

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE CIVIL

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

“EVALUACIÓN DE ATIESADORES LONGITUDINALES EN COLUMNAS DE
ACERO EN ANSYS”

OSCAR DAVID QUINAPALLO JAMI

DIRECTOR: ING. OSCAR PATRICIO JARAMILLO DE LEÓN

QUITO, ENERO 2018

Dedicatoria

Este Trabajo se la dedico a Dios y a todas las personas que confiaron en mí, a mi Padre y Madre, a mis hermanos, a mis abuelos, a mis primos, tíos y amigos que fueron testigos de cómo he llegado a ser la persona que hoy soy.

Pero especialmente este trabajo me lo dedico a mí, estoy muy feliz de haber elegido el camino del ingeniero, que piensa que todo problema se puede solucionar, y si no se podía, se inventa una.

En los días venideros habrá varias dificultades y quiero dedicarle este texto de la biblia al yo de aquellos días:

Así dice ahora el Señor, quien te creó y te formó:

«No temas, porque yo te redimí; yo te di tu nombre, Oscar, y tú me perteneces. Cuando pases por las aguas, yo estaré contigo; cuando cruces los ríos, no te anegarán. Cuando pases por el fuego, no te quemarás, ni las llamas arderán en ti. Yo soy el Señor, tu Dios. Yo soy tu salvador, el Santo de Israel. Ya he pagado por tu rescate a Egipto, Etiopía y Sebá. Ante mis ojos tú eres grandemente estimado y digno de honra. Yo te amo, y por ti y por tu vida daré hombres y naciones.»

Isaías 43:1-7 Reina Valera Contemporánea (RVC)

Agradecimientos

Agradecimiento a Dios:

Dios mío, gracias por permitirme recorrer el camino por el cual estoy caminando.

Gracias por acompañarme cuando cruzaba los lugares más oscuros que jamás pensaba siquiera que existían.

Gracias por poner en mi vida a personas maravillosas que alegran mis días y también por las personas que, aunque no dibujen una sonrisa en mi rostro, me enseñan a ser más tolerante.

Gracias por hacerme completo y por crearme con capacidades que aún no conozco.

Gracias por el bello lugar en el que crecí y por los nuevos sitios que conoceré.

Gracias Dios por tener la familia que tengo y por la que veré nuevamente después de este largo camino.

Y finalmente te doy gracias por ser paciente conmigo y por no alejarte de mí, aunque yo intente irme muy lejos.

Agradecimiento a mi Familia:

Mami le agradezco mucho por todo el cariño y el amor que ha puesto en educarme y criarme, en toda mi vida nunca he conocido a otra persona que me ame tanto como usted y eso me encanta, usted es la mejor persona del mundo.

Papi estoy muy contento por ser la persona que hoy todos conocen, quiero que sepa que siempre llevo en mi corazón cada uno de sus consejos y regaños y nunca los olvido, aunque a veces no lo parezca, le agradezco por todos los valores que me ha inculcado y ahora es tiempo de mostrar mis frutos a razón de eso.

Agradezco a Dios por los hermanos que tengo: Lucho, Raulito y Nicole son los nombres que siempre están en mi cabeza y nunca los olvido.

Papá Aparicio, aunque usted nunca vaya a leer estas palabras, le haré entender con mis acciones para que comprenda cuanto lo amo, claramente recuerdo como hace 20 años me cuidaba con celo mientras me tomaba muy fuerte de la mano y cruzábamos las calles de Sangolquí, hoy día esos papeles cambiaron y quiero seguir conociendo muchos más lugares mientras se nos permita.

A toda mi familia quiero decirle que: Los amo mucho y cada uno de ustedes es dueño de una parte de mi corazón.

Tabla de Contenidos

Dedicatoria	I
Agradecimientos	III
Tabla de Contenidos	V
Tabla de Figuras	XI
Resumen	XIII
CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- Justificación	1
1.2.- Planteamiento del Problema	1
1.3.- Objetivos	1
1.3.1.- Objetivo General.....	1
1.3.2.- Objetivos Específicos	2
1.4.- Resultados Esperados	2
1.5.- Exposición del Procedimiento Técnico	2
CAPÍTULO 2.- CONCEPTOS GENERALES.....	3
2.1.- Generalidad de los Materiales	3
2.1.1.- Propiedades de los Materiales	3
2.1.1.1.- Propiedades Mecánicas	3
2.1.1.2.- Propiedades Físicas	5
2.1.1.3.- Propiedades Químicas	5
2.1.2.- Materiales De Construcción.....	6
2.1.2.1.- Materiales Naturales.....	6
2.1.2.2.- Materiales Artificiales	6
2.1.3.- Acero.....	6
2.1.3.1.- Acero Estructural	7
2.1.3.2.- Grados del Acero.....	7
2.1.3.3.- Composición química del acero según su grado	9
2.1.3.4.- Acero Dulce	9
2.1.3.5.- Relación Esfuerzo deformación del Acero	9
2.1.3.5.1.- Módulo de Elasticidad del Acero.....	10
2.1.3.5.2.- Zona Elástica	11
2.1.3.5.3.- Zona Plástica	11
2.1.3.6.- Miembros estructurales de acero según su fabricación	13
2.1.3.6.1.- Miembros laminados en caliente.....	13
2.1.3.6.2.- Miembros conformados en frío	13
2.1.3.6.3.- Miembros Soldados.....	14
2.1.4.- Hormigón	15
2.1.4.1.- Hormigón Armado	16
2.2.- Miembros Compuestos	16
2.2.1.- Ventajas y Desventajas de los miembros compuestos	18
2.2.2.- Miembros Compuestos Según Su Configuración	18
2.2.2.1.- Miembros Compuestos Rellenos	18
2.2.2.2.- Miembros Compuestos Embebidos	19
2.2.2.3.- Vigas compuestas con conectores de corte	19
2.2.2.4.- Losa Compuesta Sobre Paneles.....	20

CAPÍTULO 3.- PANDEO DE COLUMNAS	21
3.1.- Generalidad del Pandeo	21
3.2.- Pandeo Global	21
3.2.1.- Pandeo por flexión.....	21
3.2.2.- Pandeo Torsional	23
3.2.3.- Longitud Efectiva y Condiciones de Apoyo	25
3.3.- Pandeo Local	29
3.3.1.- Elementos Rígidos.....	29
3.3.2.- Relación Esfuerzo de Pandeo por flexión - Esbeltez	30
3.3.3.- Elementos Esbeltos.....	31
3.3.4.- Teoría del Pandeo Placas	34
3.3.4.1.- Pandeo En Placas Por Compresión.....	34
3.4.1.1.- Relación entre el coeficiente de pandeo y proporción ancho largo en placas	40
3.4.- Secciones Sísmicamente Compactas	41
3.5.- Secciones Compactas Rellenas De Hormigón.....	43
CAPÍTULO 4.- MÉTODOS, TEORIAS Y ESPECIFICACIONES	44
4.1.- Método de Elementos Finitos.....	44
4.2.-Teoría de Grandes Deformaciones (Large Deflections)	45
4.3.-Teoría de plastificación de Von Mises	46
4.4.- Especificación ANSI/AISC.....	49
4.4.1.- Breve Reseña de la ANSI/AISC	49
4.4.2.- Contenido de la Especificación ANSI/AISC.....	49
4.4.3.- Capítulo E: Diseño de Miembros en Compresión	50
4.4.3.1.- E3: Pandeo por Flexión de Miembro sin Elementos Esbeltos	53
4.4.3.2.- E7: Miembros con Elementos Esbeltos.....	53
4.4.3.2.1.- E7-1: Elementos Esbeltos No Atiesados, Qs	54
4.4.3.2.2.- E7-2: Elementos Esbeltos Atiesados	56
4.4.4.- Capítulo F: Diseño de Miembros en Flexión	58
4.4.4.1.- F7: Perfiles tubulares cuadrados y rectangulares	58
4.4.4.2.- F7-1.- Fluencia.....	58
4.4.4.3.- F7-2.- Pandeo Local en el Ala	60
4.4.4.4.- F7-3.- Pandeo Local en el Alma	60
4.4.5.- Capítulo I: Diseño de Miembros de Sección Compuesta	60
4.4.5.1.- Límite de los Materiales.....	61
4.4.5.2.- Resistencia a la Compresión de Columnas Rellenas	61
4.4.5.2.1.- Para secciones Compactas	62
4.4.5.2.2.- Para Secciones No Compactas	62
4.4.5.2.3.- Para Secciones Esbeltas	62
4.5.- Norma AISI	64
4.5.1.- Generalidad	64
4.5.2.- B2: Ancho efectivo para elementos rígidos	64
4.5.2.1.- Determinación de la Capacidad de Carga	64
4.5.2.2.- B2.3: Almas y otros elementos rigidizados con gradiente de tensiones.....	65
4.5.2.3.- B5: Ancho efectivo de elementos rigidizados con atiesador intermedio simple o múltiple o labios rigidizados con atiesadores intermedios.	67
4.5.3.- C4: Miembros Comprimitos con Carga Concéntrica	69
4.5.3.1.- C4.1: Secciones no Sometidas a Pandeo Torsional ni Pandeo Torsional Flexionante.....	69
4.5.3.2.- C4.2: Secciones Sometidas a Pandeo Torsional o Pandeo Torsional Flexionante.....	69
4.5.3.3.- C4.3: Secciones no Simétricas.....	70

4.5.4.- C3.1.4: Miembros a Flexión	70
4.5.4.1.- Momento Nominal.....	70
4.5.4.2.- Pandeo distorsional en miembros a flexión.....	71
CAPÍTULO 5.- MODELACIÓN ESTRUCTURAL EN COMPUTADOR	73
5.1.- Software de simulación y modelación por computadora	73
5.1.1.- Simulación Vs Modelación.....	74
5.1.2.- Ventajas de la simulación por computadora	75
5.2.- Guía rápida para Ansys.....	76
5.2.1.- Ansys Workbench	76
5.2.2.- Interfaz Inicial	76
5.2.3.- Engineering Data.....	79
5.2.4.- Geometry.....	81
5.2.4.1.- Design Modeler Geometry.....	81
5.2.4.1.1.- Tree Outline	81
5.2.4.1.2.- Detail View	83
5.2.4.1.3.- Graphics	84
5.2.4.1.3.1.- Extrude	85
5.2.4.1.3.2.- Revolve	86
5.2.4.1.3.3.- Sweep	86
5.2.4.1.4.- Pattern	88
5.2.4.1.5.- Body Operation	89
5.2.4.1.6.- Body Transformation	90
5.2.4.1.7.- Opciones Booleanas	91
5.2.4.2.- Importar Geometría	92
5.2.5.- Model.....	93
5.2.6.- Setup.....	93
5.2.7.- Solution.....	93
5.2.8.- Results.....	94
5.2.8.1.- Mechanical.....	94
5.2.8.1.1.- View Mechanical Wizard.....	95
5.2.8.2.- Mesh	96
5.2.8.3.- Condiciones de Apoyo (Support)	99
5.2.8.3.1.- Fixed Support	99
5.2.8.3.2.- Displacement.....	100
5.2.8.3.3.- Remote Displacement	101
5.2.8.3.4.- Cylindrical Support	101
5.2.8.3.5.- Frictionless Support.....	101
5.2.8.3.6.- Elastic Support.....	102
5.2.8.4.- Cargas Aplicada (Loads)	103
5.2.8.4.1.- Fuerza (Force).....	104
5.2.8.4.2.- Presión o Esfuerzo (Pressure).....	104
5.2.8.4.3.- Momento (Moment)	105
5.2.8.4.4.- Presión Hidrostática (Hydrostatic Pressure)	105
5.2.8.5.- Obtención de Resultados.....	106
5.3.- Herramientas Útiles de Ansys	108
5.3.1.- Chart (Tablas y Gráficos).....	108
5.3.2.- Cargas a Través del Tiempo	110
5.3.3.- Definición de Superficies de construcción en los Sólidos	111
5.3.4.- Consideración de Plasticidad	112
5.3.5.- Superficies en Contacto	115
CAPÍTULO 6.- MODELACIÓN DE COLUMNAS EN ANSYS	117
6.1.- Modelación de Columnas Rectangulares Huecas a Compresión	117

6.1.1.- Asignación de Material	117
6.1.2.- Propiedades Geométricas de la Columna	118
6.1.3.- Mallado Del Cuerpo	119
6.1.4.- Restricciones y Cargas	120
6.1.5.- Resultados	122
6.1.5.1.- Deformación total	122
6.1.5.2.- Esfuerzo Total Equivalente.....	122
6.1.5.3.- Reacción en el Soporte Fijo.....	123
6.1.6.- Resistencia a la Compresión en columnas Rectangulares Huecas.....	124
6.1.6.1.- AISC 360-10.....	124
6.1.6.2.- AISI S100-07	126
6.1.7.- Cálculo de la constante k para cada elemento de la sección.....	128
6.1.8.- Comparación de Resultados	130
6.1.9.- Otros resultados	130
6.2.- Modelación de Columnas con Atiesadores Longitudinales a Compresión	135
6.2.1.- Asignación de Material	135
6.2.2.- Propiedades Geométricas de la Columna	136
6.2.3.- Mallado Del Cuerpo	137
6.2.4.- Restricciones y Cargas	138
6.2.5.- Resultados	140
6.2.5.1.- Deformación total	140
6.2.5.2.- Esfuerzo Total Equivalente.....	141
6.2.5.3.- Reacción en el Soporte Fijo.....	141
6.2.6.- Resistencia a la Compresión en Columnas Rectangulares con Atiesadores Longitudinales.....	142
6.2.6.1.- Dimensiones mínimas del atiesador	142
6.2.6.2.- AISC 360-10.....	142
6.2.6.3.- AISI S100-07	144
6.2.7.- Cálculo de la constante k para cada elemento de la sección.....	147
6.2.7.1.- k de las Placa Externas	149
6.2.7.2.- k de los Atiesadores	150
6.2.7.3.- Comparación de Resultados	151
6.2.8.- Otros resultados	152
6.2.9.- Comparación a Compresión: Columnas con Atiesadores Vs Columnas sin Atiesadores	156
6.3.- Modelación de Columnas Rellenas de Hormigón.....	158
6.3.1.- Asignación de Material	158
6.3.2.- Propiedades Geométricas de la Columna	160
6.3.3.- Mallado Del Cuerpo	160
6.3.4.- Restricciones y Cargas	161
6.3.5.- Resultados	162
6.3.5.1.- Deformación total	162
6.3.5.2.- Esfuerzo Total Equivalente.....	162
6.3.5.3.- Reacción en el Soporte Fijo.....	163
6.3.6.- Resistencia a la compresión de Columnas Compuestas	164
6.3.7.- Comparación de Resultados	165
6.3.8.- Otros Resultados.....	165
6.4.- Modelación de Columnas a Flexión.....	168
6.4.1.- Asignación de Material	168
6.4.2.- Propiedades Geométricas de la Columna	169
6.4.3.- Mallado Del Cuerpo	169
6.4.4.- Restricciones y Cargas	170
6.4.5.- Resultados	170
6.4.5.1.- Deformación total	170
6.4.5.2.- Esfuerzo Total Equivalente.....	171
6.4.5.3.- Reacción en los extremos	171

6.4.6.- Resistencia a flexión de Columnas.....	172
6.4.6.1.- AISC 306-10.....	172
6.4.7.- Comparación de Resultados	177
6.4.8.- Otros Resultados.....	180
6.5.- Modelación de Columnas con Atiesadores a Flexión	186
6.5.1.- Resultados	186
6.5.1.1.- Dimensiones Mínimas del Atiesador	186
6.5.1.1.- AISC 360-10.....	186
6.5.1.2.- AISI S100-07	187
7.- CONCLUSIONES.....	203
8.- BIBLIOGRAFÍA.....	205
9.- ANEXOS.....	206

Tabla de Figuras

Figura 1.- Ensayo de Compresión Pura en un Cilindro de Hormigón	3
Figura 2.- Ensayo a Tracción en una barra Metálica	3
Figura 3.- Viga a Flexión	4
Figura 4.- Deformación de una probeta al estar sometido a diferentes tipos de cargas	4
Figura 5.- Variación del volumen de una viga metálica por cambio de temperatura	5
Figura 6.- Corrosión en una tubería de agua potable.....	5
Figura 7.- Diferentes Grados de Acero utilizados en Latinoamérica.....	7
Figura 8.- Principales usos del Acero según su Grado	8
Figura 9.- Composición Química del Acero según su Grado	9
Figura 10.- Comportamientos característicos de aceros estructurales dulces de diferente grado ASTM,	10
Figura 11.- Curva Esfuerzo - Deformación Unitaria de Aceros de distinto Grado ASTM	11
Figura 12.- Porción Inicial de la curva Esfuerzo - Deformación Unitaria para aceros de Alto contenido de Carbono	12
Figura 13.- Porción Inicial de la curva Esfuerzo - Deformación Unitaria para aceros de Bajo contenido de Carbono	12
Figura 14.- Proceso de fabricación del acero laminado en caliente	13
Figura 15.- Proceso de fabricación del acero conformado en frío	14
Figura 16.- Proceso de soldadura de láminas de acero	15
Figura 17.- Agrietamiento de una viga reforzada sometida a flexión	16
Figura 18.- Construcción y Colocación del refuerzo a corte y flexión de una viga armada	16
Figura 19.- Efecto Poisson de una columna rellena de hormigón armado al ser sometida a compresión	17
Figura 20.- Columna de sección compuesta, elemento metálico embebido en hormigón	18
Figura 21.- Miembros Compuestos de Perfiles de Acero rellenos de Hormigón Estructural con Hormigón Armado.....	19
Figura 22.- Miembros Compuestos de Perfiles de Acero embebidos en hormigón armado.....	19
Figura 23.- Viga Compuesta con Losa Colaborante.....	20
Figura 24.- Viga Compuesta con Losa de hormigón sobre panel metálico.....	20
Figura 25.- Pandeo por flexión en una barra sometida a compresión.....	21
Figura 26.- Pandeo por Flexo torsión de una viga	23
Figura 27.- Centro de Cortante en varios perfiles metálicos.....	24
Figura 28.- Función de los arriostramientos en columnas esbeltas.....	25
Figura 29.- Comportamiento de una columna según su tipo de apoyo.....	26
Figura 30.- Pandeo en Columnas continuas sin arriostramientos	27
Figura 31.- Valores de k para diferentes condiciones de apoyo	28
Figura 32.- Pandeo Local en una columna sometida a compresión	29
Figura 33.- Elementos Rigidizados y No Rigidizados	30
Figura 34.- Relación gráfica entre la esbeltez de la columna y su carga crítica de pandeo por flexión	31
Figura 35.- Límite de elemento esbelto y no esbelto en secciones sometidas a compresión PARTE 1	32
Figura 36.- Límite de elemento esbelto y no esbelto en secciones sometidas a compresión PARTE 2	33
Figura 37.- Placa sometida a esfuerzos de compresión en su plano	34
Figura 38.- Simplificación matemática de una placa cargada a compresión	35
Figura 39.- Sentido de los alabeos en una placa sometida a compresión	37
Figura 40.- Variación de k en función de los soportes en una placa cargada a compresión	37
Figura 41.- Valores predeterminados de k en función del tipo de esfuerzo sometido.....	38
Figura 42.- Ubicación de los alabeos en función de la distribución de la carga de compresión	39
Figura 43.- Variación de k en función de su relación a/b para diferente número de alabeos	40
Figura 44.- Relación ancho espesor para definir secciones Compactas y Sísmicamente Compactas 1	41
Figura 45.- Relación ancho espesor para definir secciones Compactas y Sísmicamente Compactas 2	42
Figura 46.- Límite para secciones Esbeltas / No Esbeltas, No Esbeltas Compactas.....	43
Figura 47.- Mallado creado en un elemento para el análisis por elementos finitos.....	44
Figura 48.- Representación de un cuerpo en el espacio que considera grandes deformaciones.....	45
Figura 49.- Comparación gráfica de las teorías de plastificación por Von Mises y Tresca	48
Figura 50.- Tipo de Sección según sus elementos.....	51
Figura 51.- Cálculo de Z_x en secciones complejas.....	58

Figura 52.- Comportamiento de secciones I de diferente espesor a la rotación	59
Figura 53.- Límites de sección para miembros compuestos a compresión axial	61
Figura 54.- Representación de un modelo en un programa de simulación	73
Figura 55.- Avión Modelado vs Avión Simulado	74
Figura 56.- Análisis Matemático Vs Análisis por elementos Finitos de una figa cargada a flexión	75
Figura 57.- Interfaz inicial de Ansys Workbench.....	76
Figura 58.- Dependencia de los módulos en forma de esquema	77
Figura 59.- Sub opciones en la interfaz principal.....	78
Figura 60.- Secciones para modificar las propiedades mecánicas de los materiales	79
Figura 61.- Materiales predeterminados de comportamiento no lineal	80
Figura 62.- Configuración de unidades para dibujar elementos.....	82
Figura 63.- Creación de nuevos sistemas cartesianos relativos.....	83
Figura 64.- Opciones presentes en el panel Detail View al dar dimensiones.....	84
Figura 65.- Creación de un cuerpo por revoluciones en una trayectoria	85
Figura 66.- Extrude de una sección.....	85
Figura 67.- Proyecciones crecientes, paralelas y perpendiculares a una trayectoria respectivamente	87
Figura 68.- Proyección de una sección en función a una distancia y numero de revaluaciones.....	88
Figura 69.- Multiplicación de un sólido en patrones rectangulares	89
Figura 70.- Opciones disponibles para modificar un cuerpo con Body Operations	90
Figura 71.- Operaciones disponible en Body Transformations	91
Figura 72.- Opciones Booleanas	92
Figura 73.- Opciones de un modelo	94
Figura 74.- Interfaz de trabajo al usar el módulo Mechanical.....	95
Figura 75.- Procedimientos proporcionados por View Mechanical Wizard.....	96
Figura 76.- Mallado en un cuerpo por defecto	97
Figura 77.- Forma de los métodos usados en el mallado de los cuerpos.....	97
Figura 78.- Calidad de los elementos procesados.....	98
Figura 79.- Tipos de Apoyo disponibles en ANSYS	99
Figura 80.- Restricción o Libertad de Movimiento.....	100
Figura 81.- Configuración disponible para Soportes elásticos.....	102
Figura 82.- Carga aplicado a través de pasos.....	103
Figura 83.- Presión aplicada sobre una superficie definida	104
Figura 84.- Aplicación de un momento torsional en una sección HSS	105
Figura 85.- Resultados de Esfuerzo disponibles.....	106
Figura 86.- Progreso de calculo	107
Figura 87.- Reacción en la base de una columna	108
Figura 88.- Modificación de los resultados en función de sus ejes	109
Figura 89.- Carga Progresiva a través de varios pasos.....	110
Figura 90.- Selección de Varias superficies en un cuerpo complejo.....	111
Figura 91.- Reacción de un cuerpo sin Activar Large Deflections	113
Figura 92.- Reacción de un cuerpo Activando Large Deflections.....	114
Figura 93.- Representación de Superficie en contacto y superficie objetiva en ANSYS	115
Figura 94.- Representación de Contactos Simétricos y no Simétricos en ANSYS	116
Figura 95.- Tabla B4.1. Fuente: ANSI/AISC 360-10	124
Figura 96.- Esquema de los apoyos en una placa externa.....	128
Figura 97.- Esquema que representa los diferentes tipos de apoyo de las placas en la columna	148
Figura 98.- Tabla I1.1.b Límite de esbeltez para secciones a Flexión	206
Figura 99.- Rangos Aproximados de Rotación momento en secciones de diferente espesor	210

Resumen

Actualmente las construcciones metálicas están teniendo mayor importancia en nuestro país, gracias a su gran variedad de ventajas se han convertido en una alternativa muy usada para edificaciones de gran importancia. El Ecuador al estar ubicado geográficamente en una zona sísmica puede aprovechar las ventajas que el acero estructural brinda, la investigación sobre elementos estructurales en este material son pocas por las que este tipo de estudios aportan información muy importante para las futuras construcciones en el Ecuador.

El presente estudio tiene varios objetivos como son: obtener información sobre el comportamiento de atiesadores longitudinales en las columnas, verificar la eficacia que existe entre las especificaciones ya existentes con modelaciones en computadora, proporcionar información para optimizar los ensayos de laboratorio que pueden ser modelados con ANSYS, pues los costos por construcción y ensayo en laboratorio pueden ser muy costosos y si existiera una gran diferencia entre los ensayos de modelos computacionales y los cálculos de las especificaciones de diseño ya existentes, los ensayos no tendrían mucho significado.

A continuación, se explicará el contenido general de los capítulos escritos, en el Capítulo 1 se plantea claramente los objetivos generales y específicos de la investigación, en el Capítulo 2 podemos encontrar todos los conceptos que son necesarios para entender el comportamiento físico y mecánico de los materiales de construcción usados en la modelación. El Capítulo 3 contiene teorías generales de comportamiento en columnas mientras que en el Capítulo 4 se describen las teorías matemáticas y de diseño que nos permiten verificar los resultados obtenidos en ANSYS.

Al iniciar del desarrollo de este trabajo de titulación la información sobre el uso de ANSYS fue muy escasa o nula, por lo que a lo largo de su desarrollo se fue recopilando información de varias fuentes confiables como foros, investigaciones que usaron ANSYS y guías generales, esto fue útil para uso propio, pero con el fin de que esta información sea útil para

otros estudiantes se creó el Capítulo 5 que explica las herramientas que ANSYS permite usar para modelos estructurales y que fueron usadas para desarrollar los modelos obtenidos.

El Capítulo 6 contiene el desarrollo de los modelos estructurales, su comprobación con las especificaciones y teorías de Capítulo 4 y los resultados obtenidos para cada tipo de modelo, los modelos usados fueron: Columnas Rectangulares Huecas a Compresión, Columnas Rectangulares con atiesadores Longitudinales a Compresión, Columnas Rellenas de Hormigón y Columnas a Flexión.

El Capítulo 7 consta de conclusiones de los resultados obtenidos en este trabajo, también se dar respuesta a los objetivos planteados al inicio. Finalmente, el Capítulo 8 contiene la bibliografía utilizada, mientras que el Capítulo 9 contiene diagramas y tablas que son útiles para comparar los resultados conseguidos.

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Justificación

Cada vez son más usados los perfiles de acero para columnas en el Ecuador por sus múltiples ventajas, principalmente por su tiempo de construcción frente a otros materiales.

El Ecuador al ubicarse en zona sísmica requiere de diseños que soporten tales condiciones, las Secciones Sísmicamente Compactas son una alternativa para este problema. Las secciones que no utilizan Atiesadores Longitudinales requieren de grandes espesores por lo que influye directamente en el aumento de su costo, por ese motivo se busca reducir el espesor de las placas de columnas con el uso de Atiesadores Longitudinales.

1.2.- Planteamiento del Problema

El problema se basa en que las placas que componen la sección son propensas a sufrir de pandeo local por lo que se debe buscar alternativas para que este problema se solucione, la solución que actualmente se aplica es aumentar el espesor de las paredes de la sección, otra opción es consolidar la sección rellenándola con hormigón lo cual evitara que las placas experimenten grandes deformaciones y reducirá el número de alabeos de las placas, finalmente y acorde al propósito de este estudio se propone la utilización de atiesadores longitudinales al interior de las paredes de las placas de la columna para de esa forma disminuir la distancia b (ancho) que representa la distancia libre de una placa entre sus soportes.

1.3.- Objetivos

1.3.1.- Objetivo General

Determinar el comportamiento y la aportación de resistencia al pandeo local que los atiesadores longitudinales les proporcionan a las columnas de acero utilizando varios modelos en ANSYS.

1.3.2.- Objetivos Específicos

- Evaluar mediante el programa ANSYS el pandeo local en columnas cuadradas de acero sin atiesadores y sin relleno de hormigón.
- Evaluar mediante el programa ANSYS el pandeo local en columnas cuadradas de acero sin atiesadores y con relleno de hormigón.
- Medir por medio del programa ANSYS la resistencia al pandeo local de los Atiesadores dependiendo de su tamaño sin relleno de hormigón.
- Medir por medio del programa ANSYS la resistencia al pandeo local de los Atiesadores dependiendo de su tamaño con relleno de hormigón.

1.4.- Resultados Esperados

Con los atiesadores longitudinales se espera que el comportamiento de la columna sea similar al de columnas sin atiesadores longitudinales, pero con los espesores más pequeños y por consecuencia de esto se reduciría el peso y el precio en el costo de la columna.

1.5.- Exposición del Procedimiento Técnico

El análisis de las columnas con y sin atiesadores se realizará primeramente con perfiles que cumplan con las condiciones mínimas para secciones sísmicamente compactas, estos requerimientos se encuentran en la sección de pandeo de columnas en el capítulo 3 sección número 5. Mediante el programa ANSYS estos perfiles serán evaluados para varias cargas de compresión y flexión incluyendo cargas que simularán imperfecciones y puedan representar condiciones reales como imperfección en el laminado de la sección, diferencia entre el diseño y las condiciones reales en los apoyos, errores al momento de ejecución de las conexiones o por cargas que no hayan sido consideradas en el diseño.

Luego del análisis realizado en ANSYS los resultados serán comparados entre los diferentes tipos de secciones para tabular las cargas máximas antes de pandear, el cambio de inercia en cada caso y los espesores de cada uno de ellos.

CAPÍTULO 2.- CONCEPTOS GENERALES

2.1.- Generalidad de los Materiales

2.1.1.- Propiedades de los Materiales¹

Las propiedades son comportamientos mensurables con los que reacciona un cuerpo de cualquier naturaleza bajo la acción de un fenómeno físico, químico o mecánico para permanecer en equilibrio con su entorno.

2.1.1.1.- Propiedades Mecánicas

Resistencia a la Compresión

Es el esfuerzo máximo que es capaz de soportar un elemento bajo una carga de aplastamiento antes de fallar o colapsar.



Figura 1.- Ensayo de Compresión Pura en un Cilindro de Hormigón

Fuente: Ensayo de compresión de cilindros de hormigón – INSTRON

Resistencia a la Tensión

Es el esfuerzo máximo que es capaz de soportar un elemento bajo una carga axial de tensión antes de fallar o colapsar.

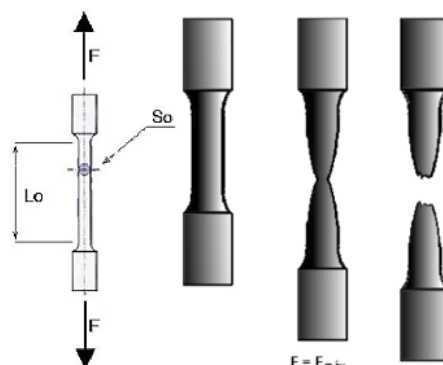


Figura 2.- Ensayo a Tracción en una barra Metálica

Fuente: Ensayo de Tracción del Acero – Lelu Neet

¹ F.R Shanley, Mecánica de Materiales, Los Ángeles, Agencia para el Desarrollo Internacional, 1971.

Elasticidad

Propiedad de un material para recuperar su forma original después de sufrir una deformación a causa de una fuerza, esfuerzo o desplazamiento.

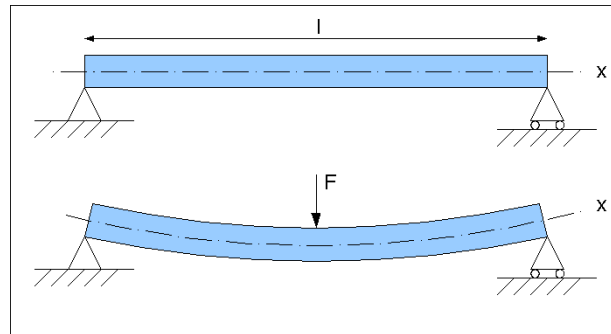


Figura 3.- Viga a Flexión

Fuente: *Tension and Compression - Quora*

Ductilidad

Propiedad de un material a sufrir grandes deformaciones sin fallar ante esfuerzos de alta tensión.

Deformación Unitaria

Es la relación que existe entre una longitud producida por una carga de tensión y su longitud inicial en una dimensión del material analizado. El valor de esta propiedad puede ser igual en otra dirección isotrópica (mismo valor de la propiedad en otra dirección) o anisotrópica.

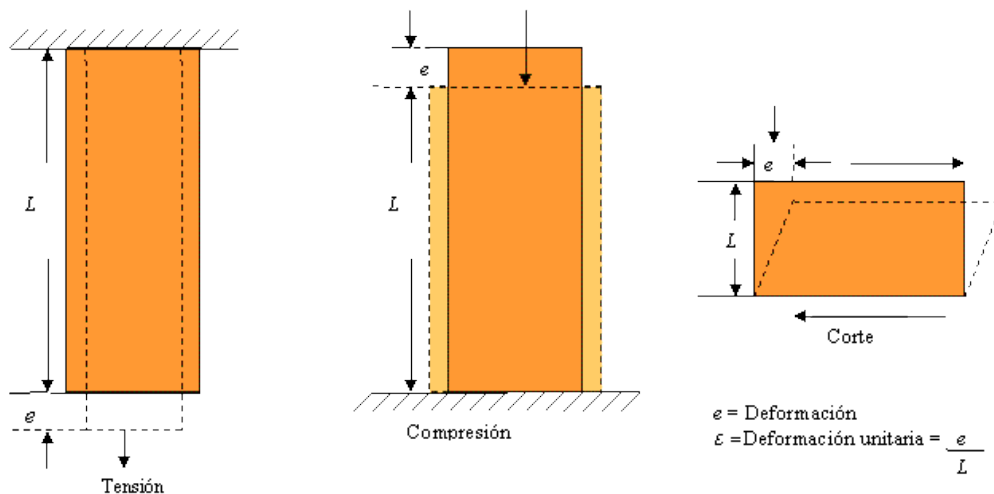


Figura 4.- Deformación de una probeta al estar sometido a diferentes tipos de cargas

Fuente: *Propiedades de los Materiales de Construcción – Ligia Velez*

2.1.1.2.-Propiedades Físicas

Dilatación Térmica

Propiedad que tiene un cuerpo de agrandar o encoger una o varias dimensiones que la componen debido al aumento o disminución de la temperatura respectivamente.



Figura 5.- Variación del volumen de una viga metálica por cambio de temperatura

Fuente: Dilatación y compresión térmica - Yuiliti

2.1.1.3.- Propiedades Químicas

Corrosión

Propiedad de un material a deteriorarse cuando está sometido a la intemperie o factores como el agua y al aire.



Figura 6.- Corrosión en una tubería de agua potable

Fuente: Corrosión en tuberías de acero – MERUS

2.1.2.- Materiales De Construcción²

Los materiales de construcción son todos aquellos cuerpos o elementos que forma parte en la construcción, estos pueden ser obtenidos de forma natural o pueden ser compuestas por otros materiales básicos que son obtenidas en un principio como materia prima para luego ser formada a un segundo material con nuevas propiedades.

2.1.2.1.- Materiales Naturales

Son aquellos materiales que son obtenidos tal como se los encuentra en la naturaleza, esto quiere decir que no han sido alterados en su comportamiento físico ni químico considerando que para su obtención si se necesitaron varios procesos físicos o mecánicos como pueden ser explosivos, procedimientos friccionantes o de corte según sean necesarios.

Ejemplo de materiales naturales: agua, madera, canto rodado, roca triturada, arena, madera, hidrocarburos, etc.

2.1.2.2.- Materiales Artificiales

Son aquellos materiales que son formados a partir de materiales naturales o no naturales que mediante uno o más procesos físicos, químicos o mecánicos permiten combinar materiales con diferentes características para obtener un material con nuevas propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Ejemplos de materiales artificiales: Cemento, Hormigón, Acero, Aditivos, Bloques, Ladrillos, etc.

2.1.3.- Acero

El Acero es un material artificial producto de la aleación de elementos como son principalmente el carbono y de otros materiales como el hierro, silicio, manganeso, níquel y cobre que son expuestas a una temperatura aproximada a 1500 °C para que todos sus componentes lleguen al punto de fusión, pero también se tiene en cuenta que este punto de fusión depende del porcentaje de aleación del acero. Sus propiedades pueden cambian a medida que varía su composición, un ejemplo de ellos es que un incremento de tan solo 0.01 % de su contenido de carbono produce un aumento aproximado en su resistencia a la fluencia de 35 kg/cm²³

² Blogger. Que son los materiales de construcción. Arkitektura.2011

³ (McCORMAC & CSERNAK, Diseño de Estructuras de Acero, 2013)

2.1.3.1.- Acero Estructural

Es un material muy utilizado en la industria de la construcción para obras de ingeniería como puentes, edificios, cubierta de edificaciones, galpones, etc.

Su fabricación es variada dependiendo de su forma como son laminas, placas, perfiles y otros elementos estructurales. También depende del grado del Acero como el Acero A 36 (ASTM).

2.1.3.2.- Grados del Acero

Los grados de acero fueron creados a través del tiempo cuando se necesitaban capacidades cada vez más altas en los miembros estructurales. Nombradas según la ASTM con la letra A al inicio y un número a continuación. La principal diferencia entre ellos es su punto de fluencia (F_y) y su esfuerzo último (F_u) aunque también depende del elemento que se vaya a construir por ejemplo el Acero ASTM A 529 funciona mejor en Diagonales y Cuerdas de Armaduras, en cambio el acero ASTM A 709 tiene más utilidad en la fabricación de elementos para puentes, torres y otras obras expuestas a la intemperie.

