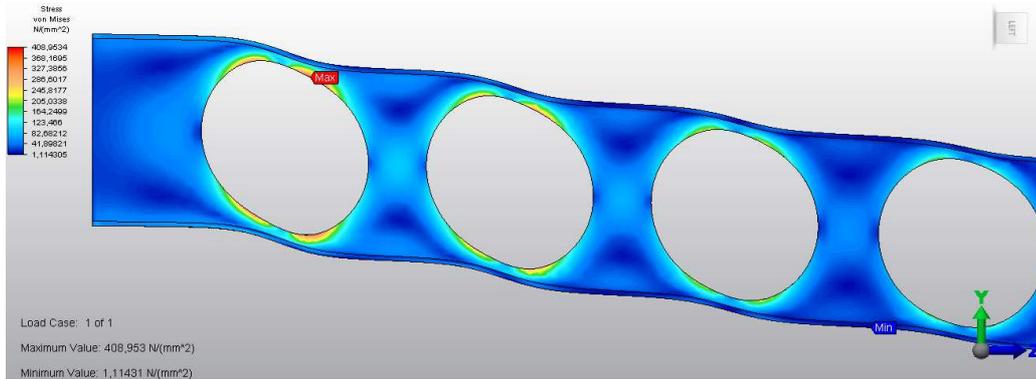
Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos de la simulación por elementos finitos, con un tamaño de malla del 10%, donde se asume que la solución ha convergido.

##### 4.2.1.1 Esfuerzos de Von Mises



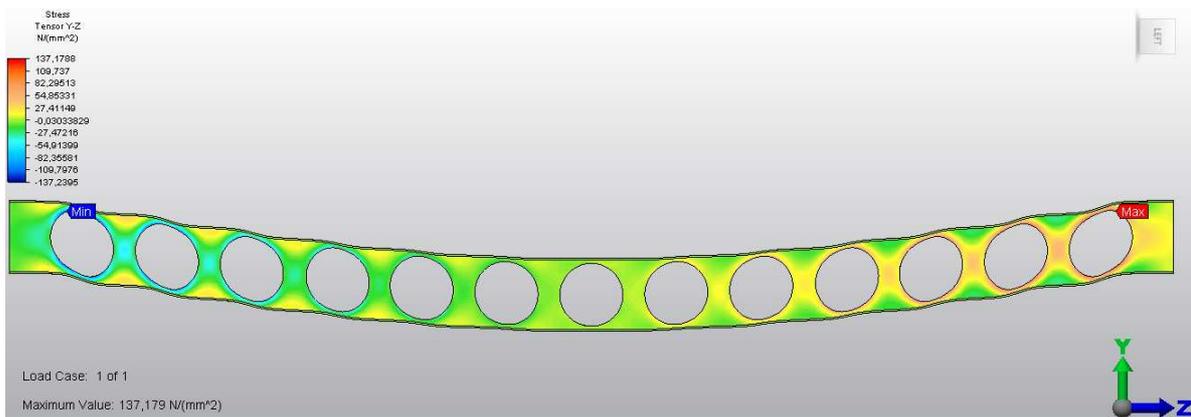
**Figura 4. 3** Esfuerzos de Von Mises para la formación del mecanismo Vierendeel

En la figura 4.31 se puede observar la formación de las 4 “bisagras” plásticas alrededor de las 3 primeras aberturas, desde el extremo izquierdo de la viga.

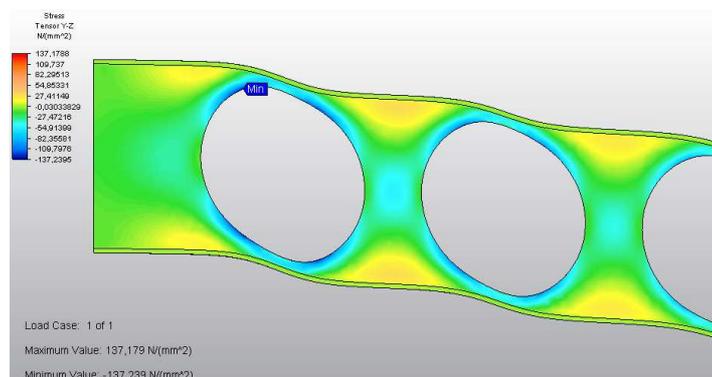


**Figura 4. 4** Detalles de los esfuerzos de Von Mises para la formación del mecanismo Vierendeel

4.2.1.2 *Esfuerzos de corte T<sub>yz</sub>*

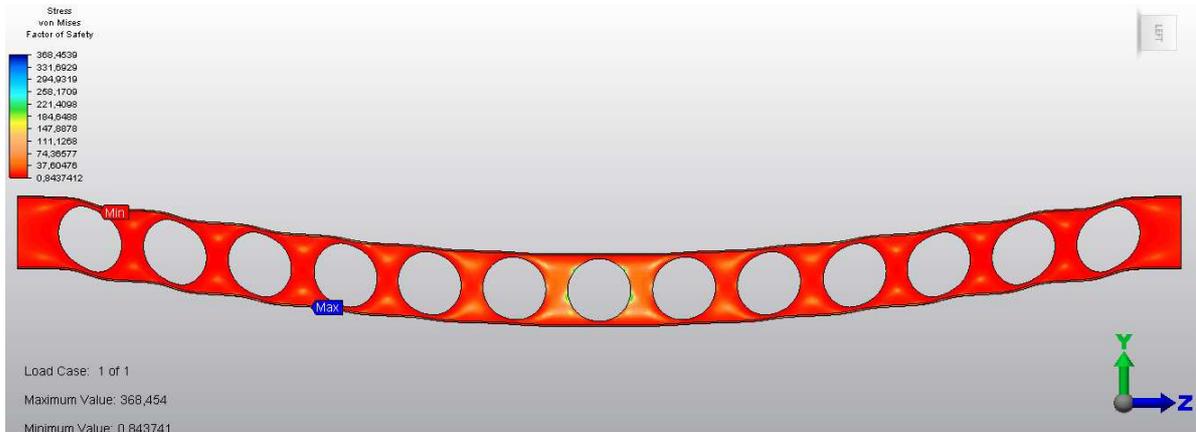


**Figura 4. 5** Esfuerzos cortantes T<sub>yz</sub> para la formación del mecanismo Vierendeel



**Figura 4. 6** Detalles de los esfuerzos cortantes T<sub>yz</sub> para la formación del mecanismo Vierendeel

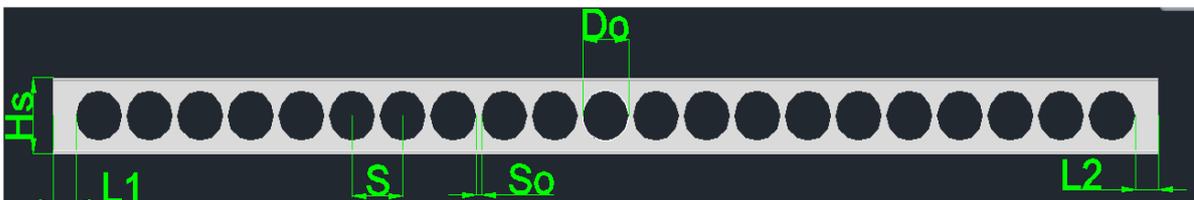
### 4.2.1.3 Factores de seguridad Von Misses



**Figura 4. 7** Factores de seguridad de Von Misses

## 4.3 FALLA POR PANDEO DEL POST-ALMA

Debido a que este tipo de falla se presenta en aberturas con separaciones entre ellas muy pequeñas, y de esbeltez del alma relativamente pequeña se tiene que una configuración aceptable para este tipo de falla es la que se muestra en la figura 4.8.



**Figura 4. 8** Geometría de la viga a fallar por pandeo del post alma

Donde los parámetros geométricos que la definen son:

- $H_s = 750$  [mm]
- $L = 12m$
- $w_d = 20 \frac{KN}{m}$
- $D_0 = 500$  [mm]
- $S_0 = 50$  [mm]
- $S = 550$  [mm]
- $L_1 = L_2 = 250$  [mm]

- Relación  $H_s/D_0$

$$\frac{H_s}{D_0} = \frac{750}{500} = 1,5$$

- Relación  $S/D_0$

$$\frac{S}{D_0} = \frac{550}{500} = 1,1$$

- Relación  $S_0/D_0$

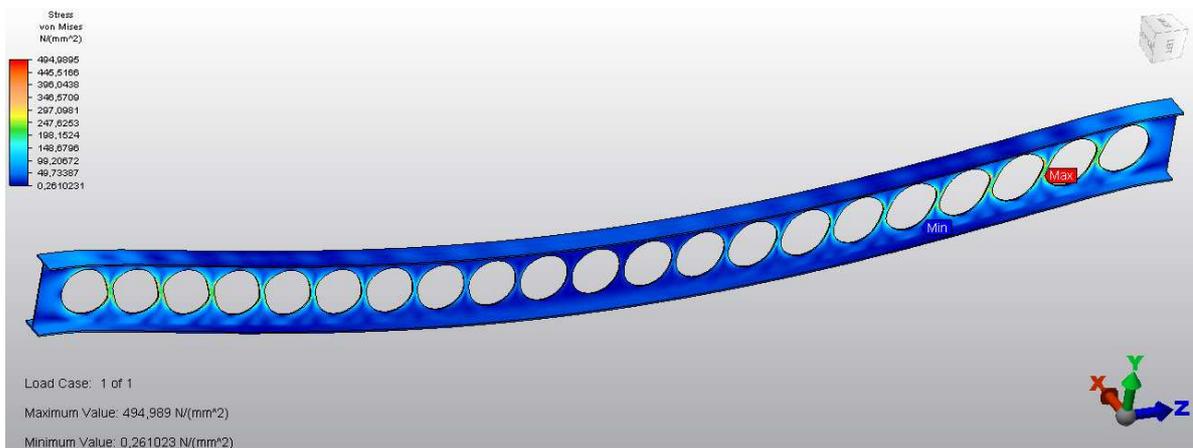
$$\frac{S_0}{D_0} = \frac{50}{500} = 0,1$$

### 4.3.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

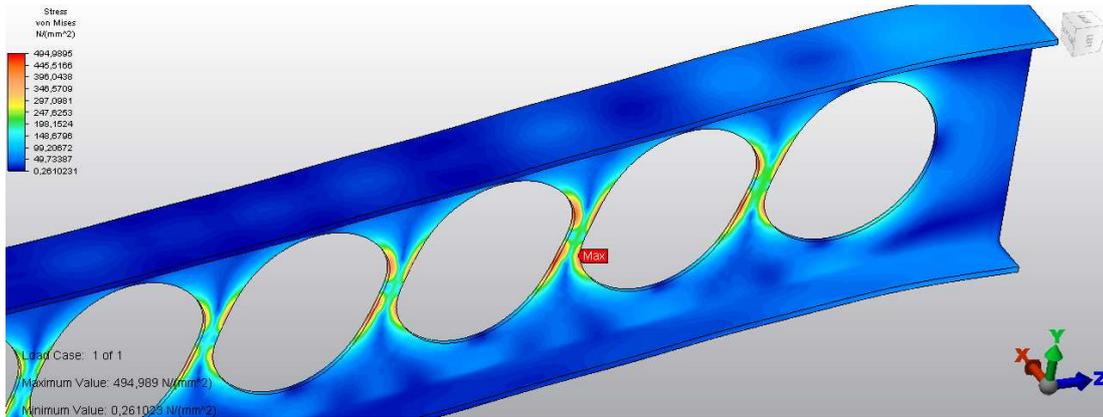
Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos de la simulación por elementos finitos, con un tamaño de malla del 10%, donde se asume que la solución ha convergido.

#### 4.3.1.1 Falla por esfuerzos

##### 4.3.1.1.1 Esfuerzos de Von Misses

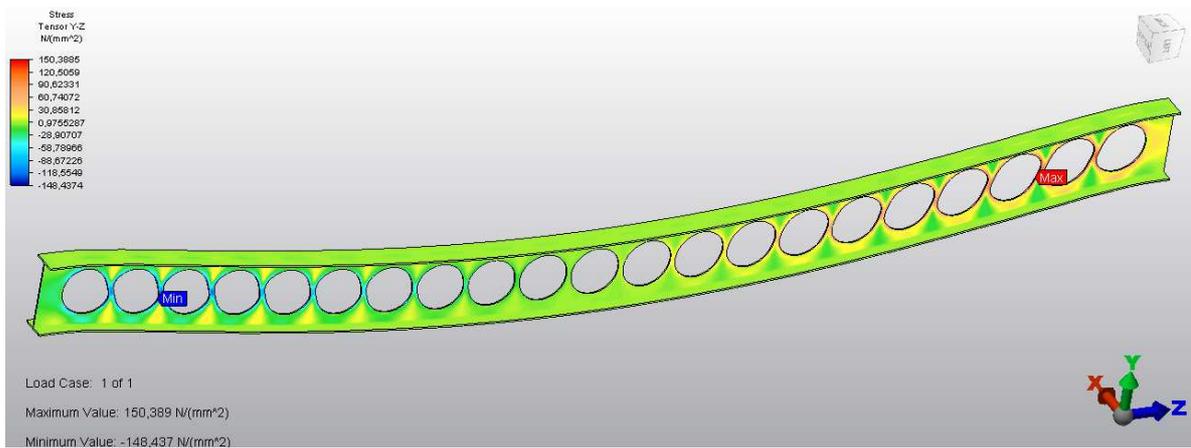


**Figura 4. 9** Esfuerzos de Von Misses para el pandeo del post-alma

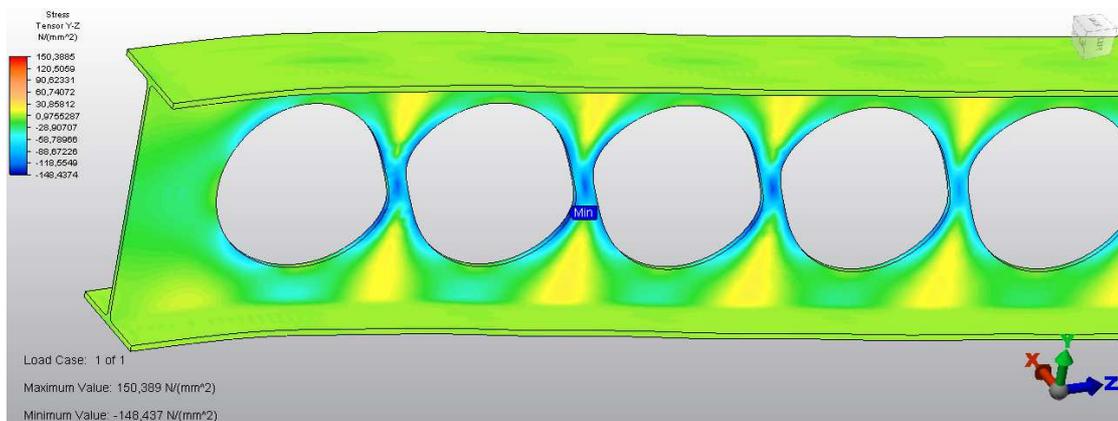


**Figura 4. 10** Detalles de los esfuerzos de Von Mises para el pandeo del post-alma

4.3.1.1.2 *Esfuerzos de corte  $T_{yz}$*



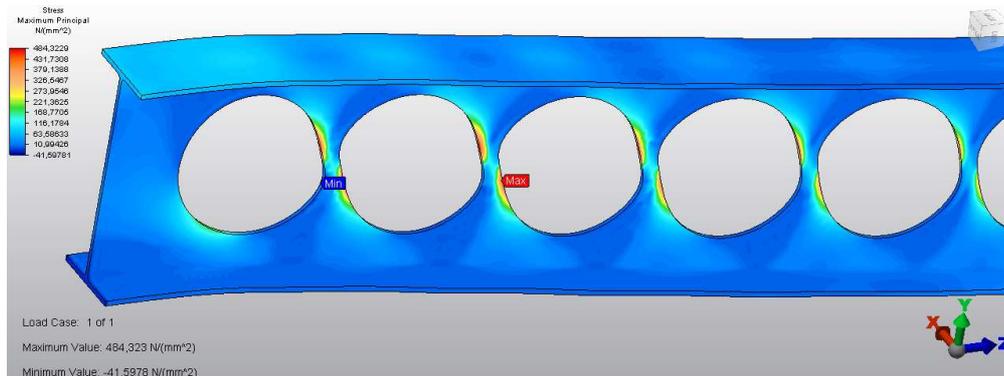
**Figura 4. 11** Esfuerzos de corte  $T_{yz}$  para el pandeo del post-alma



**Figura 4. 12** Detalles de los esfuerzos de corte  $T_{yz}$  para el pandeo del post-alma

#### 4.3.1.1.3 Esfuerzos principales máximos

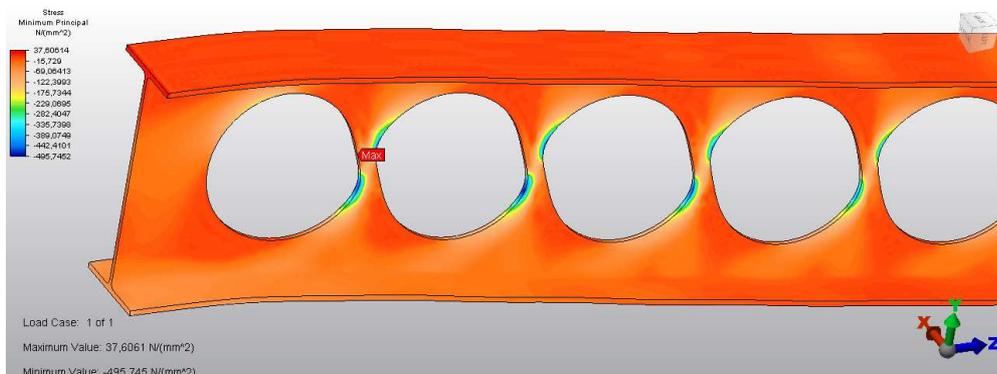
La figura 4.13 muestra la distribución de esfuerzos principales máximos para un extremo de la viga, donde las regiones de color rojo muestran los valores de tensión más altos desarrollados a lo largo de la diagonal de los post-alma, siendo los más grandes en los 3 primeros, donde precisamente se obtuvo las fallas por esfuerzos del post-alma.



**Figura 4. 13** Esfuerzos de principales máximos para el pandeo del post-alma

#### 4.3.1.1.4 Esfuerzos principales mínimos

La figura 4.14 muestra la distribución de esfuerzos principales mínimos para un extremo de la viga, donde estos esfuerzos dan una buena indicación de los esfuerzos de compresión que actúan a lo largo de la otra diagonal de los post-alma. Para este caso, las regiones más azules indican altas concentraciones de esfuerzos de compresión.



**Figura 4. 14** Esfuerzos de principales mínimos para el pandeo del post-alma

4.3.1.1.5 Factores de seguridad Von Misses

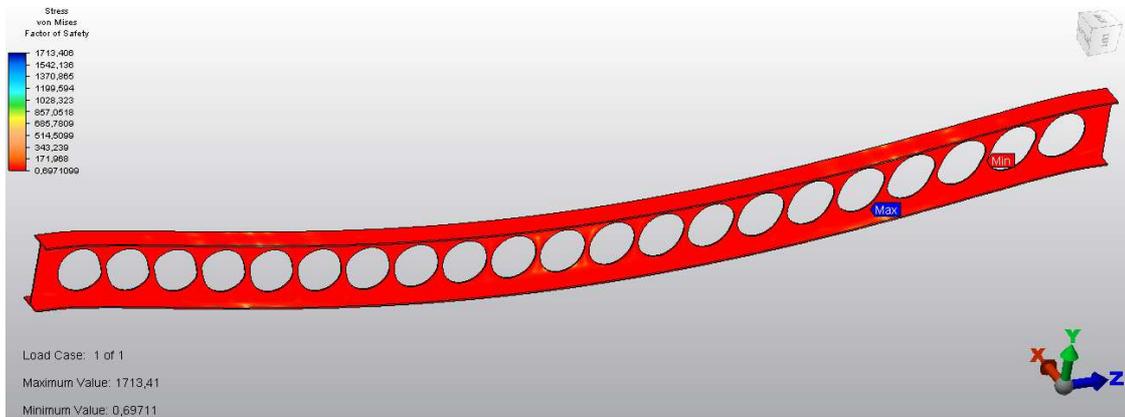


Figura 4. 15 Factores de seguridad Von Misses para el pandeo del post-alma

4.3.1.2 Falla por pandeo

Para la falla por pandeo del post alma se tiene que incrementar el valor de la carga uniformemente distribuida con el fin de vencer la rigidez torsional de los post alma y que efectivamente se tenga un pandeo local del post-alma, tal como se muestra en la figura 4.16.

El nuevo valor de la carga es de  $83,34 \left[ \frac{KN}{m} \right]$ , es decir una carga total de 1000 KN, equivalente a 100 Toneladas.

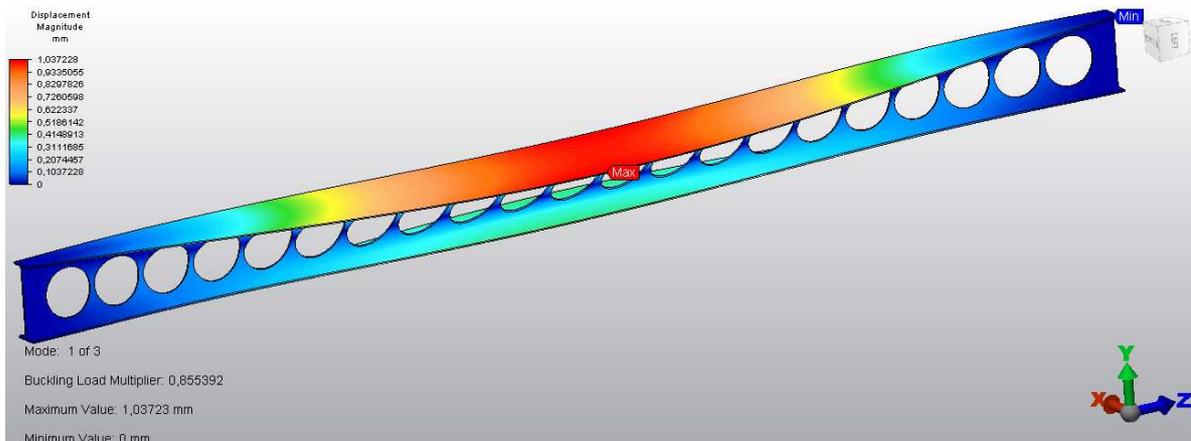
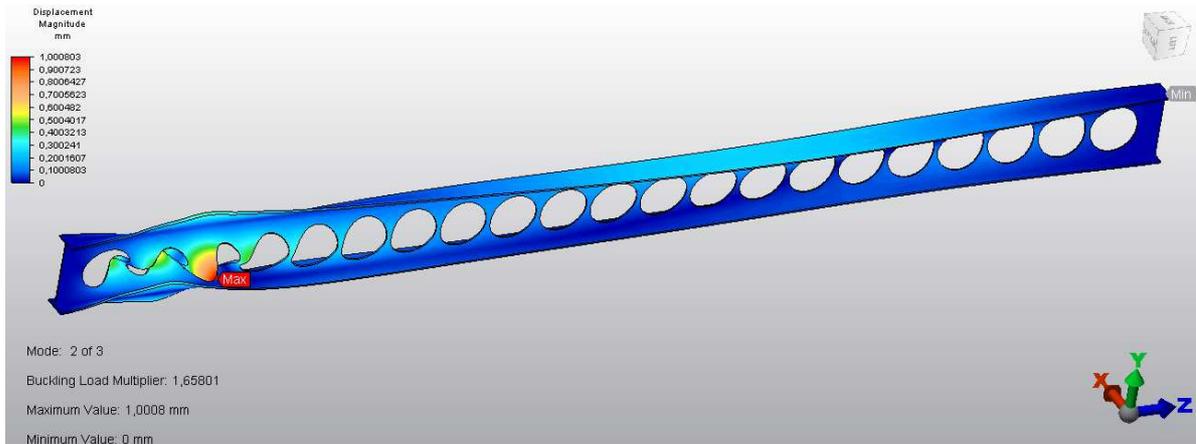


Figura 4. 16 Pandeo del Post-alma: modo 1



**Figura 4. 17** Pandeo del Post-alma: modo 2

De la figura 4.16, se deduce que la viga de alma aligerada con dicha configuración y restricciones de borde, estaría en capacidad de resistir máximo una carga de 85 Toneladas y no presentar problemas de pandeo local del post-alma.

## CAPÍTULO 5

### DISEÑO DE UNA VIGA DE ALMA ALIGERADA CON Y SIN REFORZAMIENTO

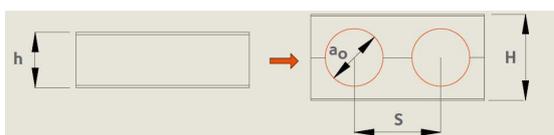
#### 5.1 INTRODUCCIÓN

Además de los métodos de diseño que utilizan curvas de interacción momento-cortante, se tienen ciertas tablas para el predimensionamiento o prediseño de vigas de alma aligerada, desarrolladas por empresas dedicadas a la fabricación de vigas y otros elementos estructurales, como las empresas europeas Arcelor Mittal y Westok, por ejemplo.

En este capítulo se va a diseñar vigas de alma aligerada con aberturas rectangulares y circulares en base al método de curvas de interacción. Se inicia el diseño haciendo uso de gráficas llamadas ábacos de predimensionamiento para la selección del perfil base de la viga de alma aligerada.

##### 5.1.1 FASE DE PREDIMENSIONAMIENTO <sup>47</sup>

Las vigas alveolares con aberturas circulares empleadas en cubiertas y forjados metálicos generalmente suelen ser secciones doblemente simétricas: las secciones superior e inferior provienen del mismo perfil de base (figura 5.1). El diseñador tiene una gran libertad en la elección del diámetro y espaciamiento de alveolos. Esos dos valores permitirán definir el perfil de base y deducir el canto final de la viga de alma aligerada en este caso con alveolos circulares.



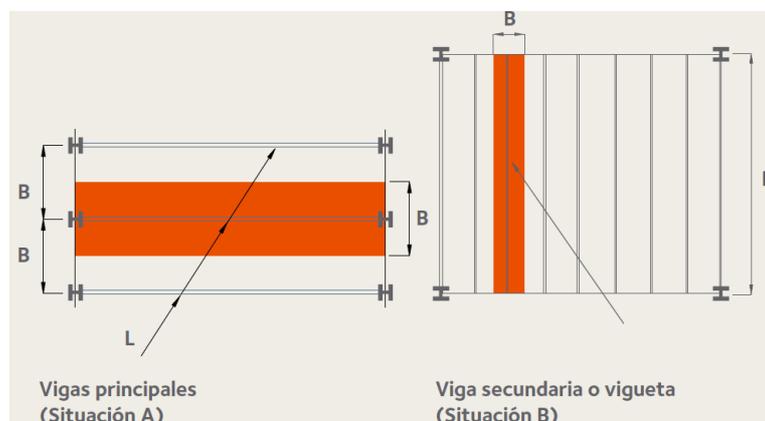
**Figura 5. 1** Viga alveolar

<sup>47</sup> ARCELOR MITTAL, (2008). *Vigas alveolares ACB*. Artículo técnico.

El proceso puede ser también el inverso: partiendo de un canto final impuesto y unas características definidas para los alveolos, el ingeniero puede obtener fácilmente el perfil de base que permita satisfacer dicha configuración.

#### 5.1.1.1 Determinación del canto de las vigas ACB

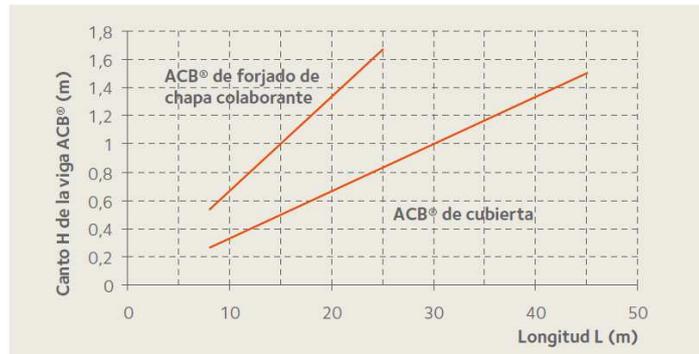
El canto  $H$  de una viga con alveolos circulares se determina en función de las variables dadas en la figura 5.2.



**Figura 5. 2** Variables para la determinación del canto

- La longitud ( $L$ ) y la distancia transversal entre vigas ( $B$ ),
- El valor de las cargas (utilización en cubierta o en forjados),
- La utilización de este tipo de vigas como vigas principales (situación A) o secundarias (situación B),
- Los criterios de deformación (flechas admisibles en situaciones habituales o para casos particulares).

Para el caso de proyectos habituales de cubiertas las vigas pueden tener una esbeltez (relación entre longitud/altura de la viga) variable entre 20 y 40 según las condiciones de apoyo. Para el caso de vigas de pórtico consideradas empotradas y para viguetas puede utilizarse como valor inicial el valor intermedio de 30 (figura 5.3).



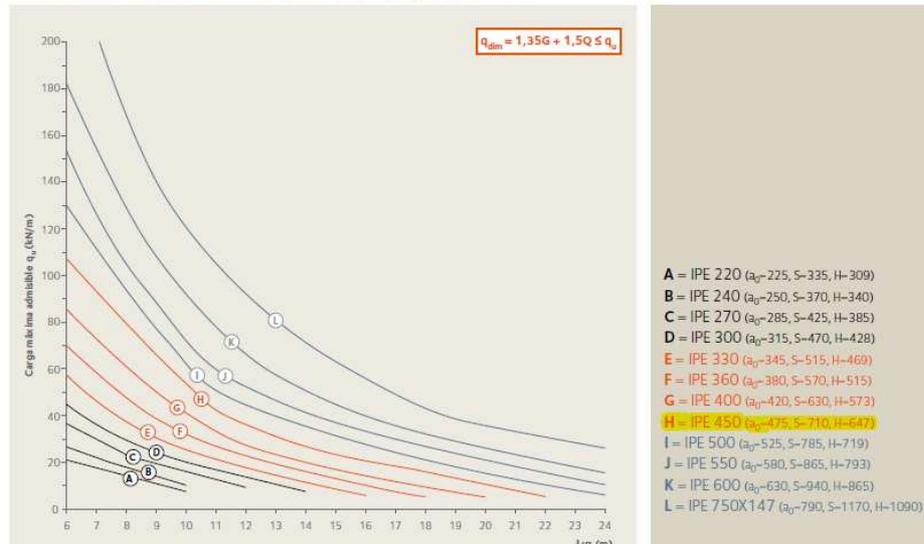
**Figura 5. 3** Canto de las vigas con alveolos circulares en función de la longitud

Para el caso de vigas utilizadas en forjados de edificios la esbeltez varía entre 10 y 20. Cuando existen caso de sobrecargas de uso normales se puede utilizar, en la fase inicial de diseño, un valor intermedio igual a 15.

**5.1.1.2 Tablas de rendimiento**

De acuerdo con la definición geométrica, la sección de la viga con alveolos circulares a considerar en el proyecto puede determinarse a partir de las curvas de rendimiento o ábacos de predimensionamiento que existen tanto para cubiertas o de forjados metálicos, tal como se muestra en la figura 5.4.

Ábaco 4: Sección de Acero - Perfil de base IPE.  $S = 1,5 a_0$  - Clase S355



**Figura 5. 4** Ábaco de predimensionamiento

La carga de diseño mayorada o factorada,  $q_d$  o  $w_d$  debe compararse con la carga admisible  $q_u$ . Dicha carga  $q_d$  se calcula fácilmente a partir de las siguientes fórmulas ponderación:

- Según Arcelor Mittal

$$q_d = (1.35D + 1.5L)B \quad (5.1)$$

- Según el LRFD

$$q_d = (1.2D + 1.6L)B \quad (5.2)$$

Donde:

D: carga permanente

L: carga viva o sobrecarga

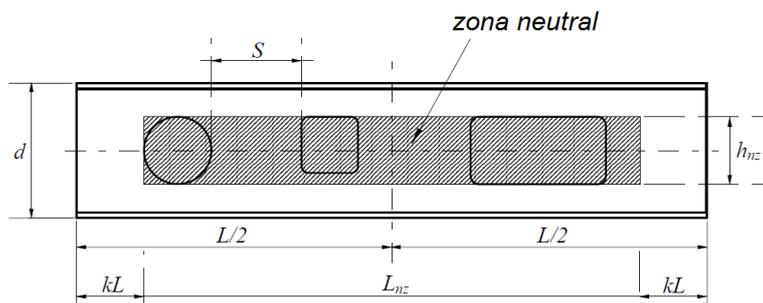
B: distancia lateral entre vigas adyacentes

## 5.2 EJEMPLO DE DISEÑO DE ABERTURAS EN EL ALMA

### 5.2.1 METODOLOGÍA

Con el siguiente ejemplo se va a aplicar el método de diseño de las curvas de interacción de momento-cortante con el fin de encontrar la región del alma de la viga donde una abertura concéntrica con una cierta forma y dimensiones no provoca reducción en la resistencia a la flexión. Sobre esta región, llamada la "zona neutral" y representada por el área sombreada en la figura 5.5, es posible diseñar aberturas en el alma sin tomar en cuenta los efectos de la sección neta de la viga, la cual prescinde de los métodos de cálculo analíticos.

La altura de la zona neutral  $h_{nz}$ , está posicionada simétricamente con respecto al centroide de la sección de acero y se puede definir como dos veces la altura media de la abertura en el alma más la excentricidad de abertura con respecto al eje neutro. Obviamente, para las aberturas ubicadas de forma simétrica con respecto al centroide de la sección de acero (abertura concéntrica),  $h_{nz}$ , es la altura de la abertura en sí.

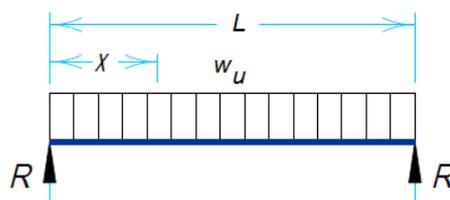


**Figura 5. 5** Zona neutral

La longitud de la zona neutral,  $l_{nz}$  (figura 5.5), para cada caso estudiado es la longitud del claro de la viga donde la interacción momento-cortante no se considera crítica.

### 5.2.2 DATOS DEL PROBLEMA

Una viga de acero, cuyo material es acero ASTM A-572 Gr 50 ( $F_y = 50$  Ksi), se encuentra simplemente apoyada en sus extremos y sometida a una carga muerta de  $w_d = 0,5 \frac{kips}{ft}$  ( $7,46 \frac{KN}{m}$ ) y a una carga viva de  $w_l = 1,3 \frac{kips}{ft}$  ( $19,4 \frac{KN}{m}$ ), ver figura 5.6. La longitud del perfil es de 12m y la distancia entre vigas adyacentes es de 2,5 m. Se determinará la zona neutra en el alma de la viga, donde aberturas rectangulares (500x1000mm) y circulares ( $d_o = 500$ mm) reforzadas o no pueden ser ubicadas alineadas con el eje neutro (excentricidad = 0), de tal forma de tener un diseño seguro de la viga de alma aligerada.



**Figura 5. 6** Viga simplemente apoyada y con carga uniforme

$$L = 12\text{m} = 39,37 \text{ [ft]}$$

$$w_u = 1,2w_d + 1,6w_l = 1,2 \left( 0,5 \frac{kips}{ft} \right) + 1,6 \left( 1,3 \frac{kips}{ft} \right) = 2,68 \left[ \frac{kips}{ft} \right] \cong 40 \left[ \frac{KN}{m} \right]$$

### 5.2.3 ELECCIÓN DEL PERFIL

De las tablas de predimensionamiento dadas en el ANEXO D, se tiene que una buena aproximación para nuestro problema es como una viga usada en una aplicación de forjado metálico, donde a partir del respectivo ábaco de predimensionamiento (figura 5.7), claro de la viga ( $L=12\text{m}$ ) y a carga de diseño ( $w_d = 40 \text{ KN}$ ) tenemos que el perfil original adecuado sería un IPE 500. La altura final de este perfil ya con los alveolos incorporados (720 mm) se asemeja al tipo de perfil seleccionado en el capítulo 3 (750 mm), por lo que asumimos que se va a utilizar el mismo perfil W30x99, pero esta vez para el diseño de las aberturas en el alma sin variar su altura o peralte.

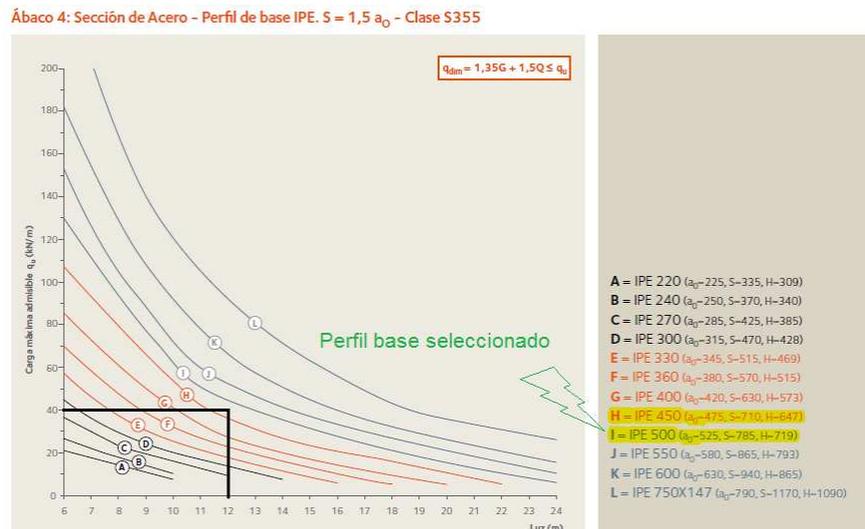


Figura 5. 7 Ábaco de predimensionamiento utilizado

### 5.2.4 DIAGRAMAS DE MOMENTO Y CORTANTE

#### 5.2.4.1 Cortante

$$V_{max} = \frac{w * L}{2} = \frac{2,68 * 39,37}{2} = 52,76 \text{ [kips]}$$

#### 5.2.4.2 Momento

$$M_{max} = \frac{wl^2}{8} = \frac{2,68 * 39,37^2}{8} = 519,25 \text{ [kips - ft]} = 6230 \text{ [Kips - in]}$$

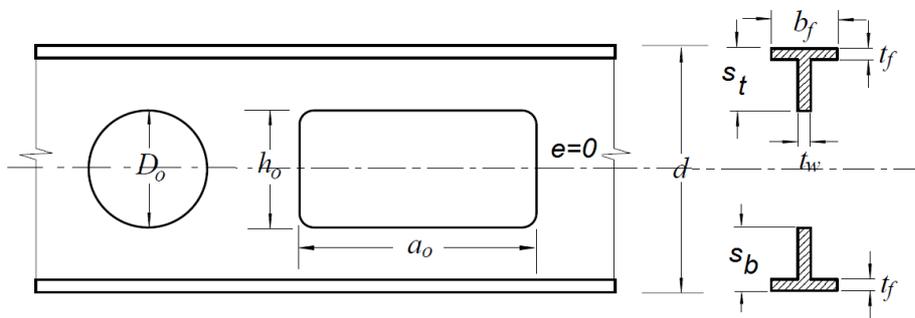
### 5.2.5 PROPIEDADES DE LA SECCIÓN W30X99

$$A_s = 29,1 \text{ in}^2 \quad d = 29,65 \text{ in} \quad t_w = 0,52 \text{ in} \quad b_f = 10,45 \text{ in} \quad t_f = 0,67 \text{ in}$$

$$Z_x = 312 \text{ in}^3$$

### 5.2.6 PROPIEDADES DE LA T Y DE LA ABERTURA

En la figura 5.8 se muestra la nomenclatura utilizada para el diseño de las aberturas rectangulares y posteriormente circulares y que serán ubicadas en la zona neutral de la viga.



**Figura 5. 8** Detalles de la abertura no reforzada en el alma

$$h_o = 19,685 \text{ in}$$

$$a_o = 39,37 \text{ in}$$

$$e = 0 \text{ in}$$

$$s_b = s_t = \left( \frac{d - h_o}{2} \right) = \left( \frac{29,65 - 19,685}{2} \right) = 4,98 \text{ in}$$

$$\Delta A_s = h_o * t_w = 19,685 * 0,52 = 10,24 \text{ in}^2$$

$$A_{sn} = A_s - \Delta A_s = 29,1 - 10,24 = 18,86 \text{ in}^2$$

$$v_t = v_b = \frac{a_o}{s_t} = \frac{a_o}{s_b} = \frac{39,37}{4,98} = 7,9$$

## 5.2.7 REVISIÓN DE LAS GUÍAS DE PROPORCIÓN

### 5.2.7.1 Patín de compresión

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{65}{\sqrt{F_y}}$$

$$\frac{10,45}{2(0,67)} \leq \frac{65}{\sqrt{50}}$$

$$7,79 \leq 9,19 \quad OK$$

Entonces la sección W30x99 es una sección compacta

### 5.2.7.2 Alma

$$\frac{d - 2t_f}{t_w} < \frac{420}{\sqrt{F_y}}$$

$$\frac{29,65 - 2(0,67)}{0,52} < \frac{420}{\sqrt{50}}$$

$$54,44 < 59,39 \quad OK$$

Cabe señalar que todos los perfiles W cumplen este requisito

### 5.2.7.3 Abertura

$$\frac{a_0}{h_0} < 3$$

$$\frac{39,37}{19,68} < 3$$

$$2 < 3 \quad OK$$

### 5.2.7.4 Capacidad de cortante plástico

$$V_m \leq \frac{2}{3} \bar{V}_p$$

$$V_m \leq \frac{2}{3} \left[ \frac{F_y * t_w * d}{\sqrt{3}} \right]$$

$$V_m \leq \frac{2}{3} \left[ \frac{50 * 0,52 * 29,65}{\sqrt{3}} \right] = 296,72 \text{ Kips}$$

### 5.2.7.5 Dimensiones de la abertura

$$a) \frac{h_0}{d} < 0,7$$

$$\frac{19,685}{29,65} < 0,7$$

$$0,66 < 0,7 \quad OK$$

$$b) p_0 = \frac{a_0}{h_0} + \frac{6h_0}{d} < 5,6$$

$$\frac{39,37}{19,685} + \frac{6(19,685)}{29,65} < 5,6$$

$$5,45 < 5,6 \quad OK$$

### 5.2.7.6 Dimensiones de la T

$$a) \frac{s_t}{d} \geq 0,15$$

$$\frac{4,98}{29,65} \geq 0,15$$

$$0,168 \geq 0,15 \quad OK$$

$$b) v_t, v_b \leq 12$$

$$7,9 \leq 12 \quad OK$$

## 5.2.8 CAPACIDAD DE MOMENTO MÁXIMO

Para secciones perforadas se cumple que:

$$M_p = F_y * Z_x = 50 * 312 = 15600 \text{ [kips - in]}$$

Para miembros con aberturas no reforzadas:

$$M_m = M_p \left[ 1 - \frac{\Delta A_s \left( \frac{h_0}{4} + e \right)}{Z_x} \right]$$

$$M_m = 15600 \left[ 1 - \frac{10,236 \left( \frac{19,685}{4} + 0 \right)}{312} \right]$$

$$M_m = 13081,3 \text{ [kips - in]}$$

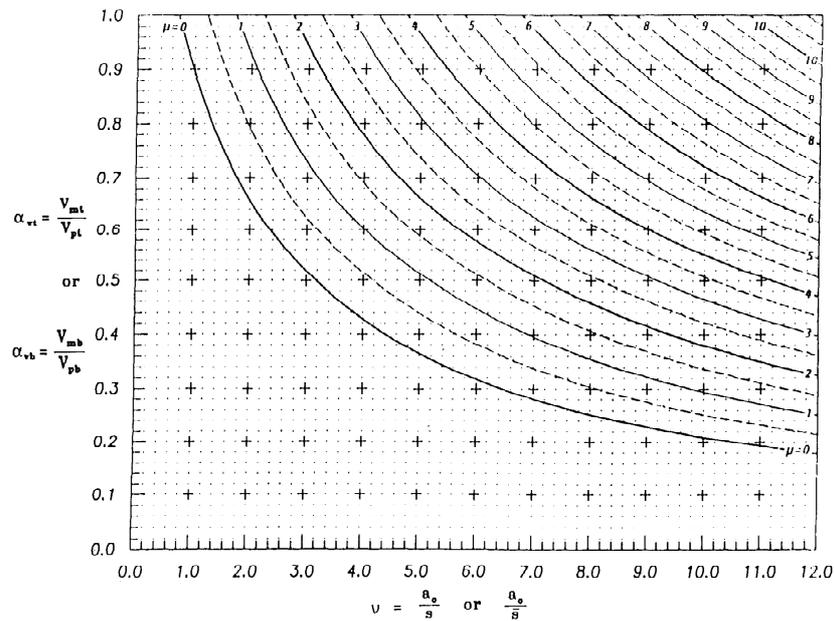
$$\phi M_m = 0,9 * 13081,3 = 11773,2 \text{ [kips - in]}$$

## 5.2.9 CAPACIDAD DE CORTANTE MÁXIMO

### 5.2.9.1 T inferior

$$V_{pb} = \frac{F_y * t_w * s_b}{\sqrt{3}} = \frac{50 * 0,52 * 4,98}{\sqrt{3}} = 74,75 \text{ Kips}$$

De la figura 5.9 con  $\mu = 0$  y  $v_b = 7,9$ , se tiene que  $\alpha_{vb} = 0,25$



**Figura 5. 9** Relación de la resistencia a cortante nominal máxima a la resistencia plástica de una T,  $\alpha_v$ , versus la relación longitud a altura o relación longitud a profundidad efectiva de la T,  $v$ .