CORRELACION DE LAS NMX Y ASTM DE ACEROS ESTRUCTURALES					
Nomenclatura		$F_y^{(3)}$		$F_u^{(4)}$	
NMX (1)	ASTM (2)	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²
B-254	A 36	250	2,530	400 a 550	4,080 a 5,620
	A 529	345	3,515	485	4,950
		380	3,880	485	4,950
		320	3,235	460	4,710
B-282	A 242	345	3,515	485	4,920
		290	2,950	414	4,220
		345	3,515	450	4,570
B-284	A 572	414	4,220	515	5,270
		450	4,570	550	5,620
	A 992	345	3,515	450 a 620	4,570 a 6,330
B-177	A 53	240	2,460	414	4,220
B-199	A 500 (5)	320	3,235	430	4,360
B-200	A 501	250	2,530	400	4,080
	A 588 (6)	345	3,515	483	4,920
		250	2,550	400	4,080
		345	3,515	450	4,590
	A 709	485	4,950	585	5,965
		690	7,036	585	7,750
		620	6,322	690	7,040
	A 913 (7)	345 a 483	3,515 a 4,920	448 a 620	4,570 a 6,330

Figura 7.- Diferentes Grados de Acero utilizados en Latinoamérica

Fuente: El Acero de Hoy - Gerdau Corsa

Otra diferencia en su uso son los límites dimensionales que posee cada grado de acero como son:

ASTM A 36.- Para espesores mayores a 203 mm (8 in) el esfuerzo de fluencia baja a 2250 kg/cm² (32 ksi)

ASTM A 529.- En placas con espesores de hasta 25 mm (1 in) y 304 mm (12in) de ancho, en barras diámetros de hasta 63 mm (2,5 in).

ASTM A 572.- En placas con espesores de hasta 101 mm (4 in).

ASTM A 588.- En placas y perfiles su espesor hasta 101 mm (4 in)

TIPO DE ACERO	DIFERENTES USOS
ASTM A 36	<ul style="list-style-type: none"> -Placas de Conexión -Anclajes de barras redondas lisas (OS) y perfiles (LI) -Cuerdas Superiores e Inferiores de Armaduras (LI) -Montantes y Diagonales de Armaduras (LI) -Largueros Tipo Joist (OS ó LI) -Contravientos de Cubiertas (OS)
ASTM A 529 G 50	<ul style="list-style-type: none"> -Placas hasta 1" de espesor (Placas de Conexión, Placas Base, Cartabones, etc.) -Canales (CE) pequeños utilizados para alfardeas de escaleras y conexiones de postes de viento -Cuerdas de Armaduras de (LI) -Montantes y Diagonales (LI) -Contravientos Laterales (LI)
ASTM A 572 G 50	<ul style="list-style-type: none"> -Placa Hasta 4" -Vigas Principales tipo (IR) -Vigas Secundarias tipo (IR) -Columnas de Perfiles tipo (IR) -Mezzanines
ASTM A 588	<ul style="list-style-type: none"> -Acero Patinable (por lo general es un acero que estará sometido a la intemperie) -Plataformas Marinas
ASTM A 709	<ul style="list-style-type: none"> -Puentes -Torres de Transmisión
ASTM A 992	<ul style="list-style-type: none"> -Vigas (IR) -Columnas (IR) -Mezzanines (IR) -Postes de viento (IR) -Espectaculares (IR) -Trabes Carril
ASTM A 53	<ul style="list-style-type: none"> -Tubos Estructurales
ASTM A 500	<ul style="list-style-type: none"> -Columnas de secciones huecas cuadradas (HSS u OR) -Columnas de secciones huecas circulares (OC) -Columnas de secciones huecas rectangulares (HSS u OR)
ASTM A 501	<ul style="list-style-type: none"> -Bastidores (PTR u OR) -Bases de tanques de gas, de agua, etc (PTR u OR)

Figura 8.- Principales usos del Acero según su Grado

Fuente: El Acero de Hoy - Gerdau Corsa

2.1.3.3.-Composición química del acero según su grado⁴

Los elementos que componen el acero son Carbono (C), Manganeso (Mn), Fosforo (P), Azufre (S), Silicio (Si), Cobre (Cu), Niquel (Ni), Cromo (Cr), Vanadio (V), Cobalto (Cb) y Niobio (Nb), dependiendo del porcentaje que contenga su composición cambia su Resistencia, en la tabla siguiente podemos ver como varían y con esto influye en su resistencia.

Elemento	ASTMA 36	ASTMA 529 G 50	ASTMA 572 G 50	ASTMA 572 G 60	ASTMA 992 / AISC A 572 G 50
C (máx)	0.26	0.27	0.23	0.26	0.23
Mn (máx)	...	1.35	1.60	1.60	0.50 - 1.60
P (máx)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.035
S (máx)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.045
Si (máx)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Cu (mín)	0.20 *	0.20 *	0.20 *	0.20 *	0.60 ^A
Ni (máx)	...	...	...	...	0.45
Cr (máx)	...	...	...	...	0.35
Mo (máx)	...	...	...	...	0.15
V (máx)	...	...	0.01 - 0.15	0.01 - 0.15	0.15
Cb o Nb (máx)	...	...	0.005 - 0.05	0.005 - 0.05	0.05
f _y (kg/cm ²)	2530	3515	3515	4200	3515 - 4570
f _u (kg/cm ²)	4080 - 5620	4920 - 7030	4570	5300	4570 **
Elong. en 200 mm (mín,%)	20	18	18	16	18
Elong. en 50 mm (mín,%)	21	21	21	18	21

... Indica que no tiene un contenido máximo.

* Sólo se coloca en la composición, cuando así se especifica.

Fuente: ASTM Volume 01.04 2009

** La relación entre f_y / f_u, no excederá el valor de 0.85.

^A Indica contenido máximo.

f_y = Esfuerzo de Fluencia, kg/cm².

f_u = Resistencia a la Ruptura por Tensión, kg/cm². Cuando se indican 2 valores, el segundo es el máximo admisible.

Figura 9.- Composición Química del Acero según su Grado

Fuente: El Acero de Hoy - Gerdau Corsa

2.1.3.4.- Acero Dulce

El acero dulce se caracteriza por su bajo contenido de carbono, de tal manera que, cuando un miembro de acero dulce es sometido a tensión, reduce considerablemente su sección transversal y produce gran alargamiento hasta llegar a su fractura.

2.1.3.5.- Relación Esfuerzo deformación del Acero

Esta relación nos muestra el comportamiento que tiene el acero bajo fuerzas internas o externas. Si graficamos el comportamiento del Acero sometido a tracción, podemos observar el comportamiento completo del miembro.

⁴ Rosario & Valadez, 2017, Elección de Acero para Estructuras, pág. 6-10

Diagrama Esfuerzo - Deformación Unitaria⁵

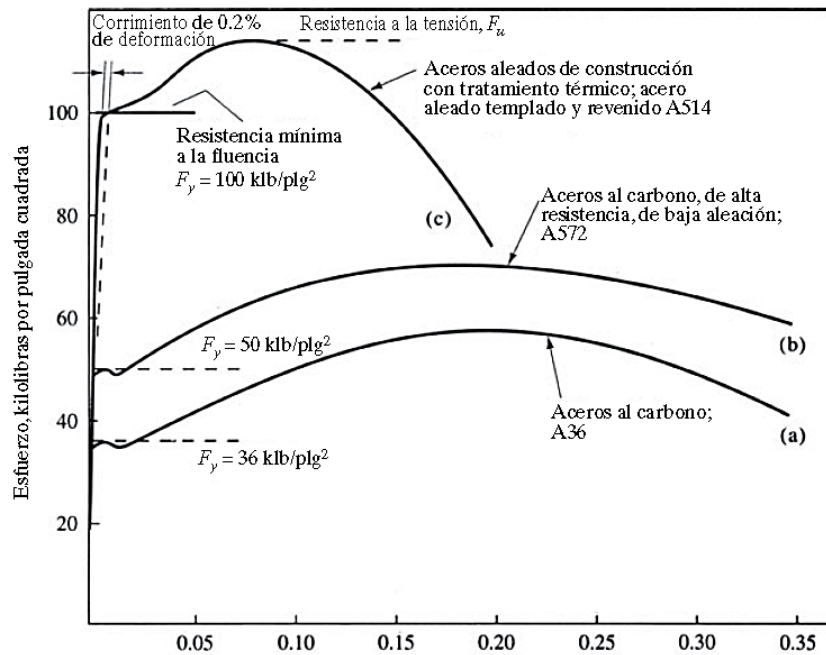


Figura 10.- Comportamientos característicos de aceros estructurales dulces de diferente grado ASTM.

Fuente: Diseño de Estructuras de Acero - Mc Cormac

2.1.3.5.1.- Módulo de Elasticidad del Acero

El módulo de elasticidad o también conocido como Módulo de Young es la propiedad de los materiales elásticos de resistirse a un esfuerzo de tracción o compresión (según sea el caso) produciendo una deformación, luego de quitar dicho esfuerzo el cuerpo vuelve a su estado original. Esta condición solo se cumple mientras el esfuerzo se ubique dentro de la zona elástica del material.

El valor del módulo de elasticidad se obtiene con la pendiente (relación esfuerzo deformación unitaria) de la curva en la zona elástica o la tangente del ángulo formado desde el eje de deformación unitaria y la inclinación de la curva.

$$E = \frac{f_s}{\epsilon}$$

Generalmente el valor del Módulo de Elasticidad para todos los grados de acero estructural no cambia y es igual a $E = 29 \times 10^6$ kg/cm² (29 000 ksi) [200 000 MPa]

⁵ Jack C. Mc Cormac, Diseño De Estructuras De Acero, 1996

2.1.3.5.2.-Zona Elástica

La primera zona del diagrama Esfuerzo – Deformación Unitaria se conoce como Zona Elástica y es donde el material tiene dicho comportamiento, este rango va desde el origen hasta donde la curva pierde su linealidad, en el eje de esfuerzos su límite viene dado por el valor (F_y) dependiendo del tipo de acero.

2.1.3.5.3.- Zona Plástica

Esta zona presenta también otras subzonas y su rango desde que la curva cambia de pendiente en un valor (F_y) en el eje de esfuerzos hasta su valor de esfuerzos último (F_u) donde falla de una manera dúctil.

La primera subzona es la de Plastificación donde no es necesario aumentar la carga para que se el elemento se deforme hasta distribuir los esfuerzos a lo largo de todo su cuerpo. A partir de esta zona en adelante pierde su propiedad elástica por lo que al quitar la carga este sufrirá de una deformación permanente que en el diagrama perpendicular a la curva de la zona elástica trazada desde donde se quitó la carga hasta el eje de deformación unitaria.

La segunda zona es la de endurecimiento donde el cuerpo ya se ha deformado y recupera un porcentaje muy pequeño para seguir deformándose al aumentar la carga hasta llegar a su esfuerzo último (F_u), a partir de aquí el cuerpo fallará inevitablemente.

A continuación, se pueden comparar diferentes comportamientos en aceros de distinto grado.

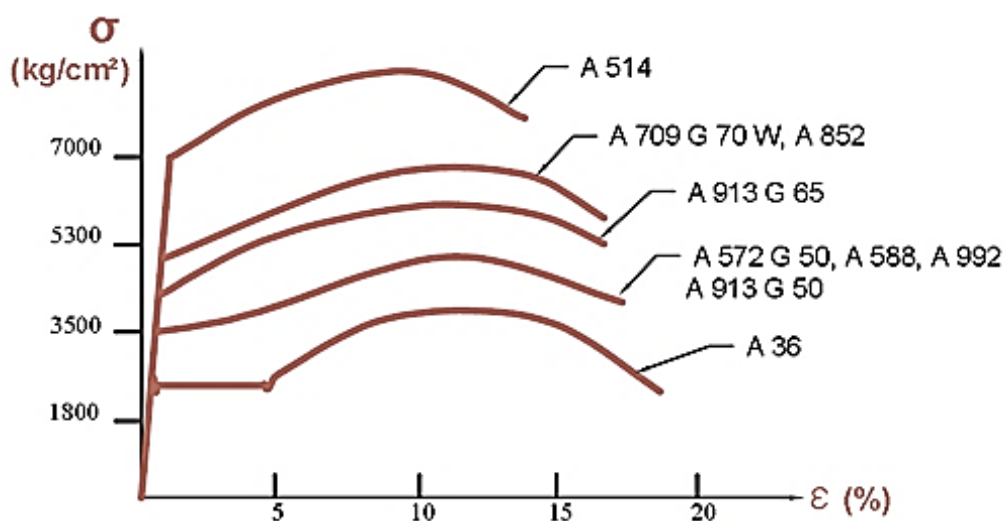


Figura 11.- Curva Esfuerzo - Deformación Unitaria de Aceros de distinto Grado ASTM

Fuente: El Acero de Hoy - Gerdau Corsa

Como se dijo anteriormente la resistencia del acero aumenta si el porcentaje de carbono es mayor, a continuación, podemos ver el comportamiento de un acero con alto contenido de carbono y uno con bajo contenido.

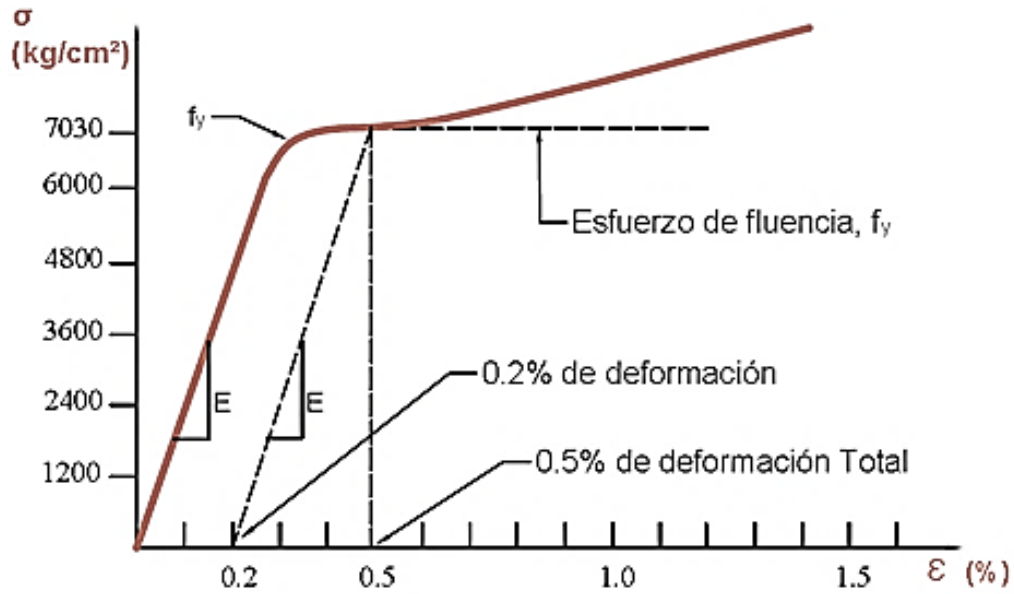


Figura 12.-Porción Inicial de la curva Esfuerzo - Deformación Unitaria para aceros de Alto contenido de Carbono

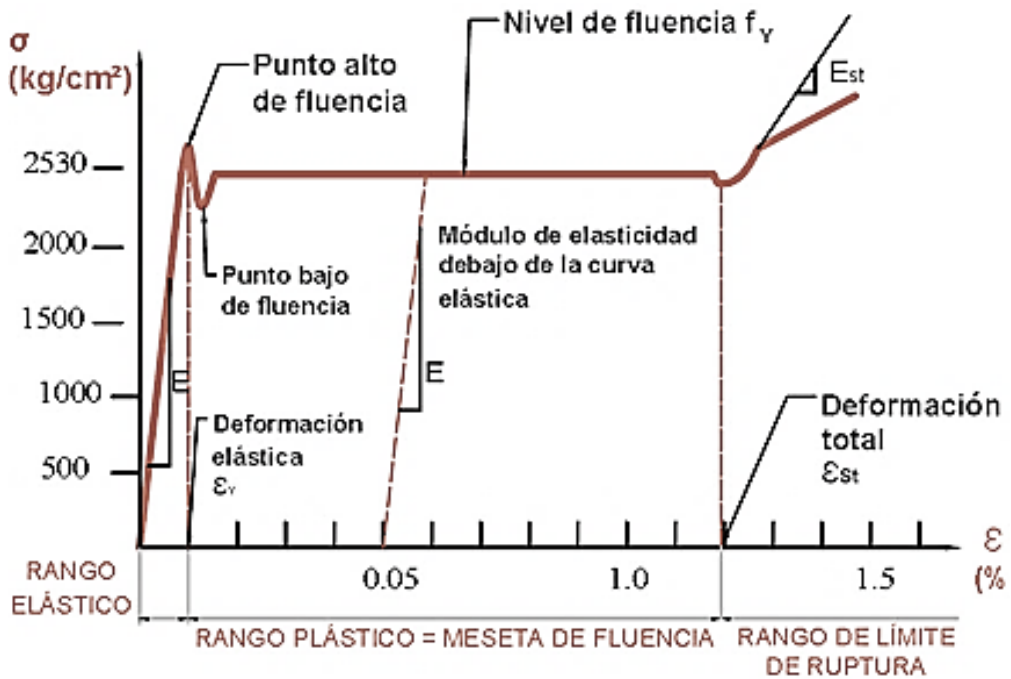


Figura 13.- Porción Inicial de la curva Esfuerzo - Deformación Unitaria para aceros de Bajo contenido de Carbono

Fuente: El Acero de Hoy - Gerdau Corsica

2.1.3.6.-Miembros estructurales de acero según su fabricación⁶

2.1.3.6.1.- Miembros laminados en caliente

El proceso de fabricación de estos miembros es el de someter lingotes o bloques de acero a altas temperaturas hasta llegar a una temperatura manejable donde a través de varios moldeadores va consiguiendo su forma final hasta enfriarse.

La principal ventaja del laminado en caliente es que, aunque acumula esfuerzos residuales en su construcción, no consta de zonas plastificadas como pasa en las secciones conformadas en frío. Y su principal desventaja es que solamente se puede laminar geometrías básicas como secciones Rectangulares, I y redondas.



Figura 14.- Proceso de fabricación del acero laminado en caliente

Fuente: Perfil I Laminado en Caliente – AHMSA

2.1.3.6.2.- Miembros conformados en frío

Para la fabricación de miembros conformados en frío se requieren de láminas previamente ya fabricadas de dimensiones ya establecidas que posteriormente pasa por varios procesos

⁶ Servicios de Fabricación. www.dipacmanta.com: 10/7/2017

de doblado y moldeado hasta llegar a su geometría final, estas partes que han sido forzadas en el proceso de construcción son deformaciones permanentes.

La principal ventaja de este tipo de laminado es que se pueden obtener geometrías más alargadas, delgadas y variadas en su sección transversal, estas secciones son las láminas en L, C o S. Su principal desventaja es que en el proceso de doblado y moldeado, los miembros poseen partes plastificadas que disminuyen su resistencia.

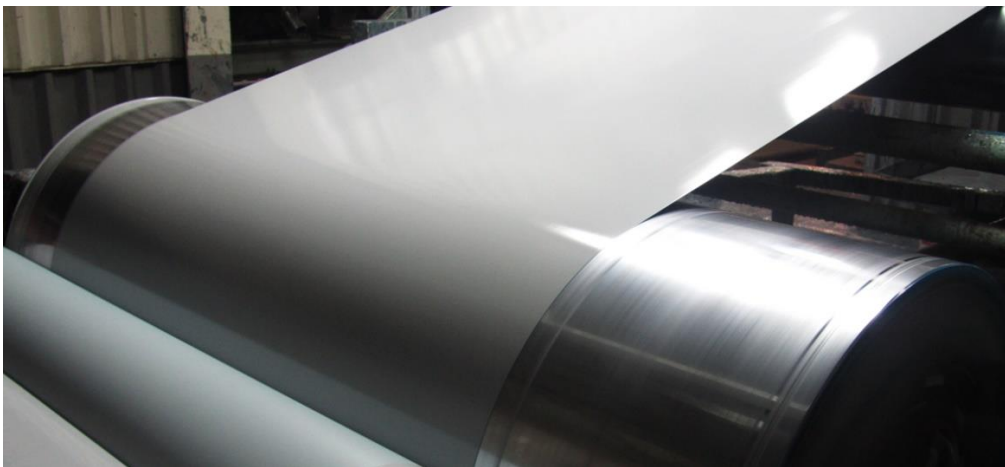


Figura 15.- Proceso de fabricación del acero conformado en frío

Fuente: Pro Coat

2.1.3.6.3.- Miembros Soldados

La fabricación de perfiles soldados empieza por planchas planas, conformadas en frío o una mezcla de ambos para formar secciones mucho más complejas, estas secciones son cortadas, armadas y finalmente soldadas donde consiguen su geometría final.

La soldadura se produce de fundir 2 piezas de acero por medio de un Electrodo (sueda) que une las 2 piezas en una sola. Al fundirse las piezas y luego de enfriarse se forma un cordón de soldadura, algunas veces es necesario de presión y calor o solamente presión para que la soldadura se produzca.



Figura 16.- Proceso de soldadura de láminas de acero

Fuente: Control de humo y gases en la soldadura - Concremaz

2.1.4.-Hormigón

También conocido como Concreto es un material semejante a la piedra que se obtiene mediante una mezcla cuidadosamente proporcionada de cemento, arena y grava u otro agregado y agua; después esta mezcla fragua (se endurece) con la forma y dimensiones del encofrado (molde en el cual es vertido el hormigón). El cuerpo del material consiste en agregados gruesos, finos y aditivos.

Los aditivos son sustancias químicas que permiten el aumento, disminución, añadidura o anulación de una o más propiedades de los materiales que componen el hormigón.

El cemento y el agua interactúan químicamente para disminuir las partículas de agregado y conforman una masa sólida⁷.

⁷ Arthur H. Nilson, Diseño de Estructuras de Concreto, 2001

2.1.4.1.-Hormigón Armado

El hormigón armado es un material compuesto por hormigón y refuerzo metálico, el refuerzo consiste en hierros redondos que son colocados en las secciones donde el hormigón está expuesto a esfuerzos de tracción.⁸

La finalidad de esta combinación es aprovechar las propiedades que cada uno de estos materiales posee para obtener un material mucho más complejo y funcional, en la siguiente figura podemos ver un ejemplo de una viga carga a flexión y como sus materiales reaccionan ante tal carga siendo que sobre el eje neutro de la viga el hormigón está soportando esfuerzos de compresión y bajo el eje neutro donde existe agrietamiento y por donde se ubica el refuerzo metálico este soporta los esfuerzos de tracción.



Figura 17.- Agrietamiento de una viga reforzada sometida a flexión

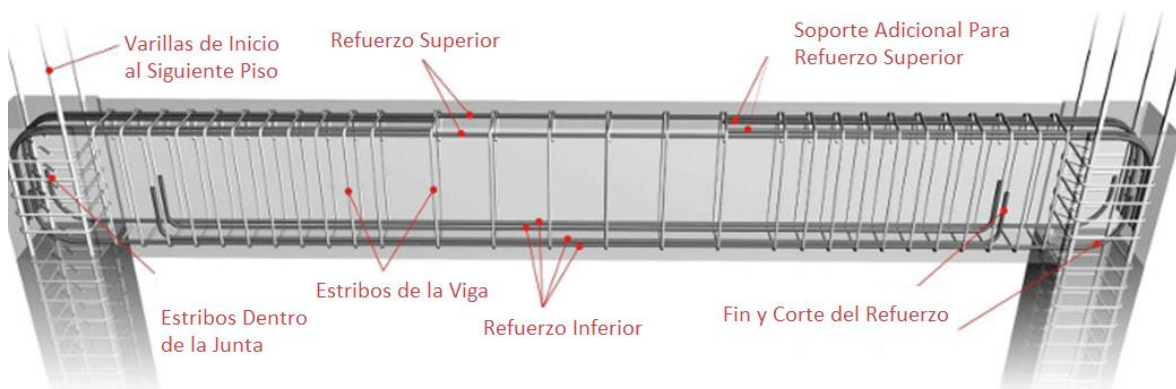


Figura 18.- Construcción y Colocación del refuerzo a corte y flexión de una viga armada

2.2.- Miembros Compuestos

Se denomina como elemento compuesto a la conformación de elementos con 2 o más materiales de construcción como pueden ser las combinaciones siguientes: Madera – Hormigón, Acero – Madera, Acero – Hormigón, siendo este último el más comúnmente

⁸ Halinco, Hormigón Armado, 2004

usado. En este caso podemos exceptuar al Hormigón Armado pues este material, aunque sea la combinación de Hormigón y refuerzo en varillas de acero se lo denomina como un material especial.

De la combinación entre el Hormigón y Acero podemos obtener dos tipos de configuración que son los perfiles embebidos en hormigón y los Perfiles de Acero rellenos de Hormigón. Cada una de estas configuraciones le dan a la sección propiedades diferentes que las veremos a continuación.

El código europeo de materiales mixtos también conocido como Eurocódigo 4 menciona este tipo de elementos de la siguiente manera:

“Son miembros estructurales compuestas de Hormigón y perfiles de acero estructural laminados en frío que están interconectados con conexiones que soportan corte y que limitan el desplazamiento longitudinal y separación entre sus miembros.”⁹

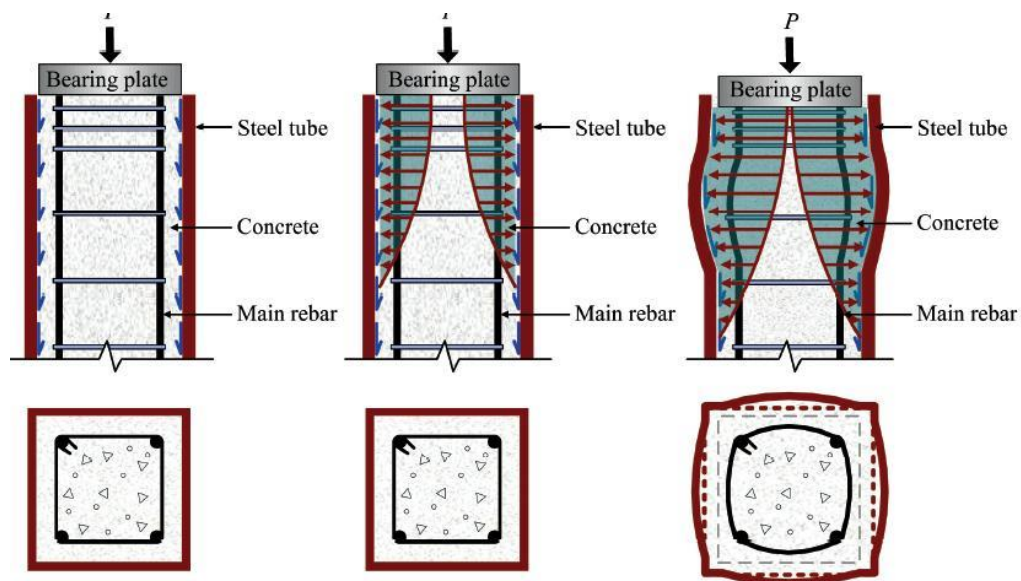


Figura 19.- Efecto Poisson de una columna rellena de hormigón armado al ser sometida a compresión

Fuente: Columnas Compuestas Encamisadas – Nelson Hincapié, Oscar Sánchez

⁹ European Committee for Standardization, Eurocode 4: Design of composite Steel and Concrete Structures, 2004, Brussels, Belgic, Section 1.5.2.1.

2.2.1.- Ventajas y Desventajas de los miembros compuestos¹⁰

Ventajas

- Mayor Beneficio – Costo
- Optimización en los materiales
- Aumento en la luz libre
- Aumenta la resistencia al fuego y la corrosión en los perfiles embebidos en hormigón
- Para el mismo caso anterior, se disminuyen las deformaciones en los perfiles de acero
- Mayor resistencia al pandeo local

Desventajas

- Complejidad en los cálculos
- Falta de coordinación en la construcción
- Información escasa o nula para diseños de elementos compuestos

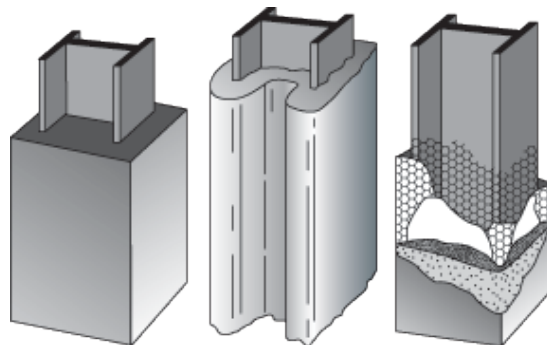


Figura 20.- Columna de sección compuesta, elemento metálico embebido en hormigón

Fuente: Columnas de Acero – Estefanía Cahum

2.2.2.- Miembros Compuestos Según Su Configuración

2.2.2.1.- Miembros Compuestos Rellenos

¹⁰ Daniel Carapaz y Elvis Escudero, Tesis: Comparación Técnica-Económica de Elementos Compuestos vs Elementos de Acero y Elementos de Hormigón Armado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, diciembre 2012, Quito Ecuador, pg. 2.

Están compuestos por un miembro tubular que puede ser circular o rectangular que es rellena con hormigón y es usado principalmente en la construcción de columnas, su geometría tiene la función de envolver y confinar al hormigón. Una ventaja particular es que no se requiere de encofrado.

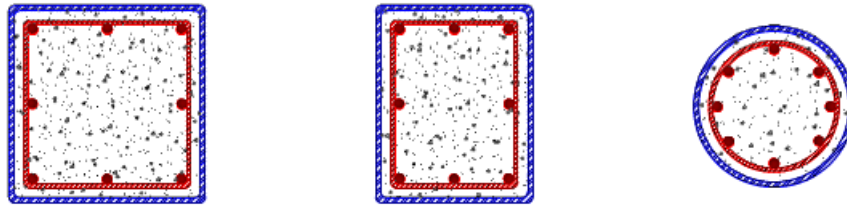


Figura 21.- Miembros Compuestos de Perfiles de Acero rellenos de Hormigón Estructural con Hormigón Armado

Fuente: Diseño Sismorresistente de Estructuras de Acero

2.2.2.2.- Miembros Compuestos Embebidos

Están compuestos por uno o varios perfiles de acero los cuales están rodeados por hormigón armado, de esta manera le es proporcionada una capa que reviste y le brinda resistencia ante el fuego en caso de incendios y a la corrosión cuando el elemento se encuentra a la intemperie; es utilizado para la construcción de vigas, columnas y muros.

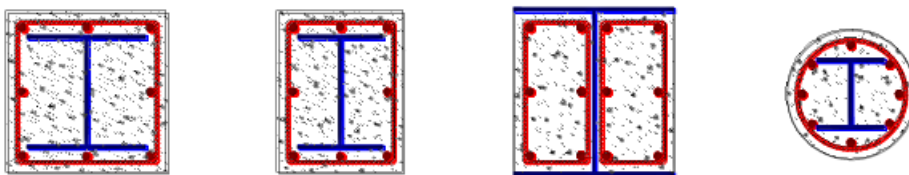


Figura 22.- Miembros Compuestos de Perfiles de Acero embebidos en hormigón armado

Fuente: Diseño Sismorresistente de Estructuras de Acero

2.2.2.3.- Vigas compuestas con conectores de corte

Resultado de combinar una viga de acero con una losa de Hormigón, están unidos con conectores de corte los cuales se logran a través de pernos que se sueldan en la parte superior de las alas de la viga de acero. Esta es una adaptación que es fácilmente ejecutable en la construcción.

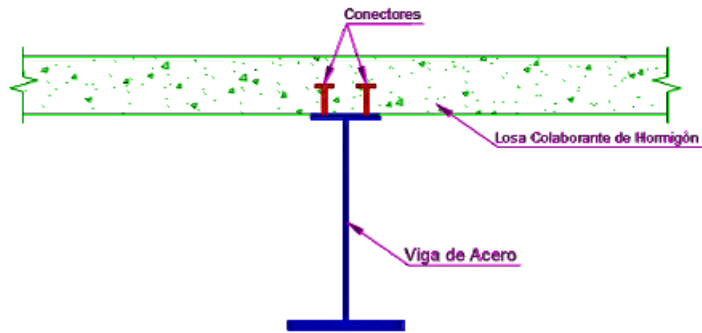


Figura 23.- Viga Compuesta con Losa Colaborante

Fuente: *Diseño Sismorresistente de Estructuras de Acero*

2.2.2.4.- Losa Compuesta Sobre Paneles

Esta configuración se consigue cuando una losa de hormigón es fundida sobre paneles metálicos en una dirección (deck) y esta a su vez es conectada por muescas o dientes en las vigas, estas permiten la transmisión de esfuerzos entre el acero y el hormigón. Una gran ventaja de este tipo de losas es que no necesita encofrado por lo que se reduce su tiempo de ejecución.

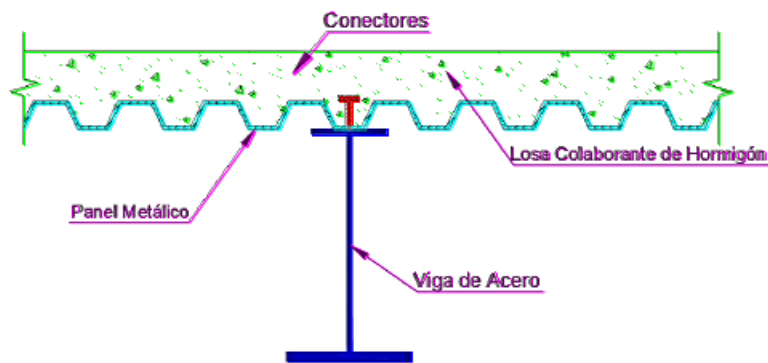


Figura 24.- Viga Compuesta con Losa de hormigón sobre panel metálico

Fuente: *Diseño Sismorresistente de Estructuras de Acero*

CAPÍTULO 3.- PANDEO DE COLUMNAS

3.1.- Generalidad del Pandeo

El pandeo es un fenómeno que ocurre cuando un elemento esbelto (elemento largo) está sometido a cargas de compresión a lo largo del eje de mayor dimensión. Las columnas son los elementos estructurales que principalmente sufren este fenómeno por lo que es de gran importancia para el análisis estructural.

Existen dos modos diferentes de pandeo en los cuales las columnas pueden reaccionar y son los siguientes:

3.2.- Pandeo Global

3.2.1.- Pandeo por flexión

También llamado Pandeo de Euler el pandeo por flexión es el primer modo de pandeo que se analiza en miembros esbeltos, esto quiere decir que depende principalmente de su longitud de tal manera que mientras más esbelto es el miembro, menor será la carga necesaria para que ese elemento pandee por flexión.

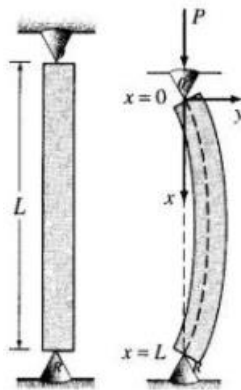


Figura 25.- Pandeo por flexión en una barra sometida a compresión

Fuente: *Diseño Sismorresistente de Estructuras de Acero*

Al aplicarse una carga de compresión a una barra, esta fallará por flexión porque su valor de esbeltez kl/r es muy grande en relación con sus dimensiones.

Para que un miembro estructural esbelto llegue a pandear por flexión es necesario que el miembro esté sometido a una carga mayor que la carga crítica de pandeo propuesta por Euler. Leonhard Euler fue un matemático suizo que en 1757 en un artículo científico publicó la importancia del pandeo en las columnas. Desde entonces se conoce a la siguiente expresión como la fórmula de Euler mejor descrita como la crítica de Euler.

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2}$$

Siendo:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Y Donde:

Fe: Carga crítica de Euler

E: Módulo de Elasticidad del elemento

K: Factor de Longitud Efectiva

L: Longitud libre del elemento

I: Inercia de la sección transversal

A: Área de la sección

En la expresión Fe podemos observar que el valor de la carga crítica no solamente depende de su longitud, sino también de sus condiciones geométricas como son su inercia y su área, también podemos ver que depende principalmente del material con el que está hecho el elemento pues es muy diferente una columna de madera y una columna con una columna de hormigón de las mismas dimensiones. Por último, podemos ver que también está relacionado con el factor K que depende directamente del tipo de apoyo al que está sujeto.

3.2.2.- Pandeo Torsional

El pandeo torsional se produce cuando el momento polar de inercia en la sección de un miembro a compresión es muy bajo, dicho miembro rota alrededor de su eje longitudinal y esto produce que todo el miembro gire por su inestabilidad.

El pandeo por flexo torsión como su nombre lo indica es el efecto combinado del pandeo por flexión y el pandeo torsional, aunque también puede fallar solamente por torsión. Por lo general, los miembros a compresión con secciones doblemente simétricas no presentan torsión, pues en estos perfiles la línea de acción de las cargas laterales pasa por el centro de cortante de la sección.