También se puede obtener  $\alpha_{vb}$  con la siguiente ecuación:

$$\alpha_{vb} = \frac{\sqrt{6} + \mu}{v_b + \sqrt{3}} \leq 1$$

$$\alpha_{vb} = \frac{\sqrt{6} + 0}{7,9 + \sqrt{3}} \leq 1$$

$$\alpha_{vb} = 0,254 \leq 1$$

Por lo tanto:

$$V_{mb} = V_{pb} * \alpha_{vb} = 74,75 * 0,254 = 19 \text{ kips} \leq V_{pb} \quad \text{OK}$$

### 5.2.9.2 T superior

$$V_{pt} = \frac{F_y * t_w * s_t}{\sqrt{3}} = \frac{50 * 0,52 * 4,98}{\sqrt{3}} = 74,75 \text{ Kips}$$

Igual que para la T superior  $\alpha_{vt} = 0,254$  y por ende:

$$V_{mt} = V_{pt} * \alpha_{vt} = 19 \text{ kips} \leq V_{pt} \quad OK$$

### 5.2.9.3 Capacidad de corte total

$$V_m = V_{mb} + V_{mt} \leq \frac{2}{3} \bar{V}_p = 296,72 \text{ kips}$$

$$V_m = 19 + 19 = 38 \text{ Kips}$$

$$\phi V_m = 0,9 * 38$$

$$\phi V_m = 34,2 \text{ kips}$$

## 5.3 UBICACIONES DE LAS ABERTURAS RECTANGULARES

El momento factorado  $M_u$ , cortante factorado  $V_u$  y valores de  $V_u/\phi V_m$  y  $M_u/\phi M_m$  son tabulados a intervalos de 0,25 m a través de la viga. Para conocer si la abertura puede ser colocada en cada ubicación, el valor de R para cada punto ( $V_u/\phi V_m$ ,  $M_u/\phi M_m$ ) es obtenido del diagrama de interacción momento-cortante, ver figura 5.10.

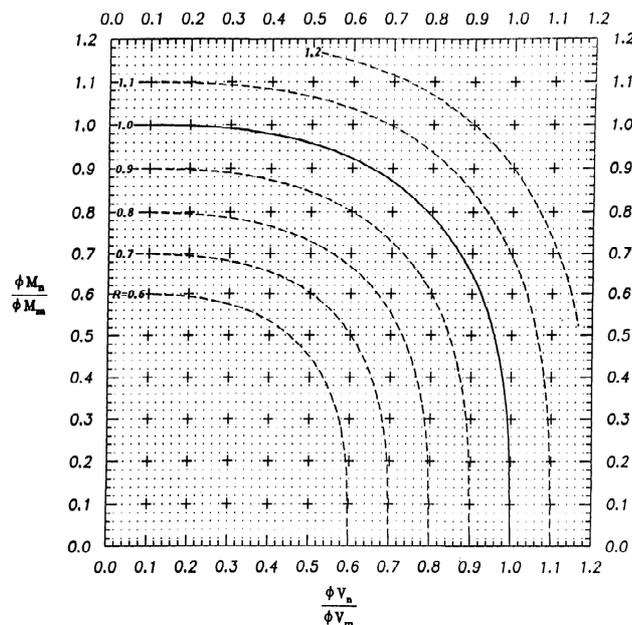


Figura 5. 10 Curvas de iteración momento- cortante

$$R = \frac{V_u}{\phi V_n} = \frac{M_u}{\phi M_n}; \phi = 0,90 \text{ para vigas de acero}; \phi = 0,85 \text{ para vigas compuestas}$$

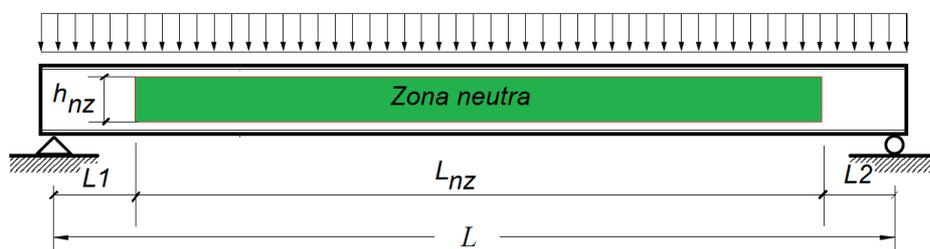
La abertura puede ser colocada en una determinada ubicación si  $R \leq 1$ . Los resultados son presentados en la tabla 5.1.

**Tabla 5. 1** Ubicaciones permitidas para las aberturas rectangulares

Punto	Distan- cia del apoyo m	Distan- cia del apoyo ft	Vu kips	Mu kips-in	Vu/ $\phi$ Vm	Mu/ $\phi$ Mm	R=Vu/ $\phi$ Vn; R=Mu/ $\phi$ Mn	RESULTA DO
1	0	0	52,76	0	1,54	0	1,5	NO
2	0,25	0,82	50,56	508,43	1,47	0,04	1,42	NO
3	0,5	1,64	48,36	995,22	1,41	0,08	1,4	NO
4	0,75	2,46	46,16	1460,39	1,35	0,12	1,32	NO
5	1	3,28	43,96	1903,91	1,28	0,16	1,28	NO
6	1,25	4,1	41,76	2325,8	1,22	0,19	1,24	NO
7	1,5	4,92	39,56	2726	1,15	0,23	1,15	NO
8	1,75	5,74	37,37	3104,68	1,09	0,26	1,1	NO
9	2	6,56	35,17	3461,66	1,02	0,29	1	OK
10	2,25	7,38	32,97	3797,01	0,96	0,32	0,96	OK
11	2,5	8,2	30,77	4110,72	0,90	0,35	0,92	OK
12	2,75	9	28,57	4402,80	0,83	0,37	0,87	OK
13	3	9,84	26,37	4673,25	0,77	0,39	0,8	OK
14	3,25	10,66	24,18	4922	0,70	0,41	0,75	OK
15	3,5	11,48	21,98	5149,22	0,64	0,4334	0,7	OK
16	3,75	12,3	19,78	5354,76	0,57	0,45	0,66	OK
17	4	13,12	17,58	5538,66	0,51	0,47	0,62	OK
18	4,25	13,95	15,38	5700,92	0,45	0,48	0,58	OK
19	4,5	14,76	13,2	5841,5	0,38	0,49	0,56	OK
20	4,75	15,58	11	5960,55	0,32	0,50	0,52	OK
21	5	16,4	8,79	6057,9	0,25	0,51	0,5	OK
22	5,25	17,22	6,6	6133,63	0,19	0,52	0,5	OK
23	5,5	18,04	4,4	6187,71	0,13	0,525	0,5	OK
24	5,75	18,86	2,2	6220,17	0,06	0,528	0,5	OK
25	6	19,68	0	6230,98	0	0,53	0,5	OK

La Tabla 5.1 muestra que toda línea central de las aberturas rectangulares deben ser colocada a partir de 2 metros hacia adelante del soporte a cada lado de la viga.

La ubicación de abertura está además limitado a que el borde de la abertura no puede estar a menos de una distancia de 49,33 pulgadas ( $d + \frac{a_0}{2}$ ) del soporte<sup>48</sup>. La zona neutra aceptable para la ubicación de las aberturas es obtenida entonces delimitando la longitud de la viga para la cual la condición  $R \leq 1$  es satisfecha. Dicha zona neutra está ilustrada en la figura 5.11.



**Figura 5. 11** Ubicación de la zona neutra para W30X99

Donde:

$$L_{nz} = 8000 \text{ mm} \quad h_{nz} = h_0 = 500 \text{ mm} \quad L_1 = L_2 = 2000 \text{ mm}$$

- Espaciamiento aberturas cuadradas y rectangulares

$$s \geq h_0 \geq 500 \text{ [mm]}$$

- Para aberturas circulares

$$s \geq 1,5D_0 \geq 750 \text{ [mm]}$$

- Radio de acuerdo (r):

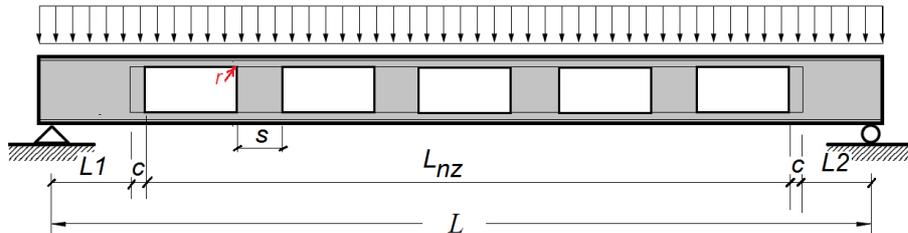
Las esquinas de las aberturas deberían tener un mínimo radio de acuerdo de 2 veces el espesor del alma o 5/8 in, el cual aún es más grande.

<sup>48</sup> Darwin, D. (1990). *Steel and Composite Beams with Web Openings*. Design Guide 2. American Institute of Steel Construction. Chicago IL. Section 3.7b3.

### 5.3.1 DISTRIBUCIÓN DE ABERTURAS

#### 5.3.1.1 Aberturas rectangulares

En la figura 5.12, se muestra la distribución de las aberturas rectangulares con sus dimensiones, que se deben realizarse en el alma del perfil W 30x99.



**Figura 5. 12** Distribución de las aberturas rectangulares

Donde:

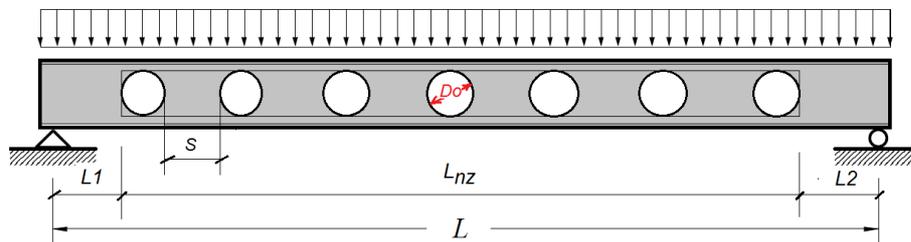
$$s = h_0 = 500 \text{ mm}, \quad c = 500 \text{ mm}, \quad r = \frac{5}{8} \text{ in} \sim 17 \text{ mm}$$

#### 5.3.1.2 Aberturas circulares

La figura 5.13, se muestra la distribución de las aberturas circulares con sus dimensiones, que se deben realizarse en el alma del perfil W 30x99.

$$h_0 = D_0 = 500 \text{ [mm]}$$

$$a_0 = 0,45D_0 = 225 \text{ [mm]}$$



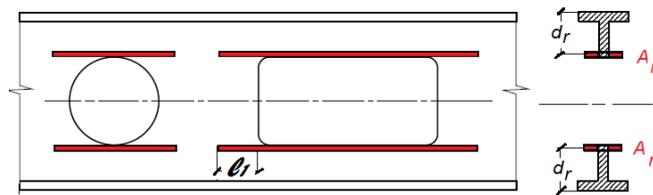
**Figura 5. 13** Distribución de aberturas circulares

Donde:

$$s \geq 1.5D_0 = 750 \text{ mm} \quad L_{nz} = 8000 \text{ mm} \quad D_0 = 500 \text{ mm}$$

## 5.4 DISEÑO DE LOS REFORZAMIENTOS

Como podemos ver en la tabla 5.1, revisando la interacción entre momento puro y cortante puro, se puede observar que el requerimiento  $R = \frac{V_u}{\phi V_n} \leq 1$  no se cumple para los tramos de la viga que están cerca a los apoyos, más exactamente cuando la distancia es menor a los dos metros en cada extremo de la viga, lo cual nos indica que se si desea ubicar aberturas en estos tramos, éstas deberían ser reforzadas (figura 5.14) con el fin de reducir el valor de  $R \leq 1$ .



**Figura 5. 14** Reforzamiento para las aberturas

Hasta este punto tenemos que:

- Cortante puro:  $R = \frac{V_u}{\phi V_n} = 1,54$
- Flexión pura:  $R = \frac{M_u}{\phi M_n} = 0,53$

El reforzamiento reduce el valor de R a 1, ya que el reforzamiento incrementará el valor de la capacidad de momento máximo  $M_m$  ligeramente, debido principalmente al efecto de reforzamiento sobre la capacidad de corte  $V_m$ . Entonces, si  $\frac{M_u}{\phi M_n}$  permanece en aproximadamente 0,53. De la figura 5.15, será igual a 1, cuando  $\frac{V_u}{\phi V_n} = 0,95$ .

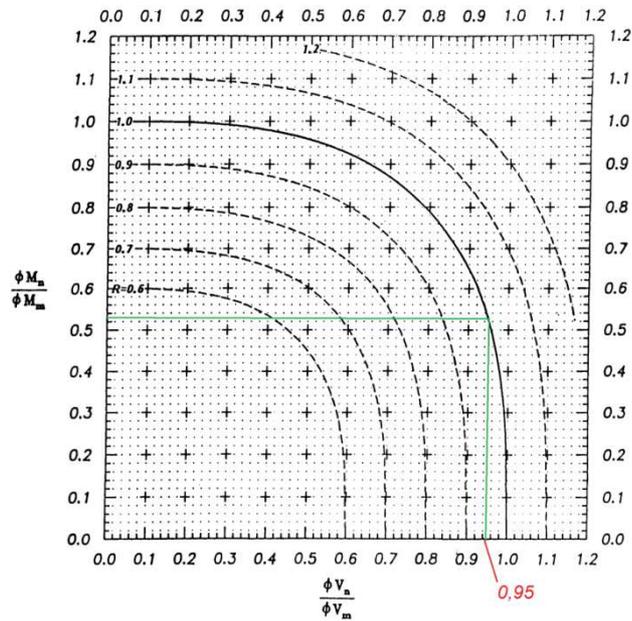


Figura 5. 15 Valor de  $\frac{V_u}{\phi V_n}$  con el reforzamiento

Probamos con  $A_r = 1,4 \text{ in}^2$

$$\Delta A_s = h_0 t_w - 2A_r = 19,685(0,52) - 2(1,4) = 7,43 \text{ in}^2$$

#### 5.4.1 REVISION DE LA RESISTENCIA

a) Capacidad de momento máximo

Debido a que  $e = 0$ ,  $t_w e < A_r$ , usamos la ecuación #

$$M_m = M_p \left[ 1 - \frac{t_w \left( \frac{h_0^2}{4} + h_0 e - e^2 \right) - A_r h_0}{Z_x} \right] \leq M_p$$

$$M_m = 15600 \left[ 1 - \frac{0,52 \left( \frac{19,685^2}{4} \right) - 1,4 * 19,685}{312} \right] \leq M_p$$

$$M_m = 14459,2 \text{ [kips - in]} \leq M_p$$

$$\phi M_m = 0,9 * 1140,8 = 13013,3 \text{ [kips - in]}$$

b) Capacidad de corte máximo

$$V_{pt} = V_{pb} = 74,75 \text{ Kips}$$

$$\bar{s} = s - \frac{A_r}{2b_f} = 4,98 - \frac{1,4}{2(10,45)} = 4,91 \text{ in}$$

$$v = \frac{a_0}{\bar{s}} = \frac{39,37}{4,91} = 8 \leq 12 \quad OK$$

Asumimos  $d_r = 4,98 - 3/16 = 4,79 \text{ in}$ .

$$P_r = F_y A_r \leq \frac{F_y t_w a_0}{2\sqrt{3}}$$

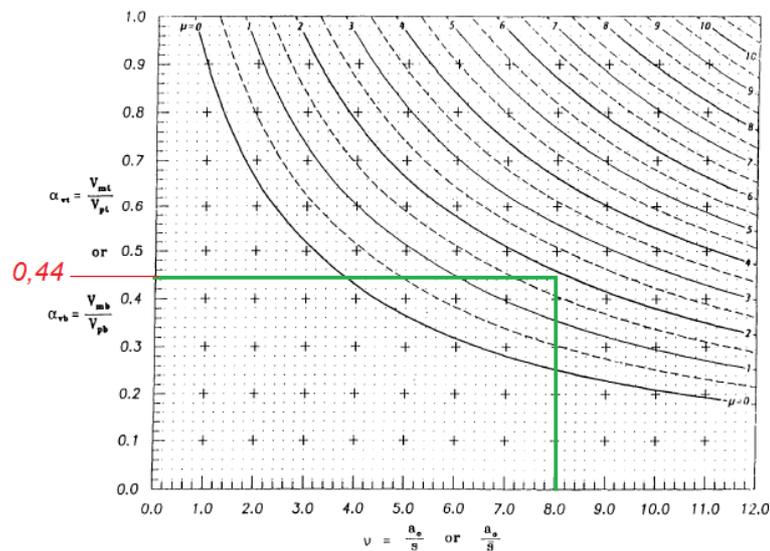
$$P_r = 50 * 1,4 \leq \frac{50 * 0,52 * 39,37}{2\sqrt{3}}$$

$$P_r = 70 \text{ kips} \leq 295,5 \text{ kips} \quad OK$$

Usando la ecuación 2.44

$$\mu = \frac{2 * 70 * 4,79}{74,75 * 4,98} = 1,8$$

Usando la figura 5.16 con  $\mu = 1,8$  y  $v = 8$ , entonces  $\alpha_v = 0,44$



**Figura 5. 16** Revisión de la resistencia de corte máxima nominal a la resistencia de corte plástica de una T,  $\alpha_v$ , versus la relación longitud altura de una T,  $v$ .

Entonces:  $V_{mb} = V_{mt} = V_p * \alpha_v = 74,75 * 0,44 = 32,89$  [kips]

Por lo tanto:  $V_m = V_{mb} + V_{mt} = 65,78$  kips  $\leq \frac{2\bar{V}_p}{3} = 296,72$  kips OK

$$\phi V_m = 0,9 * 65,78 = 59,2$$
 [kips]

- Revisión de la interacción:

$$\frac{V_u}{\phi V_m} = \frac{52,76}{59,2} = 0,89 \quad \text{y} \quad \frac{M_u}{\phi M_m} = \frac{6231}{13013,3} = 0,48$$

Con estos nuevos valores, de la figura 5.20, tenemos que:

$$R = 0,93 < 1,0 \quad \text{OK}$$

La sección tiene un 7% de exceso de capacidad.

#### 5.4.2 SELECCIÓN DEL REFORZAMIENTO

A continuación revisaremos los requisitos para ver si el reforzamiento puede ser ubicado tan solo sobre un lado del alma de la viga.

Requisitos:

$$A_r \leq \frac{A_f}{3} \quad 1,4 \leq \frac{10,45 * 0,67}{3} = 2,33 \quad \text{OK}$$

$$\frac{a_0}{h_0} \leq 2,5 \quad \frac{39,37}{19,685} \leq 2,5 \quad 2 \leq 2,5 \quad \text{OK}$$

$$\frac{s_t}{t_w} \text{ ó } \frac{s_b}{t_w} \leq \frac{140}{\sqrt{F_y}} \leq \frac{140}{0,52} \leq \frac{140}{\sqrt{50}} \quad 9,6 \leq 19,8 \quad \text{OK}$$

$$\frac{M_u}{V_u d} \leq 20 \quad \frac{6231}{52,76 * 29,65} \leq 20 \quad 3,98 \leq 20 \quad \text{OK}$$

Por lo tanto, el reforzamiento puede ser ubicado solo sobre un lado del alma.

### 5.4.3 REVISIÓN DE ESTABILIDAD

- Barra

$$t_r = 0,5 \text{ in}$$

$$b_r = 2,75 \text{ in}$$

$$\text{Area} = t_r * b_r = 0,5 \text{ in} * 2,75 \text{ in} = 1,375 \text{ in}^2$$

$$A_r = 1,4 \text{ in} > 1,375 \text{ in} \quad OK$$

$$d_r = 4,98 - \frac{3}{16} = 4,79 \text{ in.}$$

- Estabilidad

$$\frac{b_r}{t_r} \leq \frac{140}{\sqrt{F_y}}$$

$$\frac{2,75}{0,5} \leq \frac{140}{\sqrt{50}}$$

$$5,5 \leq 19,8 \quad OK$$

### 5.4.4 RESISTENCIA DE LA SOLDADURA

- Resistencia de la soldadura a lo largo de la abertura

$$R_{wr} = \phi 2P_r = 0,90 * 2 * 70 = 126 \text{ kips}$$

- Resistencia de la soldadura dentro de cada extensión

$$R_{wr} = \phi F_y A_r = 0,9 * 50 * 1,375 = 61,87 \text{ kips}$$

- Extensiones del reforzamiento ( $\ell_1$ )

$$\ell_1 = \frac{A_r \sqrt{3}}{2t_w} = \frac{1,375 \sqrt{3}}{2(0,52)} = 2,3 \text{ in}$$

- Longitud total del reforzamiento ( $L_r$ )

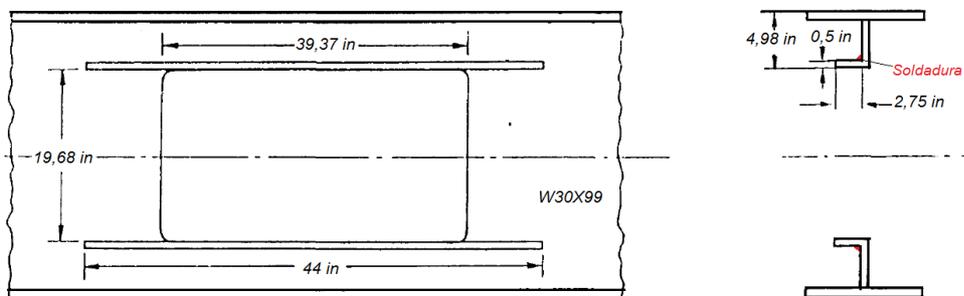
$$L_r = 39,37 + 2(2,3) = 44 \text{ in}$$

- Soldadura de filete

Usar electrodos E 70XX, los cuales tienen una resistencia al corte  $F_w$

$$F_w = 0,60 * 70 \text{ Ksi} = 42 \text{ ksi} \quad (\text{AISC 1986a})$$

En la figura 5.17 se muestra en detalle el reforzamiento a ser utilizado para las aberturas rectangulares ubicadas hasta dos metros de cada soporte de la viga.



**Figura 5. 17** Detalles del reforzamiento a utilizarse

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES

- De los resultados obtenidos en el análisis estructural de las diversas configuraciones de los alveolos se determina que la abertura del tipo “angelina” presenta los mejores resultados para casos de vigas secundarias vigas de alma aligerada.
- La distribución de esfuerzos de flexión en vigas con aberturas circulares, es más uniforme y lineal mientras más pequeñas sean las aberturas.
- El análisis de la carga crítica de pandeo es necesaria realizarlo para cada tipo de viga, ya que la esbeltez de alma ha aumentado y las condiciones de borde afectan aún más el problema de la inestabilidad de la viga de alma aligerada.
- El método de los elementos finitos resulta muy práctico y efectivo para el análisis de comportamiento estructural de las vigas de alma aligerada sujetas a diversas condiciones de trabajo y entorno.
- El tipo de perfil original obtenido en el diseño de vigas por el método de los esfuerzos permisibles puede ser utilizado para el análisis de las fallas que pueden ocurrir en las vigas de alma aligerada, si variamos los distintos parámetros que definen la distribución de los alveolos a lo largo de la viga.
- Los software de prediseño de vigas de alma aligerada brindan en enfoque de diseño superficial por lo que el estudio de este tipo de vigas requiere de un conocimiento general del diseño de elementos estructurales y complementado con un análisis por elementos finitos.
- El software ALGOR resulta ser una herramienta muy poderosa para el análisis de elementos mecánicos por elementos finitos.

- El método de diseño de la curva de interacción momento-cortante da resultados conservadores en el diseño de vigas de alma aligerada con y sin aberturas en el alma.
- Las curvas de rendimiento o predimensionamiento son útiles para poder definir el perfil base de una manera más rápida pero no tan exacta si la comparamos con el diseño de una viga en base a normas de diseño como las que presenta la AISC.
- La falla del pandeo del post-alma en general ocurre cuando existen grandes cargas puntuales que actúan sobre el post-alma o también cuando el ancho del post alma es muy pequeño en comparación con el diámetro de la abertura.
- La presencia de aberturas en el alma reduce la capacidad de momento máximo en una menor proporción que en la capacidad a cortante máximo de la viga.
- La distribución de los esfuerzos cortantes que no actúan en el plano de acción del momento flector no se los considera en el análisis de las vigas de alma aligerada ya que sus valores son pequeños en comparación con los esfuerzos cortantes que si actúan sobre dicho plano.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

- Debido a que con las aberturas se disminuye la resistencia de las vigas de alma aligerada sobre todos a esfuerzos cortantes, se recomienda que no se ubiquen aberturas donde dichos esfuerzos tengan valores muy altos.
- Se recomienda a parte de un análisis de esfuerzos por elementos finitos, también realizar un análisis de la influencia de las condiciones ambientales a las que va estar sujeta la viga, especialmente al de las altas temperaturas.
- Es recomendable que para evitar del pandeo lateral torsional de vigas de alma aligerada, se deban tener adecuadas condiciones de borde en la viga, especialmente del patín de compresión.
- Se recomienda para el análisis de las vigas de alama aligerada trabajar con algún otro software por elementos finitos más efectivo tal como ANSYS, con el

objeto de disminuir los tiempos entre simulaciones, más específicamente cuando se desea obtener la convergencia de la solución.

- La producción de vigas de alma aligerada resulta ser más costoso si no se lo hace en serie, por lo que se recomienda hacer también un estudio económico antes de aplicarlas para un proyecto.
- Se recomienda que para el análisis de todo tipo de vigas no solo se tenga en cuenta que el diseño sea seguro, sino también que se revise las deflexiones máximas permisibles, debido a que esta variable da un cierto grado de seguridad en el usuario.
- Se recomienda utilizar vigas de alma aligerada con formas de los alveolos circulares o del tipo “angelina” donde la apariencia física del entorno sea un factor importante de un determinado proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

- AISC Manual, (1989). *Allowable Stress Design and Plastic Design*, Capítulo F, Beams and other flexural member.
- ARCELOR MITTAL, (2008). *Vigas Alveolares ACB*. Artículo técnico
- ARCELOR MITTAL, (2008). *Viga Angelina*. Long Carbon Europe
- ASCE, (2005). *ASCE/SEI 7-05 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Estados Unidos.
- Askeland, D. R. (1987). *La Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Editorial Iberomérica. México.
- Crawley, W. (1992). *Estructuras de acero: análisis y diseño*; Editorial LIMUSA. Primera edición. México.
- Darwin, D. (1990). *Steel and Composite Beams with Web Openings*. Design Guide 2. American Institute of Steel Construction. Chicago.
- Erdal, F. (2011). *Ultimate Load capacity of Optimally Designed Cellular Beams*. Thesis MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY.
- FABSEC Ltd. (2006). *Design of FABSEC Cellular Beams in Non-composite and Composite Applications for both normal temperature and fire engineering conditions*.
- Gere, J. M. (2006). *Mecánica de materiales*; Sexta Edición.
- Husain M.U. and Speirs W.G. (1971). *Failure of castellated beams due to rupture of welded joints*. Acier-Stahl-Steel. Volume 1.
- Ko Chi Hang, (2002). *A Unified approach for steel and composite beams with web openings*. The Hong Kong Polytechnic University.
- Lawson, R.M, Hicks, S.J. (2006). *Design of beams with large openings for services*. Published by Steel Construction Institute. SCI Pre-Publication draft.
- McCormac, J. (2002). *Diseño de estructuras de acero Método LRFD*. 2da Edición. Editorial Alfa Omega. México.

- NEC, (2011). *Cargas y materiales*. Capítulo 1. Ecuador.
- Olander, H.C. (1953). *A method of calculating stresses in rigid frame corners*. Journal of ASCE.
- Popov, E. P. (1990). *Mecánica de sólidos*. Segunda Edición.
- Raftoyiannis, L. G., Ioannidis G. (2006). *Deflection of Castellated I-beams under transverse Loading*; Steel Structures. Grecia.
- Segui, W. (2000). *Diseño de estructuras de acero con LRFD*. 2da Edición.
- Thesis, *Cellular Beams at Ambient and Elevated Temperatures*.
- Toprac, A.A., Cooke, B.R., (1959). *An experimental investigation of open web beams*. Welding Research Council Bulletin. New York. Volume 47.
- Valarezo, D., Villagrán, O. (2006). *Estudio de la optimización de procesos de fabricación de vigas y columnas metálicas soldadas para estructuras de edificios*. Tesis Ingeniero Mecánico. Ecuador.
- Vassart, O. (2010). *Development of new types of curved and tapered cellular beams*. ARCELOR MITTAL. Journèè Construction Acier.
- Villacís, D. (2011). *Diseño y simulación por computador de una máquina peladora de soya hidratada con una capacidad de 50 kilogramos por hora*. Tesis EPN. Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Vinnakota, S. (2006). *Estructuras de acero: comportamiento y LRFD*. Primera Edición. Editorial McGraw-Hill. México.
- Wang, S., Cheng, J.J. (1995). *Shear behaviour of osbwood composite i-beams with web openings*. Canada.
- Ward, J.K. (1990). *Design of composite and non-composite cellular beams*. The Steel Construction Institute. SCI Publication 100.
- WESTOK, (2008). *Cellular Beams*. Engineers Design Guide.
- [http://www.mecapedia.uji.es/concentracion\\_de\\_tensiones.htm](http://www.mecapedia.uji.es/concentracion_de_tensiones.htm).
- [http://es.made-in-china.com/co\\_bjcdph/product\\_Light-Steel-Structure-for-Warehouse-ZM-Series-\\_hyuunnsry.html](http://es.made-in-china.com/co_bjcdph/product_Light-Steel-Structure-for-Warehouse-ZM-Series-_hyuunnsry.html).
- [http://ocw.uniovi.es/file.php/53/Teoria/Capitulo\\_VIII.pdf](http://ocw.uniovi.es/file.php/53/Teoria/Capitulo_VIII.pdf).

- <http://faberprocesosymateriales.blogspot.com/2012/12/proceso-de-laminacion.html>.
- [http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo\\_de\\_los\\_elementos\\_finitos](http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos).
- <http://www.arktec.com/espana/newsletter1210/vigasboyd.htm>.
- <http://www.steel-insdag.org/teachingmaterial/chapter28.pdf>.

## **ANEXOS**

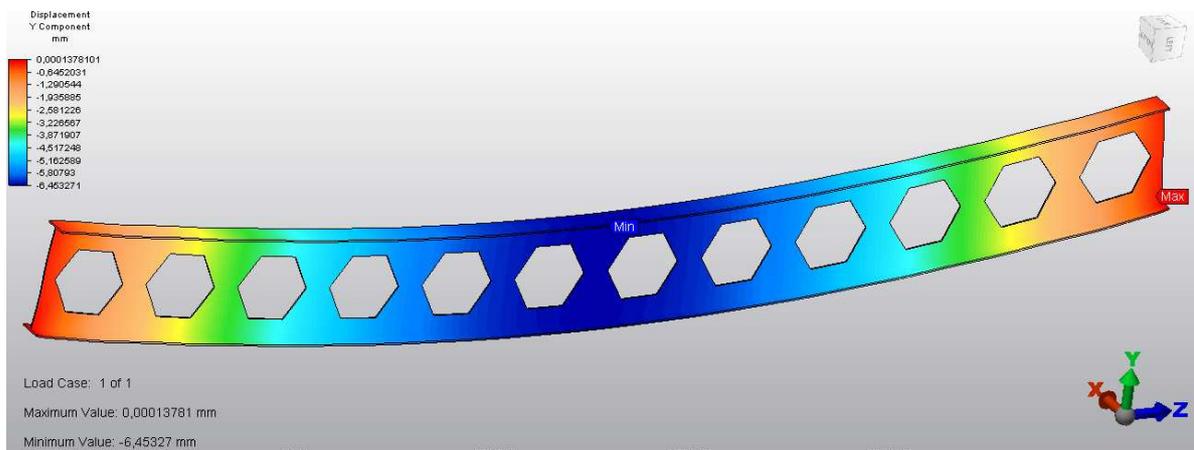
**ANEXO A**

**RESULTADOS SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS**

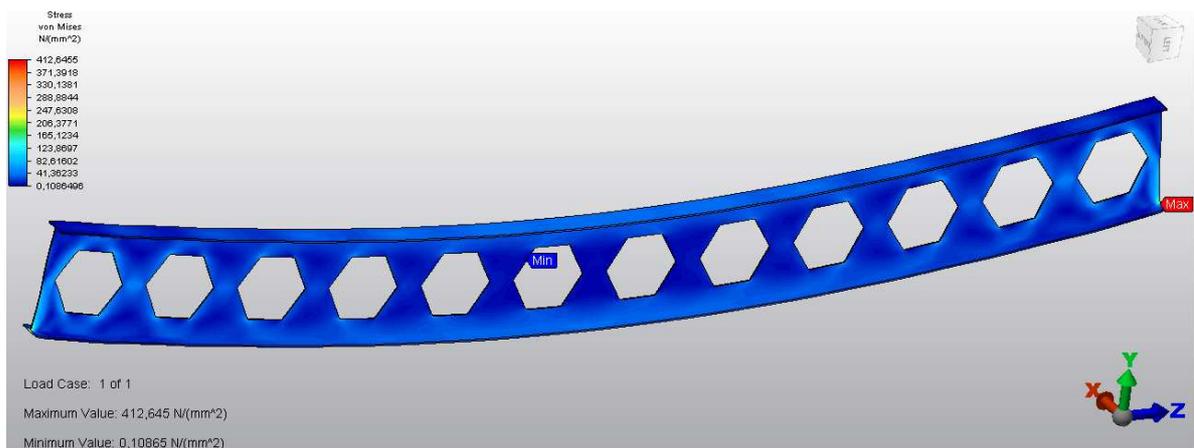
## ANÁLISIS DE ESFUERZOS LINEALES ESTÁTICOS

### ➤ Alveolos hexagonales

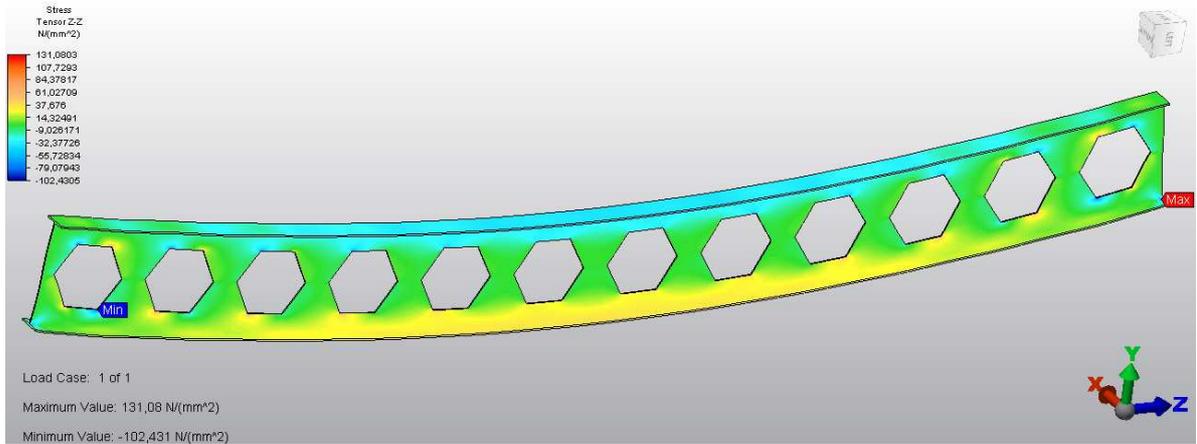
#### Deflexiones $\Delta Y$



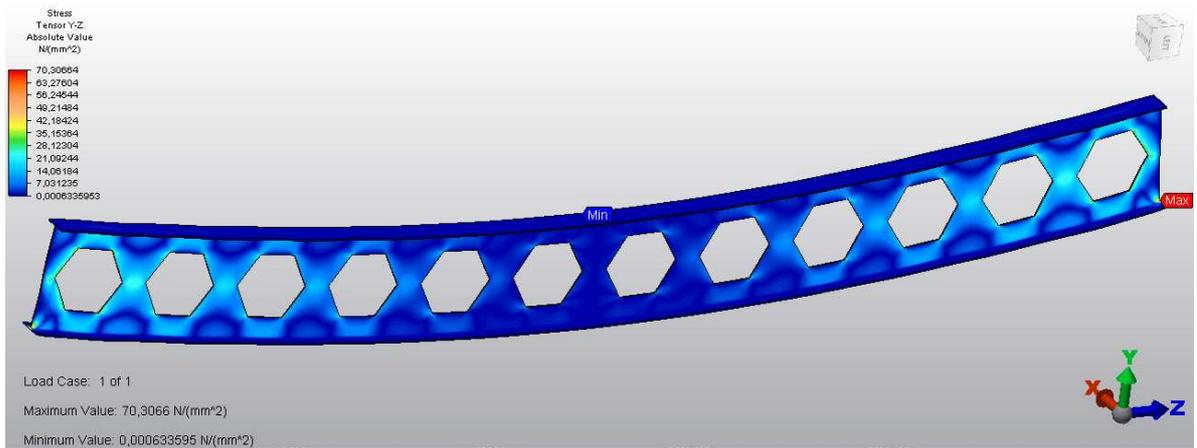
#### Esfuerzos $\sigma_{VM}$



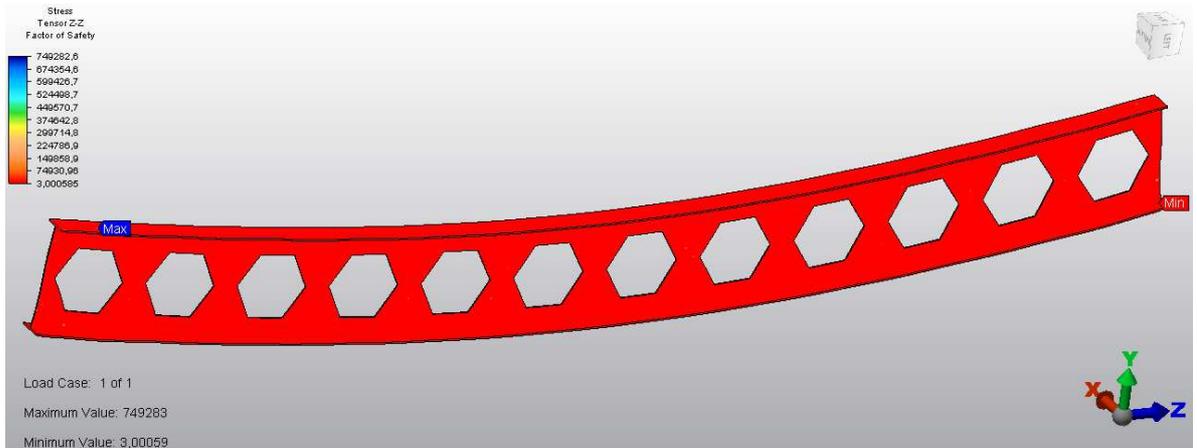
### Esfuerzos $T_{zz}$



### Esfuerzos cortantes $T_{yz}$

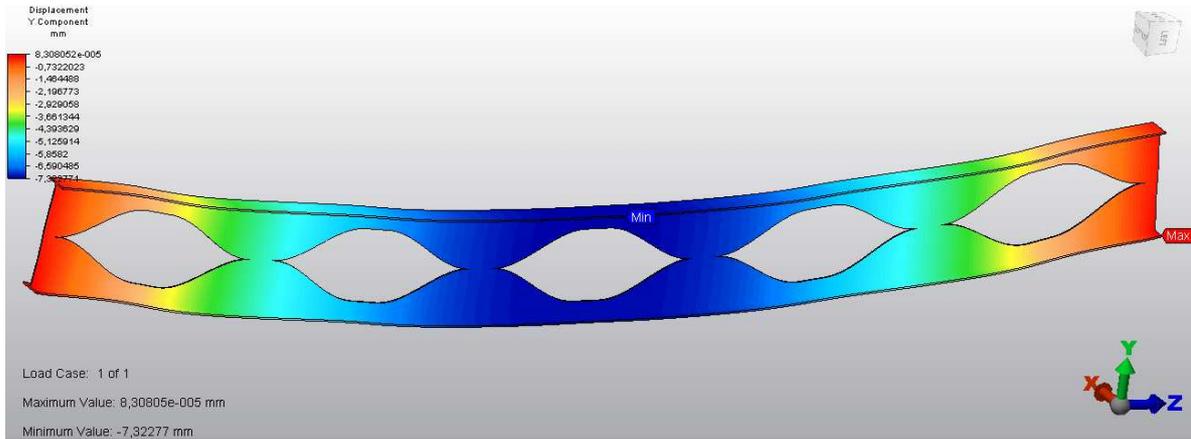


### Factores de seguridad $T_{zz}$

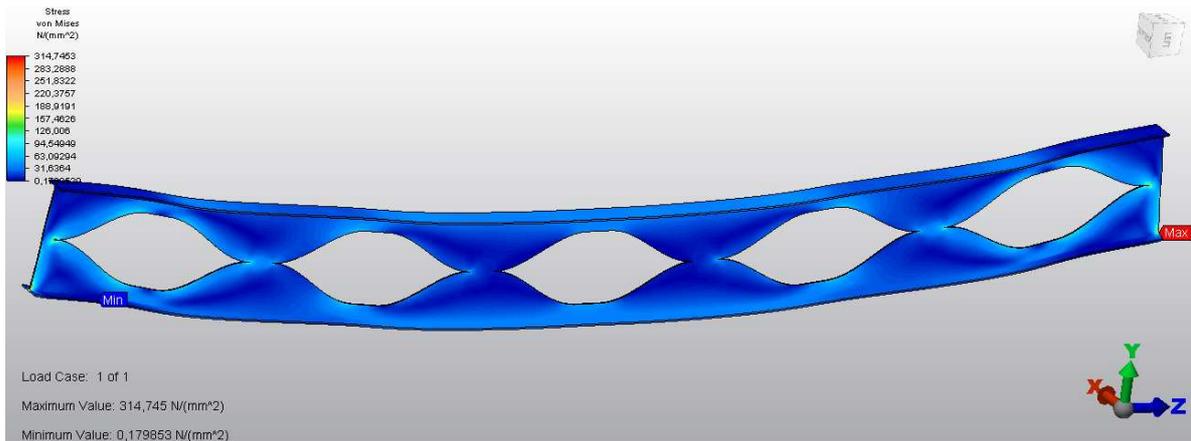


➤ *Alveolos angelina*

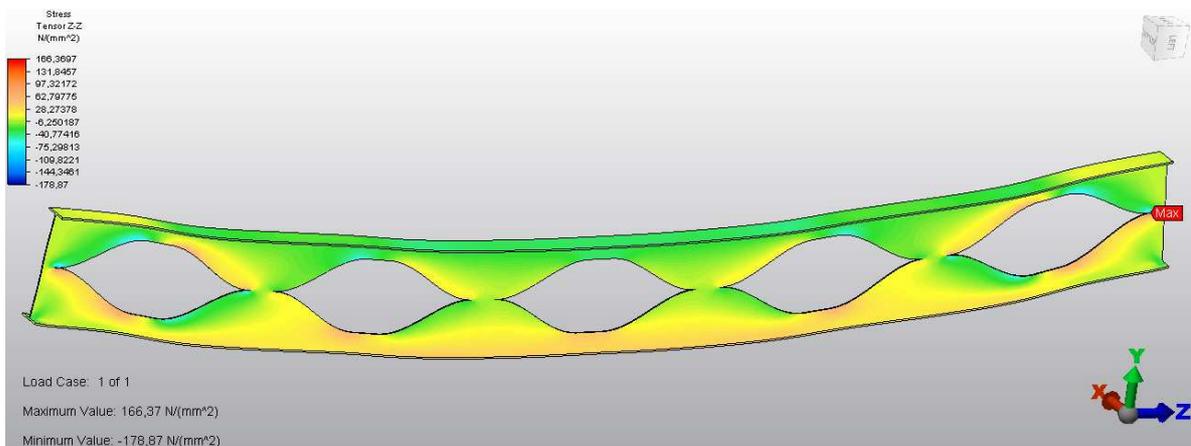
Deflexiones en el eje Y ( $\Delta Y$ )