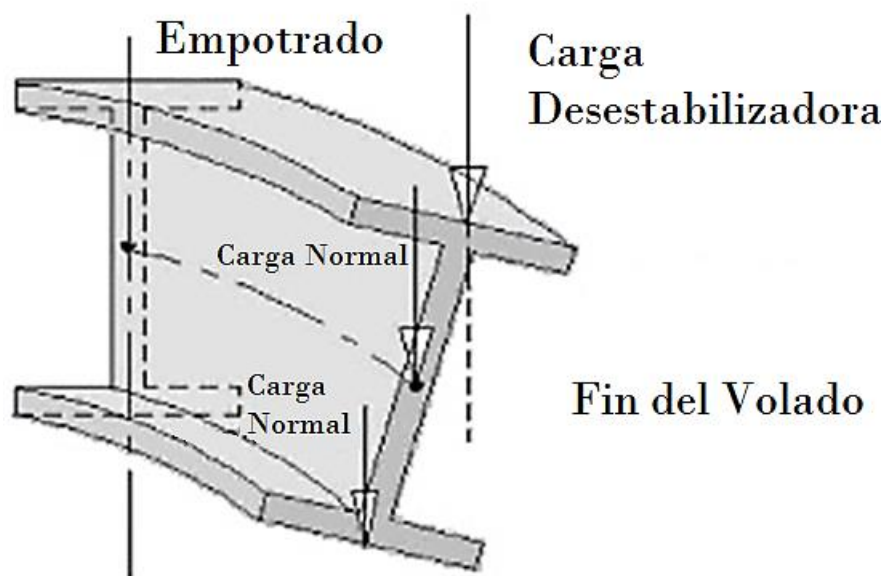


Figura 26.- Pandeo por Flexo torsión de una viga

Fuente: Resistencia de Miembros a Flexión – Rafael Rangel

Existen otra variante del pandeo torsional como el pandeo lateral torsional, donde un miembro sometido flexión presente tracción y compresión en los elementos que componen la sección, la parte que está a tracción es estable hasta antes que llegue a su punto de fluencia,

pero la parte a compresión es inestable, lo que provoca que los elementos de la sección que están a compresión se salgan de su plano hacia un lado.

El centro de cortante es el punto en el plano de la sección transversal de un miembro estructural por donde la resultante de las cargas transversales debe pasar para que sus esfuerzos solo se puedan calcular con la teoría de corte transversal y de flexión pura. A continuación, se presentan algunos ejemplos de la ubicación del centro de corte en secciones con una sola simetría y sin simetría.

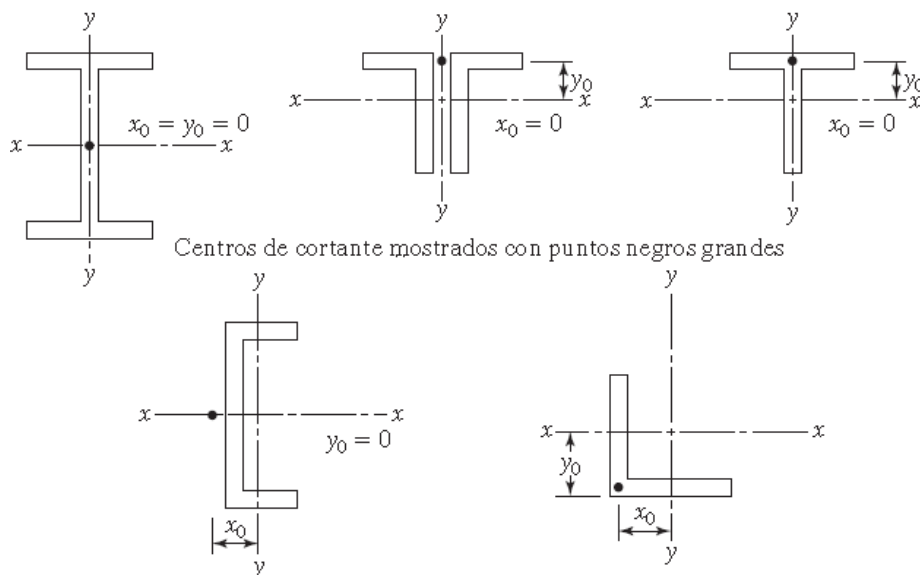


Figura 27.- Centro de Cortante en varios perfiles metálicos

Fuente: *Diseño de Estructuras de Acero - Mc Cormac*

Las secciones W, M y canales son las más propensas a sufrir de pandeo torsional, para estos casos es recomendable usar secciones en cajón y evitar en su medida que se presenten estos efectos en los miembros estructurales, o en su defecto proporcionar soportes laterales para evitar desplazamientos de este tipo, estos soporte pueden ser arriostramientos que vayan en los extremos o en el medio de la longitud del miembro de tal manera que se cumpla la condición deseada como se muestra en la figura siguiente.

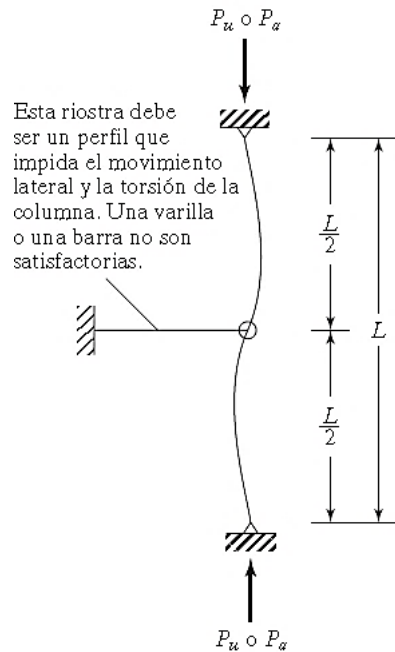


Figura 28.- Función de los arriostramientos en columnas esbeltas

Fuente: *Diseño de Estructuras de Acero - Mc Cormac*

3.2.3.- Longitud Efectiva y Condiciones de Apoyo¹¹

Se define a la Longitud Efectiva como la distancia que existe entre puntos de inflexión, estos puntos se caracterizan por tener momentos nulos (momento cero) y son un punto de articulación para los elementos pandeado. Aunque la distancia L se multiplique con el valor k para obtener la Longitud Efectiva KL , este valor es solo una representación matemática de una columna equivalente con apoyos articulados.

Como se mencionó anteriormente el factor k es un valor que depende del tipo de apoyo al cual este soportado el elemento dependiendo de si estos restringen giros o desplazamientos. Los elementos con mayores restricciones a la rotación y desplazamiento soportan cargas más altas que aquellas que tienen apoyos articulados. El factor k es un método para solucionar problemas complejos de pandeo.

¹¹ Mc Cormac and Csernak, *Diseño de Estructuras de Acero*, New Jersey, Alfaomega, 5ta Edición, 2012.

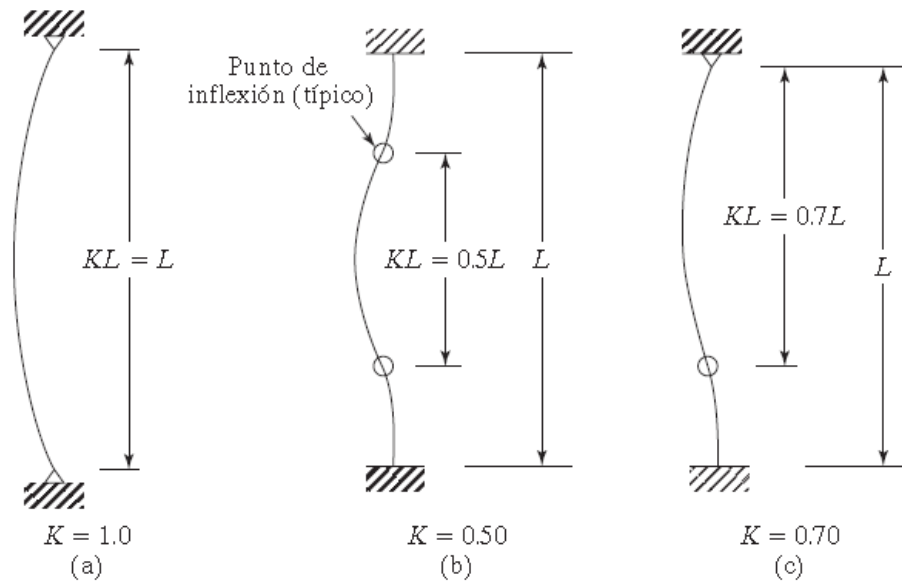


Figura 29.- Comportamiento de una columna según su tipo de apoyo

Fuente: Diseño de Estructuras de Acero - Mc Cormac

Para representar lo antes mencionado podemos ver en la ilustración anterior el efecto que produce k dependiendo de sus apoyos, siendo la figura (a) una columna con articulación en ambos extremos donde el valor k es 1, vemos que el valor teórico de la longitud efectiva es igual a la longitud real; en la figura (b) la columna se encuentra empotrada en sus extremos y al pandear se aprecia puntos de momento cero en el primer y tercer cuarto de su longitud por lo que en esos puntos se crea una condición articulada y la longitud efectiva de aquella proporción de columna cambia a $0.5 L$ y en la figura (c) al tener una columna con un empotramiento y articulación su longitud efectiva cambia a $0.7 L$ produciendo un punto de inflexión en el primer cuarto más próximo al empotramiento.

Esto no quiere decir que el valor teórico solo va de $0.5 L$ a L , pues en la vida real las columnas están construidas sobre pórticos con columnas de iguales o similares características, de tal manera que las columnas son continuas y las uniones no proporcionan una perfecta restricción al desplazamiento, para que los marcos permanezcan rígidos es necesario el uso de arriostramientos, siendo la riostra el elemento que le da tal condición. Cuando no existen arriostramientos y las columnas son continuas se pueden entender como una sola columna a

aquellas del mismo eje, de tal manera que el valor de k puede llegar a ser de 2 como se observa en la figura (a), mientras que en la figura (b) podemos ver cómo se comporta una columna cuando no se consigue una restricción perfecta a la rotación.

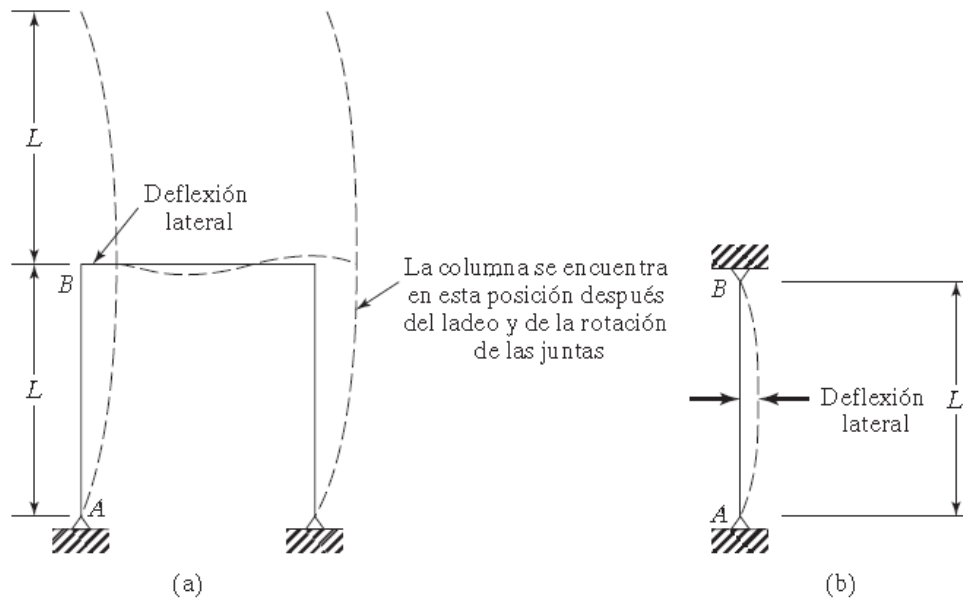


Figura 30.- Pandeo en Columnas continuas sin arriostramientos

Fuente: *Diseño de Estructuras de Acero - Mc Cormac*

En el diseño no es recomendable asignar estos valores para el factor k , sino que por la posibilidad de imperfecciones en la construcción y montaje se debe asumir valores considerablemente más conservadores y a continuación podemos ver en el siguiente cuadro los valores de k dependiendo del tipo de apoyo al cual las columnas estén sometidas.

Tabla 5.1 Valores aproximados del factor de longitud efectiva, K .	
Las líneas punteadas muestran la forma pandeada de la columna	
Valor K teórico	0.5 0.7 1.0 1.0 2.0 2.0
Valores recomendados de diseño cuando las condiciones reales son aproximadas	0.65 0.80 1.2 1.0 2.10 2.0
Símbolos para las condiciones de extremo	 <i>Rotación y traslación impedidas</i> <i>Rotación libre y traslación impedida</i> <i>Rotación impedida y traslación libre</i> <i>Rotación y traslación libres</i>

Fuente: Comentario de la Especificación, Apéndice 7 – Tabla C-A-7.1, p. 16.1-511, junio 22, 2010. Derechos reservados © American Institute of Steel Construction. Reproducido con autorización. Todos los derechos reservados.

Figura 31.- Valores de k para diferentes condiciones de apoyo

3.3.- Pandeo Local

El pandeo local se refiere al pandeo de uno o más elementos que componen la sección de la columna cuando está sometida a compresión, en algunos casos existe más de una ondulación en estos elementos, estas ondulaciones también son llamadas alabeos.

Consideramos como elemento a toda proporción rectangular que forma parte de una sección.

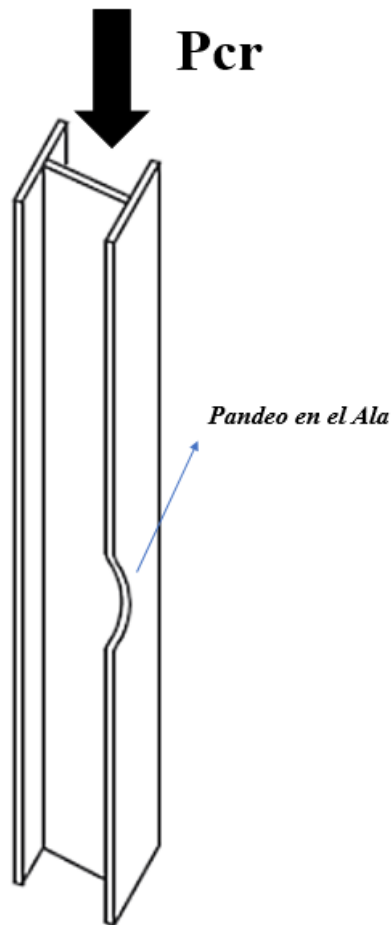


Figura 32.- Pandeo Local en una columna sometida a compresión

3.3.1.- Elementos Rígidos

En párrafos anteriores hemos hablado de secciones complejas, los cuales pueden tener una variedad de formas y estas secciones de geometrías complejas pueden ser de dos tipos, las secciones rígidas están formadas totalmente de elementos rigidizados y secciones no rígidas están compuestas por al menos un elemento no rigidizado.

Cuando hablamos de elemento rígido nos referimos a un elemento de la columna que está soportado en ambos bordes, y si uno de esos bordes se encuentra libre será un elemento no rigidizado. Ser un elemento rígido o no rígido es de suma importante en el pandeo porque aquellos elementos no rígidos serán más susceptibles a pandear, lo cual pone en riesgo la integridad del elemento estructural.

Para un entendimiento más claro mostraremos en la siguiente ilustración ejemplos de elemento no rigidizados (a) y elementos rigidizados (b).

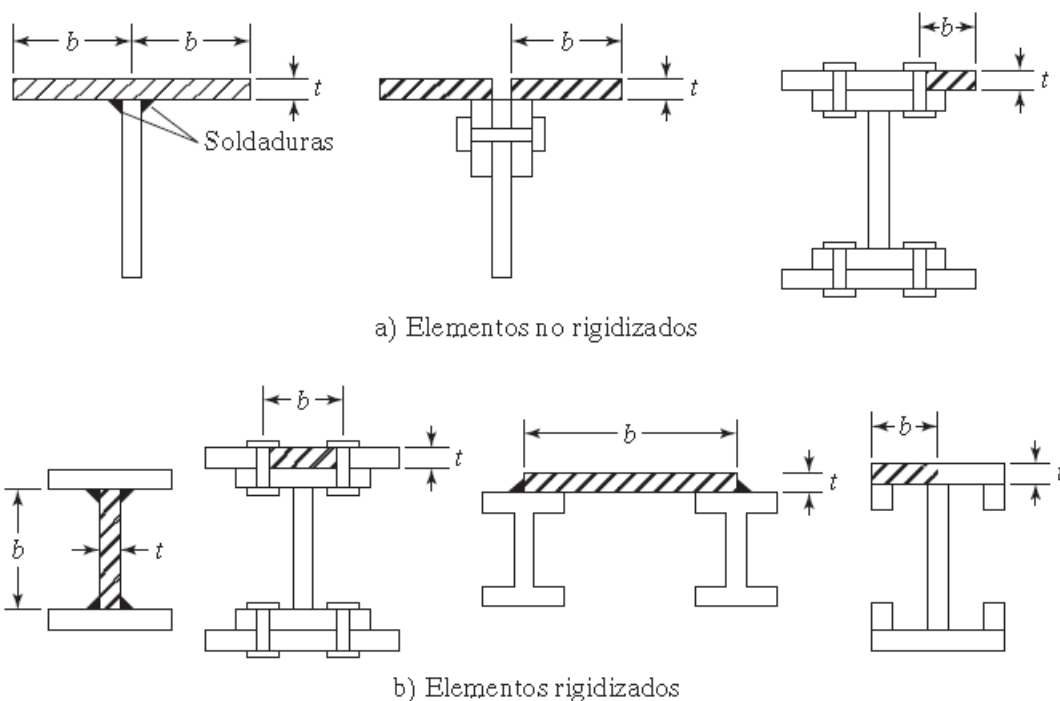


Figura 33.- Elementos Rigidizados y No Rigidizados

Fuente: Diseño de Estructuras de Acero - Mc Cormac

3.3.2.- Relación Esfuerzo de Pandeo por flexión - Esbeltez

La fuerza de pandeo resulta inversamente proporcional a la esbeltez de un miembro a compresión, por lo que mientras mayor sea su esbeltez, menor será la carga necesaria para que el miembro comprimido pandee por flexión, esto ocurre en las denominadas columnas largas, en columnas cortas en cambio la falla es por fluencia del miembro y en columnas intermedias la falla es combinada por lo que existe fluencia de algunos elementos y pandeo

de otros. este comportamiento se llama inelástico y en el diagrama a continuación podemos muestra esta relación de esbeltez y esfuerzo de pandeo.

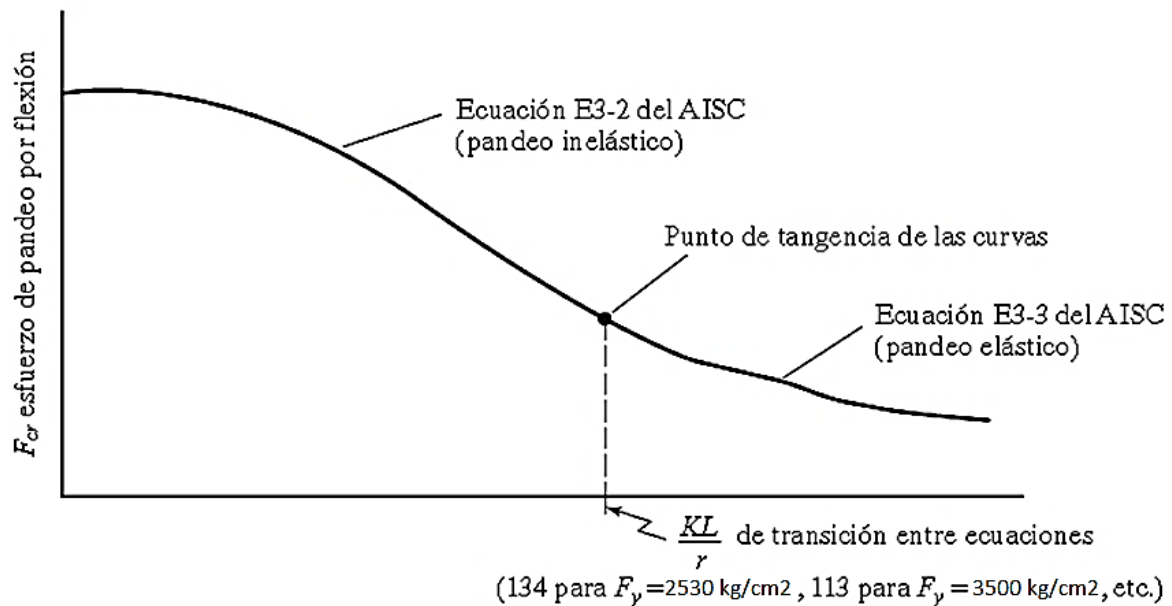


Figura 34.- Relación gráfica entre la esbeltez de la columna y su carga crítica de pandeo por flexión

Fuente: Diseño de Estructuras de Acero - Mc Cormac

3.3.3.- Elementos Esbeltos

Los elementos que conforman estas secciones se pueden clasificar como elementos esbeltos o no esbelto, siendo un elemento no esbelto aquel elemento que su relación: ancho – espesor (b/t) no supera el valor λ_r que representa el límite entre un elemento esbelto y no esbelto. Con esto la sección se puede clasificar como sección con elementos esbeltos o no esbeltos.

En el caso de que clasifique como sección con elementos no esbelto responderá a los requisitos de la sección E3 de las Especificaciones AISC de esta manera el pandeo por flexión controla la falla del miembro a compresión. Para miembros que clasifiquen como secciones con elementos esbeltos, la falla estará controlada por el menor valor de pandeo basado en el estado limite ya sea por flexión, torsión o flexo torsión los cuales se hacen referencia en la sección E7 de las Especificaciones AISC.

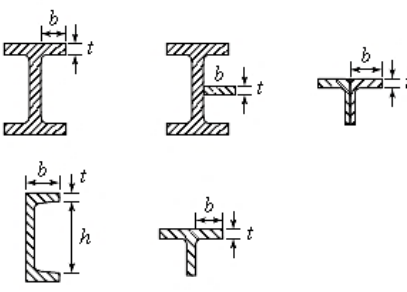
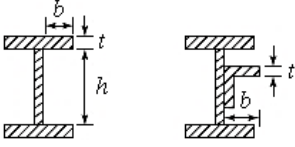
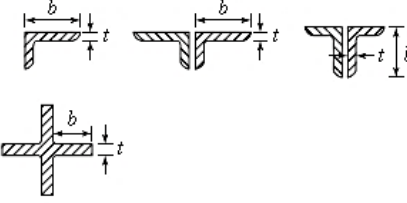
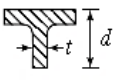
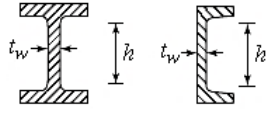
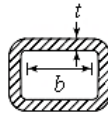
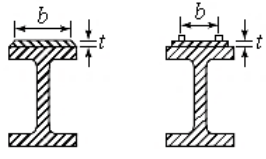
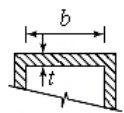
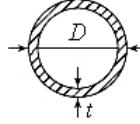
Caso	Descripción del elemento	Razón ancho-espesor	Relación límite ancho-espesor λ_r (no esbelto/esbelto)	Ejemplos
1	Patines de perfiles laminados I, placas salientes de perfiles laminados I, lados salientes de pares de ángulos conectados con contacto continuo, patines de canales, y patines de tes	bt	$0.56\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
2	Patines de perfiles compuestos I y placas o lados de ángulos salientes de perfiles compuestos I	bt	$0.64\sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}^{(\alpha)}$	
3	Lados de ángulos simples, lados de ángulos dobles con separadores, y todos los demás elementos no rigidizados	bt	$0.45\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
4	Almas de tes	dt	$0.75\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Figura 35.- Límite de elemento esbelto y no esbelto en secciones sometidas a compresión PARTE 1

Elementos rigidizados	Caso	Descripción del elemento	Razón ancho-espesor	Relación límite ancho-espesor λ_r (no esbelto/esbelto)	Ejemplos
	5	Almas de perfiles I y canales doblemente simétricos	h/t_w	$1.49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	6	Paredes de HSS rectangulares y cajones de espesor uniforme	b/t	$1.40\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	7	Cubreplacas de patines y placas de diafragmas ente líneas de conectores o soldaduras	b/t	$1.40\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	8	Todos los otros elementos rigidizados	b/t	$1.49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	9	HSS redondo	D/t	$0.11\frac{E}{F_y}$	

Fuente: Especificación AISC, Tabla B4.1A, p. 16.1-16, junio 22, 2010. Derechos reservados © American Institute of Steel Construction. Reproducido con autorización. Todos los derechos reservados.

Figura 36.- Límite de elemento esbelto y no esbelto en secciones sometidas a compresión PARTE 2

Actualmente no existe un límite de esbeltez en miembros estructurales a compresión de las especificaciones AISC como lo traían las versiones anteriores a la AISC del 2010, la cual decía que para miembros con una relación de $KL/r > 200$ el valor del esfuerzo crítico sería menor a 445 kg/cm².

En la tabla E 1.1 de las Especificaciones AISC podemos ver con claridad las secciones más comunes y el análisis que se debe realizar en función de la esbeltez de sus secciones, esta tabla puede verse en el capítulo 4.4.3.

3.3.4.- Teoría del Pandeo Placas

El pandeo en placas se define como el efecto de producir una deformación en la placa en forma de curva por la aplicación de cargas de compresión en su plano en dicho cuerpo, a partir de este efecto la integridad del cuerpo queda expuesta ya que el cuerpo sufrirá de esta deformación de manera permanente y es el inicio de la falla inevitable del cuerpo.

Los factores que intervienen en el pandeo de un cuerpo son los siguientes:

- Material del cuerpo
- Dimensiones del cuerpo
- Tipo de carga
- Condiciones de Apoyo

3.3.4.1.- Pandeo En Placas Por Compresión

La carga necesaria para producir este efecto a las placas es conocida como carga crítica de pandeo y es producto del equilibrio de un cuerpo bajo carga contenidas en el plano de la placa.

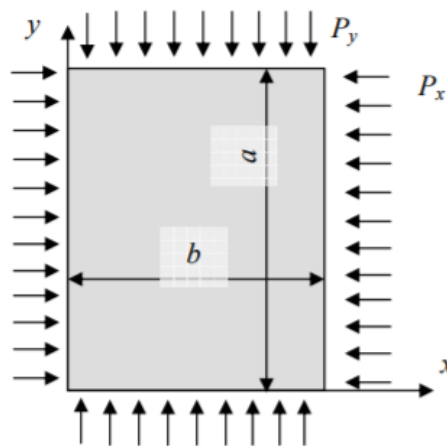


Figura 37.- Placa sometida a esfuerzos de compresión en su plano

Fuente: Cold – Formed Steel Design, Wei-Wen Yu and Roger A. LaBoube

Del diagrama de cuerpo libre de la placa podemos obtener una ecuación diferencial de segundo orden que responde al equilibrio la placa de la siguiente manera:

$$N \nabla^2 w = q - P_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - P_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2P_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

Esta expresión puede ser simplificada si solo consideramos que la carga P_y es la carga que produce el pandeo de la placa entonces podemos decir que:

$$\begin{aligned} q_0 &= 0 \\ P_x &= 0 \\ P_{xy} &= 0 \end{aligned}$$

Para Luego Obtener:

$$N \nabla^2 w = -P_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

Como en el estudio de placas las tensiones están consideradas por unidad de longitud podemos reemplazar N y dividirla para el espesor de la placa t donde conseguimos.

$$\frac{E t^2}{12(1-\mu)} \nabla^2 w = -\sigma_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

Para una placa en la que existen apoyos simples en sus bordes, la deformación se considera como:

$$w(x, y) = w_0 \operatorname{sen} \frac{n \pi x}{b} \cos \frac{m \pi y}{a}$$

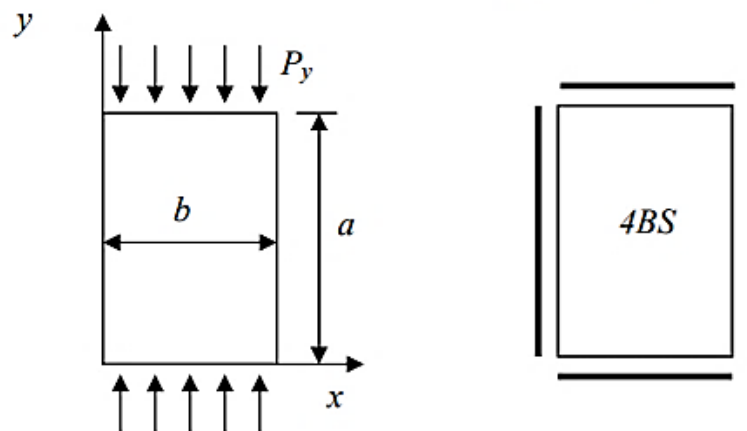


Figura 38.- Simplificación matemática de una placa cargada a compresión

Fuente: Inestabilidad de Placas – Marcos Actis, Alejandro Patanella

Las condiciones de borde satisfacen el equilibrio de tal manera que:

$$\text{para } \left. \begin{array}{l} 0 \leq x \leq b \\ y = 0 \end{array} \right\} M_y = 0 = -N \left(w_y'' + \mu w_x'' \right) \quad w = 0$$

$$\text{para } \left. \begin{array}{l} 0 \leq y \leq a \\ x = 0 \end{array} \right\} M_x = 0 = -N \left(w_x'' + \mu w_y'' \right) \quad w = 0$$

De esta manera podemos obtener la expresión general para la carga crítica de una placa con la siguiente expresión:

$$\sigma_{cr} = \left(\frac{a^2 n^2 + b^2 m^2}{abm} \right)^2 \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2$$

Donde:

a: Dimensión de la placa paralela a la dirección de la carga

b: Dimensión de la placa perpendicular a la dirección de la carga

t: Espesor de la placa

m: Número de alabeo longitudinales a la carga

n: Número de alabeos transversales a la carga

u: Coeficiente de Poisson

E: Módulo de Elasticidad del material de la placa

El menor valor posible de $n = 1$ por lo que asumiremos este valor para simplificar la expresión, de igual manera los valores obtenidos en el primer paréntesis lo denominaremos k de tal manera que:

$$\sigma_{cr} = \frac{\kappa \pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

donde $\kappa = \left(\frac{a}{bm} + \frac{mb}{a}\right)^2$

Las ondulaciones en la placa son llamadas también alabeos y en el siguiente gráfico podemos observar la dirección de estos alabeos de tal manera que cuando los bordes de la placa están simplemente apoyados y con la posibilidad de desplazarse solamente en direcciones del plano de la placa el pandeo tiene la siguiente forma.

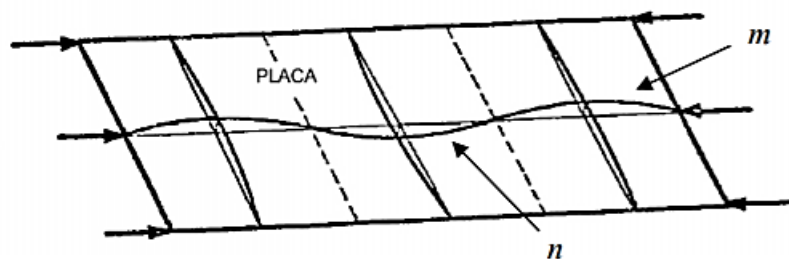


Figura 39.- Sentido de los alabeos en una placa sometida a compresión

Fuente: *Inestabilidad de Placas – Marcos Actis, Alejandro Patanella*

Para placas con diferentes tipos de apoyo el pandeo se asemeja a los siguientes;

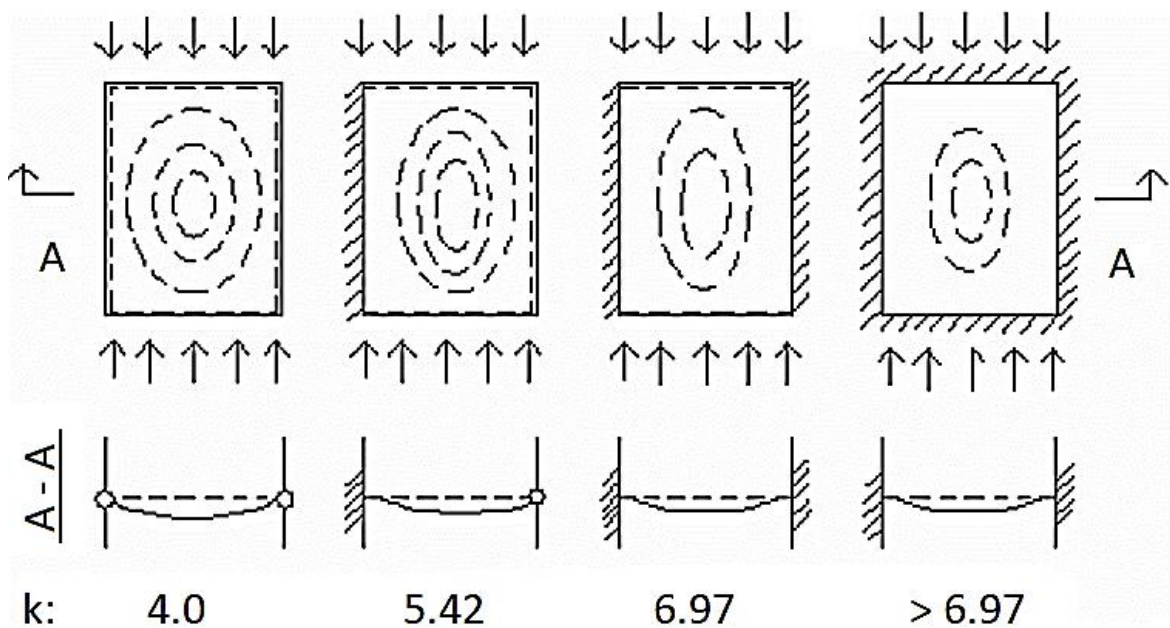


Figura 40.- Variación de k en función de los soportes en una placa cargada a compresión

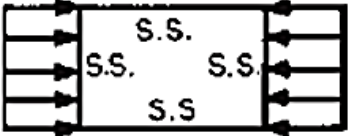
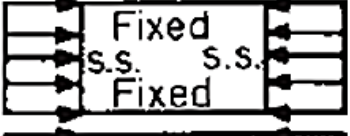
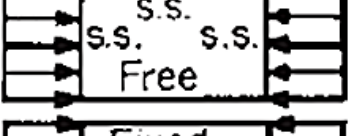
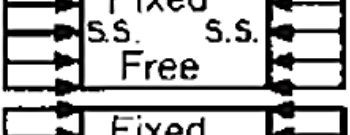
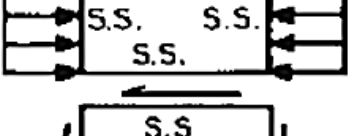
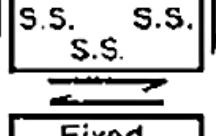

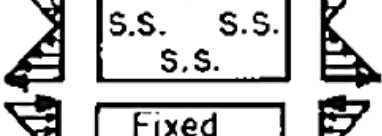

Caso	Condiciones de Apoyo	Tipo de Esfuerzo	Valor de k para placas largas
(a)		Compresión	4.0
(b)		Compresión	6.97
(c)		Compresión	0.425
(d)		Compresión	1.277
(e)		Compresión	5.42
(f)		Corte	5.34
(g)		Corte	8.98
(h)		Flexión	23.9
(i)		Flexión	41.8

Figura 41.- Valores predeterminados de k en función del tipo de esfuerzo sometido

Fuente: *Cold – Formed Steel Design*, Wei-Wen Yu and Roger A. LaBoube

El valor de k varía tanto del tipo de apoyo como del tipo de esfuerzo al que esté sometido, en los casos a, b, c, d, e, para elementos sometidos solamente a cargas de compresión los

valores de k desde 0.425 hasta 7 que son los más pequeños, este valor puede aumentar o disminuir para condiciones que no han sido consideradas como un apoyo sin rotación en las caras en las que se aplicara la carga de compresión. Las ilustraciones de los casos f y g poseen valores entre 5.34 y 8.98 que aún siguen siendo mayores que en los casos de compresión pura, finalmente en los casos h e i los valores de k para elementos cargados a flexión pueden ser mayores que 20. Los valores de k mostrados son aproximados.

Para diferentes tipos de distribución de carga los alabeos se desplazan de la siguiente manera:

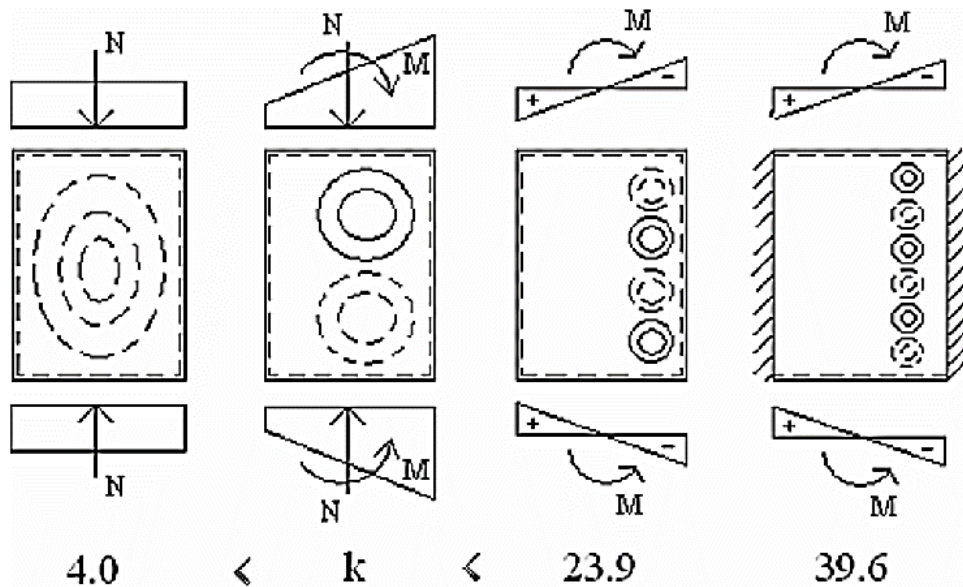


Figura 42.- Ubicación de los alabeos en función de la distribución de la carga de compresión

En este gráfico podemos ver como a medida que la distribución de carga varía los alabeos también se desplazan, los lugares en los que la placa está sometido a compresión son los que más alabeos presenta.