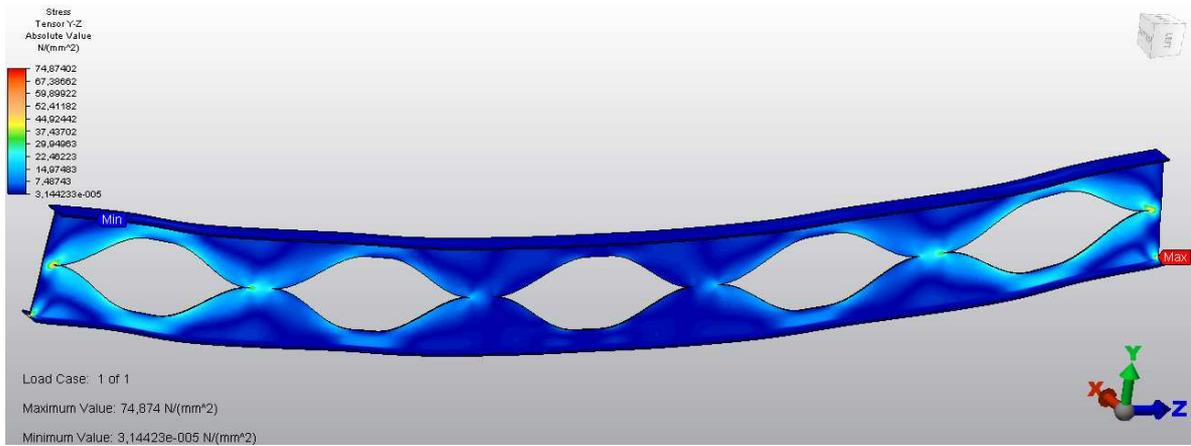
Esfuerzos  $\sigma_{VM}$



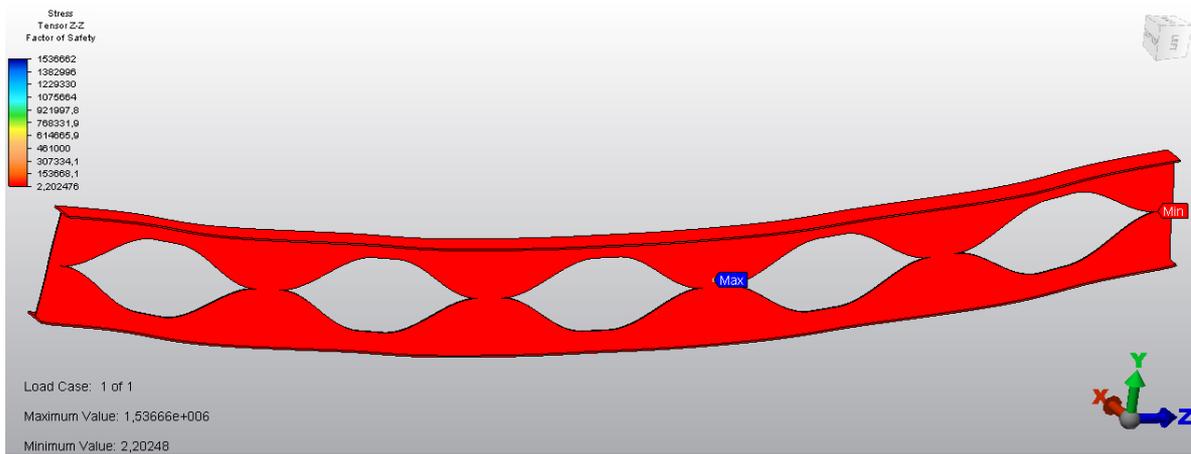
Esfuerzos  $T_{ZZ}$



### Esfuerzos cortantes $T_{yz}$

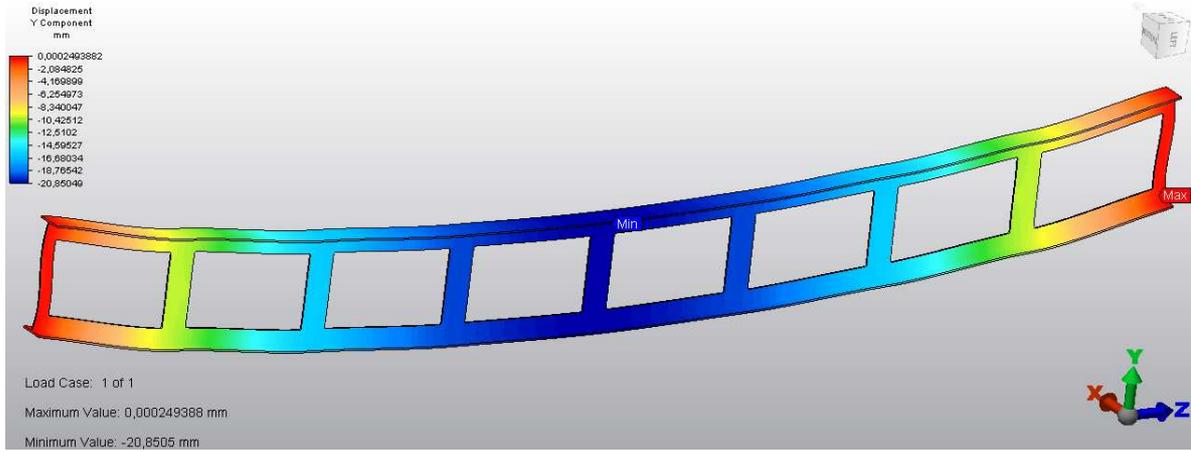


### Factores de seguridad $T_{zz}$

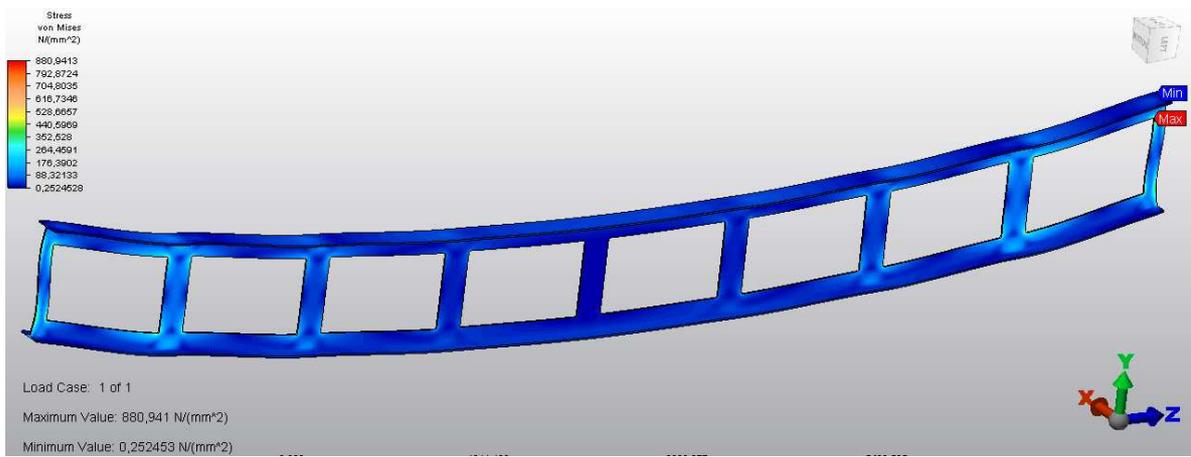


➤ *Alveolos rectangulares*

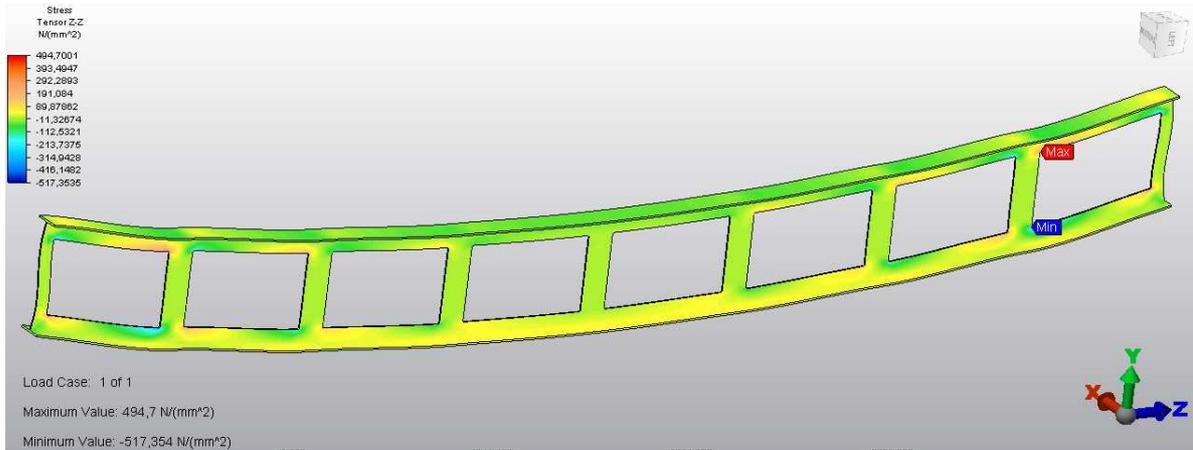
Deflexiones  $\Delta Y$



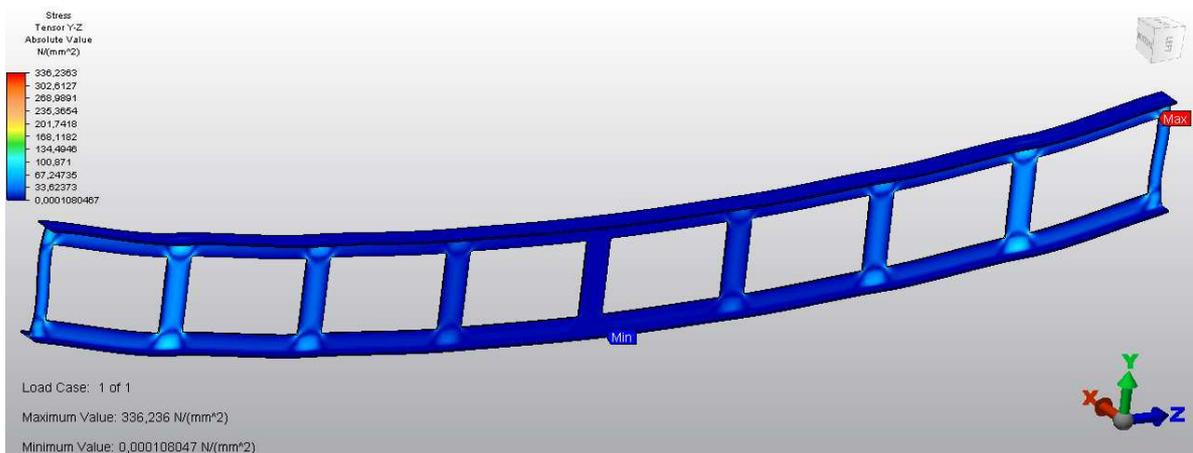
Esfuerzos  $\sigma_{VM}$



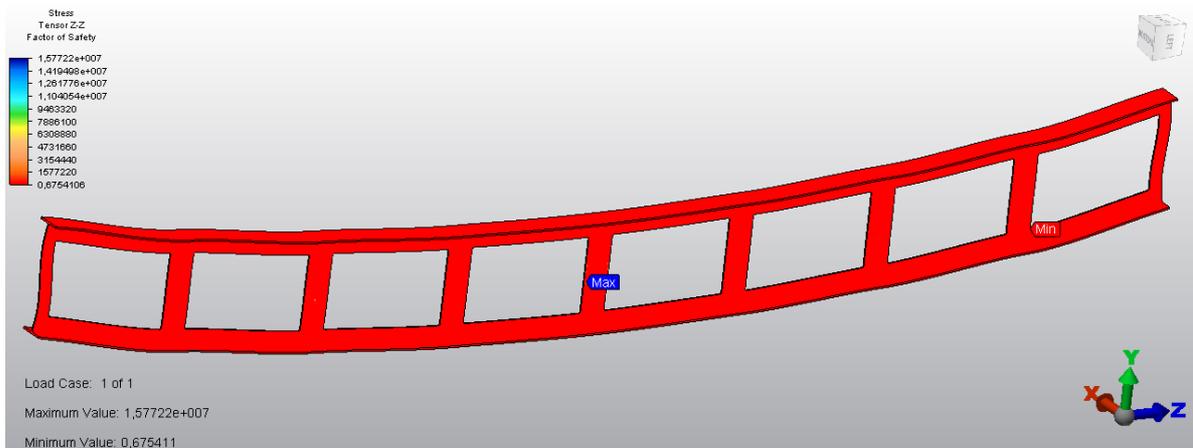
### Esfuerzos $T_{zz}$



### Esfuerzos cortantes $T_{yz}$

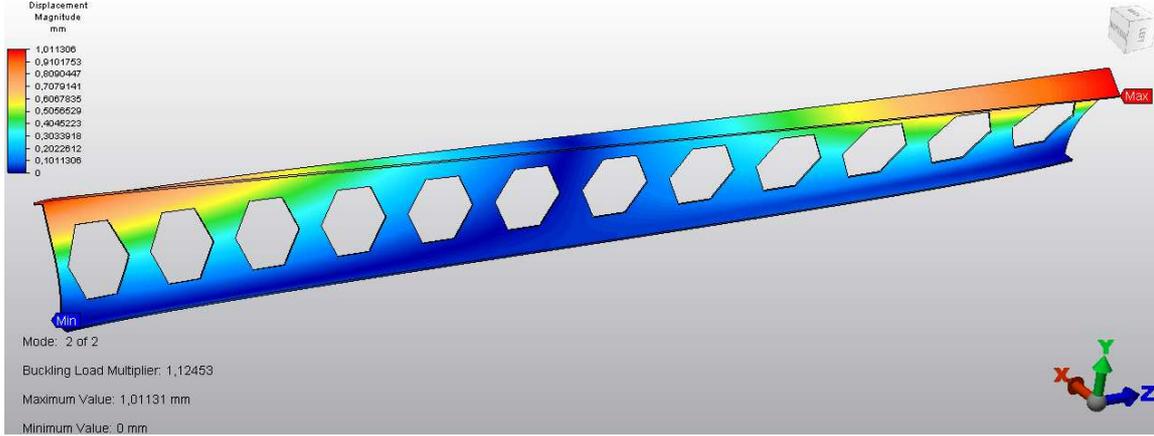
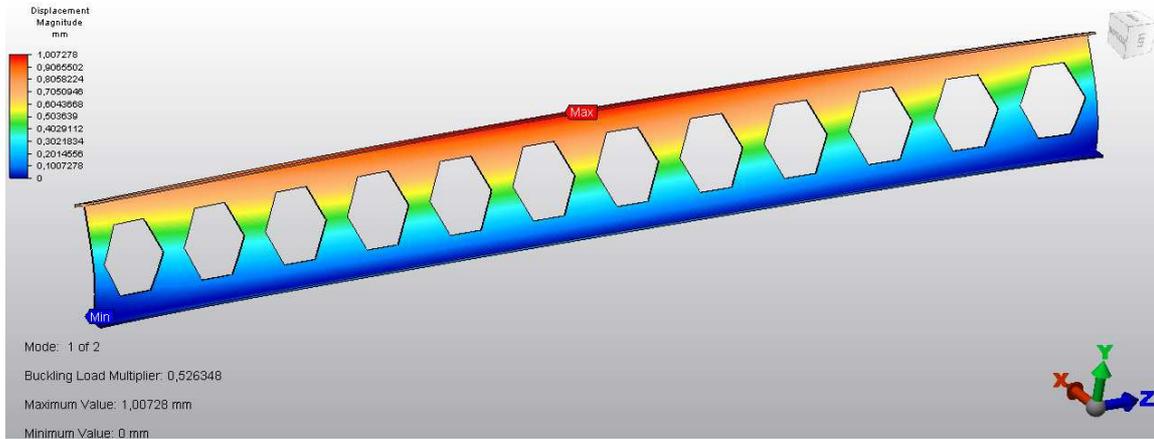


### Factores de seguridad $T_{zz}$

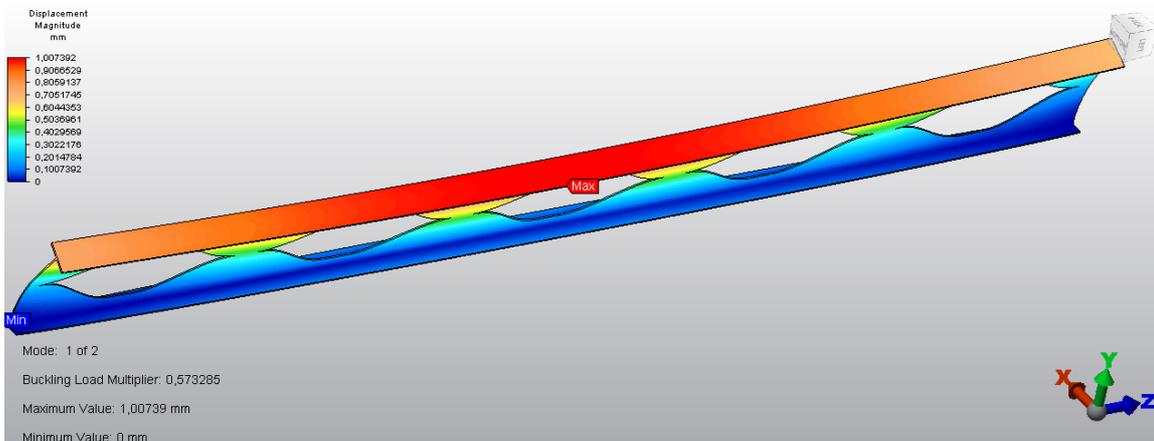


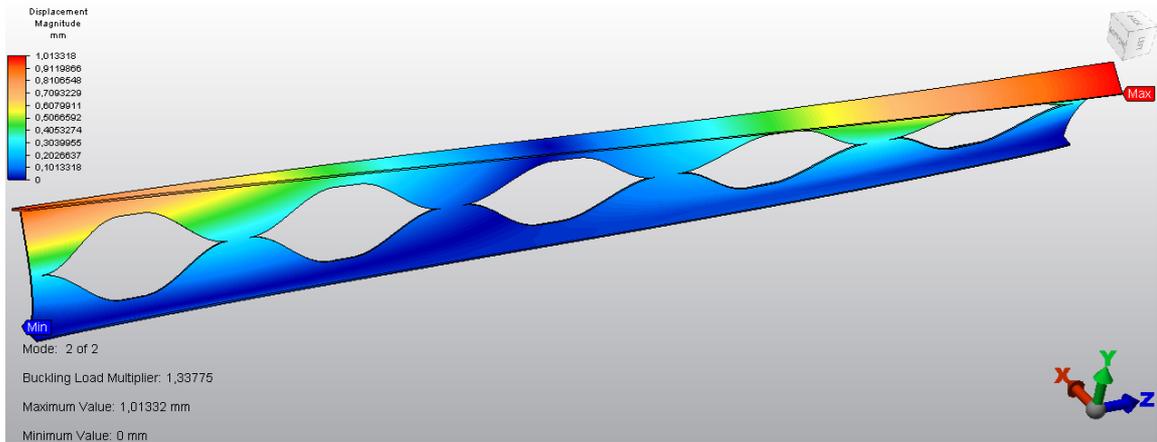
## ANÁLISIS DE CARGA CRÍTICA DE PANDEO

### ➤ Alveolos hexagonales

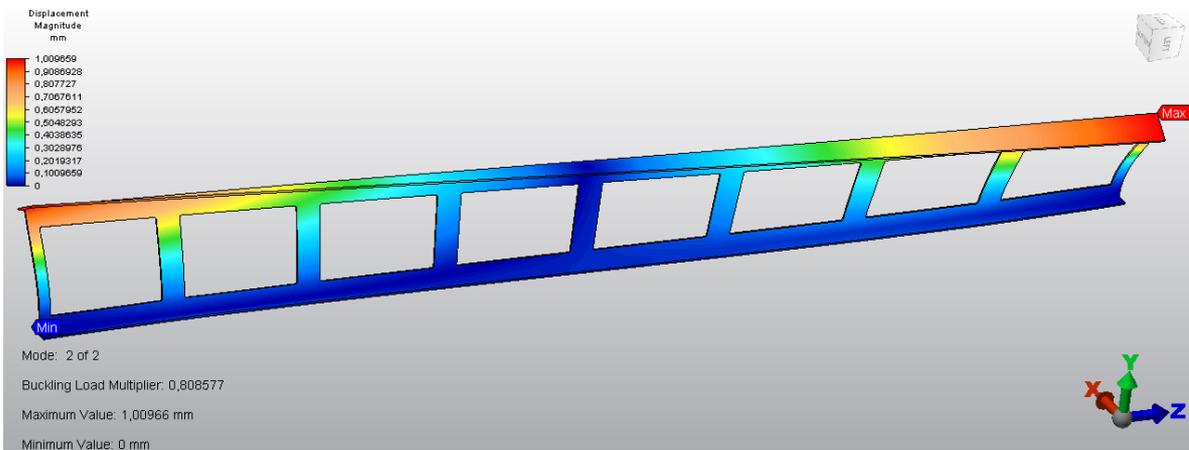
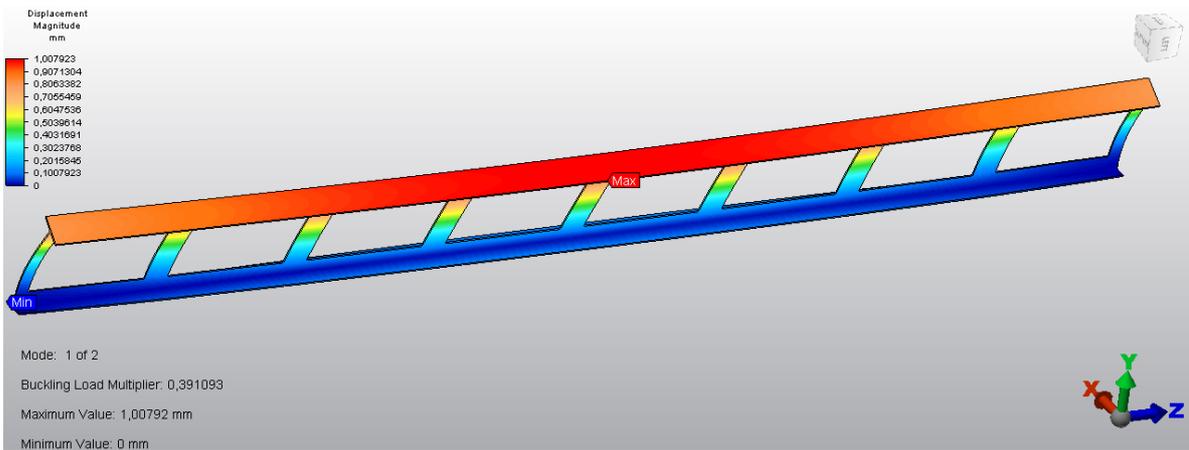


### ➤ Alveolos Angelina





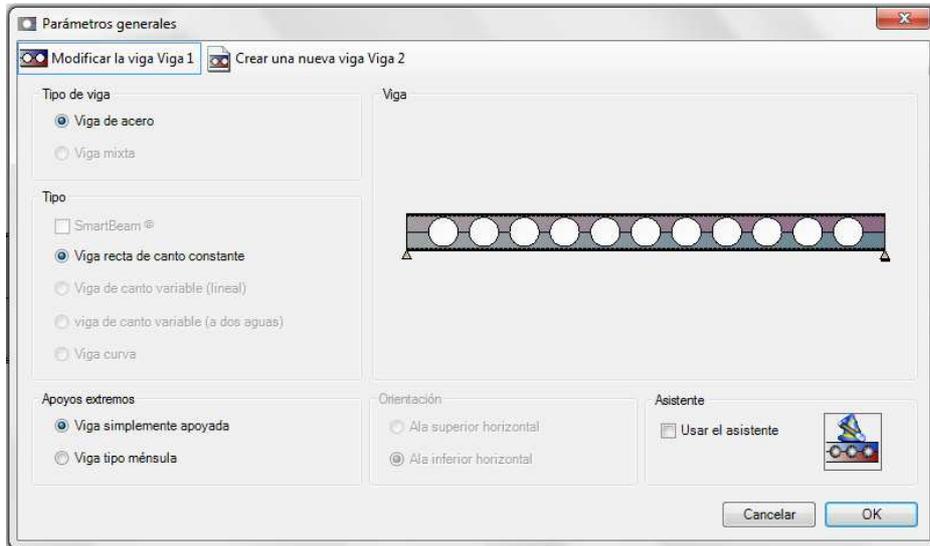
➤ *Alveolos rectangulares*



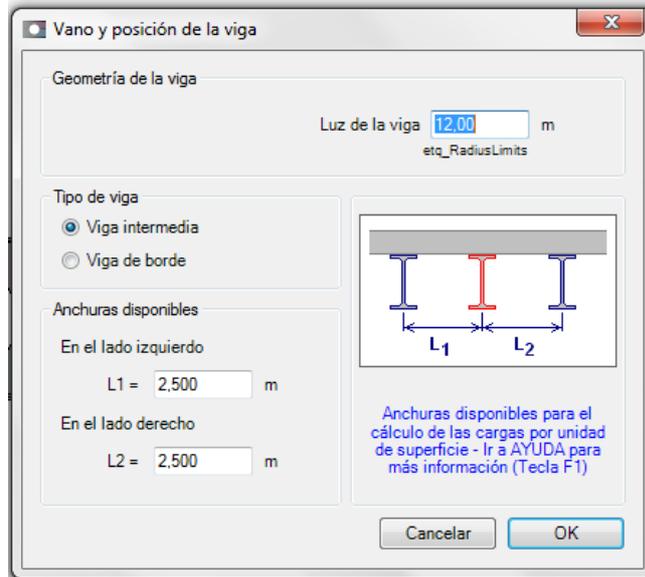
**ANEXO B**

**PREDISEÑO DE VIGAS DE ALMA ALIGERADA USANDO  
SOFTWARE ACB 2.07**

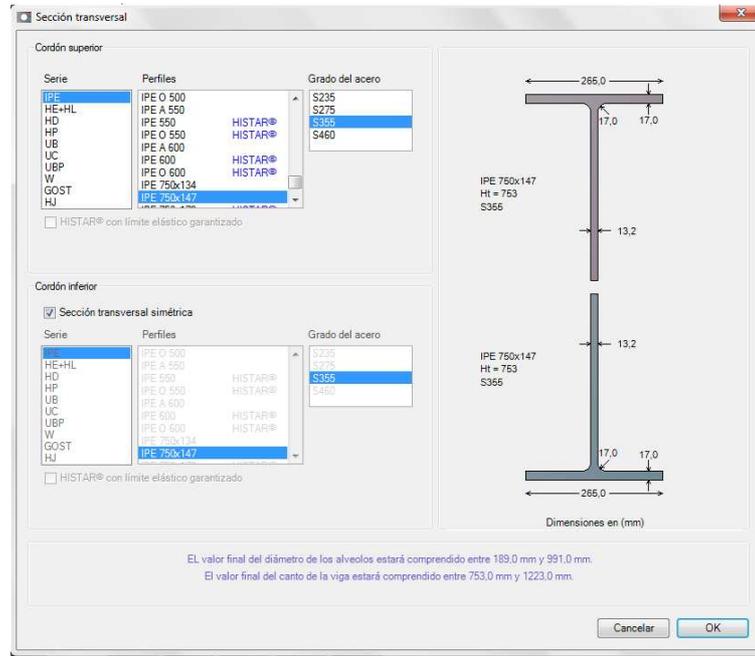
## Parámetros generales



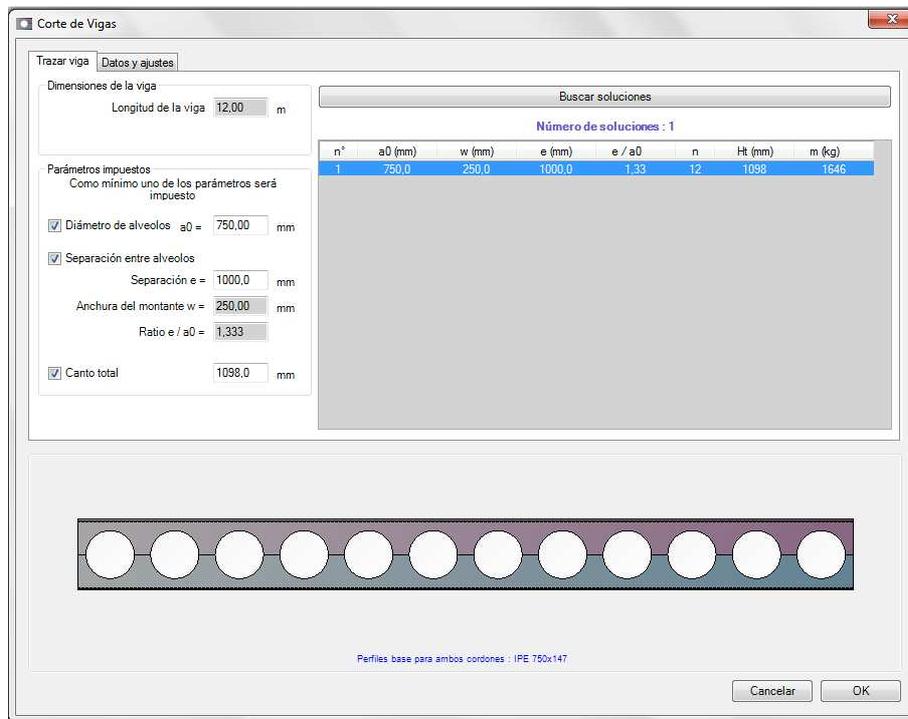
## Vano y posición de la viga



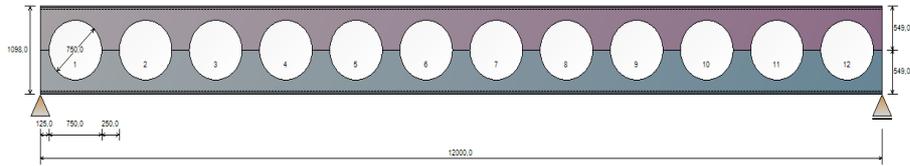
### Sección transversal



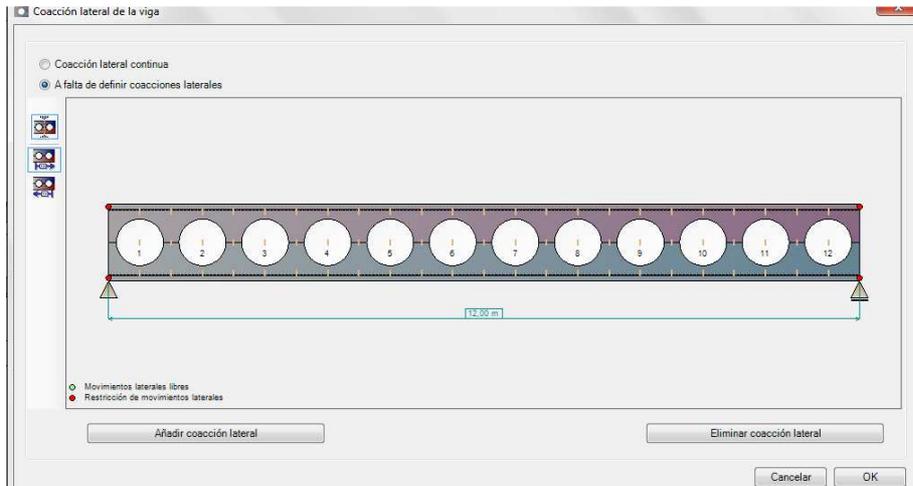
### Corte de la viga



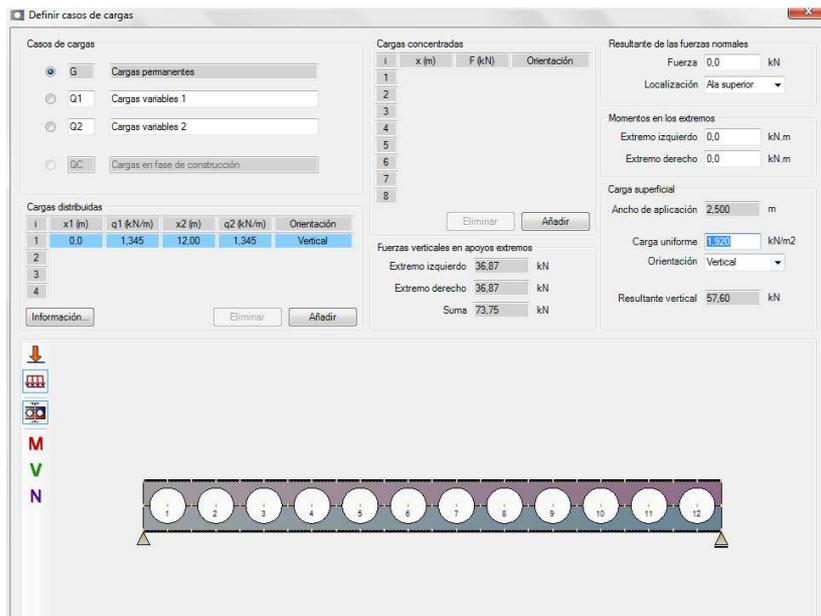
### Geometría de la viga



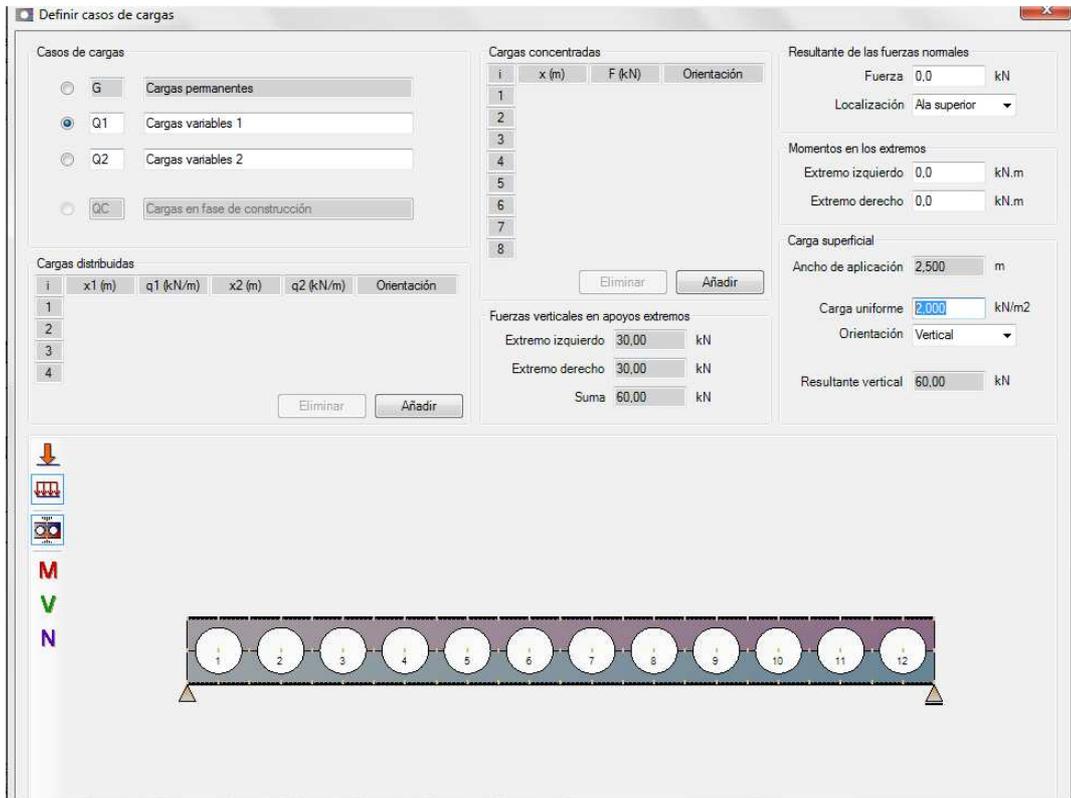
### Restricciones laterales



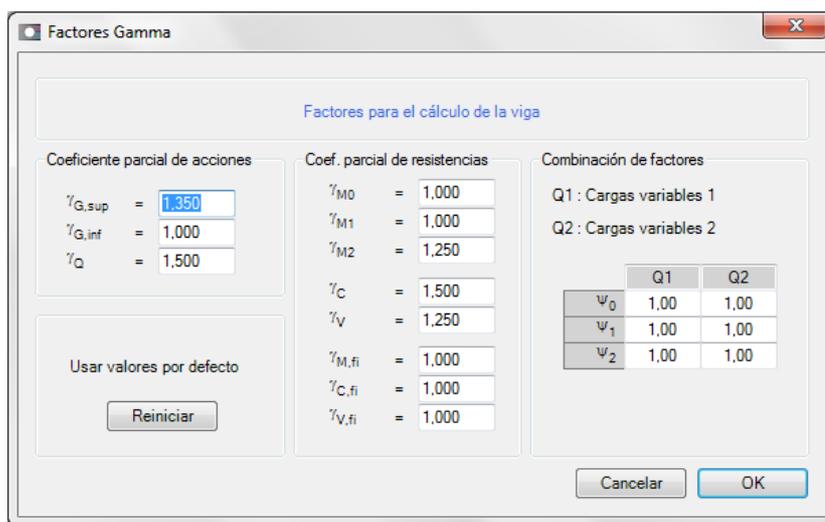
### Asignación de carga muerta (G)



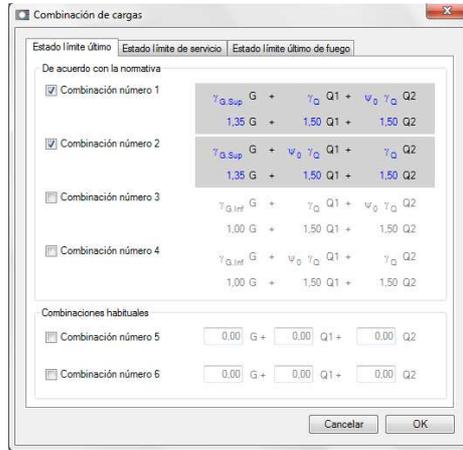
### Asignación de carga viva (Q1)



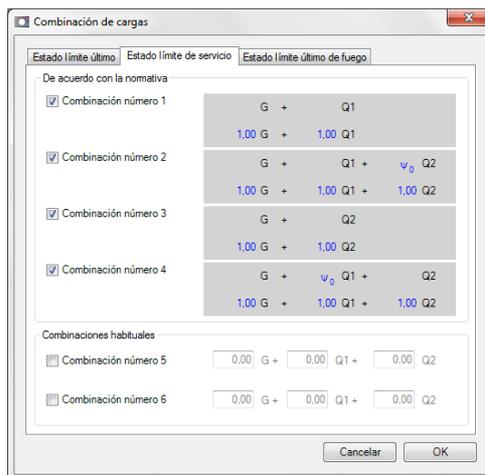
### Factores de carga (ARCELOR MITTAL)



### Combinaciones de carga (Estado Límite Último)



### Combinaciones de carga (Estado límite de servicio)



Definir casos de cargas

Casos de cargas

G Cargas permanentes

Q1 Cargas variables 1

Q2 Cargas variables 2

QC Cargas en fase de construcción

Cargas distribuidas

i	x1 (m)	q1 (kN/m)	x2 (m)	q2 (kN/m)	Orientación
1					
2					
3					
4					

Eliminar Añadir

Cargas concentradas

i	x (m)	F (kN)	Orientación
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

Eliminar Añadir

Fuerzas verticales en apoyos extremos

Extremo izquierdo 30,00 kN

Extremo derecho 30,00 kN

Suma 60,00 kN

Resultante de las fuerzas normales

Fuerza 0,0 kN

Localización Ala superior

Momentos en los extremos

Extremo izquierdo 0,0 kN.m

Extremo derecho 0,0 kN.m

Carga superficial

Ancho de aplicación 2,500 m

Carga uniforme 8,000 kN/m<sup>2</sup>

Orientación Vertical

Resultante vertical 60,00 kN

M  
V  
N

➤ Resultados obtenidos

Fuerzas

*Under ULS Combinations*

$$U1 = 1,35 G + 1,50 Q1$$

Reactions at supports :

Left end :  $R_{Av} = 94,78 \text{ kN}$   
 Right end :  $R_{Bv} = 94,78 \text{ kN}$

Maximum moment :

$M_{Max} = 284,3 \text{ kNm}$  in section no 13

Maximum shear force :

$V_{Max} = -94,78 \text{ kN}$  in section no 1

## Resistencias (Estado limite último)

### ULTIMATE LIMIT STATES (ULS)

Note: the calculation method applies to steel rolled profiles only.

#### Summary of the criteria

S = Satisfactory NS = Not satisfactory

#### Checkings of net sections at openings

Resistance to bending moment (Open. no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{M,max}$	= 0,157	< 1	S
Resistance to normal force (Open. no 6 - Comb. U1) :	$\Gamma_{N,max}$	= 0,116	< 1	S
Resistance to shear force (Open. no 5 - Comb. U1) :	$\Gamma_{V,max}$	= 0,090	< 1	S
Resistance to M+N interaction (Open. no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{MN,max}$	= 0,164	< 1	S
Resistance to N+V interaction (Open. no 6 - Comb. U1) :	$\Gamma_{NV,max}$	= 0,116	< 1	S
Resistance to M+V interaction (Open. no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{MV,max}$	= 0,157	< 1	S
Resistance to M+N+V interaction (Open. no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{MNV,max}$	= 0,164	< 1	S

#### Web checkings

Shear buckling check required (Post no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{Vbw,max}$	= 0,038	< 1	S
--	--------------------	---------	-----	---

#### Posts checkings

Resistance to shear (Post no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{Vh,max}$	= 0,114	< 1	S
Resistance to buckling (Post no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{b,max}$	= 0,139	< 1	S
Minimum throat thickness (Post no 1 - Comb. U1) :	$a_{min}$	= 0,59 mm		
Warning : the throat thickness of the fillet weld must be at least 3 mm (EC3)				

#### Gross sections checkings

Resistance to bending (Post no 6 - Comb. U1) :	$\Gamma_{Mg,max}$	= 0,109 (Classe 3)	< 1	S
Resistance to shear (Left end - Comb. U1) :	$\Gamma_{Vg,max}$	= 0,031	< 1	S

#### Other checkings

Resistance to lateral torsional buckling	$\Gamma_{LT,max}$	= 0,782	< 1	S
--	-------------------	---------	-----	---

## Deflexiones (Estado Límite de Servicio)

### Deflections

$v$  : Maximum vertical deflection of the beam

#### Under elementary load cases

Permanent loads (G) :	$v = 2,87$ mm (S13)	= L / 4176
Live loads 1 (Q1) :	$v = 2,34$ mm (S13)	= L / 5132

#### Under SLS Combinations

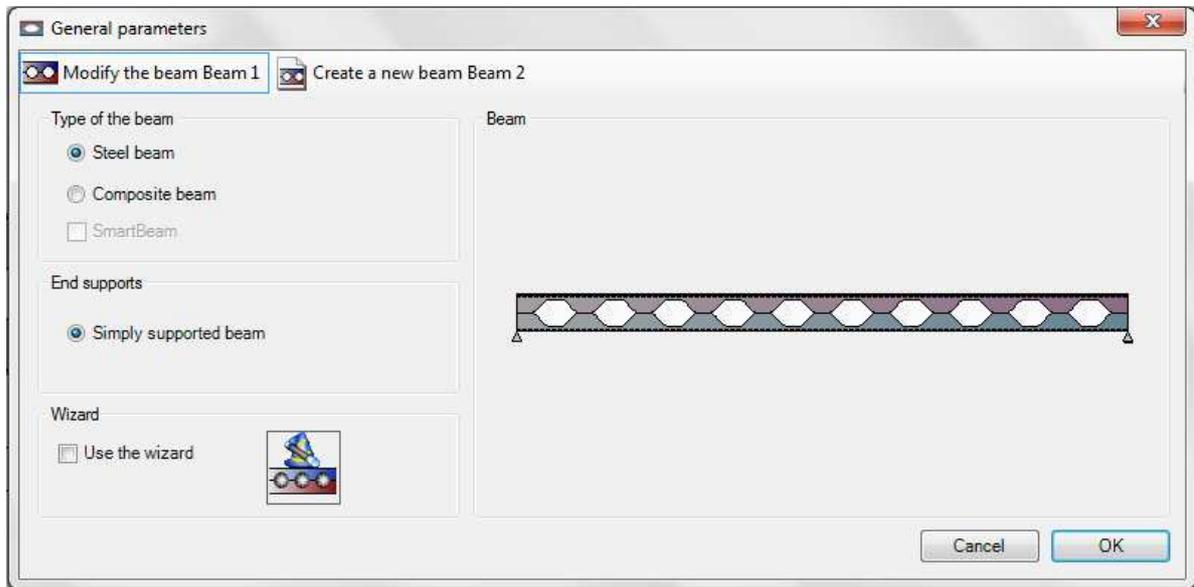
S1 = 1,00 G + 1,00 Q1 :	$v = 5,21$ mm (S13)	= L / 2302
S2 = 1,00 G + 1,00 Q1 :	$v = 5,21$ mm (S13)	= L / 2302
S3 = 1,00 G :	$v = 2,87$ mm (S13)	= L / 4176
S4 = 1,00 G + 1,00 Q1 :	$v = 5,21$ mm (S13)	= L / 2302

The user has to check whether the deflections are acceptable according to the project requirements and to consider a precambering if necessary.