En los gráficos de los tipos de apoyo podemos apreciar como a medida que se aumentan los apoyos en los bordes los alabeos se van alejando de dicho apoyo, así también el valor de k .

3.4.1.1.- Relación entre el coeficiente de pandeo y proporción ancho largo en placas

Si relacionamos los valores de k (coeficiente de pandeo) y la proporción a/b (ancho – largo) podemos observar el comportamiento del cuerpo cuando cambian sus dimensiones, pero manteniendo los bordes simplemente apoyados, de esta manera vemos que para diferentes tipos de alabeos longitudinales la curva aumenta proporcionalmente en el eje a/b .

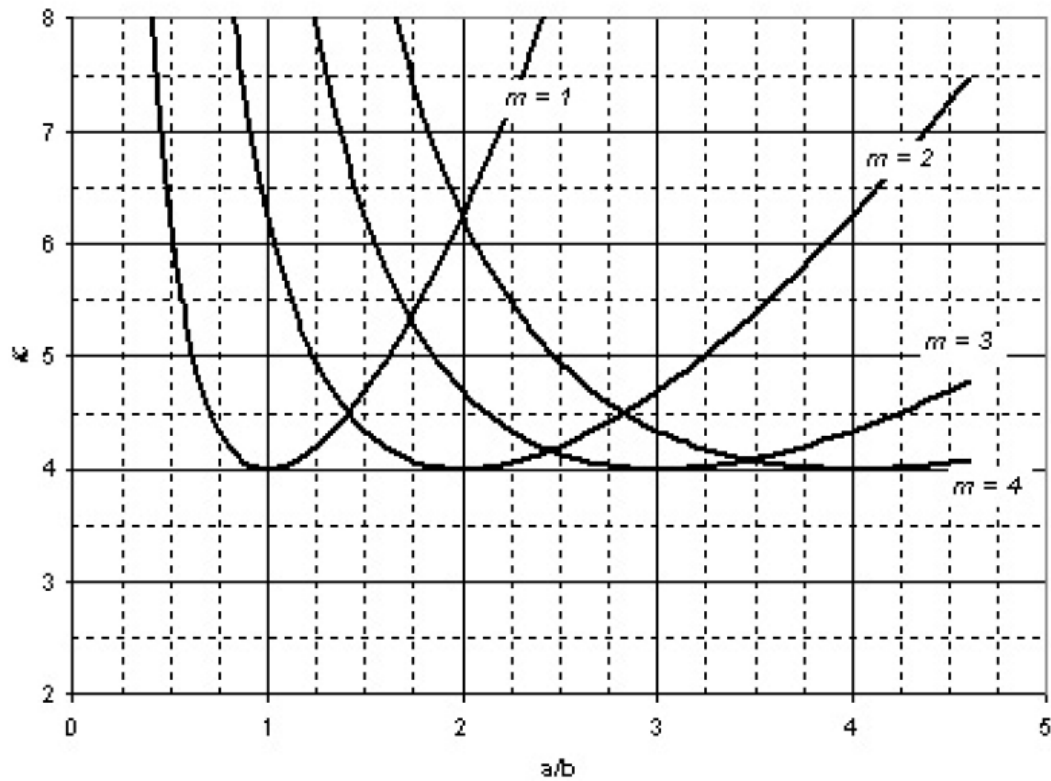


Figura 43.- Variación de k en función de su relación a/b para diferente número de alabeos

Fuente: Inestabilidad de Placas – Marcos Actis, Alejandro Patanella

m	a/b	κ
1	0.5	6.25
	1.0	4.00
	1.5	4.70
2	1.0	6.25
	1.5	4.34
	2.0	4.00
	2.5	4.20
3	2.0	4.69
	3.0	4.00
	4.0	4.34

Fuente: Inestabilidad de Placas – Marcos Actis, Alejandro Patanella

El valor k siempre tiende a 4 cuando la relación a/b de la placa es igual al número de alabeos longitudinales, siendo este a su vez su valor más bajo en placas soportadas por apoyos simples.

3.4.- Secciones Sísmicamente Compactas

Las secciones sísmicamente compactas son aquellas secciones sometidos a compresión que cumplen con los límites requeridos en su relación Ancho – Espesor, en este caso el límite para compresión es “ λ_{ps} ” y se encuentra tabulado dependiendo de su geometría.

En el Ecuador los límites máximos permitidos para esta condición vienen dados en la siguiente tabla que forma parte de la NEC SE AC para elementos con diferentes condiciones de rigidez.¹²

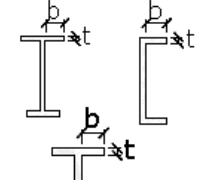
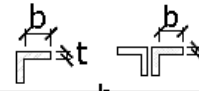


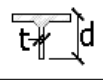
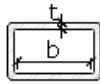

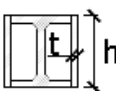

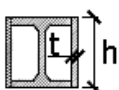



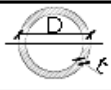
	Tipo de elemento	Relación ancho-espesor	Límites	Ejemplo
			λ_{ps}	
Elementos no Rigidizados	Flexión en alas de vigas "I" roladas o armadas, canales y vigas "T"	b/t	$0.30 \sqrt{E/F_y}$	
	Lados de ángulos simples o dobles con separadores			
	Lados salientes de pares de ángulos en contacto continuo			
	Alas de secciones para pilotes "H"	b/t	$0.45 \sqrt{E/F_y}$	
	Alma de vigas "T"	d/t	$0.30 \sqrt{E/F_y}^{[a]}$	
	Barras planas	b/t	2.5	

Tabla 4: Máximas Relaciones Ancho-Espesor para Elementos a Compresión (Adoptado de ANSI/AISC 341-10)

Figura 44.- Relación ancho espesor para definir secciones Compactas y Sísmicamente Compactas I

¹² Norma Ecuatoriana de la construcción, Estructuras de Acero, 2014

Elementos Rigidizados	Paredes de HSS rectangulares	b/t		
	Alas de perfiles "I" encajonados, y secciones cajón armadas	b/t	$0.55 \sqrt{E/F_y}$ [8]	
	Placas laterales de secciones laminadas "I" encajonadas y paredes de perfiles armados encajonados usados como amostramientos diagonales	h/t		
	Almas de perfiles "I" armados o rolados usados para vigas o columnas [c]	h/t_w	Para $C_a \leq 0.125$ $2.45 \sqrt{E/F_y} (1 - 0.93 C_a)$	
	Placas laterales de secciones laminadas "I" encajonados usados como vigas o columnas	h/t	Para $C_a > 0.125$ $0.77 \sqrt{E/F_y} (2.93 - C_a)$ $\geq 1.49 \sqrt{E/F_y}$	
	Almas de secciones cajón armadas usados como vigas o columnas	h/t	donde: $C_a = \frac{P_u}{\phi_t P_y} (DFCR)$ $C_a = \frac{\Omega_c P_u}{P_y} (DRA)$	
	Almas de perfiles "I" rolados o armados usados como amostramientos diagonales	h/t_w	$1.49 \sqrt{E/F_y}$	
	Almas de secciones para pilotes "H"	h/t_w	$0.94 \sqrt{E/F_y}$	
Paredes de HSS de sección circular	D/t	$0.038 E/F_y$		

(a) Para perfiles T de miembros sujetos a compresión, la máxima relación ancho-espesor para miembros con gran ductilidad, para el alma de la "T" puede ser incrementada a $0.38\sqrt{E/F_y}$ si se satisfacen las siguientes condiciones:
(1) Pandeo en el miembro a compresión ocurre alrededor del plano del alma
(2) La carga a compresión es transferida al final de la conexión, solo a la cara exterior del alma, de la T, dando como resultado una conexión excéntrica que reduzca los esfuerzos de compresión en la punta del alma de la T.

(b) La máxima relación ancho-espesor de las alas de una viga "I" rolada y una viga cajón armada para las columnas en un Pórtico Especial a Momento no debe exceder $0.60 \sqrt{E/F_y}$

(c) Para las vigas "I" roladas usadas en sistemas PEM, donde C_a es menor o igual a 0.125, la máxima relación ancho-espesor h/t_w no debe exceder $2.45\sqrt{E/F_y}$.

Tabla 4: (cont.) Máximas Relaciones Ancho-Espesor para Elementos a Compresión (Adoptado de ANSI/AISC 341-10)

Figura 45.- Relación ancho espesor para definir secciones Compactas y Sísmicamente Compactas 2

La Especificación ANSI/AISC 341-10 muestra una tabla con 2 límites, la primera es el límite para secciones Altamente Dúctil – Moderadamente Dúctil representada por “ λ_{hd} ”, secciones Moderadamente Dúctil - No Esbeltas “ λ_{md} ”. En otros artículos estas secciones también se denominan, las secciones Sísmicamente Compactas como Altamente Dúctiles, las secciones Compactas como Moderadamente Dúctiles y las secciones No Esbelta como No Compactas. Estas están añadidas en el Anexo B y Anexos C.

3.5.- Secciones Compactas Rellenas De Hormigón

Para compresión, las secciones compuestas rellenas se clasifican como compactas, no compactas o esbeltas. Para que una sección califique como compacta, la razón ancho-espesor debe ser menor que el límite λ_p , mostrado en la figura 48. Si la máxima razón ancho-espesor de uno o más de sus elementos de acero sujetos a compresión excede λ_p , pero no λ_r , la sección compuesta rellena es no compacta. Si la máxima razón ancho-espesor de cualquier elemento de acero sujeto a compresión excede λ_r , la sección es esbelta. La máxima razón Ancho – Espesor permitida deberá ser la especificada en el siguiente cuadro de las Especificaciones AISC en la Tabla I1.1a. para secciones rellenas sometidos a carga de compresión axial.

Razones Ancho-Espesor límites para elementos de acero comprimidos en miembros compuestos a compresion axial. Para Uso con Seccion de secciones compuestas rellenas				
Descripcion del Elemento	Razon Ancho-Espesor	λ_p Compacto/ No compacto	λ_r No Compacto/ Esbelta	Maximo Permitido
Paredes de secciones tubulares rectangulares (HSS) y de cajon de espesor uniforme	b/t	$2.26 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$3.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Secciones tubulares (HSS) redondas	D/t	$\frac{0.15E}{F_y}$	$\frac{0.19E}{F_y}$	$\frac{0.31E}{F_y}$

Fuente: American Institute of Steel Construction, Especificaciones ANSI/AISC 360-10, 2010

Figura 46.- Límite para secciones Esbeltas / No Esbeltas, No Esbeltas Compactas

En el caso de otros miembros que experimentan compresión por una carga de flexión como vigas, también existe límites para ellos en la tabla I1.1b de las especificaciones ANSI/ASCI 360-10 donde podemos encontrar límites para sus dimensiones los cuales están tabulados en el Anexo A.

CAPÍTULO 4.- MÉTODOS, TEORIAS Y ESPECIFICACIONES

4.1.- Método de Elementos Finitos¹³

El método de elementos finitos es un método numérico usado en problemas de ingeniería que involucra un alto grado de complejidad matemática, pues estos problemas constan de geometrías muy irregulares y cargas no distribuidas ni uniformes, todo esto dificulta los cálculos analíticos y la única forma de resolverlos son con cientos o miles de iteraciones que pueden ser resueltas de mejor manera y en periodos cortos por un ordenador.

La formulación que se propone por medio del uso del método de elementos finitos, permite que el problema sea planteado como una serie de ecuaciones algebraicas simultaneas, en lugar de requerir la resolución de ecuaciones diferenciales complejas, pero, dado que el problema tiene que ser discretizado geoméricamente de un cuerpo complejo a un conjunto de elementos de geometría más sencilla que el que se tenía en un principio, esté método numérico, al igual que todos los métodos numéricos, arrojan valores aproximados de las incógnitas en un numero finito de locaciones dentro del cuerpo, las cuales dependen directamente, del número de elementos usados para la discretización de la pieza.

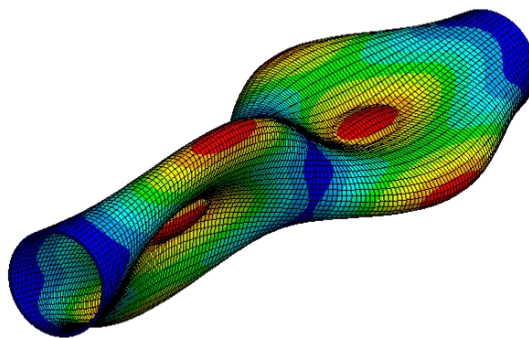


Figura 47.- Mallado creado en un elemento para el análisis por elementos finitos

¹³ Escribano Ródenas, M. (2015). El análisis por Elementos Finitos. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

4.2.-Teoría de Grandes Deformaciones (Large Deflections) ¹⁴

La teoría de grandes deformaciones es utilizada para el estudio del comportamiento de materiales plásticos de ingeniería que han pasado el límite elástico y llegando a la zona plástica. A diferencia de la teoría de pequeñas deformaciones para materiales frágiles, la teoría de grandes deformaciones es aplicado en materiales plásticos, materiales de alta ductilidad o estructuras especiales.

Esta teoría considera la no linealidad geométrica de los materiales y permite calcular las deformaciones utilizando las gradientes de desplazamiento. El planteamiento para el desarrollo matemático de la teoría de grandes deformaciones es representado en elementos diferenciales similares a cubos, también se asumen que bajo las condiciones de carga y desplazamiento los planos permanecen planos y las líneas rectas permanecerán rectas.

La nomenclatura usada en este análisis nos indica los desplazamientos en los ejes x , y , z en función a las variables u , v , w , respectivamente como se puede ver en el siguiente grafico de distorsión de un cuerpo por la aplicación de un sistema de fuerzas.

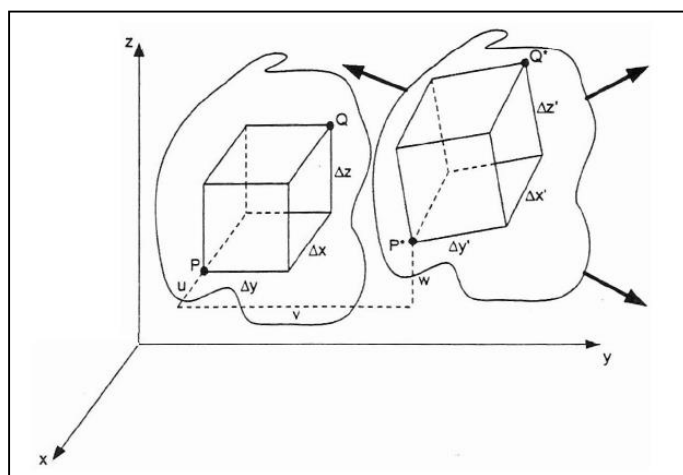


Figura 48.- Representación de un cuerpo en el espacio que considera grandes deformaciones

Fuente: *Grandes Deformaciones* - Pérez E, Rubio P, Vázquez M.

¹⁴ Pérez E. Rubio P. Vázquez M. Ecuaciones para grandes deformaciones. Universidad de Guanajuato. 2010.

4.3.-Teoría de plastificación de Von Mises¹⁵

El teorema de Von Mises es un tipo de modo de falla de los materiales dúctiles por plastificación sin considerar efectos de histéresis y efectos Bauschinger. El criterio de plastificación se representa por el tensor de tensiones siguiente:

CRITERIO DE PLASTIFICACIÓN

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}) = 0$$

El tensor de tensiones está formado por componentes dependientes e independientes entre sí en efectos aplicados en diferentes direcciones, pero en materiales isótropos como los metales esta expresión puede ser simplificada por ser material isotrópico y se puede ignorar el efecto Bauschinger dejando a la expresión de la siguiente manera:

I_x = Invariantes del tensor de tensiones (Independiente en cada dirección)

J_x = Invariantes del tensor desviador (Componente Hidrostática)

MATERIAL ISOTRÓPO

$$f(I_1, I_2, I_3) = 0$$

MATERIALES METÁLICOS

$$J_1 = 0$$

$$J_2 = \sigma_1 * \sigma_2 + \sigma_2 * \sigma_3 + \sigma_3 * \sigma_1$$

$$J_3 = \sigma_1 * \sigma_2 * \sigma_3$$

$$f(J_2, J_3) = 0$$

SIN EFECTO BAUSHINGER

$$f(J_2) = 0$$

¹⁵ Santiuste Carlos, Elasticidad y Resistencia de Materiales, Criterios de Plastificación, Universidad Carlos III de Madrid. 2015.

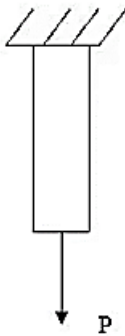
Después de la simplificación la ecuación ha quedado solamente en función de J_2 , Von Mises nos dice que esta expresión es igual al cuadrado del valor límite de plastificación K' , J_2 puede ser expresado tanto en función de las componentes del tensor desviador, en función de las tensiones principales o en función de las tensiones tangenciales como se muestra respectivamente en las siguientes ecuaciones siguientes a $(k')^2$.

$$J_2 = (k')^2$$

$$J_2 = \sigma_1 * \sigma_2 + \sigma_2 * \sigma_3 + \sigma_3 * \sigma_1 = (k')^2$$

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = (k')^2$$

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) = (k')^2$$



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

$$\sigma_1 = \sigma_y, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

$$2 \sigma_y^2 = 6(k')^2$$

$$k' = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$$

En un ensayo de tensión uniaxial a un cilindro homogéneo el valor de σ_1 es igual al esfuerzo de fluencia σ_y y σ_2, σ_3 son iguales a cero por lo que reemplazando estas condiciones en la ecuación de k'^2 obtenemos el valor de k' es igual al esfuerzo de fluencia $\sigma_y / (3^{1/2})$

Otra teoría con un análisis más conservador es el de Henri Tresca el cual también considera los mismos principios de la teoría de falla de materiales dúctiles, pero con cálculos más sencillos y los cuales ayudarían a comprobar resultados de esfuerzos equivalente de una manera más rápida que la calculando por Von Mises. A continuación, se presenta el eclipse de energía de distorsión máxima para la teoría de Von Mises y Tresca, el primero representado por una línea continua y el segundo por una línea punteada. Ninguna de estas dos teorías sobrepasa esta superficie que se basa en un corte diagonal en un cilindro.

Eclipse de Energía de Distorsión Máxima

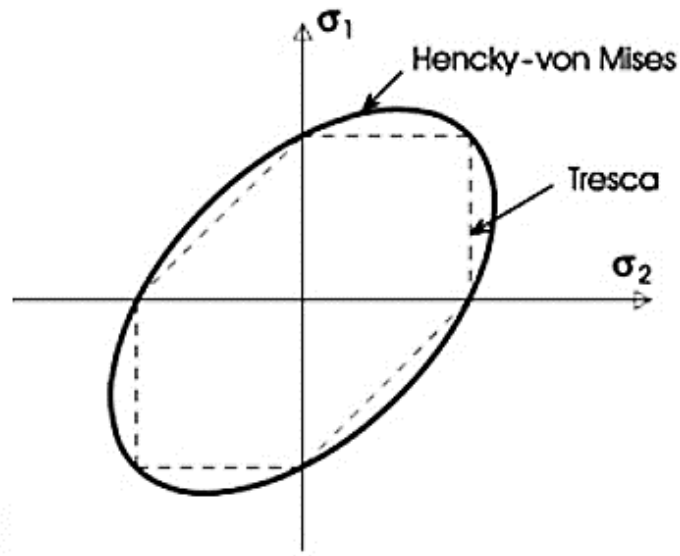


Figura 49.- Comparación gráfica de las teorías de plastificación por Von Mises y Tresca

Fuente: *Elasticidad y Resistencia de Materiales* – Carlos Santiuste

Los Programas de modelación y Simulación que utilizan Análisis de Elementos Finitos como Ansys generalmente usan este tipo de resultados para calcular los esfuerzos en sólidos y se pueden visualizar mediante escala de colores, donde cada color representa un valor de esfuerzo individual en cada nodo del sólido.

TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES

$$\sigma' = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

PLASTIFICACIÓN

$$\sigma' = \sigma_Y$$

Para la obtención de los esfuerzos en Ansys, el programa utiliza el teorema de Von Mises para calcular los esfuerzos equivalentes, máximos y mínimos.

4.4.- Especificación ANSI/AISC

4.4.1.- Breve Reseña de la ANSI/AISC

La Institución Americana de Estandarización por sus siglas en inglés ANSI (American National Standards Institute), es la organización encargada de la regulación de las normativas de estandarización en los Estados desde 1966 para la regulación de productos, procesos y servicios; ésta a su vez es miembro de la Organización Internacional de Estandarización, ISO. ANSI ha creado normativas para varias áreas, pero en el caso de la construcción, solo se encargó de regularizarla y no de crearla en sí, puesto que desde años anteriores ya existían instituciones de regulación para la construcción.

Las construcciones en Acero han crecido exponencialmente desde las últimas décadas del 2000 ya que se apreciaba notoriamente las ventajas que tenían este tipo de estructuras, en el año de 1921 la Institución Americana de Construcciones de Acero (AISC) desarrolló la primera edición de la Especificación de Construcción para estructuras de Acero (Specification for Structural Steel Buildings), a partir de ésta y mediante la experimentación, experiencia y errores estructurales se ha ido actualizando en periodos considerables al mismo tiempo que se crean nuevas técnicas, teorías o criterios de diseño.

Para el diseño de estructuras de Acero en el Ecuador es necesario acudir a la Norma Ecuatoriana de la Construcción para Estructuras de Acero NEC-SE-AC, la última versión fue publicada en diciembre del 2014. Esta norma está altamente referenciada por la AISC en diferentes ediciones dependiendo del elemento estructural.

4.4.2.- Contenido de la Especificación ANSI/AISC

La especificación ANSI/AISC 360-10 para Construcciones de Acero fue publicada el 22 de junio del 2010 es la edición que se tratará a continuación, los capítulos que esta especificación contiene son los siguiente:

A. Disposiciones Generales

- B. Requisitos de Diseño
- C. Diseño de Estabilidad
- D. Diseño de Miembros en Tracción
- E. Diseño de Miembros en Compresión
- F. Diseño de Miembros en Flexión
- G. Diseño de Miembros en Corte
- H. Diseño de Miembros Para Solicitaciones Combinadas y Torsión
- I. Diseño de Miembros de Sección Compuesta
- J. Diseño de Conexiones
- K. Diseño de Conexiones de Perfiles Tubulares
- L. Diseño para Estados Límites de Servicio
- M. Fabricación y Montaje
- N. Control de Calidad y Aseguramiento

Anexo 1: Diseño por Análisis Inelástico

Anexo 2: Diseño para Empozamiento

Anexo 3: Diseño por Fatiga

Anexo 4: Diseño Estructural para la Condición de Fuego

Anexo 5: Evaluación de Estructuras Existentes

Anexo 6: Arriostramientos para la Estabilidad de Columnas y Vigas

Anexo 7: Métodos Alternativos de Diseño por Estabilidad

Anexo 8: Análisis Aproximados de Segundo Orden

Cada uno de estos capítulos está especificado para satisfacer los requerimientos mínimos para que según sea el caso y dependiendo de los tipos de cargas a las que esté sometido un elemento estructural, este pueda soportar satisfactoriamente la carga aplicada. Para fines específicos se expandirá con más detalle las secciones de los capítulos que se relacionen a elementos en compresión.

4.4.3.- Capítulo E: Diseño de Miembros en Compresión

Cuando un miembro está sometido a compresión es necesario considerar las características de los elementos que los componen pues estas nos indicarán las prioridades de diseño, estas

características son la esbeltez, tipo de sección y estado de rigidez, este último define si el elemento está rigidizado o no, entendiéndose como rigidizado a un elemento que tiene algún tipo de restricción en los bordes del elemento, si solo contara con una restricción el elemento se considera como un elemento no rigidizado, esta condición es también conocida como elemento atiesado o no atiesado y es empleado en la versión en español de la Especificación ANSI/AISC 360-10 para construcciones de Acero, en su versión original en inglés es conocida como Stiffened o Unstiffened Element.

Como ejemplos de secciones con elementos no atiesados tenemos a las secciones I, T, C y G, perfiles L y canales, en cambio las secciones con elementos atiesados son las secciones tubulares redondas o rectangulares y las secciones compactas homogéneas.

Secciones con Elementos no Atiesados



Secciones con Elementos Atiesados




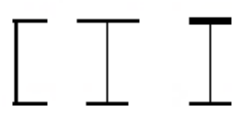
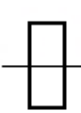
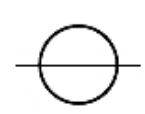


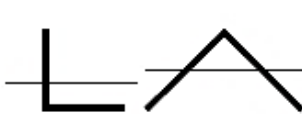

Figura 50.- Tipo de Sección según sus elementos

Fuente: Especificación ANSI/AISC 360-10

Si ningún elemento de la sección es esbelto se conoce como sección compacta. En la sección 3.3.3. se explica de mejor manera sobre esbeltez en elementos.

La Tabla E1.1 de la Especificación ANSI/AISC 360-10 resume de una manera simple los subcapítulos que deben ser revisados dependiendo del caso que se tenga para miembros sometidos a compresión, también indica el estado límite de falla más probable en dicha sección.

Los estados límite nombrados en la tabla E.1.1 corresponden principalmente a la presencia de los efectos mostrados a continuación.

TABLA NOTA E1.1				
Aplicaciones de las Secciones del Capítulo E				
Sección transversal	Sin elementos esbeltos		Con elementos esbeltos	
	Secciones en Capítulo E	Estados Límites	Secciones en Capítulo E	Estados Límites
	E3 E4	FB TB	E7	LB FB TB
	E3 E4	FB FTB	E7	LB FB FTB
	E3	FB	E7	LB FB
	E3	FB	E7	LB FB
	E3 E4	FB FTB	E7	LB FB FTB
	E6 E3 E4	FB FTB	E6 E7	LB FB FTB
	E5		E5	
	E3	FB	N/A	N/A
Secciones asimétricas, distintas de ángulos simples	E4	FTB	E7	LB FTB

FB=pandeo por flexión, TB=pandeo torsional, FTB=pandeo flexotorsional, LB=pandeo local

Fuente: Especificación ANSI/AISC 360-10

4.4.3.1.- E3: Pandeo por Flexión de Miembro sin Elementos Esbeltos

Aplicable para miembros en compresión con secciones no compactas y compactas. El tipo de falla a analizar es el pandeo Global en el miembro que está definida por la carga P_n que es la carga límite de pandeo por flexión.

$$P_n = F_{cr} * A_g \quad (E3 - 1)$$

La tensión de Pandeo por flexión se determina:

(a) Cuando $\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ ó $(\frac{F_y}{F_e} \leq 2.25)$

$$F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] * F_y \quad (E3 - 2)$$

(b) Cuando $\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ ó $(\frac{F_y}{F_e} > 2.25)$

$$F_{cr} = 0.877 * F_e \quad (E3 - 3)$$

Donde

F_e : Pandeo Elástico de Euler.

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (E3 - 4)$$

4.4.3.2.- E7: Miembros con Elementos Esbeltos

Aplicable para miembros en compresión con elementos esbeltos. Se debe determinar el estado límite de pandeo por flexión, torsión o flexo torsión mediante la carga a compresión nominal P_n .

$$P_n = F_{cr} * A_g \quad (E7 - 1)$$

(a) Cuando $\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$ ó $(\frac{QF_y}{F_e} \leq 2.25)$

$$F_{cr} = Q \left[0.658 \frac{QF_y}{F_e} \right] * F_y \quad (E7 - 2)$$

(b) Cuando $\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$ ó $(\frac{QF_y}{F_e} > 2.25)$

$$F_{cr} = 0.877 * F_e \quad (E7 - 3)$$

Q = Qa * Qs Si la sección está compuesta por elementos atiesados y no atiesados.

Qa = 1.00 Para secciones compuestas por elementos esbeltos no atiesados

Qs = 1.00 Para secciones compuestas por elementos esbeltos atiesados.

Q = 1.00 Para miembros sin elementos esbeltos.

Para secciones compuesta por elementos múltiples atiesados y no atiesados es conservador usar el menor valor de Q.

Donde

Fe: Esfuerzo de pandeo elástico de Euler.

Fcr: Esfuerzo Crítica de falla.

Q: Factor de reducción para elementos esbeltos en compresión.

4.4.3.2.1.- E7-1: Elementos Esbeltos No Atiesados, Qs

El facto de reducción Qs depende del tipo de sección, así como del tipo de proceso constructivo que tuvo que puede ser laminado en caliente, laminado en frío, soldadas o empernadas.

(a) Para ángulos, alas y planchas proyectadas en columnas laminadas y otros miembros en compresión.

(i) Cuando $\frac{b}{t} \leq 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$Q_s = 1.0 \quad (E7 - 4)$$

(ii) Cuando $0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{b}{t} < 1.03 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$Q_s = 1.415 - 0.74 \left(\frac{b}{t}\right) * \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (E7 - 5)$$

(iii) Cuando $\frac{b}{t} \geq 1.03 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$Q_s = \frac{0.69 E}{F_y \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (\text{E7} - 6)$$

(b) Para ángulos, alas y planchas proyectadas en columnas armadas y otros miembros en compresión.

(i) Cuando $\frac{b}{t} \leq 0.64 \sqrt{\frac{Ek_c}{F_y}}$

$$Q_s = 1.0 \quad (\text{E7} - 7)$$

(ii) Cuando $0.64 \sqrt{\frac{Ek_c}{F_y}} < \frac{b}{t} < 1.17 \sqrt{\frac{Ek_c}{F_y}}$

$$Q_s = 1.415 - 0.65 \left(\frac{b}{t}\right) * \sqrt{\frac{F_y}{Ek_c}} \quad (\text{E7} - 8)$$

(iii) Cuando $\frac{b}{t} \geq 1.17 \sqrt{\frac{Ek_c}{F_y}}$

$$Q_s = \frac{0.90 Ek_c}{F_y \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (\text{E7} - 9)$$

Donde:

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/tw}} \quad \text{para efectos de cálculo } 0.35 \leq k_c \leq 0.76$$

(c) Para ángulos simples:

(i) Cuando $\frac{b}{t} \leq 0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$Q_s = 1.0 \quad (\text{E7} - 10)$$

(ii) Cuando $0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{b}{t} < 0.91 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$Q_s = 1.34 - 0.76 \left(\frac{b}{t}\right) * \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (\text{E7} - 11)$$

(iii) Cuando $\frac{b}{t} \geq 0.91 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$Q_s = \frac{0.53 E}{F_y \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (\text{E7} - 12)$$

Donde:

b: Ancho completo del ala del ángulo más largo.

(d) Para almas de secciones T:

(i) Cuando $\frac{d}{t} \leq 0.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$Q_s = 1.0 \quad (\text{E7} - 13)$$

(ii) Cuando $0.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{d}{t} < 1.03 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$Q_s = 1.908 - 1.22 \left(\frac{d}{t}\right) * \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (\text{E7} - 14)$$

(iii) Cuando $\frac{d}{t} \geq 1.03 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$Q_s = \frac{0.69 E}{F_y \left(\frac{d}{t}\right)^2} \quad (\text{E7} - 15)$$

Donde:

d = profundidad nominal de la sección T.

4.4.3.2.2.- E7-2: Elementos Esbeltos Atiesados

El factor de reducción Q_a representa el factor de reducción por área efectiva para elementos esbeltos atiesados.

$$Q_a = \frac{A_e}{A} \quad (\text{E7} - 16)$$

Donde

A = Área Total de la sección sometida a compresión

A_e = Área Efectiva de la sección a compresión calculada con respecto a b_e que se calcula dependiendo del tipo de sección de la siguiente manera.

El valor de f se calculó por medio de la iteración $f = Pn/Ae$, o se puede asumir un valor conservador de $f = Fy$.

- (a) Para elementos esbeltos en compresión uniforme, $\frac{b}{t} \geq 1.49 \sqrt{\frac{E}{f}}$, excepto para alas de tubos cuadrados y rectangulares de espesor uniforme:

$$b_e = 1.92t \sqrt{\frac{E}{f}} \left[1 - \frac{0.34}{(b/t)} \sqrt{\frac{E}{f}} \right] \leq b \quad (E7 - 17)$$

Donde:

f se toma como Fcr con Fcr calculado con $Q = 1.0$

- (b) Para alas de elementos esbeltos de tubos cuadrados y rectangulares en compresión uniforme con, $\frac{b}{t} \geq 1.40 \sqrt{\frac{E}{f}}$

$$b_e = 1.92t \sqrt{\frac{E}{f}} \left[1 - \frac{0.38}{(b/t)} \sqrt{\frac{E}{f}} \right] \leq b \quad (E7 - 18)$$

Donde

$f = Pn / Ae$

El valor de f se calculó por medio de la iteración $f = Pn/Ae$, o se puede asumir un valor conservador de $f = Fy$.

- (c) Para tubos circulares cargados axialmente, cuando $0.11 \sqrt{\frac{E}{Fy}} < \frac{D}{t} < 0.45 \sqrt{\frac{E}{Fy}}$

$$Q = Q_a = \frac{0.038E}{Fy(D/t)} + \frac{2}{3} \quad (E7 - 19)$$

Donde

D = Diámetro externo

t = Espesor de la Pared

4.4.4.- Capítulo F: Diseño de Miembros en Flexión

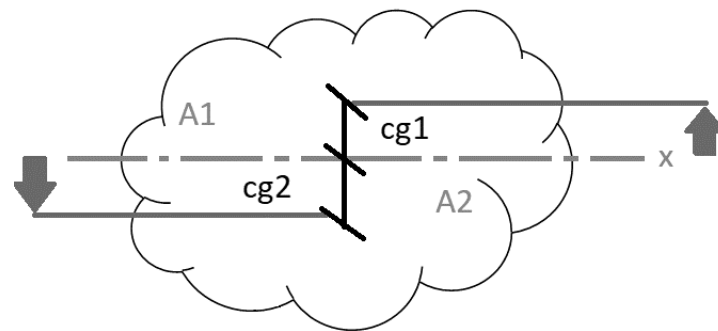
Para miembros sometidos a flexión simple alrededor de su eje principal, esta carga de flexión es aplicada en un plano paralelo a este eje que pasa por el centro de corte de la sección.

4.4.4.1.- F7: Perfiles tubulares cuadrados y rectangulares

La resistencia de la sección tubular está dada por el Momento nominal de la sección M_n que es el menor valor obtenido por el estado límite de fluencia en alas o alma de la sección.

4.4.4.2.- F7-1.- Fluencia

$$M_n = M_p = F_y Z \quad (E7 - 1)$$



A = Área
cg = Centro de Gravedad

Figura 51.- Cálculo de Z_x en secciones complejas

$$Z_x = A1 * cg1 + A2 * cg2$$

$$Z_x = \sum A * cg$$

Momento de Fluencia M_y

$$M_y = F_y * S_x$$

$$S_x = I_x / c$$

Este momento no está escrito en la especificación, pero representa el límite para el cual la sección a flexión tiene comportamiento elástico, en varias investigaciones se ha demostrado que el tipo de construcción de para obtener las placas influyen altamente en la ubicación de este límite siendo que los miembros de acero laminados en frío tienen este límite en un valor de momento menor al M_y aquí calculado pues estos presentan esfuerzos residuales que disminuyen su comportamiento resistente, es por eso que el valor mejor asumido para este tipo de construcciones es de $M_y = 0.7 * F_y * S_x$.

Diagrama Momento Resistente - Rotación¹⁶

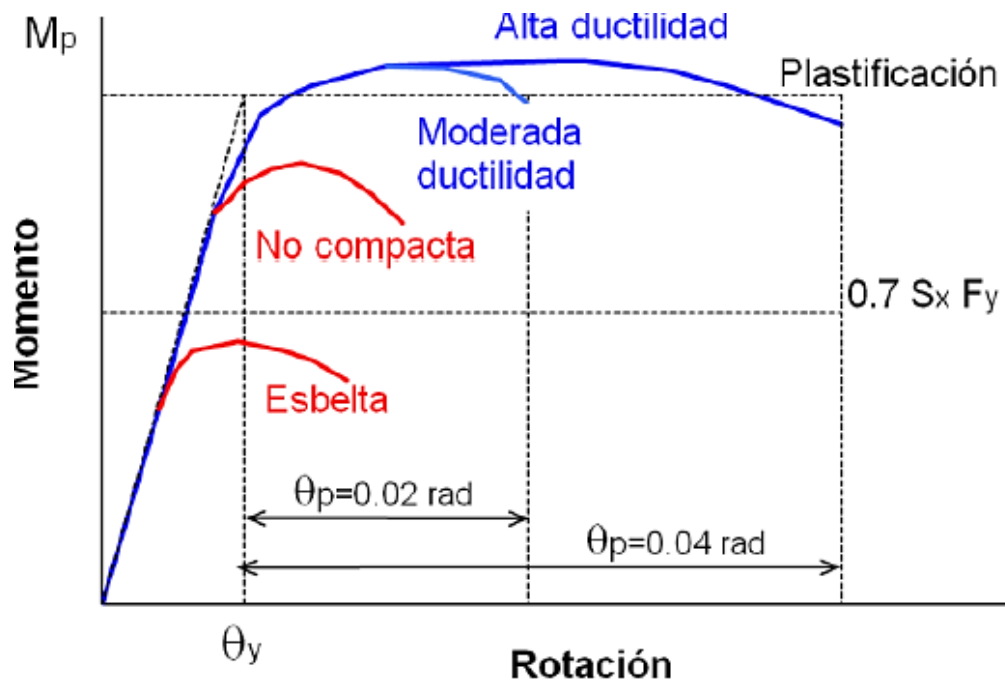


Figura 52.- Comportamiento de secciones I de diferente espesor a la rotación

Fuente: *Diseño Sismorresistente de Estructuras de Acero*

Existen varios artículos que proporcionan información sobre los límites aproximados que las secciones actúan en función de una rotación, en este caso la ilustración mostrada es proporcionada por la Asociación Latinoamericana del Acero en su Capítulo de construcciones sismorresistentes, otras referencias en estos límites se encuentran en el ANEXO E.