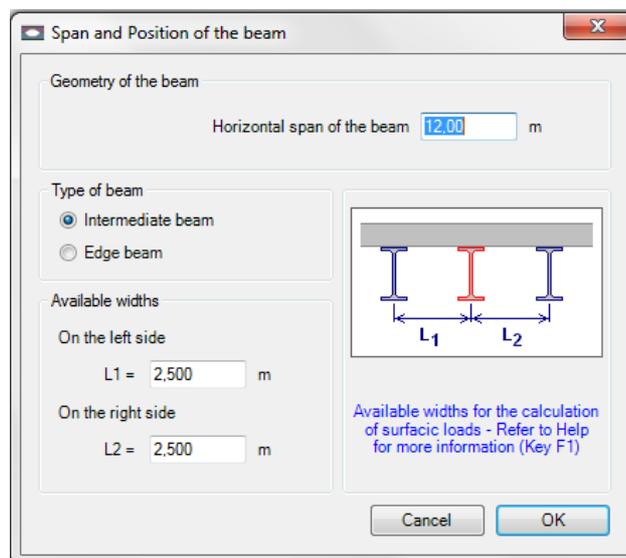
**ANEXO C**

**PREDISEÑO DE VIGAS DE ALMA ALIGERADA USANDO EL  
SOFTWARE ANGELINA V 2.01**

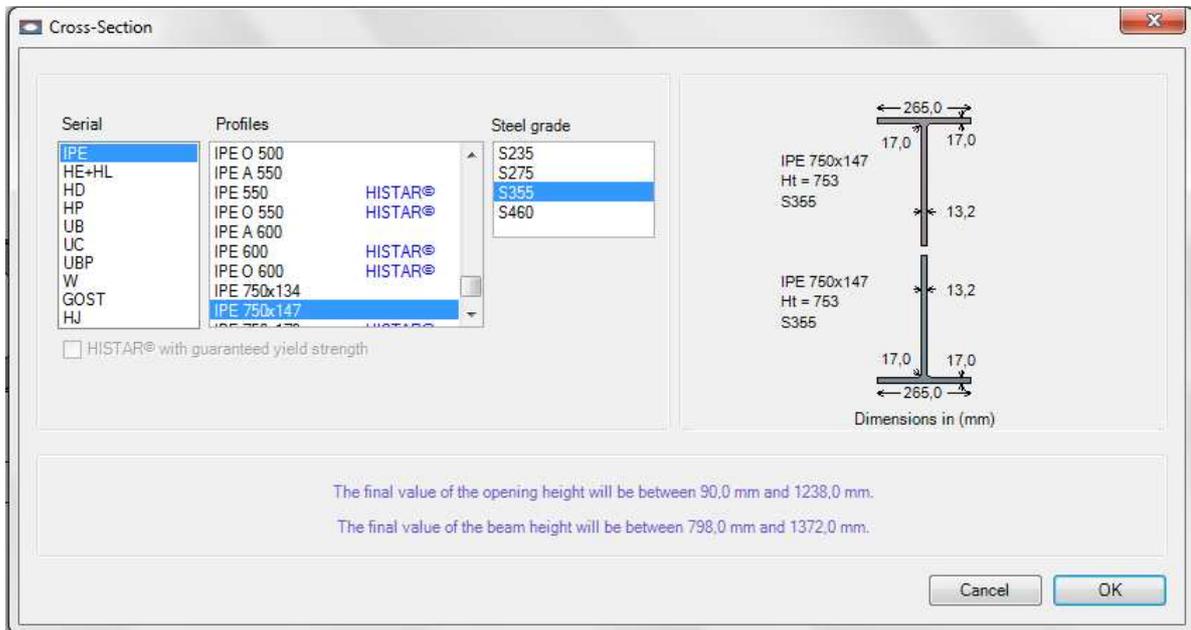
## Parámetros generales



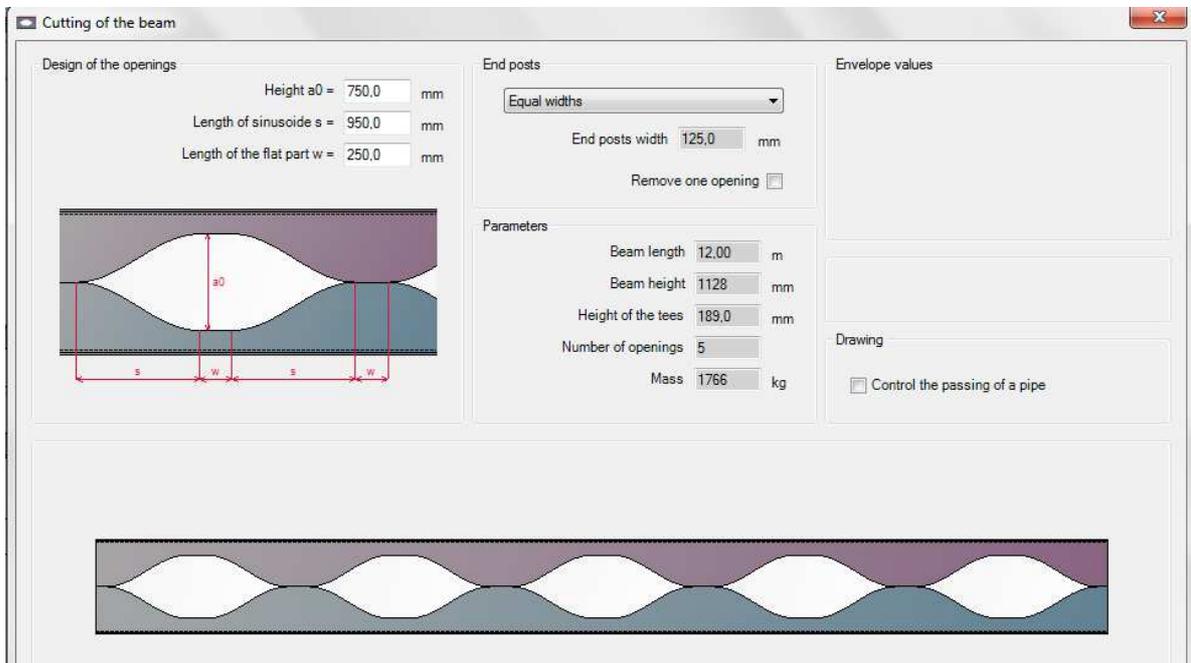
## Vano y posición de la viga



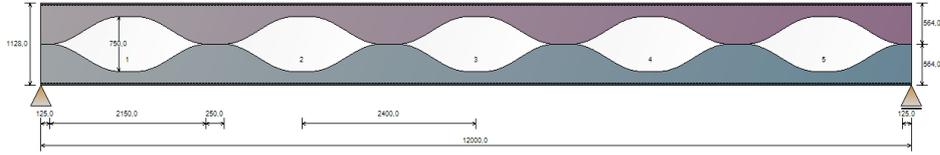
## Sección transversal



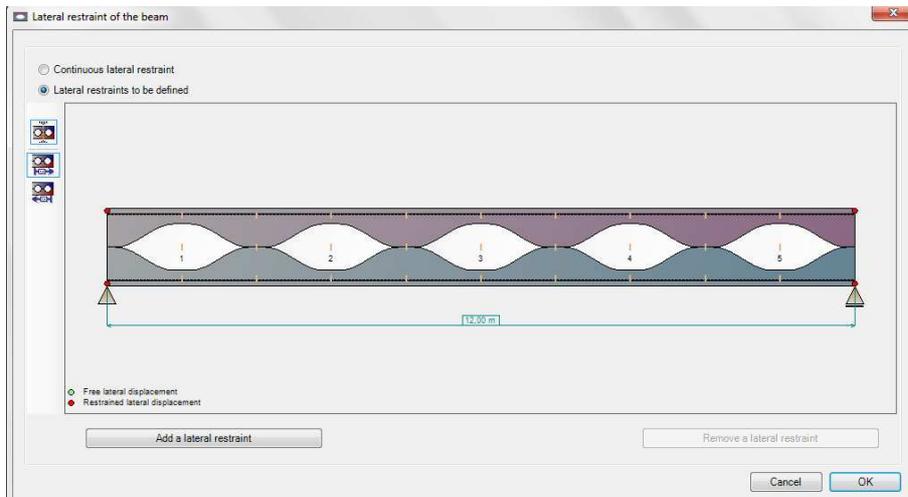
## Corte de la viga



### Geometría de la viga



### Restricciones laterales



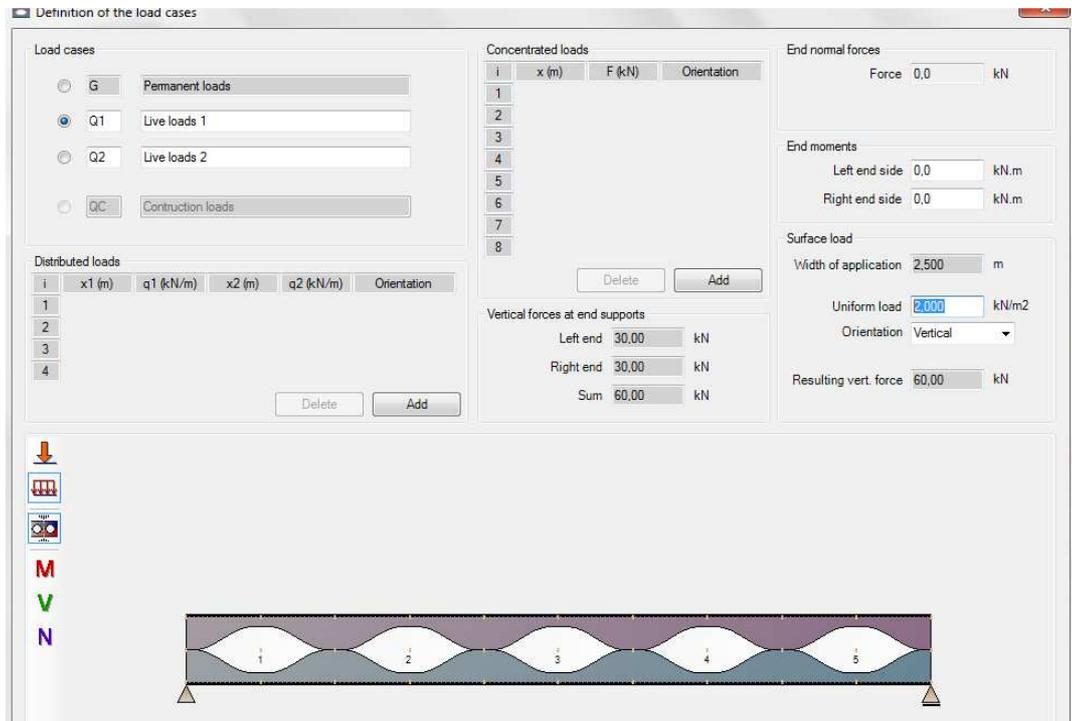
### Asignación de carga permanente (G)

i	x1 (m)	q1 (kN/m)	x2 (m)	q2 (kN/m)	Orientation
1	0,0	1,444	12,00	1,444	Vertical
2					
3					
4					

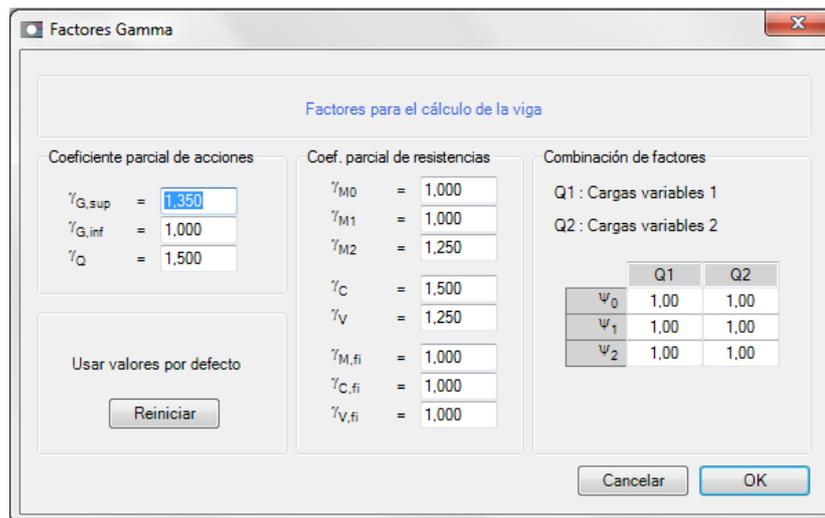
i	x (m)	F (kN)	Orientation
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

Left end	37,46 kN
Right end	37,46 kN
Sum	74,93 kN

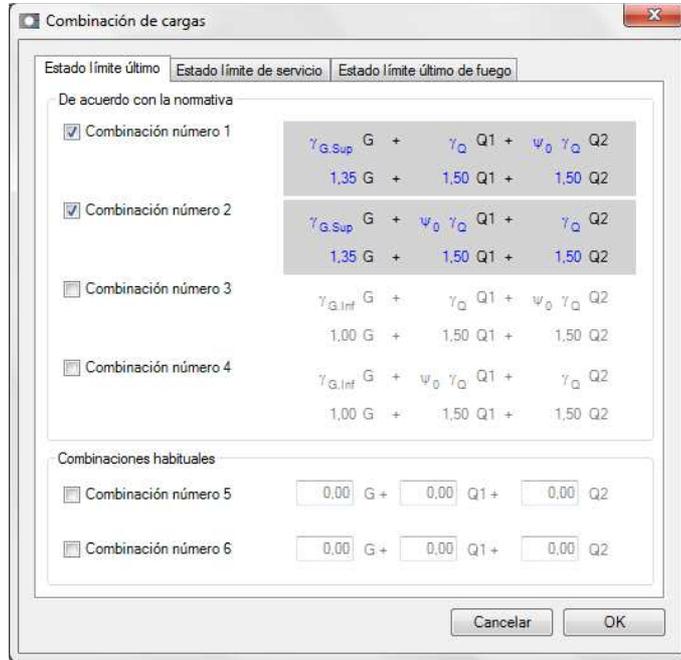
## Asignación de carga viva (Q1)



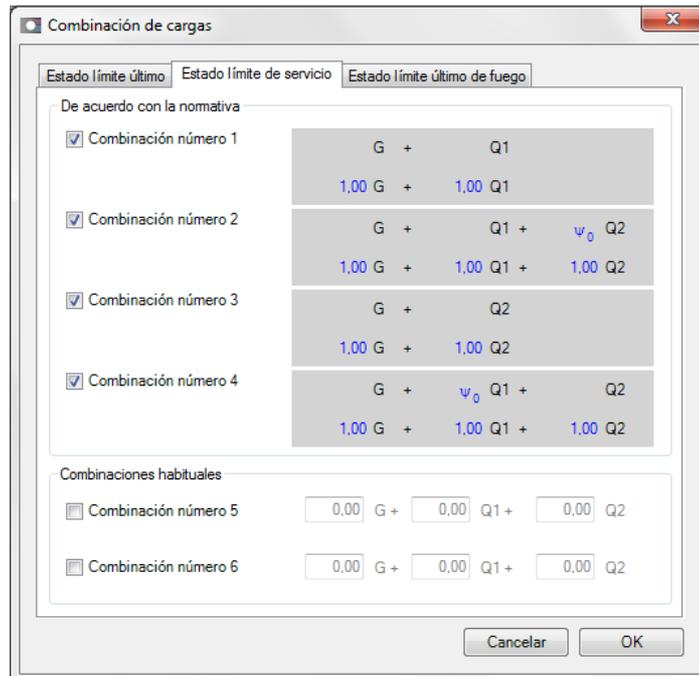
## Factores de carga (ARCELOR MITTAL)



### Combinaciones de carga (Estado Límite Último)

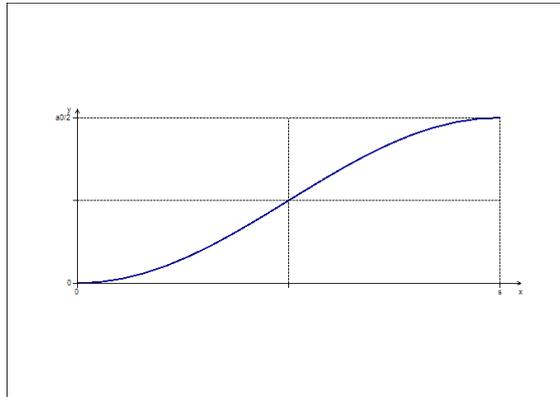


### Combinaciones de carga (Estado límite de servicio)



➤ Resultados obtenidos

Forma de la abertura



Equation of the sinusoid :

$$y = (a_0 / 4) [1 + \sin(\pi x / s - \pi/2)]$$

$$a_0 = 750 \text{ mm}$$

$$s = 950 \text{ mm}$$

Fuerzas

*Under ULS Combinations*

$$U1 = 1,35 G + 1,50 Q1$$

**Reactions at supports :**

Left end :  $R_{Av} = 95,57 \text{ kN}$

Right end :  $R_{Bv} = 95,57 \text{ kN}$

**Maximum moment :**

$M_{Max} = 286,7 \text{ kNm}$  in section no 7

**Maximum shear force :**

$V_{Max} = -95,57 \text{ kN}$  in section no 1

## Resistencia (Estado límite último)

### ULTIMATE LIMIT STATES (ULS)

**Note: the calculation method applies to steel rolled profiles only.**

#### Summary of the criteria

S = Satisfactory NS = Not satisfactory

#### Checkings of net sections at openings

Resistance to shear force (Open. no 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{V,max}$	= 0,068	< 1	S
Resistance to M+N interaction (Open. no 5 - Comb. U1) :	$\Gamma_{MN,max}$	= 0,187	< 1	S
Resistance to M+N+V interaction (Open. no 5 - Comb. U1) :	$\Gamma_{MNV,max}$	= 0,187	< 1	S

#### Web checkings

Shear buckling check required (Post no 4 - Comb. U1) :	$\Gamma_{Vbw,max}$	= 0,028	< 1	S
--	--------------------	---------	-----	---

#### Posts checkings

Resistance to shear (Post no 5 - Comb. U1) :	$\Gamma_{Vh,max}$	= 0,224	< 1	S
Minimum throat thickness				
Intermediate posts (Post no 1 - Comb. U1) :	$a_{min}$	= 1,00 mm		
End posts (Post no 5 - Comb. U1) :	$a_{min}$	= 4,25 mm		
<i>The calculation for end posts does not take into account the details of the joint</i>				

Warning : the throat thickness of the fillet weld must be at least 3 mm (EC3)

#### Gross sections checkings

Resistance to bending (Post no 2 - Comb. U1) :	$\Gamma_{Mg,max}$	= 0,102 (Classe 3)	< 1	S
Resistance to shear (Left end - Comb. U1) :	$\Gamma_{Vg,max}$	= 0,030	< 1	S

#### Other checkings

Resistance to lateral torsional buckling	$\Gamma_{LT,max}$	= 0,776	< 1	S
--	-------------------	---------	-----	---

## Deflexiones (Estado Límite de Servicio)

### Deflections

v : Maximum vertical deflection of the beam

#### Under elementary load cases

Permanent loads (G) :	v = 2,85 mm (S7)	= L / 4214
Live loads 1 (Q1) :	v = 2,28 mm (S7)	= L / 5263

#### Under SLS Combinations

S1 = 1,00 G + 1,00 Q1 :	v = 5,13 mm (S7)	= L / 2340
S2 = 1,00 G + 1,00 Q1 :	v = 5,13 mm (S7)	= L / 2340
S3 = 1,00 G :	v = 2,85 mm (S7)	= L / 4214
S4 = 1,00 G + 1,00 Q1 :	v = 5,13 mm (S7)	= L / 2340

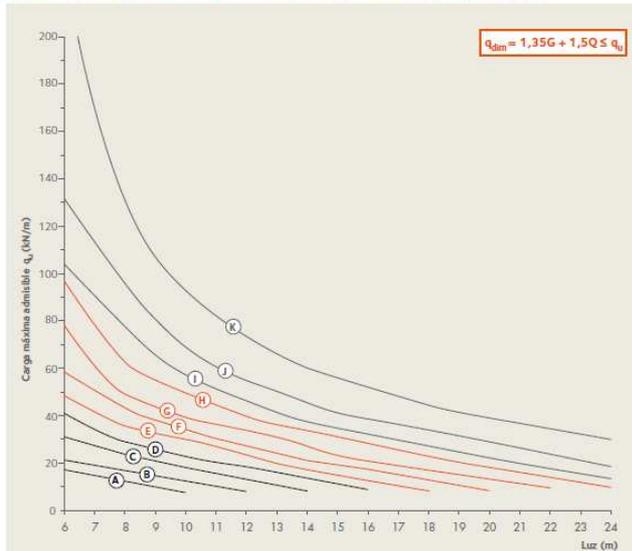
The user has to check whether the deflections are acceptable according to the project requirements and to consider a precambering if necessary.

**ANEXO D**

**ÁBACOS DE PREDIMENSIONAMIENTO PARA VIGAS ACB**

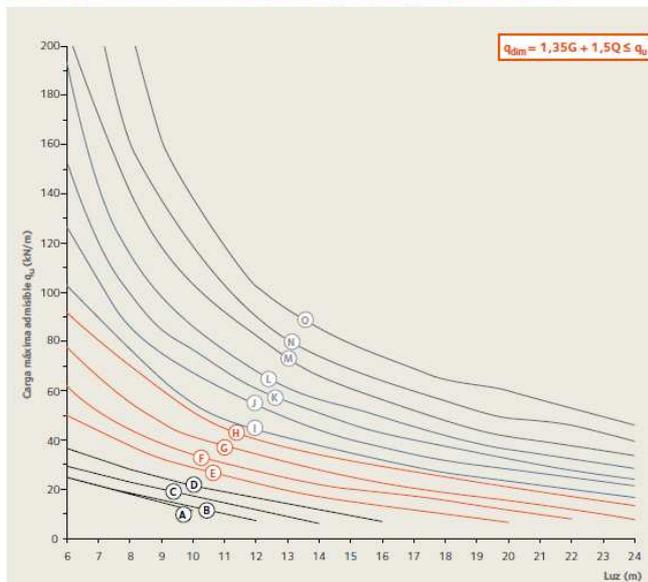
Cubiertas (S= 1,25 ao)

Ábaco 1: Sección de Acero – Perfil de base IPE. S = 1,25 a<sub>0</sub> - Clase S355



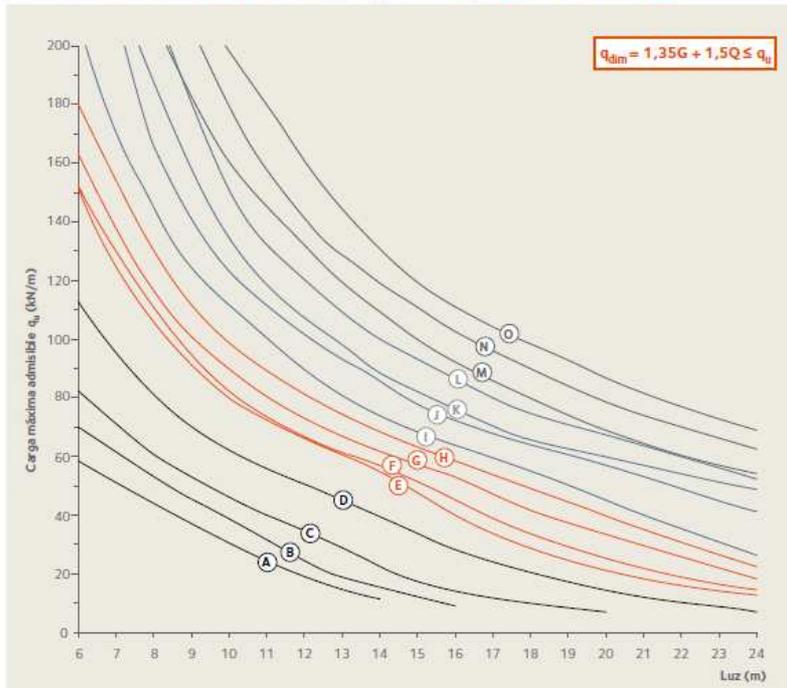
- A = IPE 200 (a<sub>0</sub>-210, S-260, H-294)
- B = IPE 240 (a<sub>0</sub>-250, S-310, H-353)
- C = IPE 300 (a<sub>0</sub>-315, S-390, H-445)
- D = IPE 330 (a<sub>0</sub>-345, S-430, H-489)
- E = IPE 360 (a<sub>0</sub>-380, S-480, H-535)
- F = IPE 400 (a<sub>0</sub>-420, S-530, H-594)
- G = IPE 450 (a<sub>0</sub>-475, S-590, H-672)
- H = IPE 500 (a<sub>0</sub>-525, S-660, H-745)
- I = IPE 550 (a<sub>0</sub>-580, S-730, H-822)
- J = IPE 600 (a<sub>0</sub>-630, S-790, H-896)
- K = IPE 750X147 (a<sub>0</sub>-790, S-990, H-1127)

Ábaco 2: Sección de Acero – Perfil de base HEA. S = 1,25 a<sub>0</sub> - Clase S355



- A = HEA 200 (a<sub>0</sub>-180, S-230, H-268)
- B = HEA 220 (a<sub>0</sub>-220, S-280, H-307)
- C = HEA 240 (a<sub>0</sub>-240, S-300, H-338)
- D = HEA 280 (a<sub>0</sub>-285, S-360, H-399)
- E = HEA 320 (a<sub>0</sub>-325, S-410, H-459)
- F = HEA 360 (a<sub>0</sub>-370, S-460, H-521)
- G = HEA 400 (a<sub>0</sub>-410, S-510, H-581)
- H = HEA 450 (a<sub>0</sub>-460, S-580, H-654)
- I = HEA 500 (a<sub>0</sub>-515, S-640, H-732)
- J = HEA 550 (a<sub>0</sub>-565, S-710, H-805)
- K = HEA 600 (a<sub>0</sub>-620, S-780, H-881)
- L = HEA 650 (a<sub>0</sub>-670, S-840, H-956)
- M = HEA 700 (a<sub>0</sub>-725, S-910, H-1032)
- N = HEA 800 (a<sub>0</sub>-830, S-1040, H-1183)
- O = HEA900 (a<sub>0</sub>-935, S-1170, H-1334)

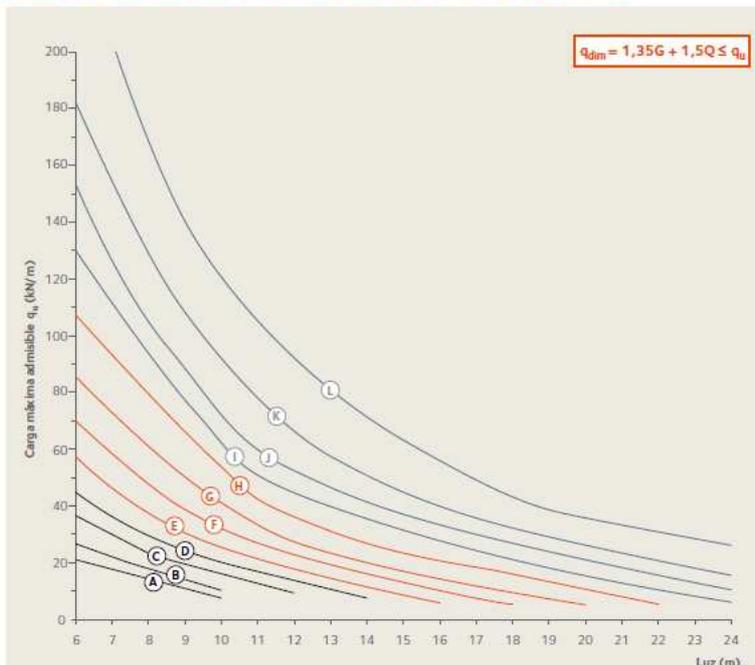
Ábaco 3: Sección de Acero – Perfil de base HEM.  $S = 1,25 a_0$  - Clase S355



- A = HEM 200 ( $a_0=190, S=240, H=303$ )
- B = HEM 220 ( $a_0=220, S=280, H=337$ )
- C = HEM 240 ( $a_0=250, S=310, H=383$ )
- D = HEM 280 ( $a_0=320, S=400, H=457$ )
- E = HEM 300 ( $a_0=340, S=430, H=496$ )
- F = HEM 320 ( $a_0=375, S=470, H=532$ )
- G = HEM 360 ( $a_0=415, S=520, H=587$ )
- H = HEM 400 ( $a_0=455, S=570, H=644$ )
- I = HEM 450 ( $a_0=500, S=630, H=711$ )
- J = HEM 550 ( $a_0=600, S=750, H=854$ )
- K = HEM 600 ( $a_0=650, S=810, H=927$ )
- L = HEM 650 ( $a_0=700, S=880, H=998$ )
- M = HEA 700 ( $a_0=750, S=940, H=1070$ )
- N = HEA 800 ( $a_0=855, S=1070, H=1219$ )
- O = HEA 900 ( $a_0=955, S=1190, H=1365$ )

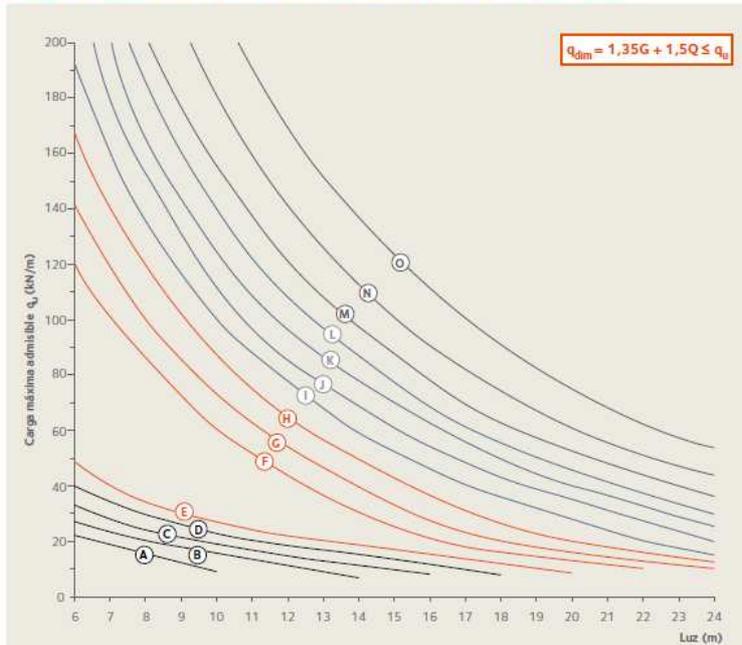
Forjados metálicos ( $S = 1,5a_0$ )

Ábaco 4: Sección de Acero - Perfil de base IPE.  $S = 1,5 a_0$  - Clase S355



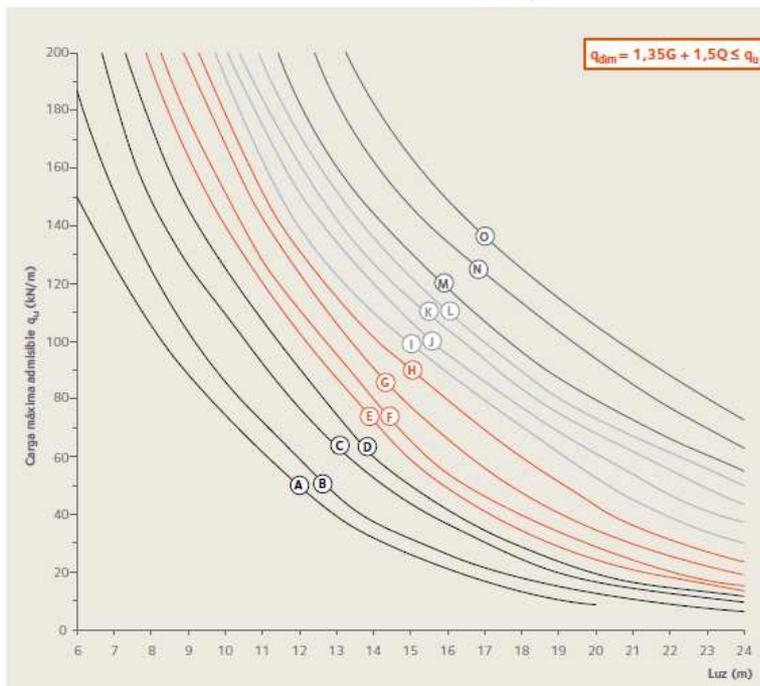
- A = IPE 220 ( $a_0=225, S=335, H=309$ )
- B = IPE 240 ( $a_0=250, S=370, H=340$ )
- C = IPE 270 ( $a_0=285, S=425, H=385$ )
- D = IPE 300 ( $a_0=315, S=470, H=428$ )
- E = IPE 330 ( $a_0=345, S=515, H=469$ )
- F = IPE 360 ( $a_0=380, S=570, H=515$ )
- G = IPE 400 ( $a_0=420, S=630, H=573$ )
- H = IPE 450 ( $a_0=475, S=710, H=647$ )**
- I = IPE 500 ( $a_0=525, S=785, H=719$ )
- J = IPE 550 ( $a_0=580, S=865, H=793$ )
- K = IPE 600 ( $a_0=630, S=940, H=865$ )
- L = IPE 750X147 ( $a_0=790, S=1170, H=1090$ )

Ábaco 5: Sección de Acero – Perfil de base HEA.  $S = 1,5 a_0$  - Clase S355



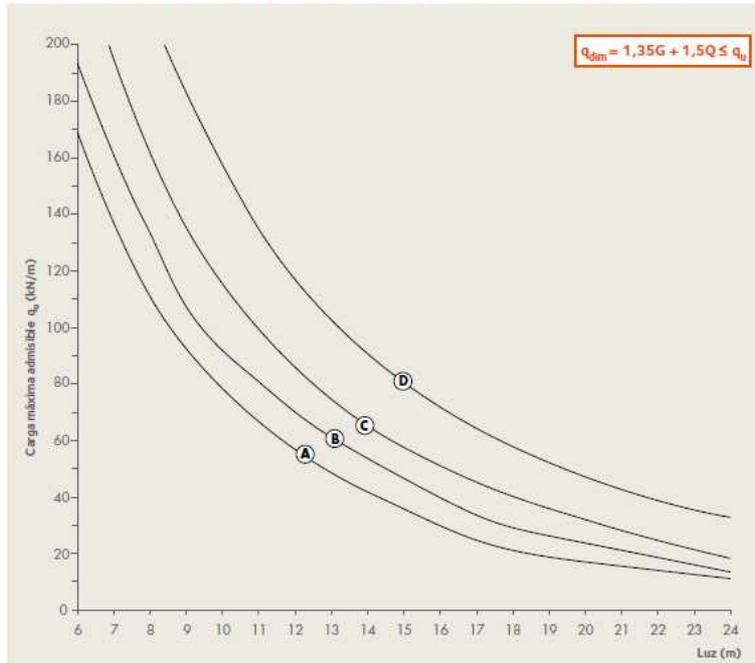
- A = HEA 200 ( $a_0=170, S=250, H=256$ )
- B = HEA 240 ( $a_0=230, S=340, H=322$ )
- C = HEA 280 ( $a_0=285, S=425, H=385$ )
- D = HEA 300 ( $a_0=305, S=455, H=414$ )
- E = HEA 340 ( $a_0=345, S=515, H=471$ )
- F = HEA 360 ( $a_0=370, S=550, H=502$ )
- G = HEA 400 ( $a_0=410, S=610, H=560$ )
- H = HEA 450 ( $a_0=460, S=680, H=633$ )
- I = HEA 500 ( $a_0=515, S=765, H=706$ )
- J = HEA 550 ( $a_0=565, S=845, H=776$ )
- K = HEA 600 ( $a_0=620, S=925, H=851$ )
- L = HEA 650 ( $a_0=670, S=1000, H=922$ )
- M = HEA 700 ( $a_0=725, S=1085, H=995$ )
- N = HEA 800 ( $a_0=830, S=1240, H=1142$ )
- O = HEA 900 ( $a_0=935, S=1395, H=1288$ )

Ábaco 6: Sección de Acero - Perfil de base HEM.  $S = 1,5 a_0$  - Clase S355

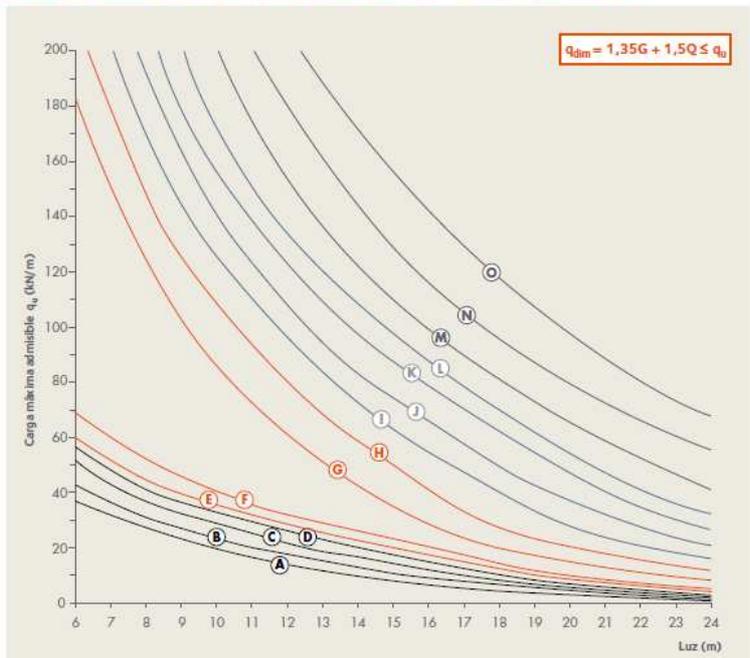


- A = HEM 260 ( $a_0=260, S=385, H=395$ )
- B = HEM 280 ( $a_0=280, S=420, H=422$ )
- C = HEM 300 ( $a_0=310, S=460, H=466$ )
- D = HEM 320 ( $a_0=340, S=505, H=498$ )
- E = HEM 340 ( $a_0=380, S=560, H=535$ )
- F = HEM 360 ( $a_0=410, S=605, H=566$ )
- G = HEM 400 ( $a_0=450, S=670, H=619$ )
- H = HEM 450 ( $a_0=500, S=745, H=687$ )
- I = HEM 500 ( $a_0=540, S=810, H=749$ )
- J = HEM 550 ( $a_0=600, S=900, H=823$ )
- K = HEM 600 ( $a_0=650, S=970, H=894$ )
- L = HEM 650 ( $a_0=700, S=1050, H=962$ )
- M = HEM 700 ( $a_0=750, S=1125, H=1031$ )
- N = HEM 800 ( $a_0=855, S=1280, H=1176$ )
- O = HEM 900 ( $a_0=955, S=1430, H=1315$ )

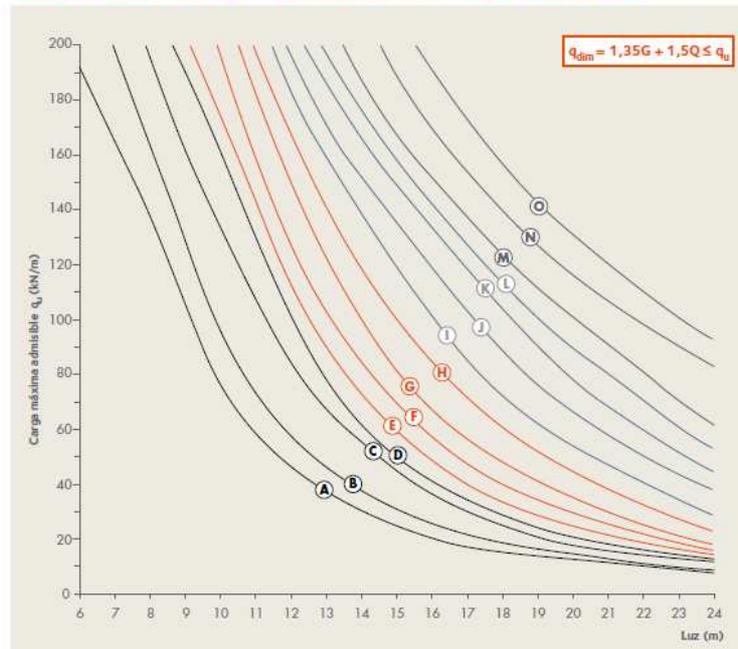
Ábaco 7: Sección de Acero - Perfil de base IPE. S = 1,5 a<sub>0</sub> - Clase S460



Ábaco 8: Sección de Acero - Perfil de base HEA. S = 1,5 a<sub>0</sub> - Clase S460



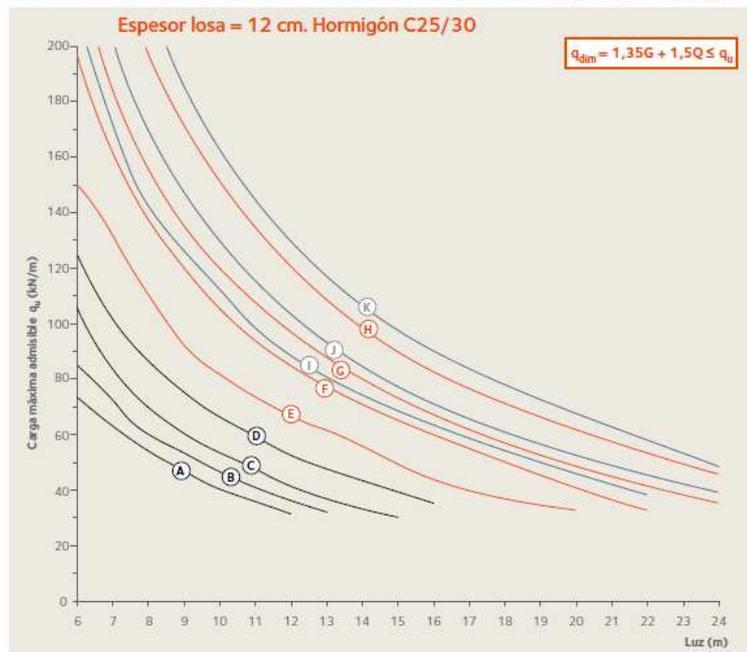
Ábaco 9: Sección de Acero - Perfil de base HEM.  $S = 1,5 a_0$  - Clase S460



- A = HEM 260 ( $a_0=260, S=385, H=395$ )
- B = HEM 280 ( $a_0=280, S=420, H=422$ )
- C = HEM 300 ( $a_0=310, S=460, H=466$ )
- D = HEM 320 ( $a_0=340, S=505, H=498$ )
- E = HEM 340 ( $a_0=380, S=560, H=535$ )
- F = HEM 360 ( $a_0=410, S=605, H=566$ )
- G = HEM 400 ( $a_0=450, S=670, H=619$ )
- H = HEM 450 ( $a_0=500, S=745, H=687$ )
- I = HEM 500 ( $a_0=540, S=810, H=749$ )
- J = HEM 550 ( $a_0=600, S=900, H=823$ )
- K = HEM 600 ( $a_0=650, S=970, H=894$ )
- L = HEM 650 ( $a_0=700, S=1050, H=962$ )
- M = HEM 700 ( $a_0=750, S=1125, H=1031$ )
- N = HEM 800 ( $a_0=855, S=1280, H=1176$ )
- O = HEM 900 ( $a_0=955, S=1430, H=1315$ )

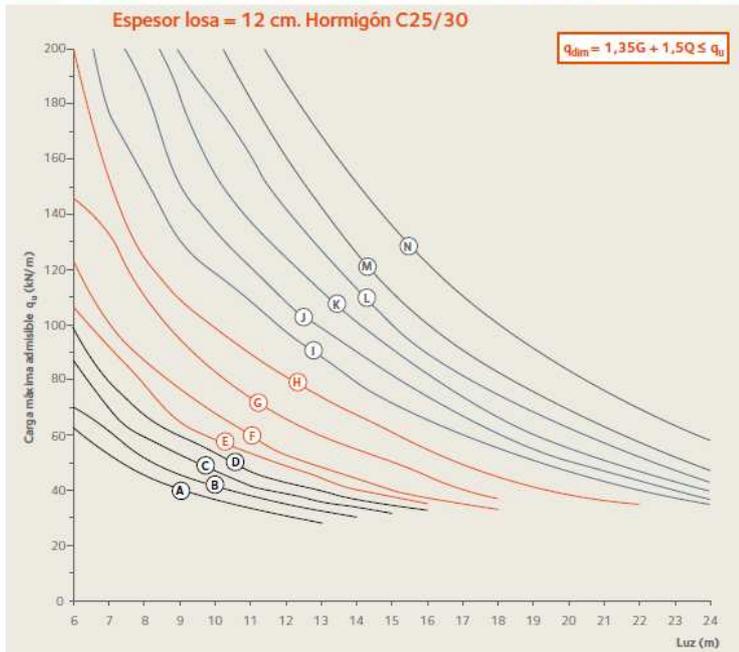
Forjados mixtos

Ábaco 10: Sección mixta Acero-Hormigón - Perfil de base IPE & HEA-B.  $S = 1,5 a_0$  - Clase S355.



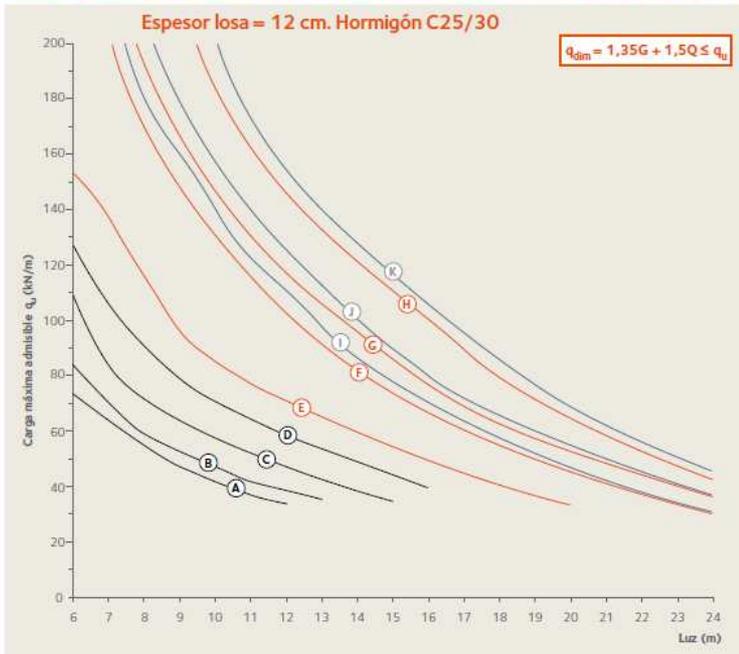
- A = IPE 300-HEA 280 ( $a_0=260, S=390, H=388$ )
- B = IPE 330-HEA 300 ( $a_0=280, S=420, H=422$ )
- C = IPE 360-HEA 340 ( $a_0=310, S=465, H=470$ )
- D = IPE 400-HEA 400 ( $a_0=350, S=525, H=537$ )
- E = IPE 450-HEA 450 ( $a_0=400, S=600, H=609$ )
- F = IPE 500-HEA 550 ( $a_0=480, S=720, H=719$ )
- G = IPE 550-HEA 650 ( $a_0=560, S=840, H=828$ )
- H = IPE 600-HEA 800 ( $a_0=640, S=960, H=963$ )
- I = IPE 500-HEB 550 ( $a_0=480, S=720, H=724$ )
- J = IPE 550-HEB 650 ( $a_0=560, S=840, H=833$ )
- K = IPE 600-HEB 800 ( $a_0=640, S=960, H=968$ )

Ábaco 11: Sección mixta Acero-Hormigón – Perfil de base HEA & HEB.  $S = 1,5 a_0$  - Clase S355.



- A = HEA 260-HEB 260 ( $a_0=230, S=345, H=345$ )
- B = HEA 280-HEB 280 ( $a_0=250, S=375, H=374$ )
- C = HEA 300-HEB 300 ( $a_0=270, S=405, H=403$ )
- D = HEA 320-HEB 320 ( $a_0=290, S=435, H=431$ )
- E = HEA 340-HEB 340 ( $a_0=300, S=450, H=456$ )
- F = HEA 360-HEB 360 ( $a_0=320, S=480, H=484$ )
- G = HEA 400-HEB 400 ( $a_0=360, S=540, H=542$ )
- H = HEA 450-HEB 450 ( $a_0=410, S=615, H=613$ )
- I = HEA 500-HEB 500 ( $a_0=460, S=690, H=685$ )
- J = HEA 550-HEB 550 ( $a_0=500, S=750, H=752$ )
- K = HEA 600-HEB 600 ( $a_0=550, S=825, H=824$ )
- L = HEA 650-HEB 650 ( $a_0=600, S=900, H=896$ )
- M = HEA 700-HEB 700 ( $a_0=650, S=975, H=967$ )
- N = HEA 800-HEB 800 ( $a_0=740, S=1110, H=1106$ )

Ábaco 12: Sección mixta Acero-Hormigón – Perfil de base IPE & HEA-B.  $S = 1,5 a_0$  - Clase S460.



- A = IPE 300-HEA 280 ( $a_0=260, S=390, H=388$ )
- B = IPE 330-HEA 300 ( $a_0=280, S=420, H=422$ )
- C = IPE 360-HEA 340 ( $a_0=310, S=465, H=470$ )
- D = IPE 400-HEA 400 ( $a_0=350, S=525, H=537$ )
- E = IPE 450-HEA 450 ( $a_0=400, S=600, H=609$ )
- F = IPE 500-HEA 550 ( $a_0=480, S=720, H=719$ )
- G = IPE 550-HEA 650 ( $a_0=560, S=840, H=828$ )
- H = IPE 600-HEA 800 ( $a_0=640, S=960, H=963$ )
- I = IPE 500-HEB 550 ( $a_0=480, S=720, H=724$ )
- J = IPE 550-HEB 650 ( $a_0=560, S=840, H=833$ )
- K = IPE 600-HEB 800 ( $a_0=640, S=960, H=968$ )

Ábaco 13: Sección mixta Acero-Hormigón - Perfil de base HEA & HEB.  $S = 1,5 a_0$  - Clase S460.