¹⁶ Asociación Latinoamericana del Acero, *Diseño Sismorresistente de Construcciones de Acero*, Argentina, 2014, pg 10.

4.4.4.3.- F7-2.- Pandeo Local en el Ala

(a) Para secciones Compactas

No aplica límite

(b) Para secciones con alas No compactas

$$M_n = M_p - (M_p - F_y S) \left(3.57 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{F_y}{E}} - 4.0 \right) \leq M_p \quad (\text{F7} - 2)$$

(c) Para secciones con alas esbeltas

$$M_n = F_y S_{eff} \quad (\text{F7} - 3)$$

S_{eff} = Módulo de la sección efectiva determinada con el ancho efectivo del ala en compresión calculado:

$$b_e = 1.92t \sqrt{\frac{E}{f}} \left[1 - \frac{0.38}{(b/t)} \sqrt{\frac{E}{f}} \right] \leq b \quad (\text{F7} - 4)$$

4.4.4.4.- F7-3.- Pandeo Local en el Alma

(a) Para secciones con alma compacta

No aplica límite

(b) Para secciones con alma no compacta

$$M_n = M_p - (M_p - F_y S_x) \left(0.305 \frac{h}{t_w} \sqrt{\frac{F_y}{E}} - 0.738 \right) \leq M_p \quad (\text{F7} - 5)$$

4.4.5.- Capítulo I: Diseño de Miembros de Sección Compuesta

Se entiende por sección compuesta a aquella sección que está conformada por más de un material de construcción, en este caso, la Especificación ANSI/AISC 360-10 define que

estos materiales son perfiles de acero estructural armados o laminados, secciones tuberales rectangulares o circulares con hormigón estructural.

4.4.5.1.- Límite de los Materiales

Existen límites de materiales para el diseño para secciones compuestas las cuales son:

Para Hormigón Simple

- $215 \text{ kg/cm}^2 (21 \text{ Mpa}) < f'c < 715 \text{ kg/cm}^2 (70\text{Mpa})$

Para Hormigón Liviano

- $215 \text{ kg/cm}^2 (21 \text{ Mpa}) < f'c < 430 \text{ kg/cm}^2 (42\text{Mpa})$

Para Acero Estructural y Acero de Refuerzo

- $F_y < 5\ 355 \text{ kg/cm}^2 (525 \text{ Mpa})$

4.4.5.2.- Resistencia a la Compresión de Columnas Rellenas

La especificación nos indica que el estado límite de pandeo para columnas compuestas rellenas con doble simetría deben ser determinadas con por la Tabla I1. 1a.

TABLA I1.1a Razones Ancho-Espesor límites para elementos de acero comprimidos en miembros compuestos sujetos a compresión axial Para Uso con Sección I2.2				
Descripción del Elemento	Razón Ancho-espesor	λ_p Compacto/ No compacto	λ_r No compacto/ Esbelto	λ Máximo Permitido
Paredes de secciones tubulares rectangulares (HSS) y de cajón de espesor uniforme	b/t	$2.26 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$3.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Secciones tubulares (HSS) redondas	D/t	$\frac{0.15E}{F_y}$	$\frac{0.19E}{F_y}$	$\frac{0.31E}{F_y}$

Figura 53.- Límites de sección para miembros compuestos a compresión axial

Fuente: Diseño de Estructuras de Acero - Mc Cormac

Se define a la sección como Esbelta, no compacta o compacta mediante los límites de las tablas en los Anexos B y C.

4.4.5.2.1.- Para secciones Compactas

$$P_{no} = P_p \quad (I2 - 9a)$$

donde

$$P_p = F_y A_s + C_2 f'_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (I2 - 9b)$$

$C_2 = 0.85; 0.95$, para Secciones Rectangulares y Circulares respectivamente.

4.4.5.2.2.- Para Secciones No Compactas

$$P_{no} = P_p - \frac{P_p - P_y}{(\lambda_r - \lambda_p)^2} (\lambda - \lambda_p)^2 \quad (I2 - 9c)$$

$$P_y = F_y A_s + 0.7 f'_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (I2 - 9d)$$

4.4.5.2.3.- Para Secciones Esbeltas

$$P_{no} = F_{cr} A_s + 0.7 f'_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (I2 - 9e)$$

Donde

- (i) Para secciones rectangulares rellenas

$$F_{cr} = \frac{9.0E}{\left(b/t \right)^2} \quad (I2 - 10)$$

- (ii) Para secciones redondeadas rellenas

$$F_{cr} = \frac{0.72F_y}{\left((D/t) \frac{F_y}{E_s} \right)^{0.2}} \quad (I2 - 11)$$

La Inercia Efectiva de para secciones compuestas está dada por:

$$EI_{eff} = E_s I_s + E_s I_{sr} + C_3 E_c I_c \quad (12 - 12)$$

$$C_3 = 0.6 + 2 \left(\frac{A_s}{A_c + A_s} \right) \leq 0.9 \quad (12 - 13)$$

Donde:

As: Área del Acero Estructural

Asr: Área del Acero de Refuerzo

Ac: Área del Hormigón

f'c: Resistencia del hormigón la compresión

Fy: Resistencia del Acero a la fluencia

Es: Módulo de elasticidad de Acero = 2 00 00 Mpa

Ec: Módulo elasticidad del hormigón

Ic: Inercia del Hormigón

Is: Inercia del Acero Estructural

Isr: Inercia del Acero de Refuerzo

Ieff: Inercia Efectiva

λ : Límite Máximo permitido

λ_p : Límite Compacto/ No compacto

λ_r : Límite No Compacto / Esbelto

b: ancho de la placa

t: espesor de la placa

D: Diámetro externo de la sección

4.5.- Norma AISI¹⁷

4.5.1.- Generalidad

El Instituto Americano de Hierro y Acero conocido por sus siglas en inglés AISI (American Iron and Steel Instituto) es la organización encargada de regular la especificación norteamericana para diseño de estructuras de acero conformados en frío. Esta especificación ha recopilado información confiable, precisa y muy útil con el fin de contribuir al diseño de este tipo de miembros estructurales.

En las secciones siguientes se tratarán secciones específicas de la Norma AISI S100 – 2007 útiles para el desarrollo de este trabajo de titulación como son: Ancho efectivo para elementos rígidos, Miembros a compresión y Miembros a flexión.

4.5.2.- B2: Ancho efectivo para elementos rígidos

4.5.2.1.- Determinación de la Capacidad de Carga

El ancho efectivo b_e , se debe determinar utilizando las siguientes condiciones

Cuando $\lambda \leq 0.673$

$$b = w \quad \text{Eq. B2.1 – 1}$$

Cuando $\lambda > 0.673$

$$b = \rho w \quad \text{Eq. B2.1 – 2}$$

$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right)}{\lambda} \quad \text{Eq. B2.1 – 3}$$

$$\lambda = \sqrt{f/F_{cr}} \quad \text{Eq. B2.1 – 4}$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w}\right)^2 \quad \text{Eq. B2.1 – 5}$$

¹⁷ American Iron and Steel Institute, North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members AISI S100-07, Toronto.2007.

t = Espesor del elemento comprimido

w = Ancho del elemento comprimido

f se calcula de la siguiente manera

Cuando la fluencia inicial del elemento es producida por compresión

$$f = F_y$$

Cuando la fluencia inicial del elemento es producida por tracción

f se calcula en base a la sección efectiva M_y

k = Coeficiente de Pandeo de Placas; 4 para elementos rigidizados apoyados sobre un alma en cada borde longitudinal.

4.5.2.2.- B2.3: Almas y otros elementos rigidizados con gradiente de tensiones

Para elementos que están sometidos a tensión variable uniforme, principalmente usado cuando los elementos de un miembro están sometidos a flexión.

El ancho efectivo del elemento es calculado considerando los siguientes valores de k.

- (i) Para elementos rigidizados con gradiente de tensiones donde f_1 está a compresión y f_2 a tensión la ilustración izquierda de la figura 53.a.

Para $h_o/b_o \leq 4$

$$\psi = |f_2/f_1| \quad \text{Eq. B2.3 - 1}$$

$$k = 4 + 2(1 + \psi)^3 + 2(1 + \psi) \quad \text{Eq. B2.3 - 2}$$

$$b_1 = b_e/(3 + \psi) \quad \text{Eq. B2.3 - 3}$$

$$b_2 = b_e/2 \quad \text{Eq. B2.3 - 4} \quad \text{Cuando } \psi > 0.236$$

$$b_2 = b_e - b_1 \quad \text{Eq. B2.3 - 5} \quad \text{Cuando } \psi \leq 0.236$$

$b_1 + b_2$ no debe exceder la sección de gradiente a compresión del elemento efectivo, si supera este valor significa que toda la sección a compresión está trabajando completamente.

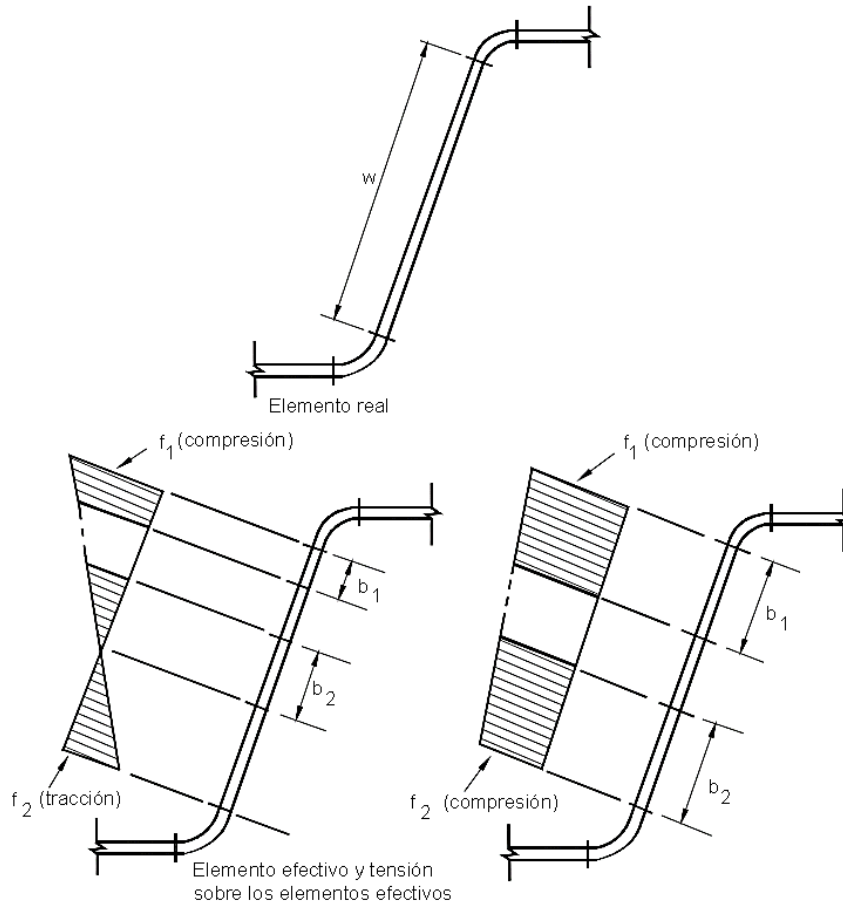


Figura 53.a. – Elementos rigidizados bajo gradiente de esfuerzos

Fuente: AISI S100-07 B.2.3-1

Para $h_o/b_o > 4$

$$b_1 = b_e / (3 + \psi) \quad \text{Eq. B2.3 - 6}$$

$$b_2 = \frac{b_e}{(1 + \psi)} - b_1 \quad \text{Eq. B2.3 - 7}$$

- (ii) Para elementos rigidizados con gradiente de tensiones donde f_1 y f_2 están a compresión la ilustración derecha de la figura 53.a.

$$k = 4 + 2(1 + \psi)^3 + 2(1 + \psi) \quad \text{Eq. B2.3 - 8}$$

$$b_1 = b_e / (3 - \psi) \quad \text{Eq. B2.3 - 9}$$

$$b_2 = b_e - b_1 \quad \text{Eq. B2.3 - 10}$$

4.5.2.3.- B5: Ancho efectivo de elementos rigidizados con atiesador intermedio simple o múltiple o labios rigidizados con atiesadores intermedios.

$$b_e = \rho \left(\frac{A_g}{t} \right) \quad \text{Eq. B5.1 - 1}$$

Donde:

$$\rho = 1 \quad \text{Cuando } \lambda \leq 0.673$$

$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right)}{\lambda} \quad \text{Eq. B5.1 - 2} \quad \text{Cuando } \lambda > 0.673$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} \quad \text{Eq. B5.1 - 3}$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b_o} \right)^2 \quad \text{Eq. B5.1 - 4}$$

k es el menor valor entre R*kd y kloc

$$R = 2 \quad \text{Eq. B5.1 - 5} \quad \text{Cuando } b_o/h < 1$$

$$R = \frac{11 - b_o/h}{5} \geq \frac{1}{2} \quad \text{Eq. B5.1 - 6} \quad \text{Cuando } b_o/h \geq 1$$

B5.1.2 : Para atiesadores de cualquier tamaño, localización y número.

$$k_{loc} = 4 \left(\frac{b_o}{b_p} \right)^2 \quad \text{Eq. B5.1.2 - 1}$$

$$k_d = \frac{(1 + \beta^2)^2 + 2 * \sum_{i=1}^n \gamma_i \omega_i}{\beta^2 (1 + 2 * \sum_{i=1}^n \delta_i \omega_i)} \quad \text{Eq. B5.1.2 - 2}$$

Donde:

$$\beta = \left(2 * \sum_{i=1}^n \gamma_i \omega_i + 1 \right)^{1/4} \quad \text{Eq. B5.1.2 - 3}$$

$$\gamma_i = \frac{10.92 (I_{sp})_i}{b_o t^3} \quad \text{Eq. B5.1.2 - 4}$$

$$\delta_i = \frac{(As)_i}{b_o t} \quad \text{Eq. B5.1.2 - 6}$$

$$\omega_i = \sin\left(\pi \frac{c_i}{b_o}\right)^2 \quad \text{Eq. B5.1.2 - 5}$$

As: Área del Atiesador.

be: Ancho Efectivo del Elemento.

bo: Ancho del Elemento como se muestra en la Figura.

h: altura del alma que atiesa al elemento entero, si almas de diferente altura utilizar el menor.

Isp: Inercia del Atiesador calculada desde el centro del elemento que se va atiesar como se muestra en la Figura.

k: Coeficiente de pandeo de la placa

kd: Coeficiente de la placa al pandeo distorsional

kloc: Coeficiente de pandeo de los sub elementos

R: Factor Modificante del coeficiente de pandeo distorsional

n: Número de Atiesadores

u: Coeficiente de Poisson

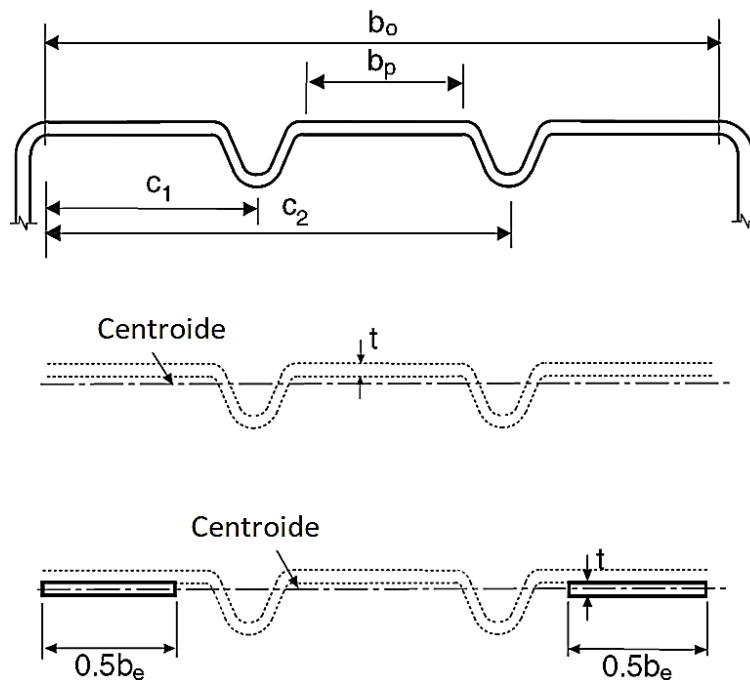


Figura 53.b. - Ilustración de una placa con múltiples atiesadores y sus dimensiones

Fuente: AISI S100-07 B5.1.1.

4.5.3.- C4: Miembros Comprimitos con Carga Concéntrica

Cuando $\lambda_c \leq 1.5$

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y \quad \text{Eq. C4.1 - 2}$$

Cuando $\lambda_c > 1.5$

$$F_n = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] F_y \quad \text{Eq. C4.1 - 3}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \quad \text{Eq. C4.1 - 4}$$

Donde:

F_e = La menor de las tensiones por pandeo elástico torsional, torsional flexionante y flexionante determinado con C4.1, C4.2, C4.3.

4.5.3.1.- C4.1: Secciones no Sometidas a Pandeo Torsional ni Pandeo Torsional Flexionante

Para secciones doblemente simétricas, secciones cerradas y cualquier otra sección que se pueda demostrar que no esté sujeta a pandeo torsional ni pandeo torsional flexionante, F_e se calcula con la expresión de pandeo elástico de Euler:

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad \text{Eq. C4.1.1 - 1}$$

4.5.3.2.- C4.2: Secciones Sometidas a Pandeo Torsional o Pandeo Torsional Flexionante

Para secciones simplemente simétricas sometidas a pandeo torsional flexionante calculado con F_e :

$$F_e = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} - \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] \quad \text{Eq. C4.1.2 - 1}$$

Una expresión más simple y con estimación considerable es:

$$F_e = \frac{\sigma_{ex}\sigma_t}{\sigma_{ex} + \sigma_t} \quad \text{Eq. C4.1.2 - 2}$$

$$\beta = 1 - \left(x_o/r_o\right)^2 \quad \text{Eq. C4.1.2 - 3}$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{K_x L_x}{r_x}\right)^2} \quad \text{Eq. C3.1.2.1 - 8}$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A * r_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 * E * C_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad \text{Eq. C3.1.2.1 - 9}$$

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} \quad \text{Eq. C3.1.2.1 - 7}$$

C_w = Constante de alabeo torsional de la sección transversal

G = Módulo de Elasticidad transversal

J = Constante de torsión de St. Venant de la sección transversal

K_t = Factor de Longitud efectiva de torsión

L_t = Longitud no arriostrada para torsión

X_o = Distancia entre el centro de corte y el baricentro a lo largo del eje principal x , considerado negativo

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

4.5.3.3.- C4.3: Secciones no Simétricas

Para este tipo de secciones, F_e , debe ser determinado de un análisis racional. Para miembros comprimidos compuestos se debe determinar con el Capítulo F.

4.5.4.- C3.1.4: Miembros a Flexión

4.5.4.1.- Momento Nominal

$$M_n = S_e F_y \quad \text{Eq. C3.1.1 - 1}$$

Donde:

Se = Módulo elástico de la sección Efectiva calculada desde el centroide hasta la fibra extrema más alejada a compresión o tensión F_y .

4.5.4.2.- Pandeo distorsional en miembros a flexión

Cuando $\lambda \leq 0.673$

$$M_n = M_y \quad \text{Eq. C3.1.4 - 1}$$

$$M_y = S_{fy} * F_y \quad \text{Eq. C3.1.4 - 4}$$

$$S_{fy} = \frac{I_x}{c}$$

I_x = Inercia con respecto al eje x

c = distancia del centroide de la sección a la fibra en compresión más alejada

Cuando $\lambda > 0.673$

$$M_n = M_y \left(1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right) \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \quad \text{Eq. C3.1.4 - 2}$$

$$M_{crd} = S_F * F_d \quad \text{Eq. C3.1.4 - 5}$$

$$F_d = \beta k_d \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b_o} \right)^2 \quad \text{Eq. C3.1.4 - 6}$$

β = Valor que representa el Gradiente de Momento, conservadoramente se toma este valor como 1.0. o en su defecto.

$$1.0 \leq 1 + 0.4 \left(\frac{L}{Lm} \right)^{0.7} \left(1 - \frac{M1}{M2} \right)^{0.7} \leq 1.3 \quad \text{Eq. C3.1.4 - 7}$$

$$k_d = 0.5 \leq 0.6 \left(\frac{b_o D \sin \theta}{h_o t} \right) \leq 8.0 \quad \text{Eq. C3.1.4 - 9}$$

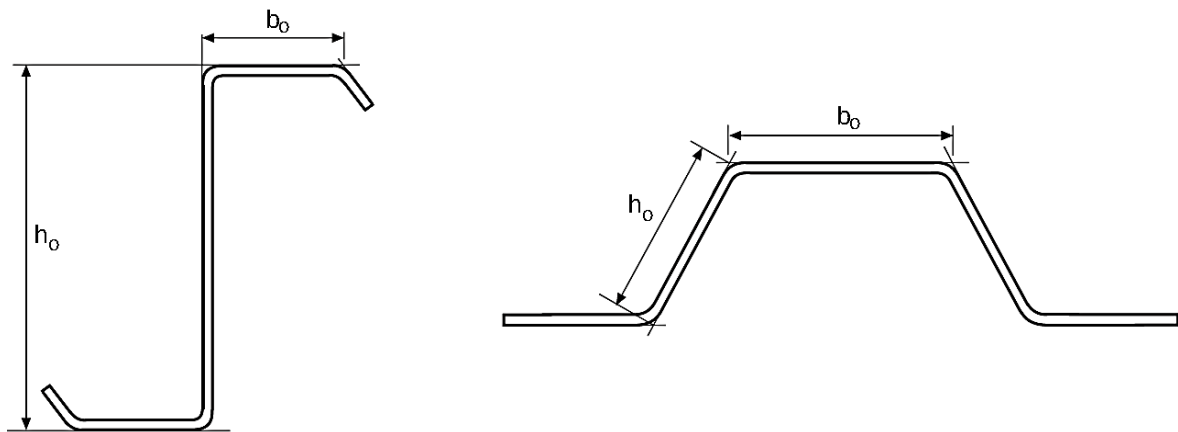


Figura 53.c. - Ilustración de una placa con múltiples atiesadores y sus dimensiones

Fuente: AISI S100-07 B2-3.2.

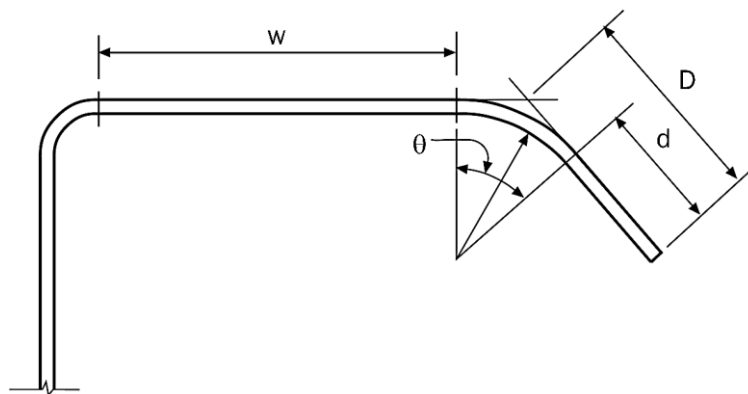


Figura 53.d. - Ilustración de una placa con múltiples atiesadores y sus dimensiones

Fuente: AISI S100-07 B4-1.

CAPÍTULO 5.- MODELACIÓN ESTRUCTURAL EN COMPUTADOR

5.1.- Software de simulación y modelación por computadora

Los softwares de simulación o modelación por computadora son programas informáticos o redes entre ordenadores que tiene como finalidad crear una representación de un modelo en un sistema determinado. La simulación ha sido de gran relevancia para los modelos matemáticos en muchas ciencias como son: química, física, astrología, sistemas económicos, comportamientos psicológicos y sociales.

La simulación por computadora nos ha permitido comprender de mejor manera el funcionamiento de los modelos planteados y pueden ser tan simples como complejos, que para obtener un resultado del modelo planteado su procedimiento puede durar desde minutos e incluso días respectivamente. La capacidad para procesar este tipo de problemas a superado en creces los modelos matemáticos tradicionales que desde antaño se realizaban con papel y lápiz. Un ejemplo de lo antes mencionado es el hecho de que hace más de 10 años se realizó una batalla simulada donde se estableció 66239 tanques y otros vehículos en un área cercana a Kuwait, para esta hazaña se utilizó varios Superordenadores de alto rendimiento.

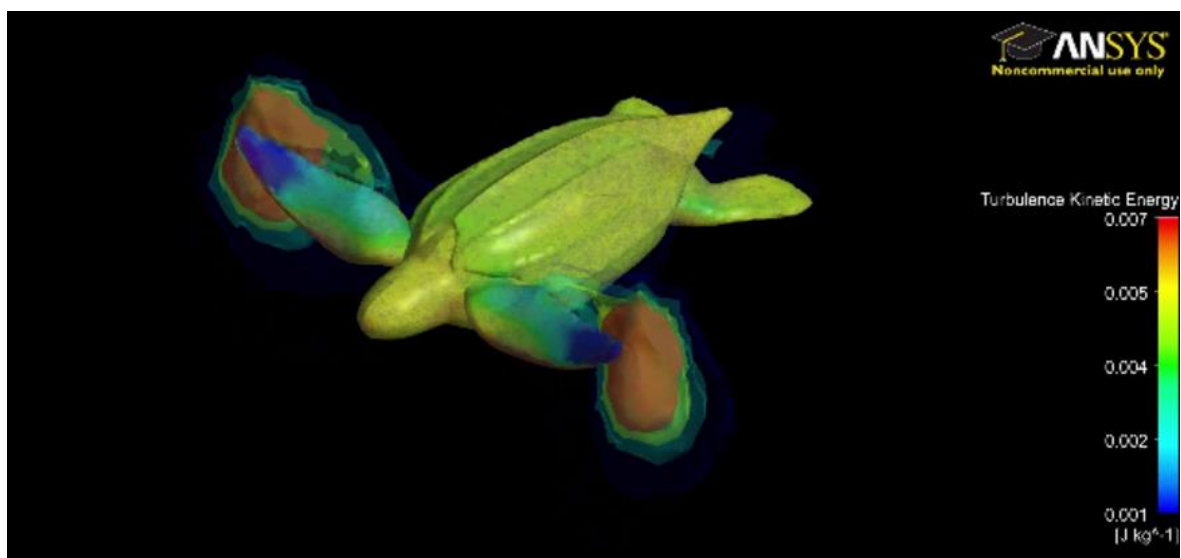


Figura 54.- Representación de un modelo en un programa de simulación

Fuente: Competición de simulación 2015

5.1.1.- Simulación Vs Modelación

Aunque ambos conceptos tengan sus diferencias son parte de un mismo fin que es la simplificación de procesos algorítmicos y matemáticos que serían extremadamente costoso realizarlas por una o más personas para obtener resultados analizables. Los ordenadores actuales están en capacidad tecnológica de realizar estas operaciones en tiempos razonables, estas operaciones han sido programadas con la finalidad de conocer eventos posibles o concretos en el medio en que sea sometido el modelo; cuando se habla de modelación hacemos referencia a los procesos, en cambio cuando hablamos de modelo nos referimos al cuerpo analizado también conocido como sistema abstracto.

La simulación es la representación de un sistema que imita a la realidad y mediante cálculos reproduce posibles realidades. La modelación también nos representa un sistema real pero su diferencia está en su resultado, pues su respuesta será el resultado de varios patrones ya programados. Así podemos decir que la simulación no es predecible mientras que la modelación si lo es.



Figura 55.- Avión Modelado vs Avión Simulado

Fuente: Fotos de Aviación – Daniel Cabrera

5.1.2.- Ventajas de la simulación por computadora

- Permite la resolución de procesos matemáticos y algorítmicos complejos.
- Entrega de resultados en plazos reducidos.
- Alternativa ideal a los ensayos de prueba y error de modelos en escala real.
- Permite parametrizar procesos específicos que equivalen a modelos diferentes.
- Mejora la capacidad de un grupo de trabajo para optimizar resultados antes de la fabricación del modelo.
- Agilita la toma de decisiones en corto tiempo para enfocarse en diseños más variados que ahorran inversión.

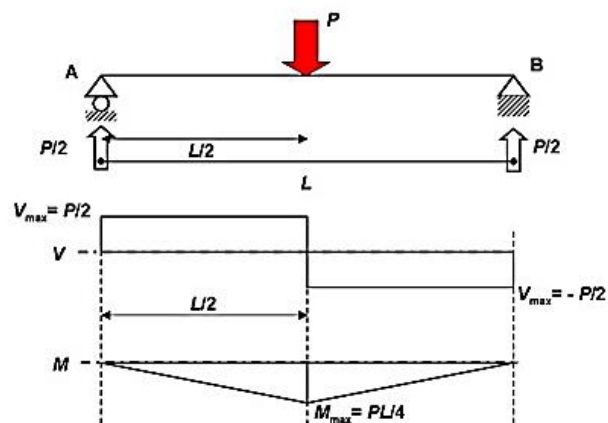
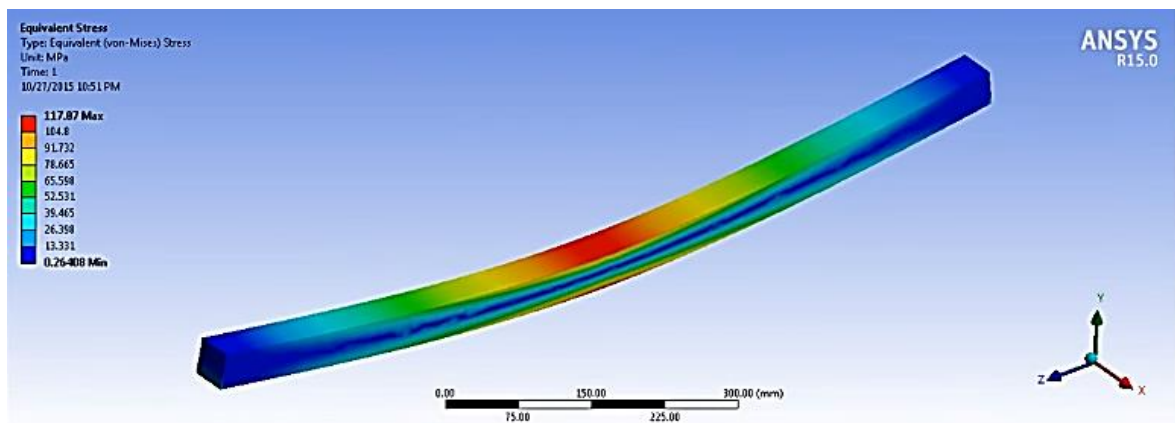


Figura 56.- Análisis Matemático Vs Análisis por elementos Finitos de una viga cargada a flexión

5.2.- Guía rápida para Ansys

5.2.1.- Ansys Workbench

ANSYS es un programa de simulación y modelación para fenómenos físicos en las ramas de Mecánica Estructural, Electromecánica, Fluidos y Termodinámica que para el cálculo y desarrollo de los problemas utiliza el Método de Elementos Finitos.

5.2.2.- Interfaz Inicial

Al iniciar el programa se presenta una interfaz inicial que permite elegir módulos que dependiendo del tipo de análisis se debe seleccionar desde la Toolbox (Caja de Herramientas) uno o varios tipos de análisis pueden ser usados independientemente, pero también pueden ser enlazados entre sí y cada uno de ellos proporcionan resultados diferentes.

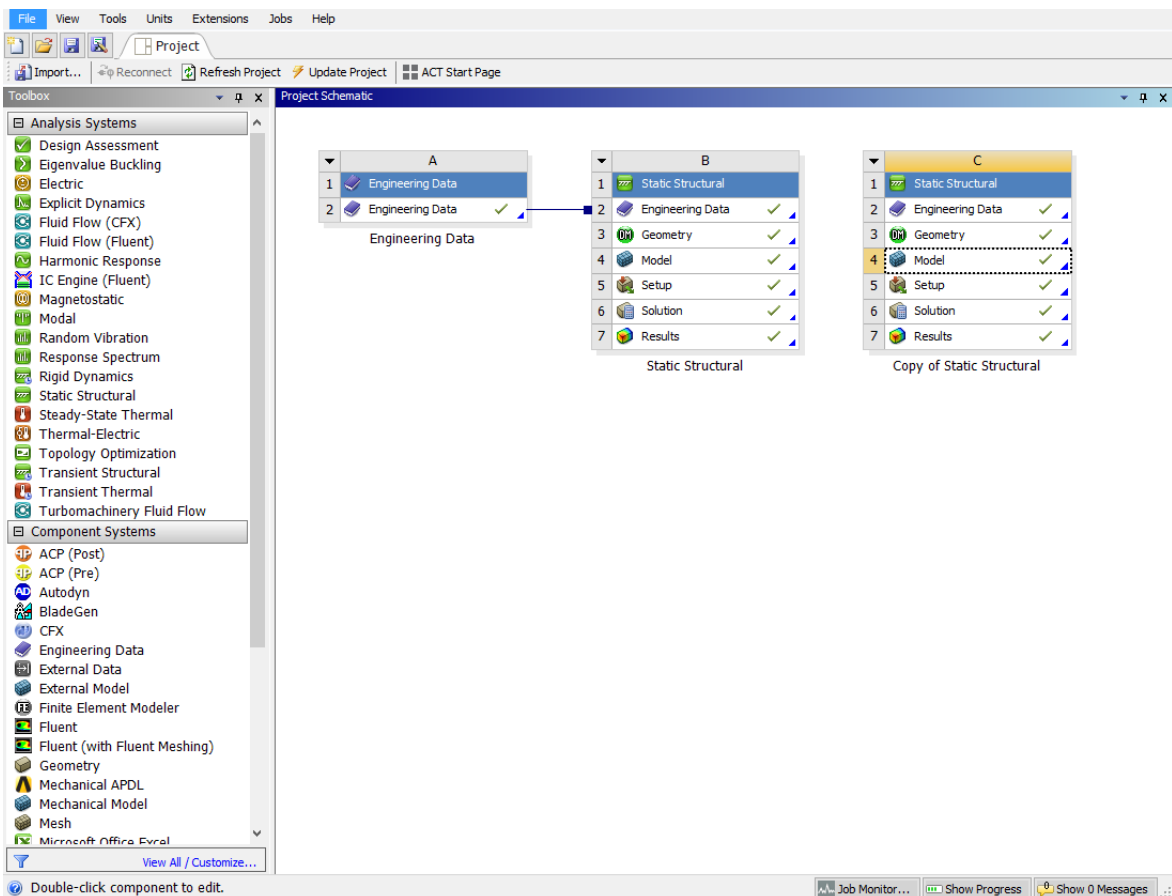


Figura 57.- Interfaz inicial de Ansys Workbench

En la Toolbox encontramos diferentes tipos de Sistemas de Análisis como son: Análisis Electromagnéticos, de Fluidos, Térmicos y Análisis Estructurales. En esta guía nos centraremos en este último que es aplicable a nuestro campo de estudio.

Cuando se elige un tipo de sistema de análisis este se incorpora al esquema de proyecto ubicado a la derecha de la pantalla que puede ser renombrada por el usuario, el sistema de análisis elegido aparece en forma de un recuadro numerado el cual necesita ser llenado, cada una de estas secciones se llaman células por lo que tiene un nombre propio, por ejemplo, en la imagen la sección Geometría (Geometry) se llamaría célula A3.

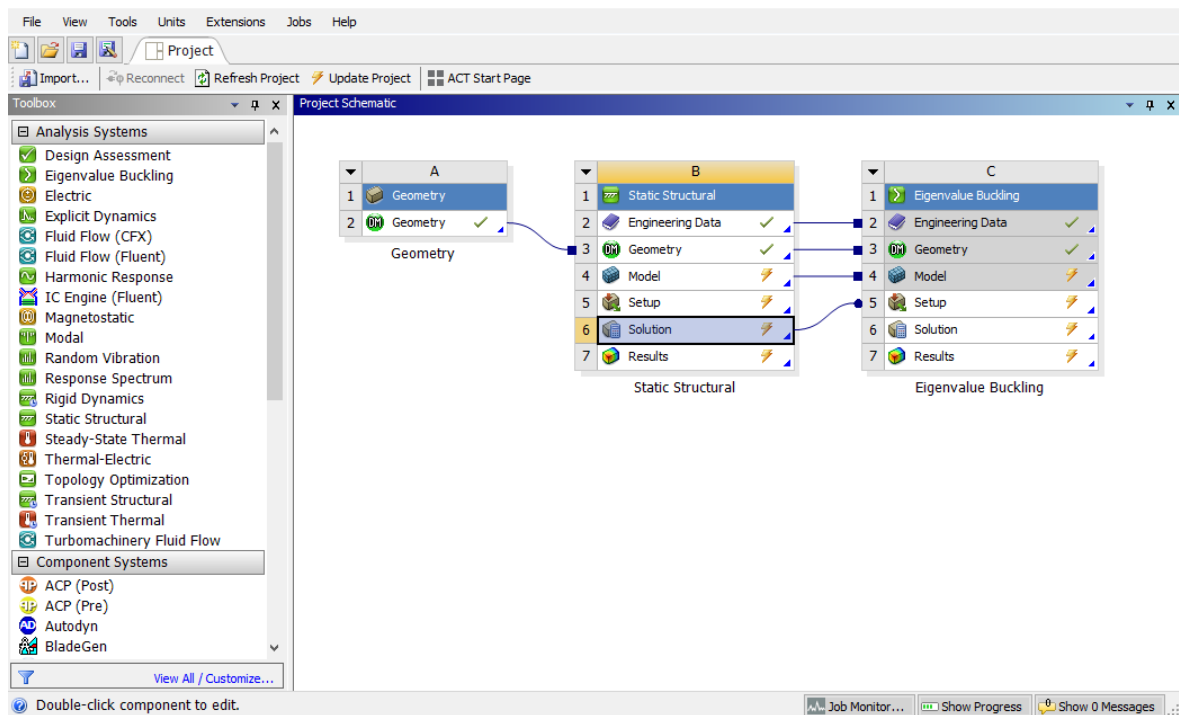


Figura 58.- Dependencia de los módulos en forma de esquema

Cada sección numerada tiene un icono a su derecha que puede ser un signo de interrogación azul que significa que esa sección está vacía y necesita ser llenada. El segundo icono que se puede encontrar es el de 2 flechas de color verde que se rodean entre sí, esto significa que esa célula aún no ha sido llenada ni procesada completamente. El tercer icono que se puede ver es un rayo de color amarillo que indica que esa celda está lista para ser procesada y finalmente encontramos un visto de color verde que significa que esa célula ha sido llenada correctamente.

También se puede relacionar los componentes del sistema que son parte individual de la misma estructura de los sistemas de análisis e incluso relacionar celdas entre diferentes sistemas de análisis, en este caso estas celdas son dependientes directamente entre sí y solo la primera célula será editable, mientras que las células adjuntas a esta no podrán editarse. Así también estas celdas no editables pueden ser enlazadas a otros sistemas de análisis de tal manera que el resultado de un tipo de análisis sea dato de entrada para el segundo análisis y así sucesivamente.

Cuando se abre cualquiera de estos tipos de sistemas de análisis siempre habrá celdas comunes, pues como son Datos de Ingeniería (Engineering Data) necesarios para definir los materiales a usarse. Geometry también es una celda común que permite dibujar, modificar o importar secciones o volúmenes, aunque el propio programa lleva incorporado el módulo de dibujo llamado Design Modeler Geometry y a partir de la última versión V 18 existe otra herramienta de dibujo llamado New Space Claim Geometry.

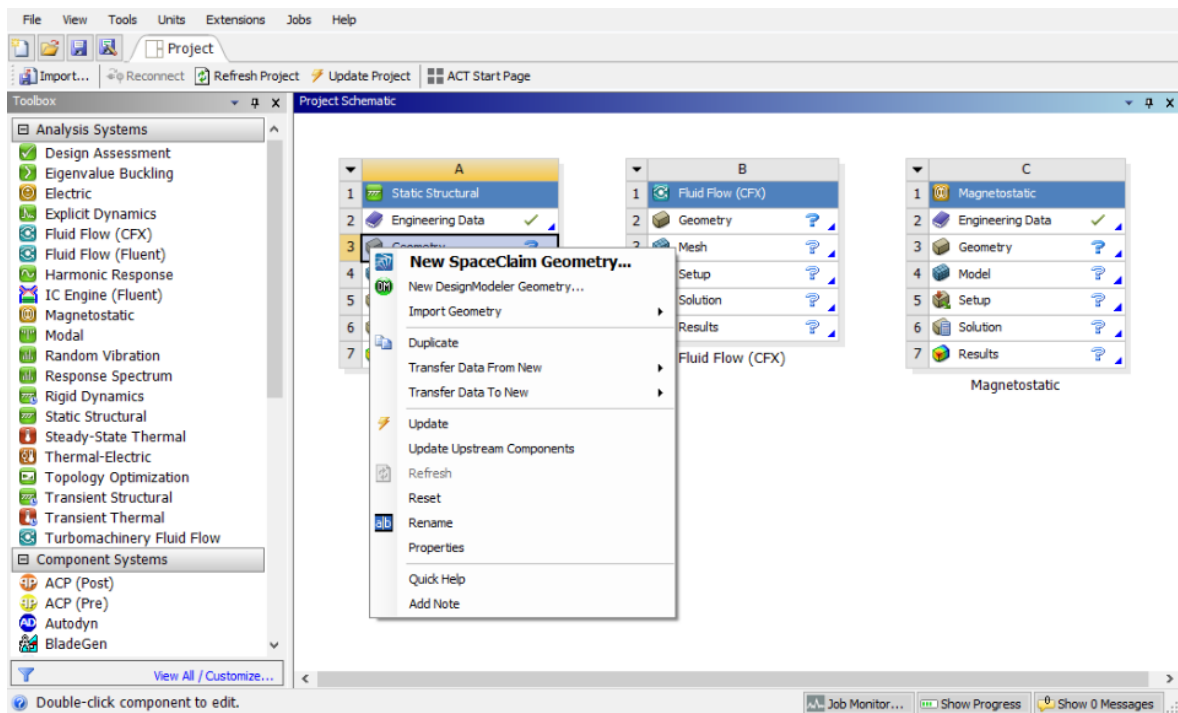


Figura 59.- Sub opciones en la interfaz principal

5.2.3.- Engineering Data

Esta sección permite seleccionar los materiales precargados en el programa que vamos a utilizar en nuestro proyecto, también se puede modificar sus propiedades e incluso agregar nuevos materiales con una variedad de propiedades únicas o semejantes a las existentes.

Al abrir esta sección es notable que la interfaz ventana es diferente como se puede ver en la Figura 62, la parte del Toolbox seleccionada en recuadro rojo ha cambiado pues ahora muestra opciones para modificar o agregar propiedades a nuestros materiales a usarse, aunque también sirve para agregar materiales nuevos.

En recuadro azul se ubican los materiales disponibles a usarse en el proyecto, pero además se puede añadir un nuevo material y es por eso que existe un recuadro vacío al final de todos los materiales. Por último, en el recuadro verde podemos modificar los valores del material seleccionado, a su derecha se encuentra un diagrama para propiedades que nos son constantes y son representadas como una función.

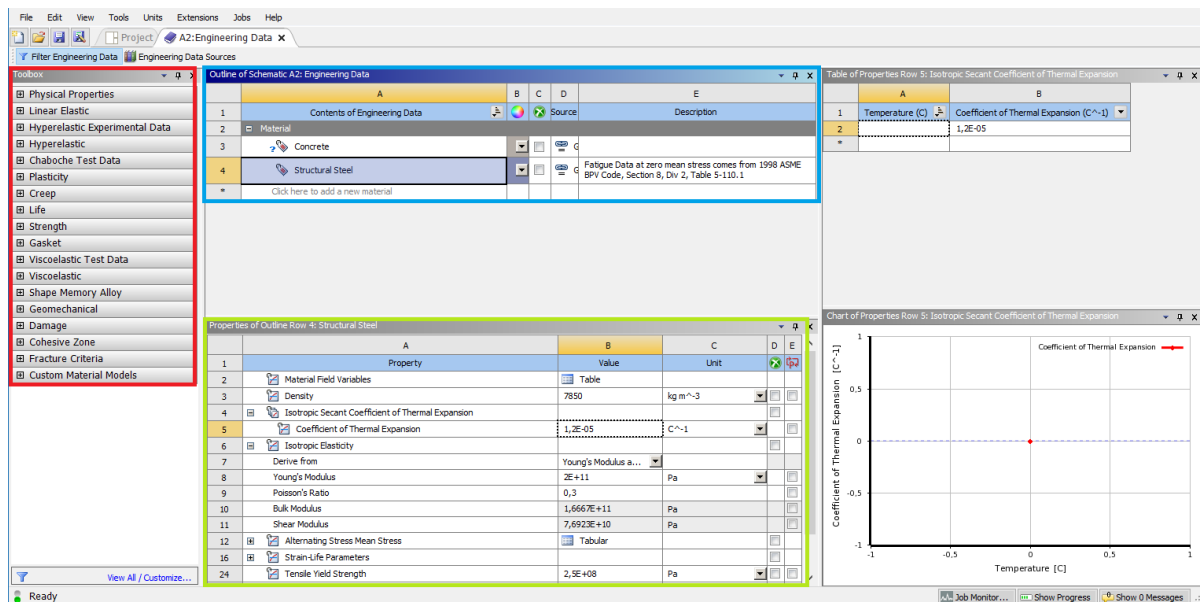


Figura 60.- Secciones para modificar las propiedades mecánicas de los materiales

Para añadir materiales de la biblioteca del programa es necesario dirigirse a Engineering Data Sources señalada con un recuadro negro y una flecha del mismo color, luego vemos que aparece una sección de materiales en el recuadro amarillo que nos indique el tipo de material que queremos agregar como son materiales generales, materiales no lineales, materiales hiper elásticos, etc.

Y en el recuadro morado se pueden ver cada uno de estos materiales y una descripción de sus propiedades en la sección inferior, para agregar uno de estos materiales basta con presionar el símbolo más a su derecha e inmediatamente aparecerá un libro a su lado que indica que el material ha sido incluido en nuestra lista de materiales a usar.

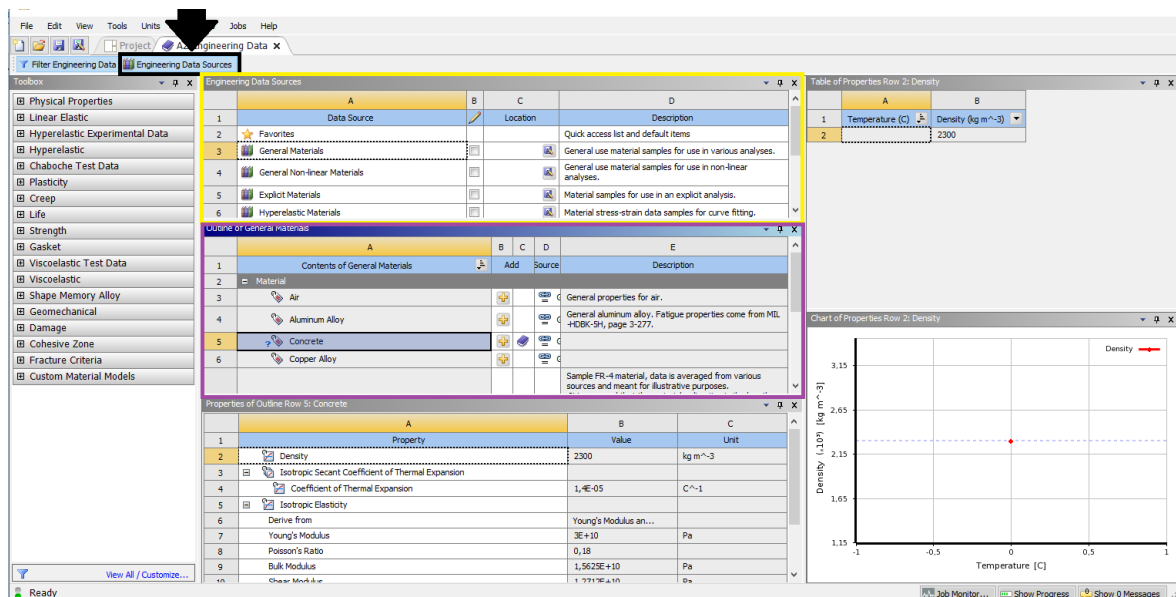


Figura 61.- Materiales predeterminados de comportamiento no lineal

Para continuar la siguiente celda se puede cerrar la pestaña de Engineering Dato y se guardaran los cambios automáticamente o solo cambiar de pestaña a Project.

Observación: a menudo se confunde la pestaña con la ventana del programa por lo que si el usuario se equivoca debe anular la pregunta siguiente que será si desea salir sin guardar el proyecto, si no se realiza esto todo el proyecto se borrará irremediamente.

5.2.4.- Geometry

La sección Geometry (Geometría) permite agregar cuerpos para posteriormente ser analizado bajo parámetros de medición, existen 2 maneras de añadir una nueva geometría y es la de dibujarlo en el mismo programa con 2 herramientas, la primera es Design Modeler Geometry que nos permite dibujar desde cero los cuerpos. New Space Claim Geometry es la segunda herramienta que utilizar para dibujar cuerpos, pero solo está disponible desde la versión 18 de Ansys. En esta breve guía solo nos enfocaremos en Design Modeler Geometry.

5.2.4.1.- Design Modeler Geometry

Es el editor de diseños por defecto que ANSYS proporciona para crear cuerpos. La interfaz del Design Modeler Geometry se divide en 4 secciones principales como son las mostradas a continuación.

5.2.4.1.1.- Tree Outline

El Tree Outline (Árbol de contornos) en la pestaña de Modeling que es un esquema donde se encuentran los planos de referencia, cuerpos y secciones, en la pestaña adyacente encontramos Sketching que permite dibujar, modificar, contrastar, dimensionar o configurar los cuerpos. Solo es posible dibujar en planos coordenados existentes y en 2 dimensiones, para crear cuerpos en 3d existen opciones en la barra de herramientas.

El programa permite crear otros planos de referencia que facilitan el dibujo para cuerpos complejos, para esto primero que todo se debe escoger otro plano de referencia para poder trasladar y rotar el nuevo plano, luego en la barra de herramientas seleccionamos la opción de nuevo plano con un icono con un plano ortogonal. Los nuevos planos tienen las mismas propiedades desde un inicio.

El esquema del Tree Outline es una forma muy organizada de saber las dependencias entre los sistemas de referencia con los planos, secciones, líneas y cuerpos.

El tamaño de la escala que se encuentra en la parte inferior de la ventana Graphics también puede ser modificada en unidades y en vista, modificable en la barra de menú que se puede ver la opción Units que permitirá cambiar las unidades en las que nos muestra dando clic en dicha sección.

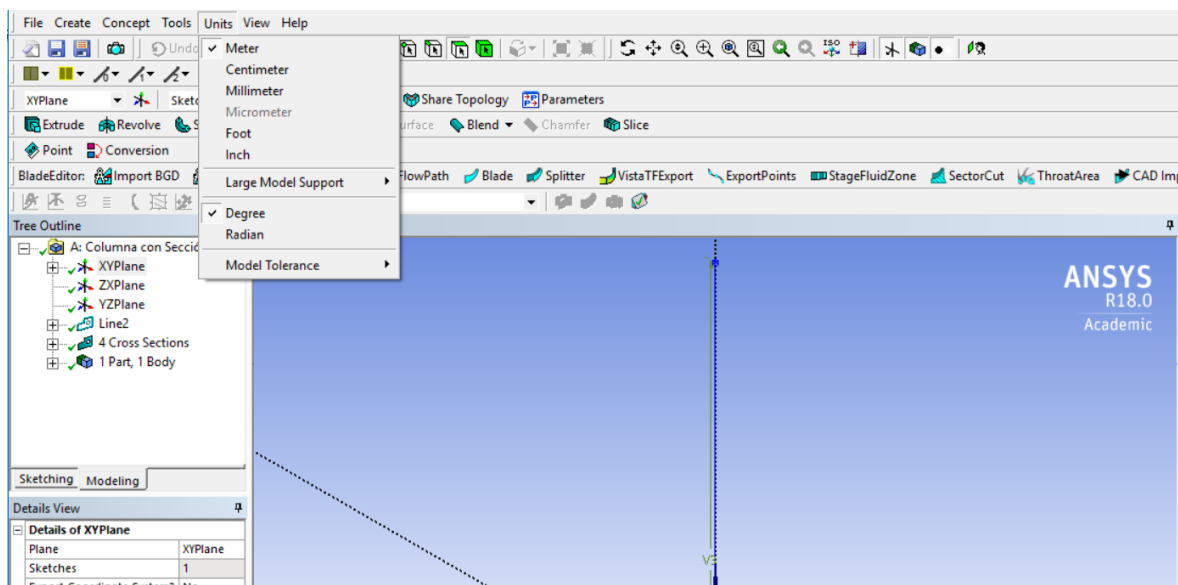


Figura 62.- Configuración de unidades para dibujar elementos

En la Figura 65 es posible observar en un recuadro de color rojo el botón para crear nuevos planos, en el recuadro de color amarillo observamos que el nuevo plano se ha integrado al esquema y ha sido renombrado como nuevo plano, en recuadro verde se ubica el nuevo sistema cartesiano de referencia llamado, en el cuadro de Detail View vemos las opciones de referencia para crear el nuevo plano como son con respecto a que se crea el nuevo sistema, la orientación, la perpendicularidad la distancia desde otro plano de referencia y el sentido.

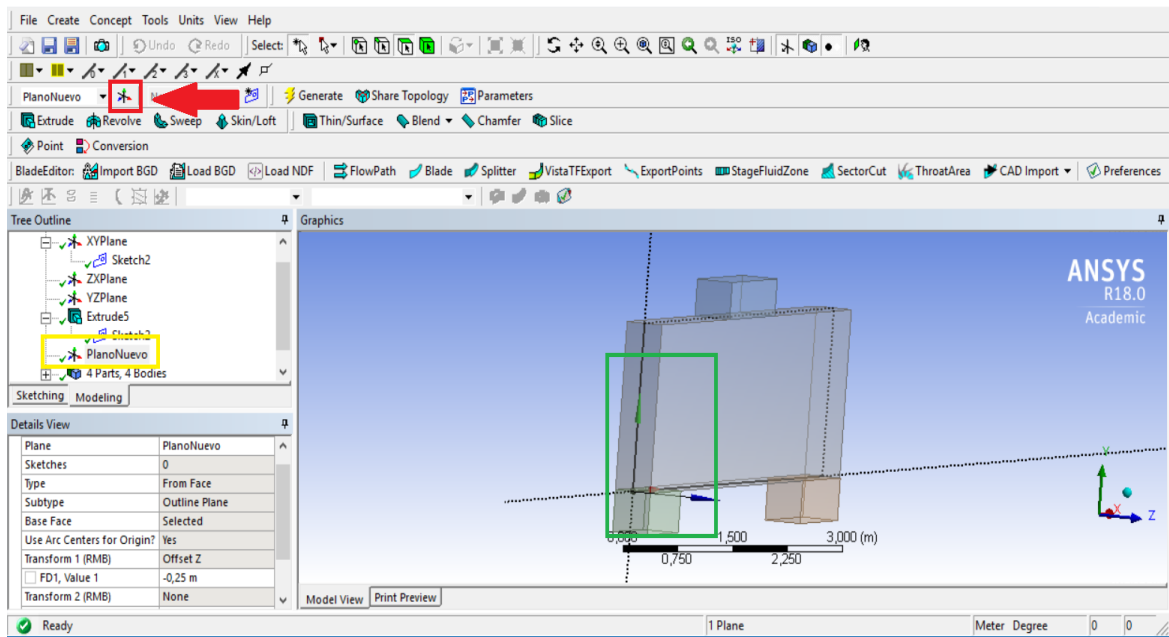


Figura 63.- Creación de nuevos sistemas cartesianos relativos

5.2.4.1.2.- Detail View

La sección Detail View o Vista a detalle es un cuadro donde podemos observar las dimensiones de la sección o cuerpo dibujado, vale la pena añadir que es el único lugar en la ventana que permite modificar valores.

Cuando se crea o modifica la geometría podemos observar que a esta se le asigna un nombre automáticamente y a su lado se puede cambiar de dimensión. Dependiendo de cómo fue instalado el programa en la computadora, puede estar configurada para que los decimales estén separados por una coma o un punto, esto es de importancia pues, cuando se escribe con el opuesto el programa no lo identifica y omite los cero, además la separación errónea asume todo como entero.

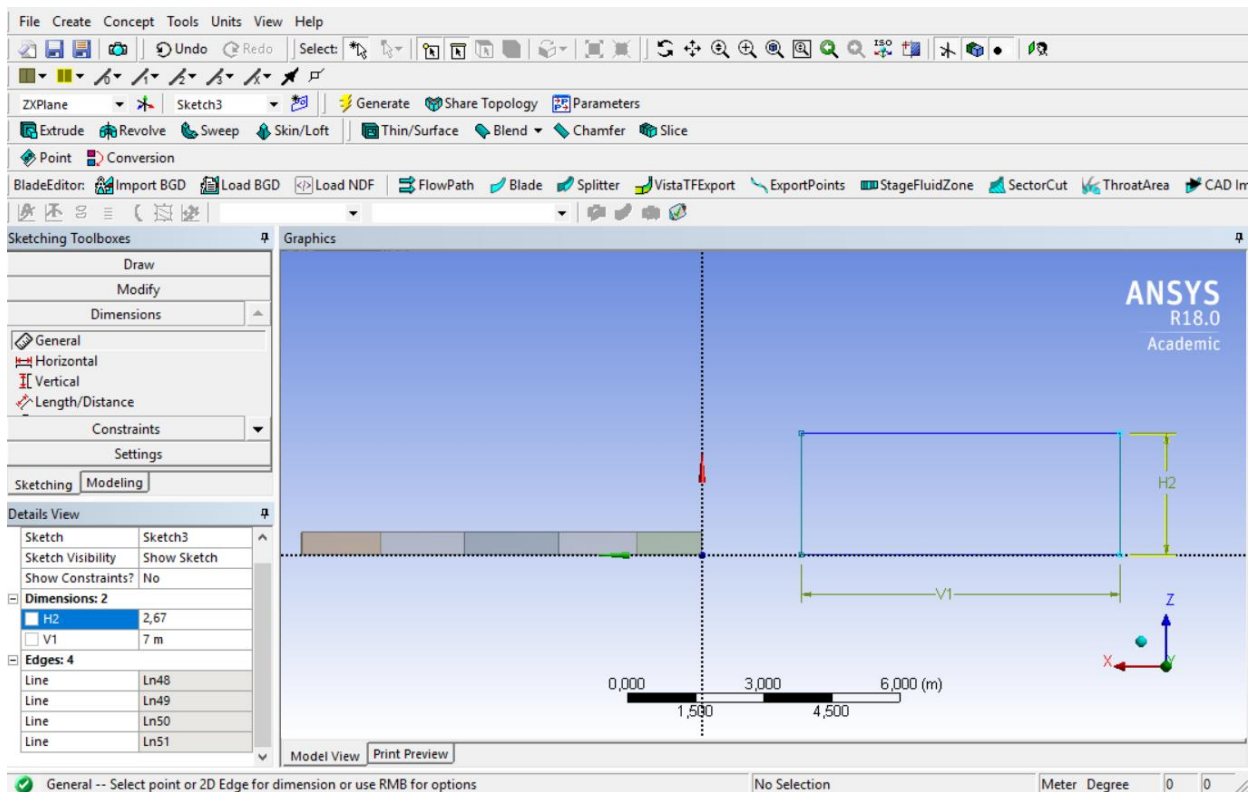


Figura 64.- Opciones presentes en el panel Detail View al dar dimensiones

5.2.4.1.3.- Graphics

El área llamada Graphics (Gráficos) es el cuadro donde se representan todas las modificaciones realizadas en los cuadros antes mencionados, también sirve como interfaz gráfica para el diseño.

La herramienta ideal para desplazarse a través de esta área es un mouse que posea scroll pues mientras lo presionamos es posible rotar alrededor del eje elegido, y si presionamos Ctrl + Scroll podemos desplazarnos manteniendo la misma vista.

Para modificar el área de trabajo se puede agregar la opción Grip (mallado coordenado) desde Tree Outline > Sketching > Setting. En esta sección se puede activar el Mallado coordenado y modificarlo como la línea gruesa del Major Grip y las líneas más pequeñas se modifican en Minor Steps per Major.

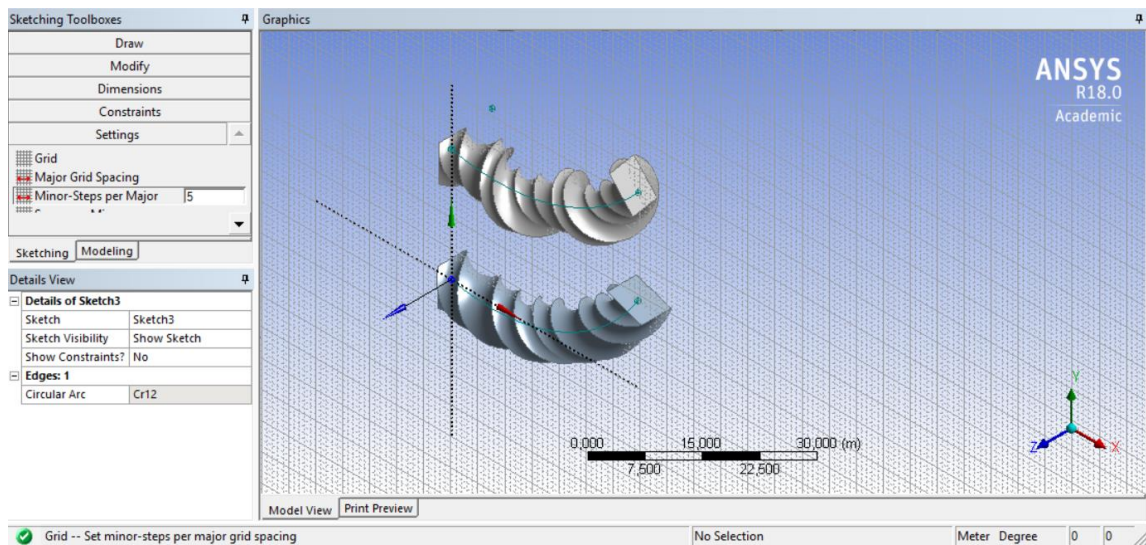


Figura 65.- Creación de un cuerpo por revoluciones en una trayectoria

5.2.4.1.3.1.- Extrude

Permite darle a una sección ya creada una profundidad para el nuevo cuerpo de volumen macizo. En el Detail View se muestran las opciones correspondientes al extrude como son el plano de donde se tomará la sección la dirección del extrude el tipo de solido que se creará, siendo Add Material unir para el nuevo cuerpo con uno ya existente, por otra parte, la opción Add Frozen no une cuerpos, sino que le da una propiedad de independencia.

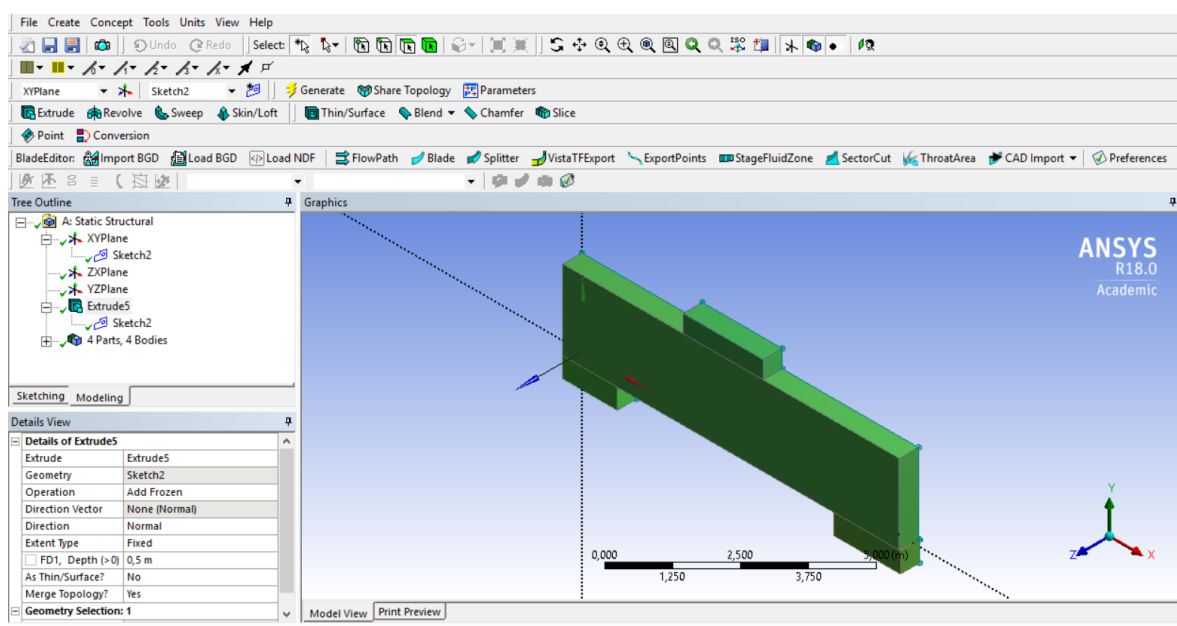
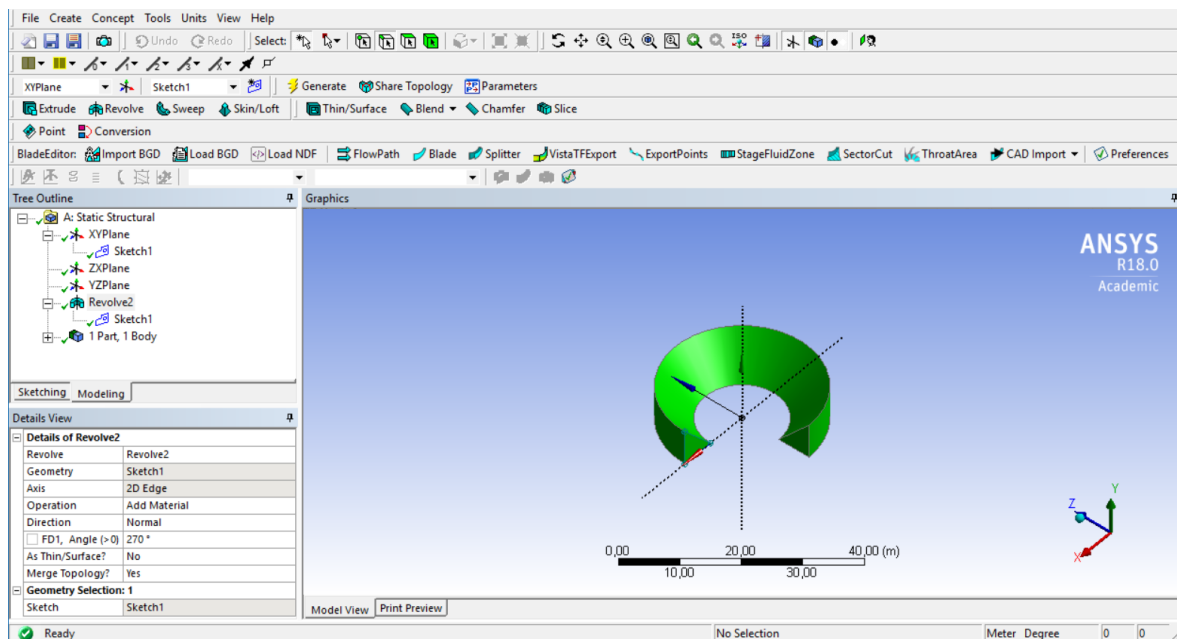


Figura 66.- Extrude de una sección

5.2.4.1.3.2.- Revolve

La opción Revolve permite crear un sólido a partir de una sección ya definida y un eje de referencia por el cual la sección rodeará y formará al sólido por revolución. Es necesario introducir un ángulo de revolución por el cual rotará la sección sobre el eje de referencia, si ponemos un valor positivo rotará a en sentido horario con respecto al eje señalado desde el eje positivo hacia el negativo como se muestra a en la imagen siguiente.



5.2.4.1.3.3.- Sweep

Sweep permite hacer una proyección por trayectoria a partir de una sección a través de un recorrido representado por una línea en el espacio.

Aquí tenemos 2 formas de proyectar la sección a través de la trayectoria, la primera la llamada Path Tangent que hace el recorrido con la sección perpendicular a la trayectoria, la segunda opción es con la opción Global Axes que realiza el recorrido con la sección paralela al eje al cual fue dibujada.

Existe la opción de que mientras transcurre el recorrido aumente o disminuya su sección, esta se conoce como Scale y es se puede modificar de la siguiente manera, para aumentar de

tamaño se coloca el valor de escala que siempre es mayor a 1, si se quiere disminuir de sección el facto será mayor que 0 y menor que 1.

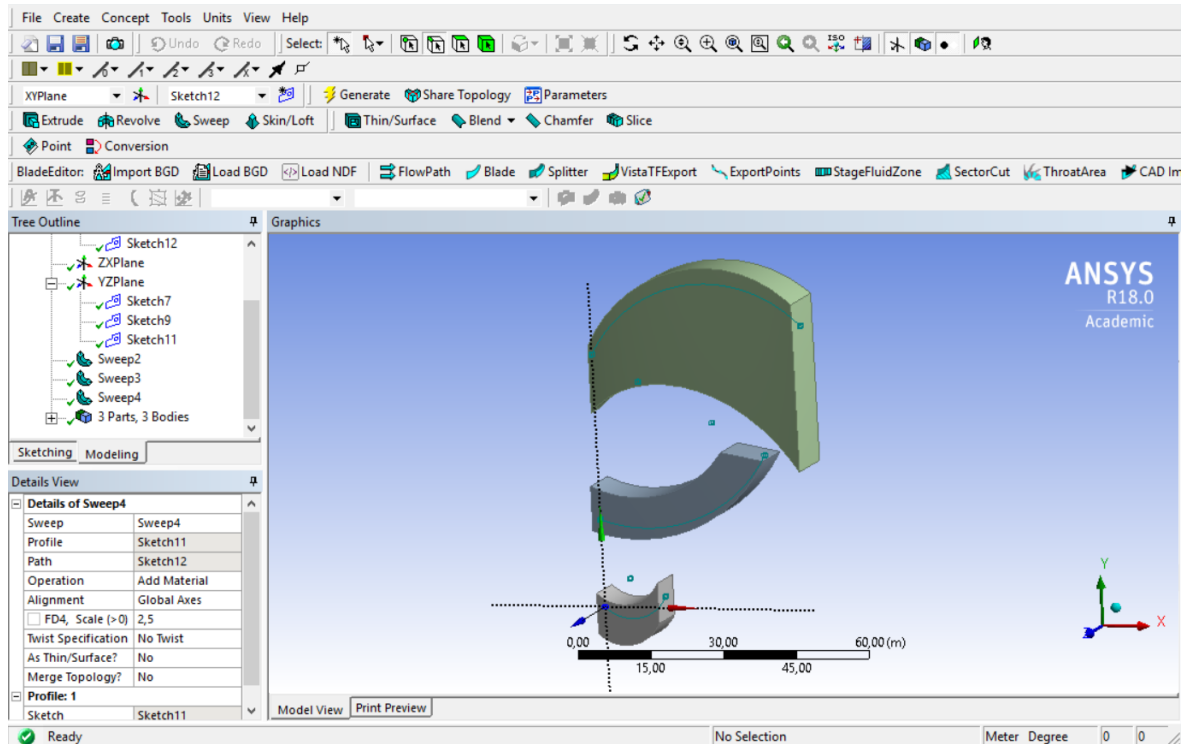


Figura 67.- Proyecciones crecientes, paralelas y perpendiculares a una trayectoria respectivamente

La opción twist specification al igual que la opción anterior permite trazar un camino por el cual se proyectará, la diferencia está en que en vez de cambiar de proporción la sección rota alrededor de su trayectoria.

Si se activa esta opción y se elige Pitch, pedirá la distancia de paso de cada vuelta (entendiéndose como paso a una revolución entera), en cambio sí elegimos Turns nos pedirá cuantas revoluciones quiere que realice a lo largo de toda la trayectoria. En la Figura 70 podemos ver un claro ejemplo de ello.

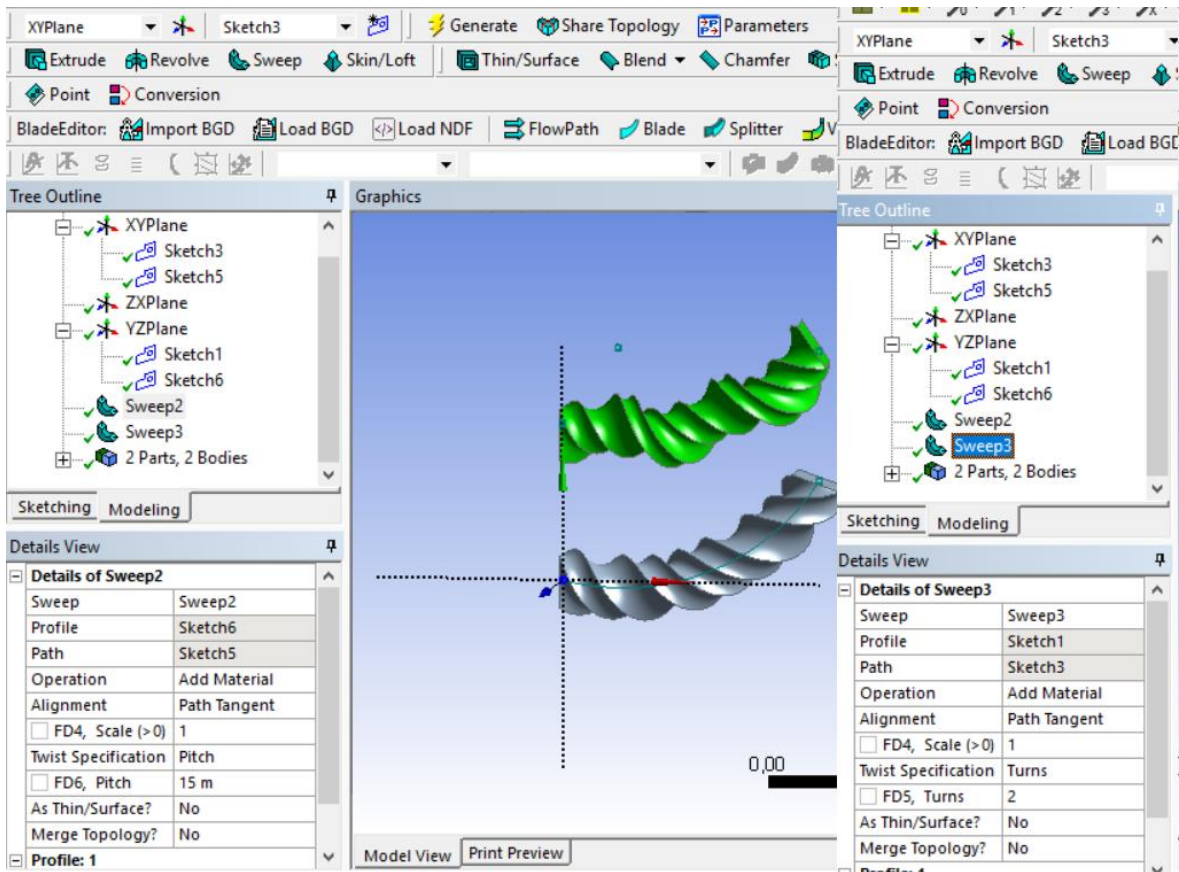


Figura 68.- Proyección de una sección en función a una distancia y numero de revaluaciones

5.2.4.1.4.- Pattern

La opción Pattern o (patrones) es la opción más sencilla para clonar o hacer copias en forma de patrones. Es útil pues el programa no cuenta con la opción de copiado y pegado.

Para acceder a la opción de patrones se debe escoger la siguiente elección en la barra de herramientas, Create > Pattern. Luego aparecerán nuevas opciones en el Detail View, en la opción Pattern Type (Tipo de Patrón) se puede escoger entre 3 opciones, la primera de ellas, linear que nos permite realizar copias a lo largo de un eje, en Direction se indica hacia qué lado del eje se quiere que vaya el patrón, en FD1 offset indica la distancia de centro a centro de los patrones siguientes y en FD3 Copies indica cuantas copias se quiere.

Con la opción Rectangular se creará un cuadro de patrones, pero se tiene que añadir una nueva distancia y número de copias en el mismo plano que se realizó el lineal y perpendicular al eje antes seleccionado. La opción restante Circular que permite realizar copias en patrón

alrededor del contorno de un círculo que tiene como referencia un eje y en la opción ángulo que se puede configurar, pero si se quiere que exista una separación equidistante tendremos que poner 0.

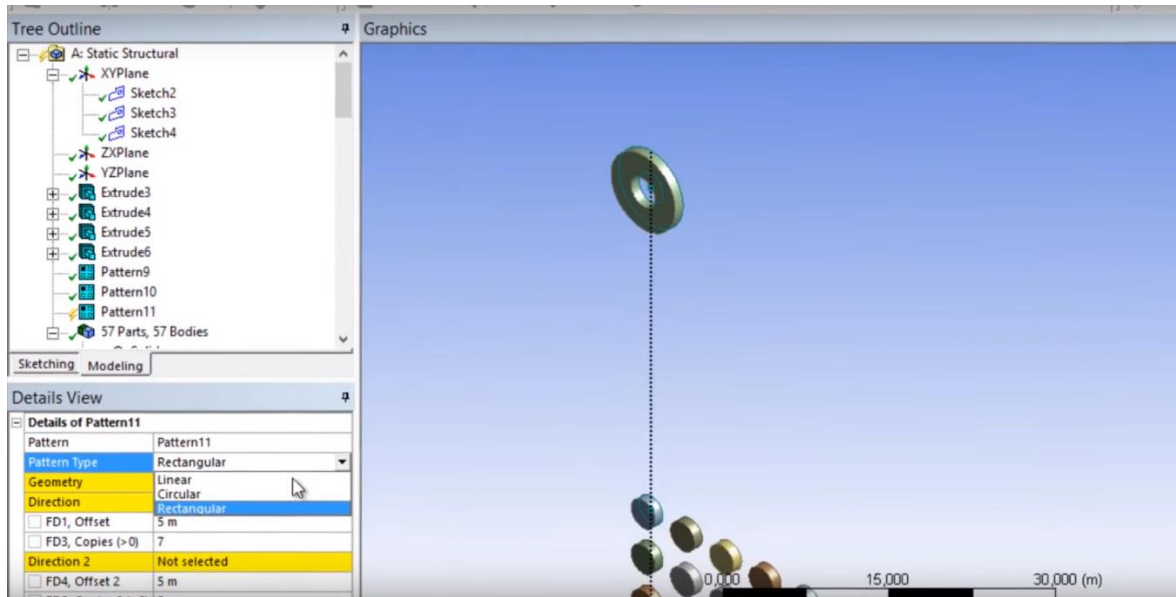


Figura 69.- Multiplicación de un sólido en patrones rectangulares

En la barra de herramientas también se puede encontrar otras opciones para modificar cuerpos.

5.2.4.1.5.- Body Operation

Con esta opción se puede modificar las opciones entre 2 o más cuerpos independientes. En la Detail View opción Type se puede elegir las siguientes sub funciones, la primera es Sew que permite unir 2 solidos tipo superficie generando un solo solido resultante. Otra opción Simplify que ayuda a simplificar cuerpos que tienen elementos innecesarios nos permite eliminar caras o aristas que están sobre unas ya existentes y que son innecesarias y limpia el cuerpo en sí. La tercera opción es Cut Material que cortara el cuerpo seleccionado a cualquier otro cuerpo que este toque. La opción Cuarta es Slice Material con el cual se puede rebanar la parte de un cuerpo seleccionado con cualquier otro cuerpo que toque, esto generará 2 cuerpos separados. La quinta opción es Imprint Faces (imprimir caras) que separa superficies de cuerpos con lados superpuestas, esta opción es muy útil cuando se quiere definir una cara en donde se aplicara una carga y no en toda superficie más grande.

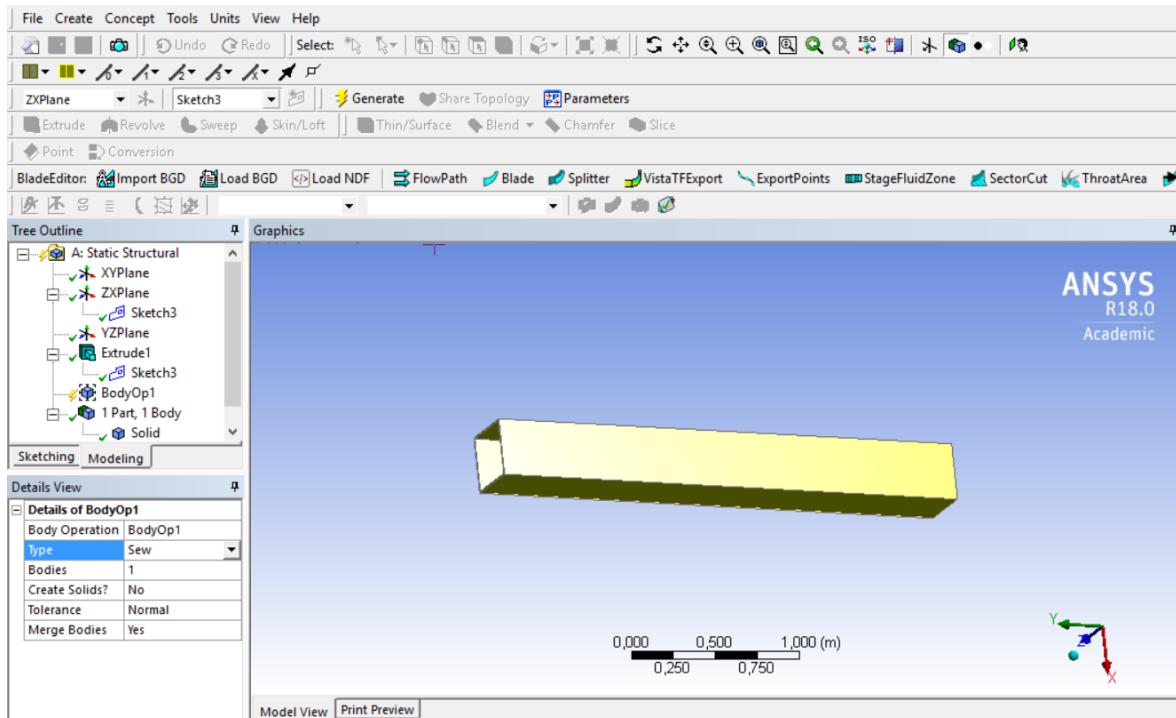


Figura 70.- Opciones disponibles para modificar un cuerpo con Body Operations

La última opción es Clean Bodies que revisa y corrige los errores que no sea tan evidente en la geometría.

5.2.4.1.6.- Body Transformation

Esta herramienta ubicada en Create > Body Transformation permitirá orientar en el espacio, trasladar, rotar o dar una escala a nuestros cuerpos. La Figura 73 muestra estas opciones básicas.

Mirror es la herramienta que nos permite crear una copia de un cuerpo desde un eje de simetría como si de un espejo se tratara.

Move nos permite mover al cuerpo sin rotarlo a partir de un punto, un plano o un vértice.

Rotate como su nombre lo indica nos permite rotar a un cuerpo alrededor de un eje que puede estar dentro o fuera del cuerpo.

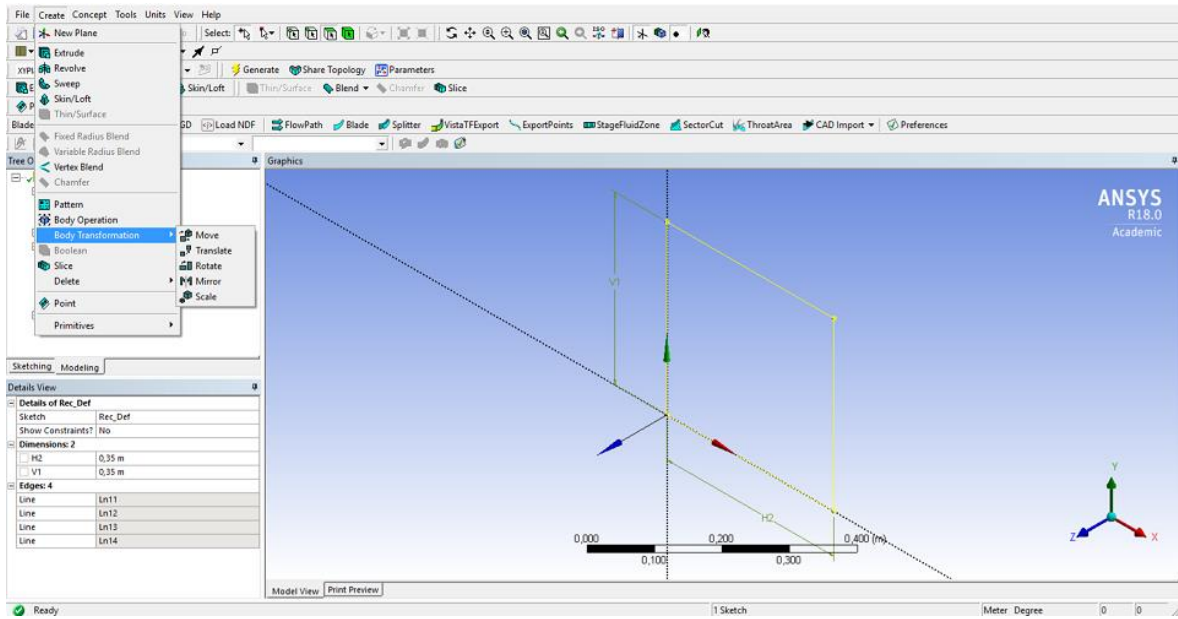


Figura 71.- Operaciones disponible en Body Transformations

Scale permite escalar un cuerpo para que sea más grande o más pequeño, si el número de escala es mayor que 0 pero menor que 1 será más pequeño y si es mayor de 1 crecerá; para que el cuerpo se escale se debe escoger si se quiere que lo haga desde el origen o desde el centro de la figura, también se puede escalar con diferentes proporciones escogiendo la opción escala no uniforme (Non-Uniform) existen 3 factores que equivalen a cada uno de los ejes.

5.2.4.1.7.- Opciones Booleanas

Las opciones Booleanas permiten modificar cuerpos superpuestos, con las siguientes sub opciones.

La primera es Unite que une todos los cuerpos seleccionados para crear un nuevo cuerpo que las integre, la segunda opción es Subtract en el que primero se elige un cuerpo objetivo y después seleccionaremos los cuerpos a extraer que estén superpuestos. La tercera opción es Intersect que creará un cuerpo nuevo a partir de los volúmenes que coinciden en un mismo lugar y finalmente encontramos Imprint Faces que creará cuerpos nuevos a partir de todas las intersecciones que existen.

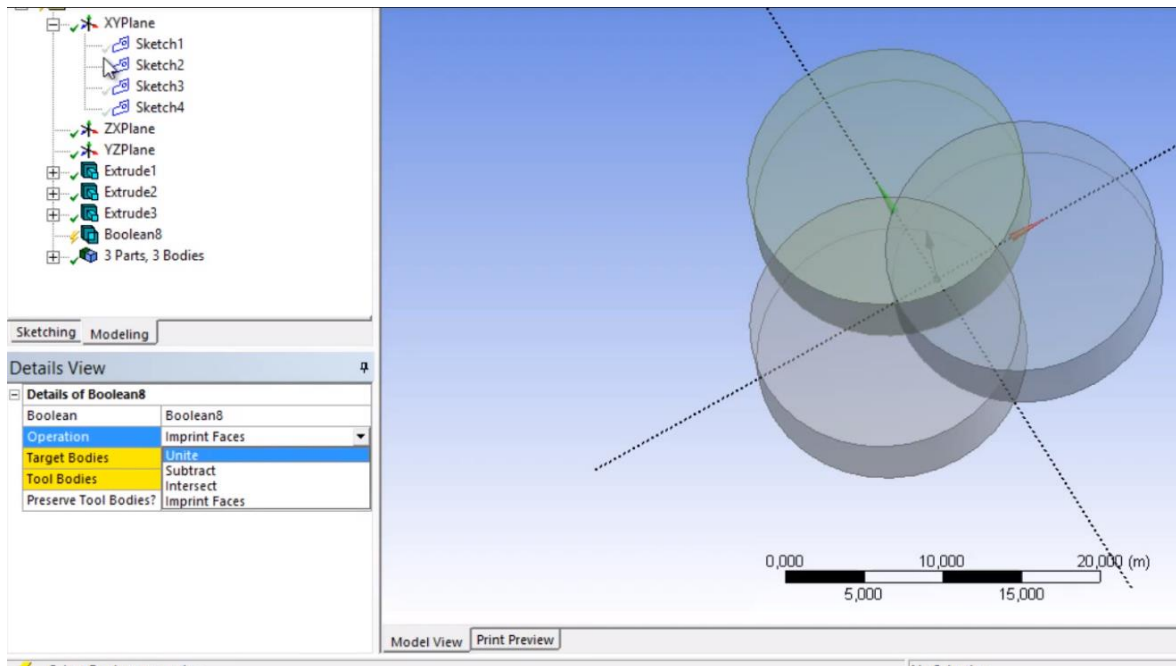


Figura 72.- Opciones Booleanas

5.2.4.2.- Importar Geometría

Otra forma de usar un cuerpo para modelación es importarlo desde un archivo externo que puede haber sido creado con la misma herramienta Design Modeler o un tercer programa como Autocad, los principales formatos de archivos reconocidos son los siguientes.

- ACIS (*.sat;*.sab)
- AMF (*.amf)
- ANSYS (*.anf;*.pmdb)
- AutoCAD (*.dwg;*.dxf)
- BladeGen (*.bgd)
- Catia [V4] (*.model;*.exp;*.session)
- Catia [V5] (*.CATPart;*.CATProduct)
- Catia [V6] (*.3dxml)
- Creo Elements/Direct Modeling (*.pkg;*.bdl;*.ses;*.sda;*.sdp;*.sdac;*.sdpc)
- Creo Parametric (*.prt;*.asm)
- DesignModeler (*.agdb)
- FE Modeler (*.fedb)
- GAMBIT (*.dbs)
- IGES (*.iges;*.igs)
- Inventor (*.ipt;*.iam)
- JT (*.jt)
- Monte Carlo N-Particle (*.mcnp)

NX (*.prt)
OBJ (*.obj)
Parasolid (*.x_t;*.xmt_txt;*.x_b;*.xmt_bin)
PLY (*.ply)
Rhino (*.3dm)
SketchUp (*.skp)
Solid Edge (*.par;*.asm;*.psm;*.pwd)
SolidWorks (*.SLDPRT;*.SLDASM)
SpaceClaim (*.scdoc)
STEP (*.stp;*.step)
Stereolithography (*.stl)

5.2.5.- Model

Model es la 3era opción en el esquema del proyecto que permite modificar las configuraciones de discretización de los cuerpos antes obtenidos proporcionando un mallado a estos. El resultado de esta configuración es un gráfico que muestra al cuerpo con una malla de tamaño configurable conocida como Mesh.

5.2.6.- Setup

Setup es la 4ta opción en el esquema del proyecto y se refiere a las condiciones de borde que se le da a nuestro problema, siendo estas opciones los tipos de apoyo en la estructura, las cargas aplicadas en los cuerpos, el tiempo que estará expuesto a tales ensayos y desplazamientos iniciales o aceleraciones.

5.2.7.- Solution

Solution es la 5ta opción en el esquema del proyecto y se refiere al tipo de soluciones que proporciona el programa, los cálculos pueden ser analizados e impresos como reporte para su revisión manual.

5.2.8.- Results

La última opción en el esquema del proyecto corresponde a los resultados, estos resultados son configurables siendo posible obtener resultados de deformaciones, deformaciones unitarias, esfuerzos y distribución de energía.

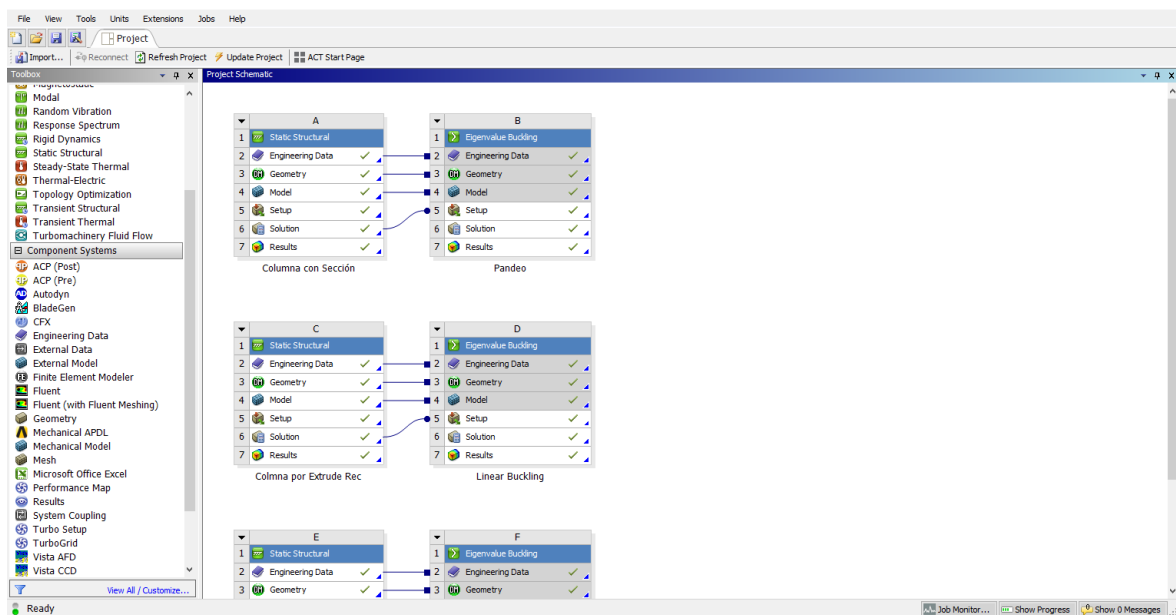


Figura 73.- Opciones de un modelo

5.2.8.1.- Mechanical

Es la herramienta proporcionada por ANSYS para poder configurar las opciones de Model, Setup, Solution y Results. Al igual que Design Modeler tiene una estructura esquemática y su interfaz es similar, teniendo los cuadros de Outline Detail of View y Graphics, pero ahora tenemos una nueva ventana llamada Messages donde podremos ver los procedimientos que realiza el programa y si existe un error este mostrará un mensaje sobre lo que ocurrió y sugerencias.

Como se puede observar en la Figura 76, el proyecto esta esquematizado desde Project que es el archivo, Model es el asignado por el programa, por ser el primero es la letra A y como

se dijo aparece el nombre de las celdas nombradas desde el inicio. Geometry, Coordinate Systems y Mesh permite configurar las opciones de la interfaz y discretización, con color verde vemos el tipo de sistema de análisis, en este caso estuvieron conectados 2 sistemas, Structural Analysis y Eigenvalue Buckling.

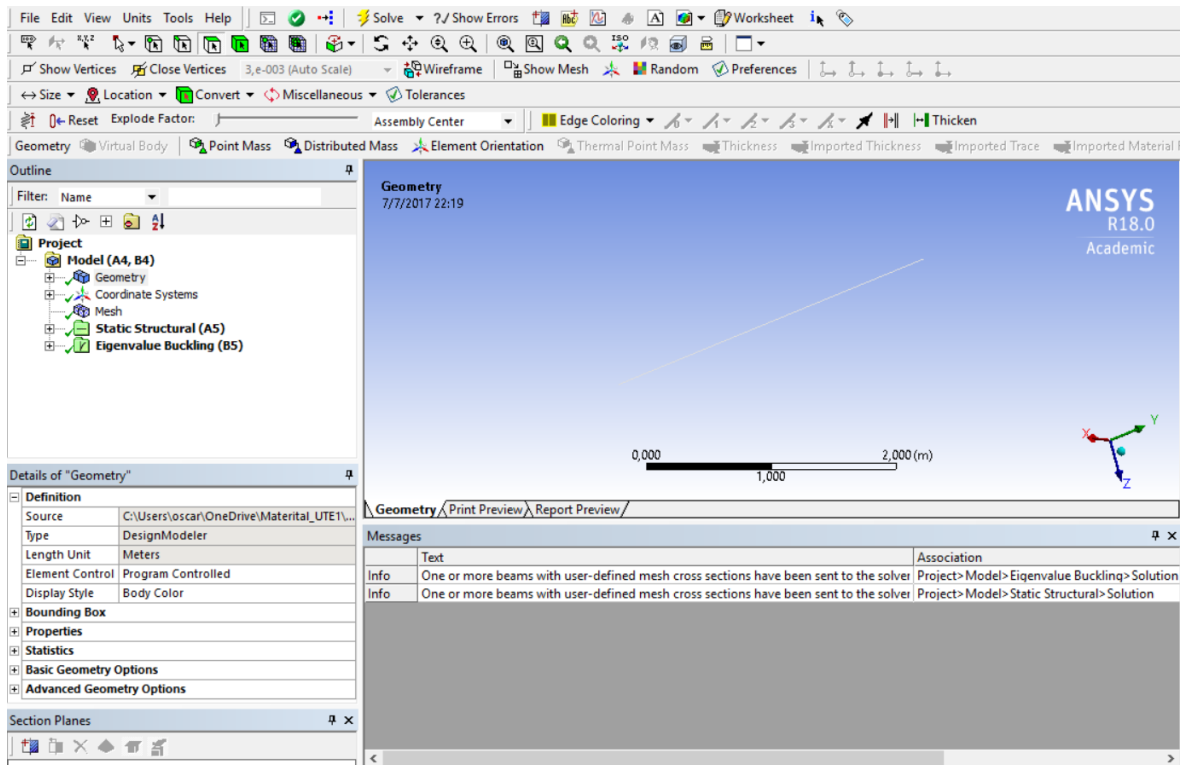


Figura 74.- Interfaz de trabajo al usar el módulo Mechanical

5.2.8.1.1.- View Mechanical Wizard

Una herramienta recomendada para personas que estas iniciando su aprendizaje en este módulo es la función de Ayudante que está representada con un icono circular verde con un visto blanco en su interior que se ubica en la barra de herramientas llamado View Mechanical Wizard.

Wizard es una herramienta de procedimientos necesarios que ANSYS proporciona para completar el proceso de análisis, se le puede preguntar un caso específico en la opción Choose Wizard, algunos ejemplos son análisis de tensiones, análisis de fatiga, análisis

modal, etc. Cada vez que se elija una de estas opciones de análisis los pasos para completarlo cambiarán. Los iconos en color verde representan los pasos ya completados, los amarillos los que están incompletos y los vacíos o rojos los pasos por completar.

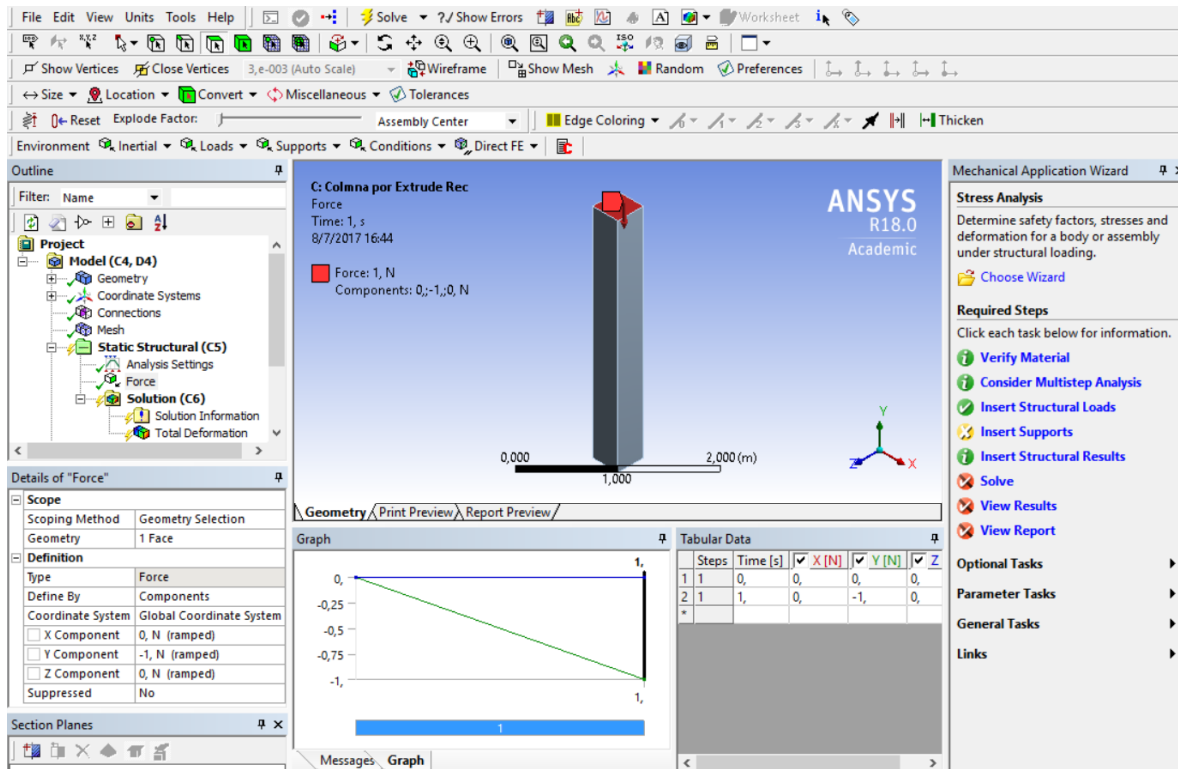


Figura 75.- Procedimientos proporcionados por View Mechanical Wizard

5.2.8.2.- Mesh

La opción Mesh o mejor conocida como mallado es una herramienta de Mechanical para poder discretizar los elementos en partes más pequeñas que componen dicho elemento, estas partes están compuestas por tetraedros o hexaedros según sea más conveniente y cada uno de estos está compuesto por nodos que lo componen.

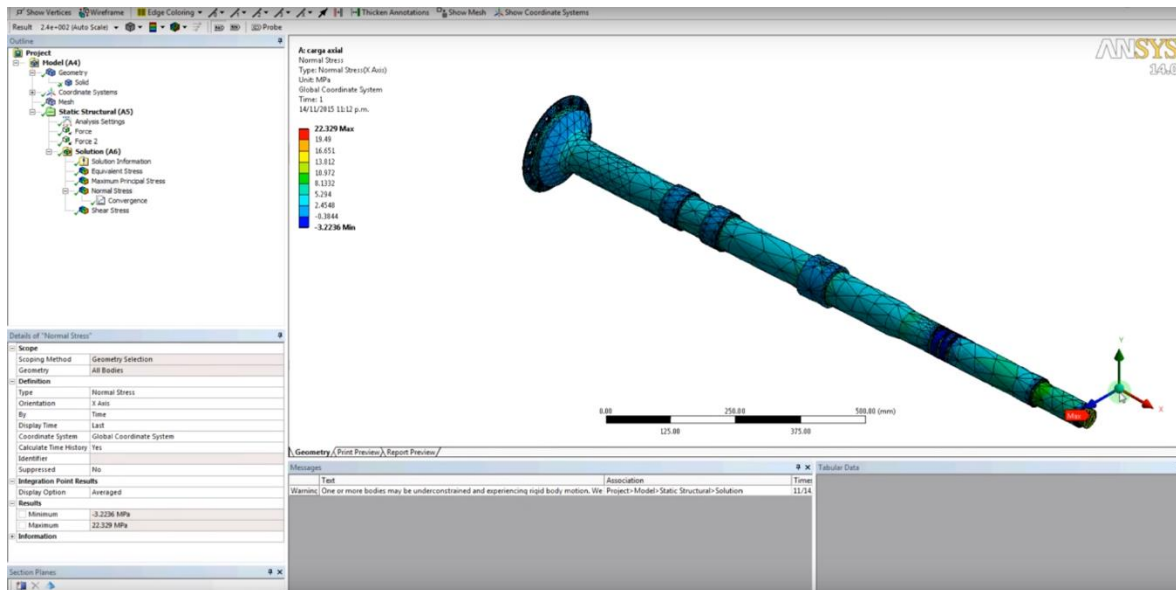


Figura 76.- Mallado en un cuerpo por defecto

Crear el mallado es un muy importante porque dependiendo de la geometría y de los resultados que se busquen estos cambiarán de método o de tamaño, aunque si no se tiene idea de cuál será elección más óptima para nuestro caso el programa tiene especificaciones generales y básicamente aceptables para cualquier caso, por default el programa usa la opción de mallado automático que no es tan refinado, sino más bien tosco y recomendable para elementos con esquinas cuadradas pero para secciones redondas o de transición es necesarios conocer cómo se configura esta opción.

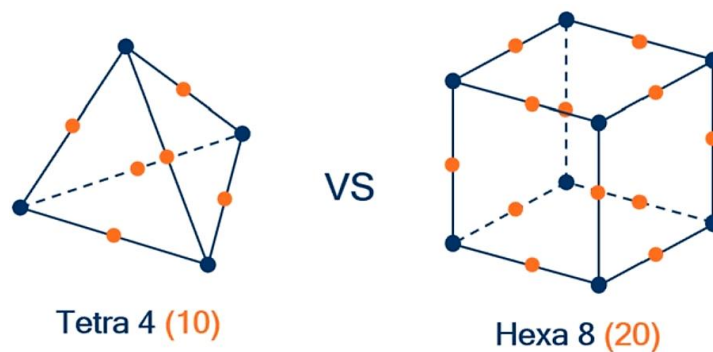


Figura 77.- Forma de los métodos usados en el mallado de los cuerpos

El mallado Tetraedro transforma el elemento en tetraedros más pequeños que lo componen, dichos tetraedros pueden ser de 4 o de 10 nodos dependiendo de cuan compleja sea el cuerpo discretizado, así también el mallado por elementos Hexagonales crea elementos más pequeños con dicha geometría con 8 o 20 nodos como se ve aprecia en la imagen. Hay que

tener en cuenta que mientras más elementos y nodos se crean más tardará la computadora en resolver el problema por lo que a veces es mejor trabajar con la menor cantidad de elementos y nodos posibles para respuestas sencillas en cuerpos de geometrías simples.

Para poder Lograr esta configuración basta con ir a la opción Mesh y en la tabla View Detail configurar sus opciones Element Midside Nodes se escoge Dropped para elegir la opción con menos nodos o Kept para el tener más nodos según sea el caso tetraedro o hexaedro, si es en su mayoría con esquinas su el programa configurará el elemento con hexaedros por su similitud, pero para aquellos elementos que sean con muchas curvas y con secciones complejas el programa utilizará tetraedros. Esta opción es totalmente modificable poniendo un parámetro de mallado en la opción Mesh, pulsando botón derecho se puede configurar de diferentes maneras, en este caso se cambia de tipo de figura para poder escoger que elementos lo componen, escogeremos Automatic Method en donde se encuentra la opción Method y donde se puede cambiar de método de discretización.

Al final de la opción de detalles se puede ver cuántos nodos y elementos son parte del cuerpo discretizado por lo que ya se puede hacer una idea del tiempo que tomará en resolver aquel problema.

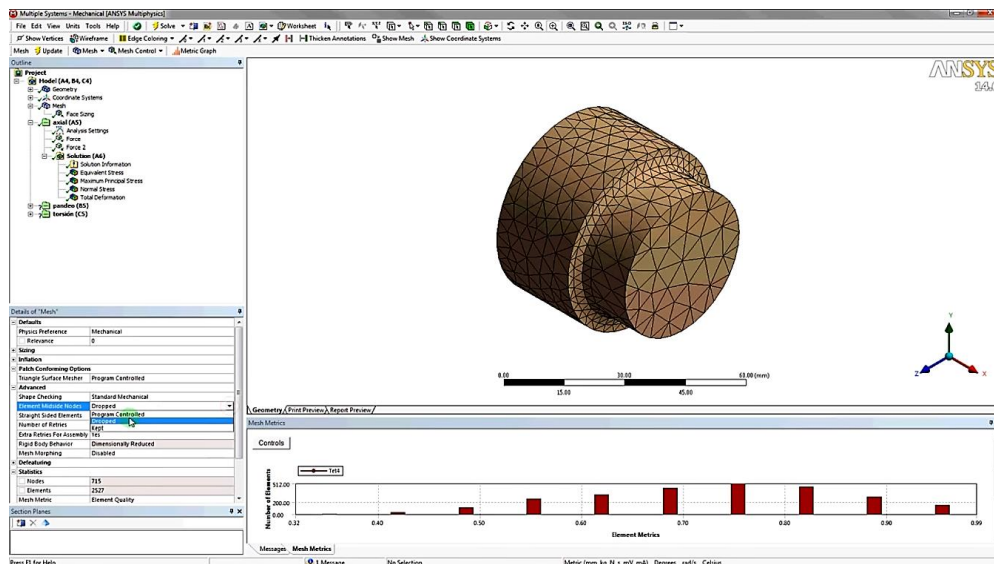


Figura 78.- Calidad de los elementos procesados

5.2.8.3.- Condiciones de Apoyo (Support)

Antes de poner las condiciones de apoyo en los elementos a analizar primeramente se deberá mallar los cuerpos dependiendo de los resultados que se requieran, este tema está mejor explicado en la sección Mesh.

Dependiendo a los requerimientos del problema se puede asignar un tipo de impedimento o restricción en diferentes direcciones, aunque se puede conseguir el mismo efecto con diferentes herramientas como se puede apreciar en la Figura 81.

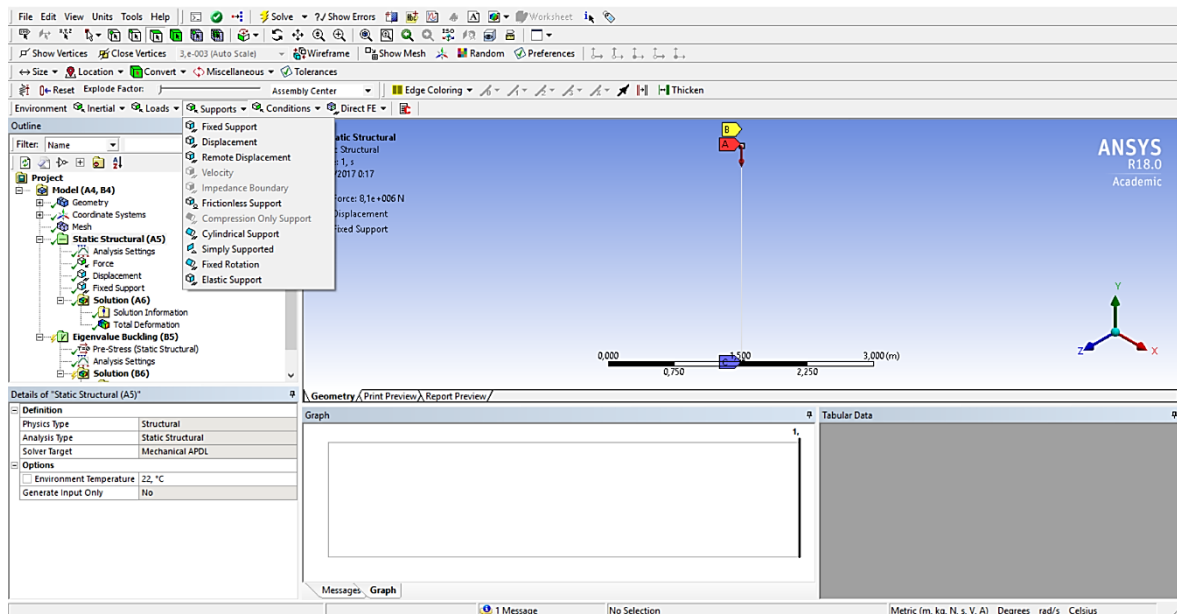


Figura 79.- Tipos de Apoyo disponibles en ANSYS

5.2.8.3.1.- Fixed Support

Este tipo de apoyo es equivalente a designar un apoyo empotrado en el sector designado, este apoyo impide el desplazamiento de los 3 ejes coordenados y la rotación alrededor de los ejes antes mencionados, el soporte puede ser asignado en un área, en una arista o en un vértice.

Para poder obtener la resultante de las fuerzas, esfuerzos y deformaciones aplicadas en el cuerpo basta con arrastrar la opción Fixed Support hasta la sección de solutions más abajo ubicados, este valor tendrá las mismas propiedades que las generadas en la sección Analysis

Settings, por ejemplo, si se configuró que se realizarán 20 Steps (pasos) para el proceso la fuerza resultante en los apoyos se imprimirá en 20 Steps.

5.2.8.3.2.- Displacement

La opción displacement tiene 2 finalidades, la primera es asignar un desplazamiento impuesto y el otro es permitir o restringir el desplazamiento en cualquiera de los 3 ejes cartesianas. Al igual que los soportes el desplazamiento puede ser asignado en un área, en una arista o en un vértice.

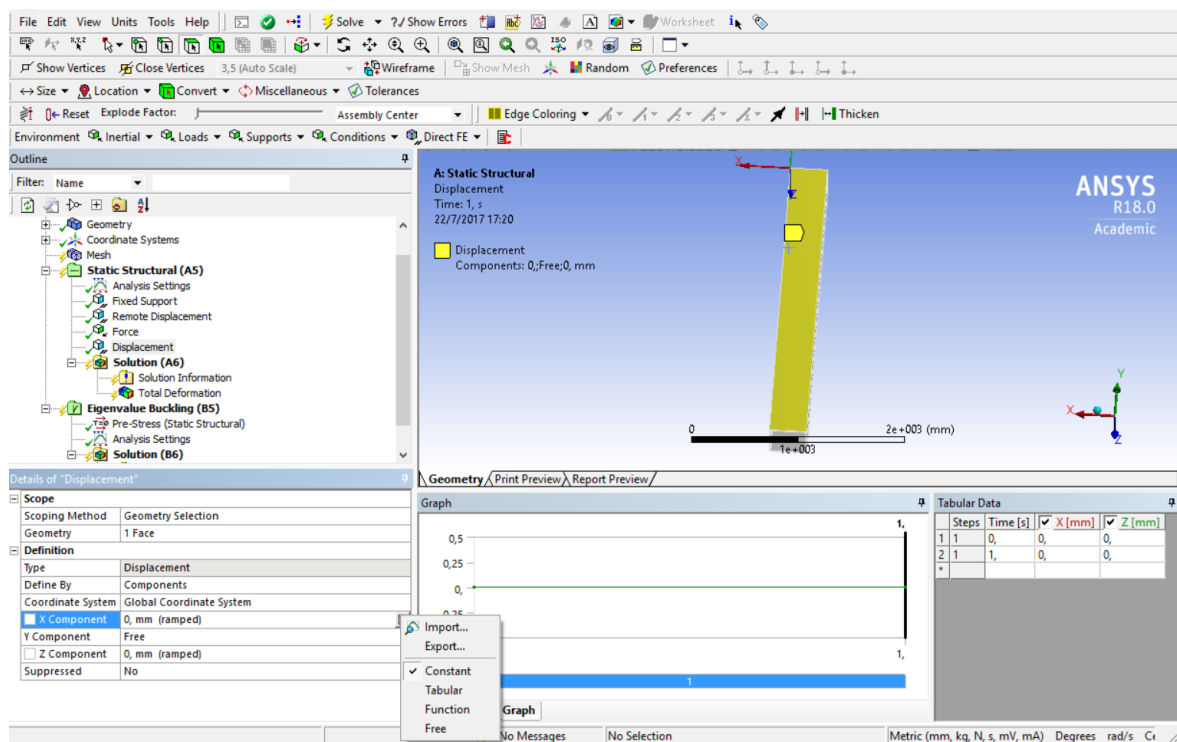


Figura 80.- Restricción o Libertad de Movimiento

Para asignar el desplazamiento basta con escribir la distancia deseada en la casilla en blanco, otra manera de asignar un desplazamiento es con la opción tabular que permite asignar un desplazamiento para cada Step (paso) para que se haya configurado en Analysis Settings, y por último se puede asignar un desplazamiento a través de una función que puede ser escrita como una ecuación con variables y constantes.

Para poder permitir una dirección de desplazamiento libre se debe escoger la opción Free y para poder evitar un desplazamiento libre se debe escoger la opción Constant o en su defecto se debe escribir 0 como valor asignado.

5.2.8.3.3.- Remote Displacement

La opción remote displacement tiene las mismas características que la herramienta displacement, pero con la opción de poder rotar alrededor de un punto remoto.

Este punto remoto de rotación también puede ser asignado en un punto fijo y puede ser configurado de la misma manera que el desplazamiento, ya sea con un valor impuesto, por función, por tabla, puede ser permitida con la opción free o restringida con la opción Constant o simplemente escribiendo 0.

5.2.8.3.4.- Cylindrical Support

La opción cylindrical support permite o restringe el desplazamiento de 3 maneras, la primera es permitir o restringir la rotación alrededor del eje de la sección cilíndrica, la segunda es permitir o restringir el movimiento sobre la superficie del cilindro, pero este solo está disponible en cuerpos en 3 dimensiones, la tercera es permitir o restringir el movimiento tangencial a un círculo y es equivalente al desplazamiento axial, pero para círculos en 2 dimensiones.

5.2.8.3.5.- Frictionless Support

La opción Frictionless Support es otro de los tipos de apoyo disponibles en el programa, esta opción permite crear un apoyo sobre una superficie asignada de tal manera que puede desplazarse a lo largo del plano, pero nunca en sentido normal al mismo.

Anteriormente se mencionó que hay varias maneras de designar el mismo tipo de soporte, una alternativa a este es asignar un desplazamiento restringido en el mismo sentido de la

cara asignada con displacement definiéndola como Constant y la dirección paralela al plano como Free.

5.2.8.3.6.- Elastic Support

Elastic Support como su nombre lo indica permite simular el comportamiento de un resorte por lo que es necesario colocar una constante de rigidez, la cual debe ser superada para que el resorte reaccione. Después de aplicar este soporte el desplazamiento en el soporte podrá moverse ligeramente.

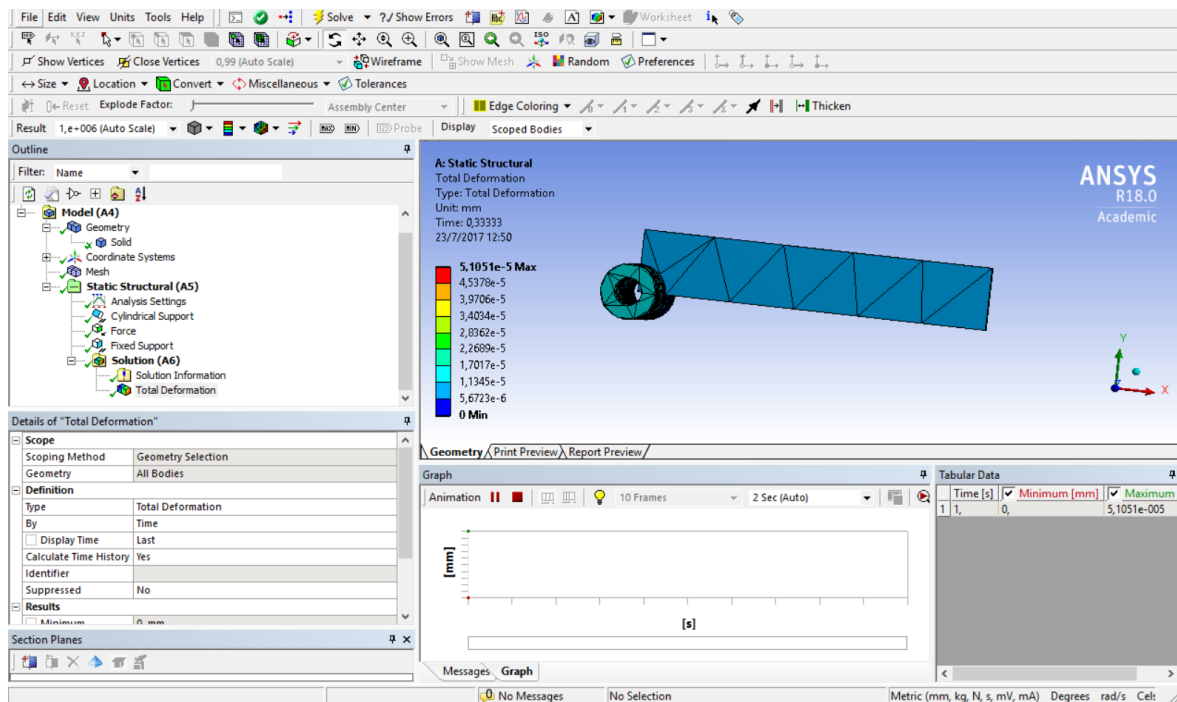


Figura 81.- Configuración disponible para Soportes elásticos

Los soportes antes mencionados pueden ser combinados de varias maneras, pero se debe tener cuidado y verificar los resultados obtenidos con cálculos que lo aprueben, en el caso de sobreponer soportes el programa responderá con mensajes de error o peligro ya que las matrices que la componen se repiten por lo que hay que designar los soportes de la manera más simplificada posible para que el cálculo dure menos en resolverse.

5.2.8.4.- Cargas Aplicada (Loads)

Después de asignar las restricciones respectivas se debe las aplicar las cargas del problema, la combinación de estas dos condiciones permitirá definir el tipo de esfuerzo que soportará el cuerpo experimentado.

Los efectos posibles son los siguientes: compresión del cuerpo, tensión del cuerpo, corte del cuerpo, torsión del cuerpo o la combinación parcial o total de todos ellos.

Para poder aplicar una carga en forma de función se debe escribir la función con variables y constantes después de definir la casilla como Function, esta opción es aplicable para fuerzas, esfuerzos, momentos o presión hidrostática, si se desea definir la carga en función del tiempo la configuración se debe hacer en la sección Analysis Settings aumentando el número de pasos y el tiempo entre cada paso, también se puede interpolar valores entre pasos preñdiendo la casilla Auto Time Stepping y escribiendo cuantos sub pasos deben imprimir el programa. Hay que recalcar que el número de pasos incrementará el tiempo de resolución del problema.

En la barra de herramientas podemos encontrar la opción Loads que permitirá elegir diferentes efectos en nuestro cuerpo objetivo, desde el principio del proyecto el programa permite elegir las unidades a utilizar, pero en la barra de menú se puede cambiar las unidades del proyecto a conveniencia con la opción Units, la misma opción sirve para la asignación de soportes. A continuación, se presentan los efectos que se pueden asignar al cuerpo objetivo.

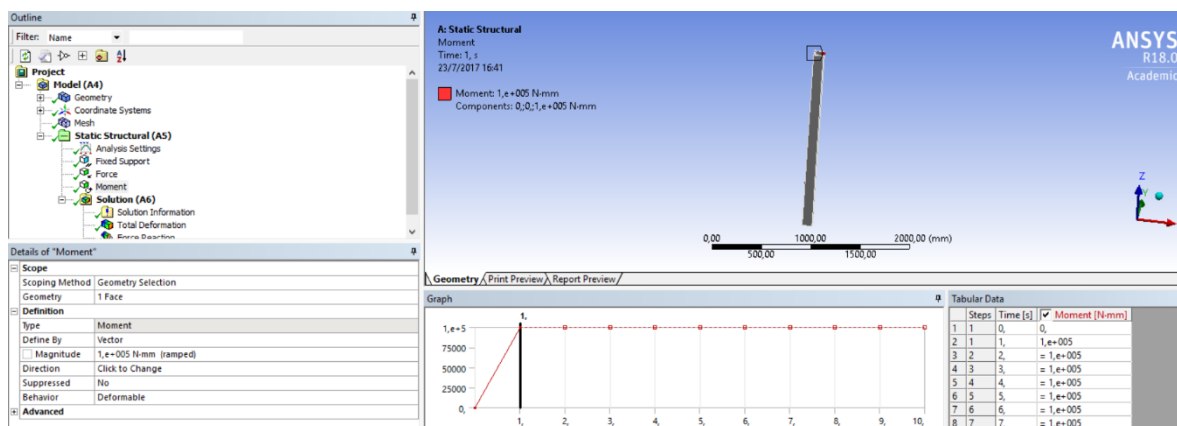


Figura 82.- Carga aplicado a través de pasos

5.2.8.4.1.- Fuerza (Force)

La opción Force es aplicable en superficies planas, superficies cilíndricas, aristas y vértices; La aplicación de una fuerza es intuitiva y basta en definir la aplicación de la carga, la magnitud de la misma y su dirección; si se desea colocar una fuerza en una dirección diferente a la de los ejes basta en descomponer esta fuerza y asignarlas en forma de vector de tal manera que la dirección esta descrita por el signo de la carga siendo positivo la dirección positiva del eje y negativa en sentido contrario.

5.2.8.4.2.- Presión o Esfuerzo (Pressure)

La opción Pressure es la más simple de usar de las cargas solo se puede aplicar en una superficie plana o cilíndrica y también puede ser descrita en forma de función o tubularmente, por default la presión ira en dirección a la compresión, pero se puede cambiar este sentido presionando la flecha de color rojo o se le puede dar dirección en forma de vector como en el caso de la fuerza.

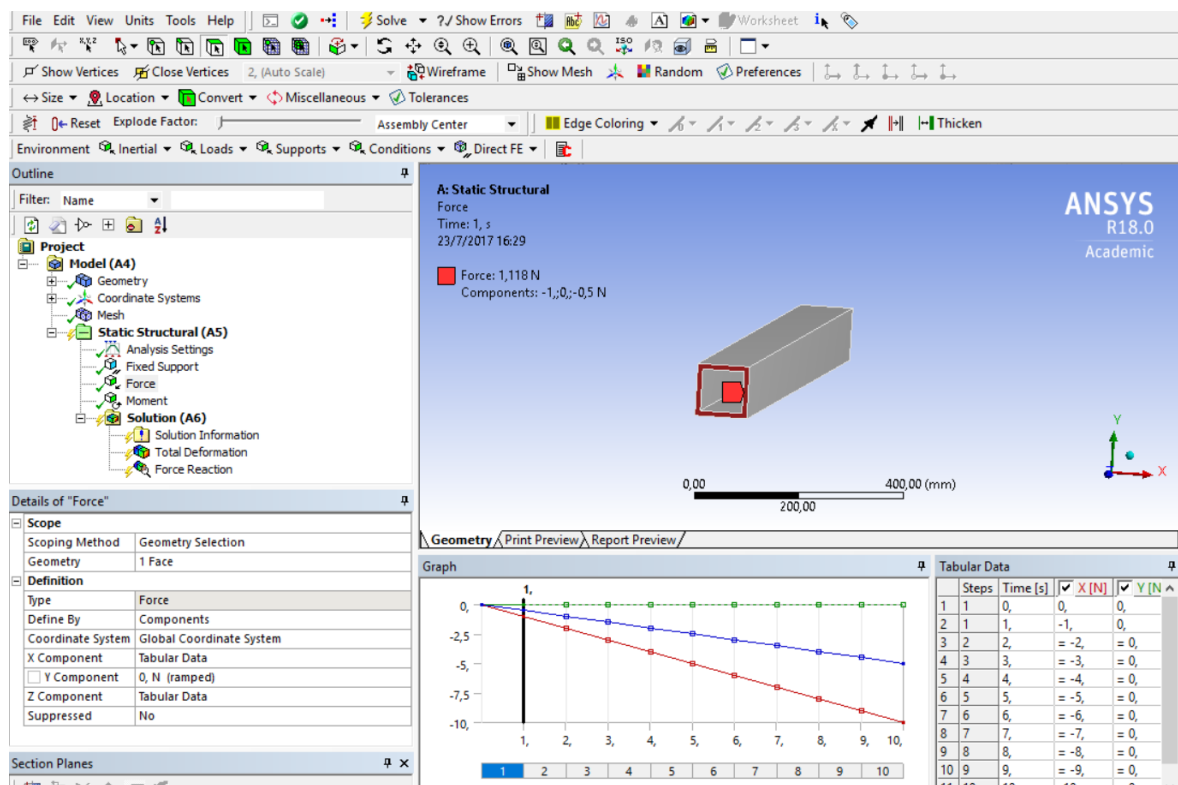


Figura 83.- Presión aplicada sobre una superficie definida

5.2.8.4.3.- Momento (Moment)

La opción Moment permite rotar una parte del elemento, el momento puede ser aplicado en una superficie plana, superficie cilíndrica, en una arista o en un vértice. La magnitud de la carga debe ser definida en la casilla asignada que por default lo hará en el mismo plano seleccionado, pero también puede ser definida como una función o tabulación, si la rotación no es en los planos cartesianos globales se debe descomponer en estos planos y colocar sus magnitudes en cada casilla de la opción Tabular.

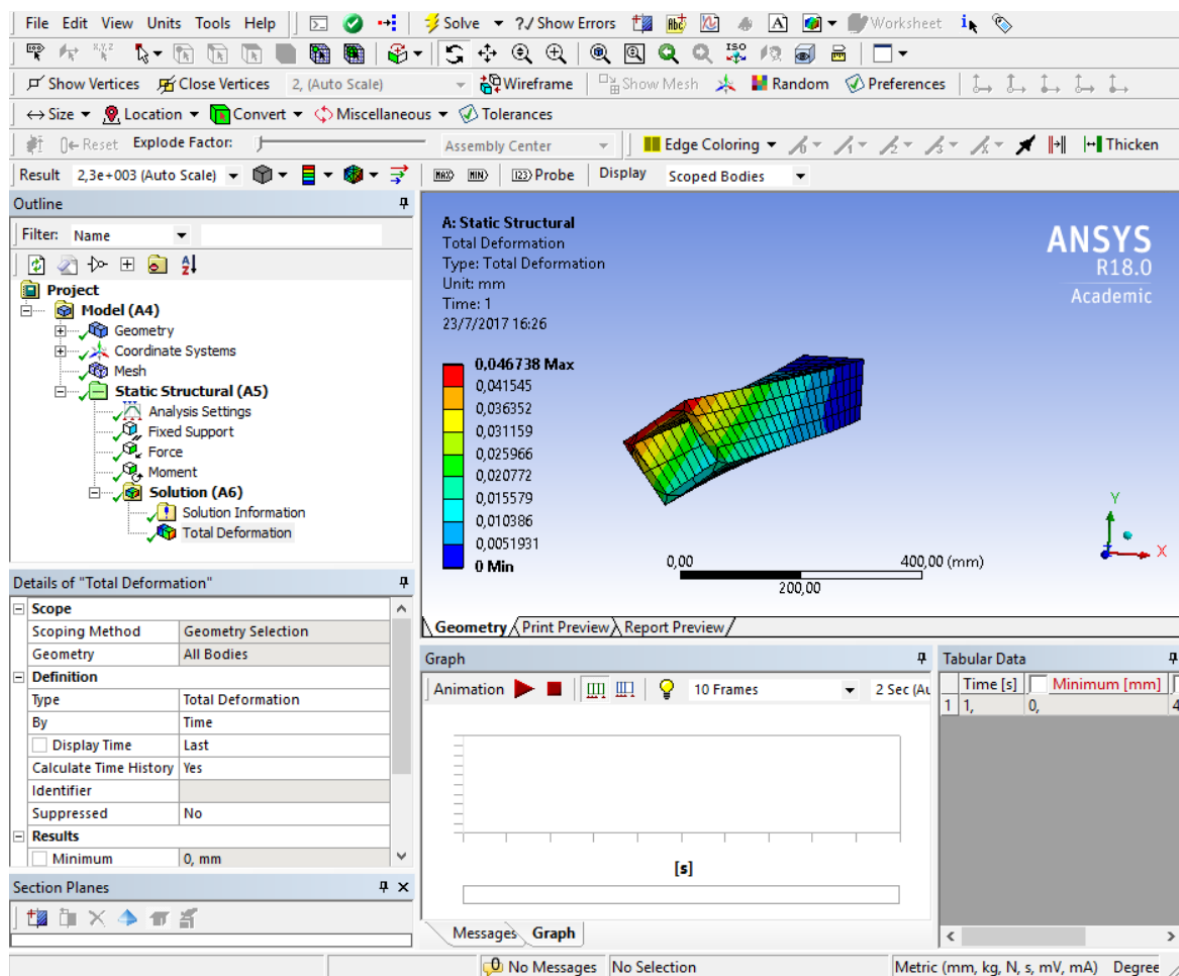


Figura 84.- Aplicación de un momento torsional en una sección HSS

5.2.8.4.4.- Presión Hidrostática (Hydrostatic Pressure)

El programa Ansys también permite la simulación de fluidos, aunque la modalidad de Structural Analysis prioriza el análisis mecánico, los programadores han permitido usar la

opción de presión Hidrostática de un fluido sobre uno o varios planos. Al elegir esta opción se debe configurar la densidad del fluido que se desea que haga efecto sobre una superficie, una arista o un vértice, también es necesario asignar una aceleración y una dirección que puede ser modificada como vector o en forma tabular. Cuando la presión hidrostática esta sobre los cuerpos produce una reducción en su volumen.

5.2.8.5.- Obtención de Resultados

El programa tiene una variedad de resultados dependiendo de las necesidades del usuario por lo que hay que ser muy específico al momento de pedir resultados al programa, entre las respuestas que nos puede entregar están: desplazamiento total y direccional; Deformación Unitaria total o direccional, Esfuerzos totales, direccionales, máximos o mínimos y Energía.

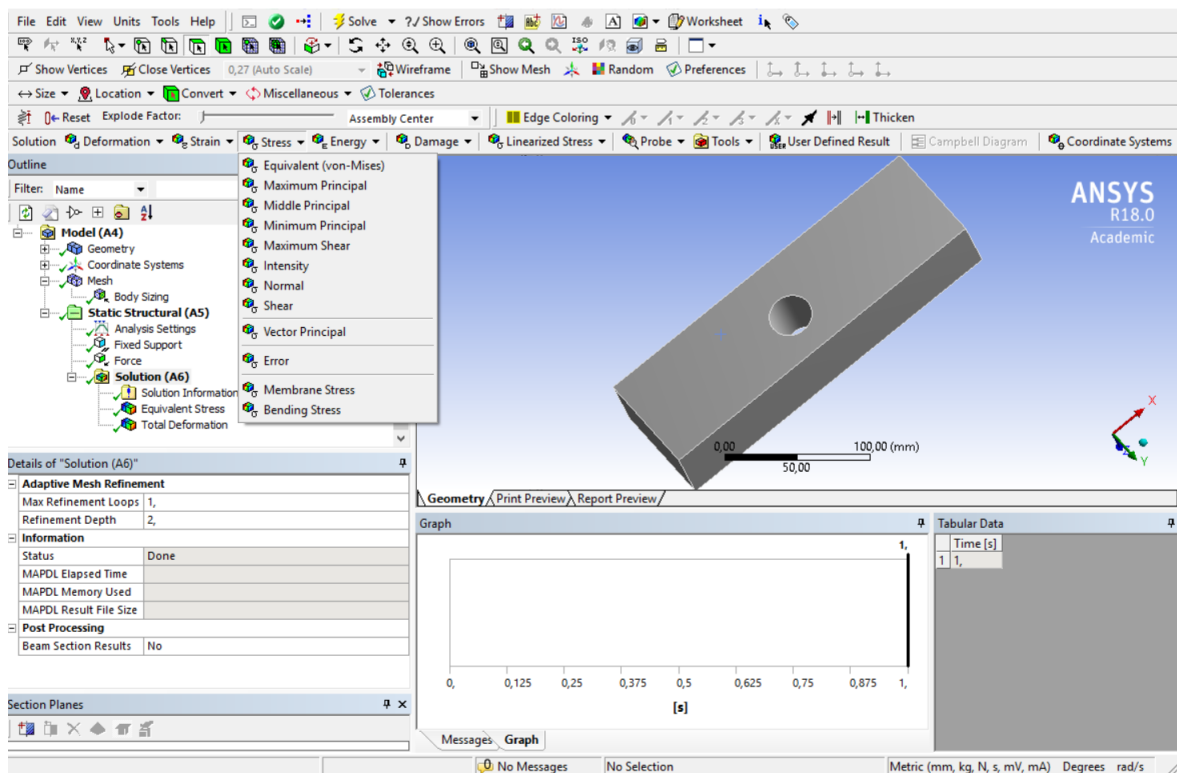


Figura 85.- Resultados de Esfuerzo disponibles

La obtención de resultados al igual que la designación de cargas es intuitiva, los resultados pueden ser tan exactos como se deseen y antes de elegir un tipo de respuesta es necesario conocer la teoría de la respuesta solicitada, puesto que si no se conoce su principio de poco nos servirá el resultado que arroje. El programa puede resolver el ejercicio sin necesidad de

escoger una respuesta puesto que el programa resuelve las ecuaciones diferenciales y matrices que se genera para luego solamente imprimir los resultados.

Cuando ya se hayan encogido los resultados que se desee el usuario, basta con elegir la opción solve para que el programa comience a resolver aquel modelo, en este punto es muy importante decir que el tiempo de solución del programa dependerá principalmente de cómo se configuró el modelo, puesto el tipo de geometría de discretización (tetraedro, hexaedro), número de elementos y número de nodos externos e intermedio son directamente proporcionales al tiempo de solución del modelo; también depende de los pasos que se configuren a realizar, Ansys define un solo paso por defecto pero se pueden añadir una inmensidad de pasos si se necesitaran como en el caso de ciclos de carga en tiempos definidos, también depende si se han añadido al modelo materiales no lineales y efectos como el de grandes deformaciones (Large Deflections), este último puede aumentar exponencialmente el tiempo de resolución del modelo.

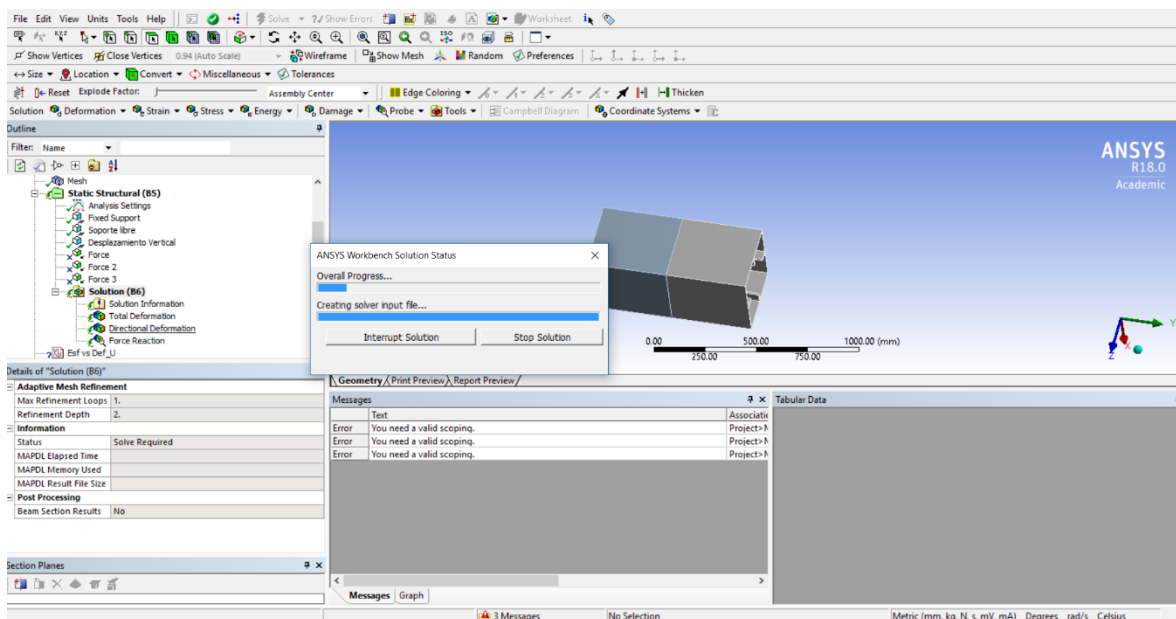


Figura 86.- Progreso de calculo

Para poder obtener los valores de las reacciones en los apoyos, basta con arrastrar el icono del apoyo que es de interés y con clic derecho elegir la opción Resolve This Result para que el programa imprima los resultados, si no se modificó la opción de pasos el programa arrojará un solo valor como respuesta, si es que se modificó los pasos el programa tabulará resultados

por cada paso y si se activó la opción de sub pasos arrojará datos interpolados entre sus pasos. Estos datos también se grafican, principalmente en función de los pasos que tiene como unidad los segundos [s] pero también se pueden tabular y graficar curvas en función de otros parámetros uno o más si se requieren con la opción Chart.

Lo resultados no solo se pueden obtener en base a todo el cuerpo, a una de sus cara, aristas o vértices, sino que también de elementos o nodos que los componen de manera específica.

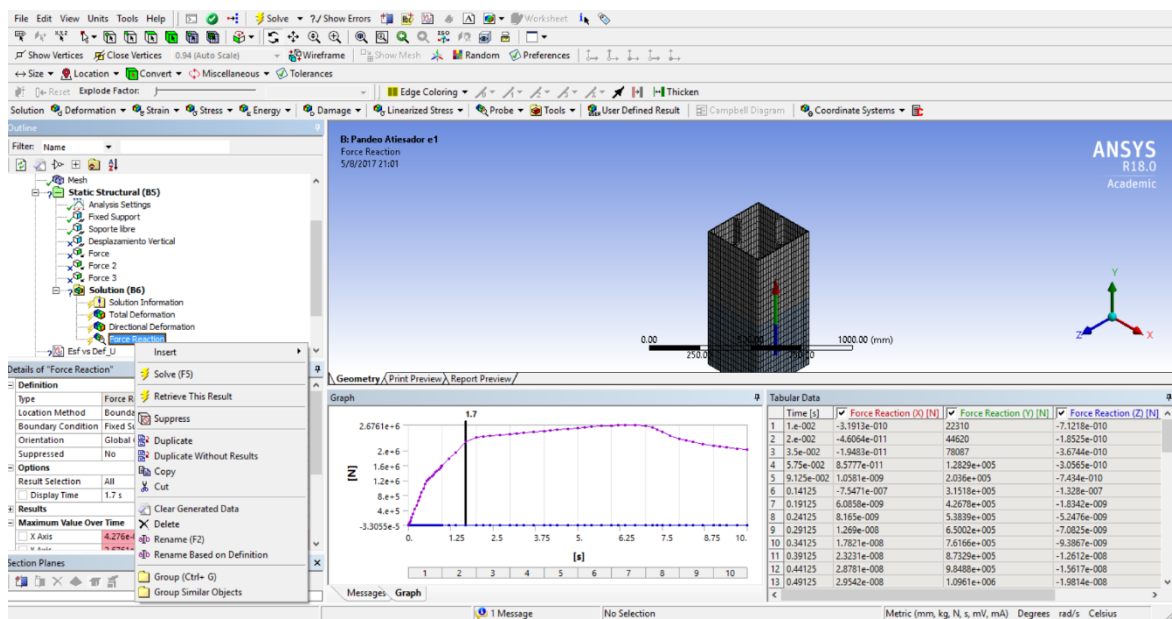


Figura 87.- Reacción en la base de una columna

5.3.- Herramientas Útiles de Ansys

5.3.1.- Chart (Tablas y Gráficos)

La opción Chart se encuentra en la barra de herramientas y está representada con un icono que se asemeja a la gráfica de una curva, esta opción nos permite crear curvas o gráficos en función de una variable, también se pueden crear curvas en función de la misma variable antes mencionada pero diferente relación en el eje y en base a los resultados obtenidos, esto se debe a que el número de puntos obtenidos en cada respuesta es el mismo para cualquier respuesta por lo que si configuramos nuestro análisis para que obtenga resultados cada

segundo durante 10 segundo este arrojará 10 valores por cada respuesta requerida, estos puntos se pueden relacionar en otras curvas que el programa no considera, pero si permite agrupar en otras curvas.

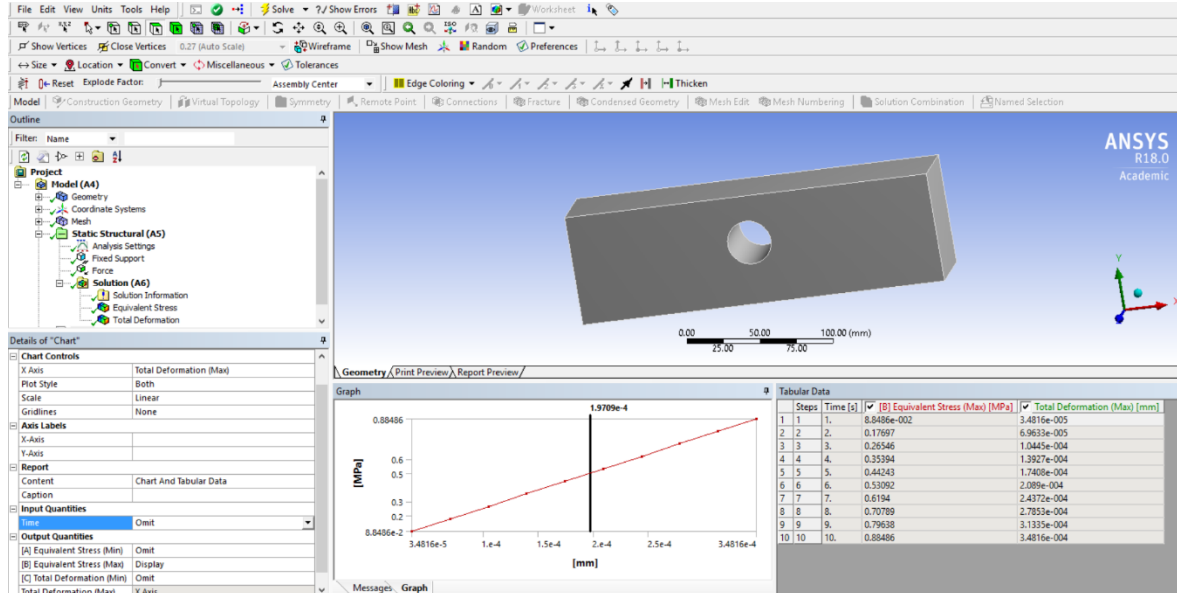


Figura 88.- Modificación de los resultados en función de sus ejes

Cuando se escogen las respuestas a graficar, nos aparecerá una lista de detalle en la que podemos elegir la variable que ira en el eje x de nuestra gráfica en la opción X Axis, la opción Scale nos permitirá representaron los valores en forma escalar o logarítmica según se necesite, con Gridlines podemos mostrar u ocultar la grilla de los valores de la tabla; como todas las curvas vienen dadas en función del tiempo por default, es posible omitir esta opción para poderla en función de otro parámetro, así también se pueden desactivar los otro parámetros que irán en el eje y se quitarán de los datos de tabulación, aunque también es posible solamente desactivarlo.

En necesario mencionar que los resultados que imprime el programa son los valores máximos y mínimos que la sección experimenta a lo largo de todo el análisis, por lo que por cada respuesta general que pidamos nos arrojará estas 2 respuestas a menos de que se configure para imprimir resultados específicos como resultados máximos.

5.3.2.- Cargas a Través del Tiempo

Ansys Workbench asigna un valor definido de 1 segundo para la duración de todo el análisis mecánico por lo que solamente nos devolverá un solo valor por cada respuesta solicitada que será el último valor del análisis, esta opción es útil para problemas elásticos solamente. Pero también existe la opción de que la carga se aplique de manera variada a en función del tiempo de tal manera que si se configuran más pasos de tiempo Ansys nos devolverá un valor por cada paso en las respuestas, de esta manera se puede analizar un comportamiento más completo.

Los pasos de tiempo configurados pueden ser tanto múltiplos como fracciones de segundo según se necesite. Al final tendremos un cuadro y un gráfico por cada respuesta y para mayor facilidad el programa indica los valores máximos y mínimos que obtuvo del análisis completo. Es impórtate recalcar que mientras más pasos de tiempo se asignen mayor será el tiempo que tardará en resolver el problema matemático.

La variación de la carga se configura en cada una de las asignaciones de carga. Una de las manera más fácil de aplicar una carga lineal progresiva es poner un valor inicial en la primera fila y el valor final en la última fila y las celdas intermedias interpolarán los valores de manera automática, si por error se configuro mal el número de pasos y luego aumentamos más pasos el programa no borra este valor, y asignando cero tampoco se arreglará por lo que será necesario borra la fila (Delete Row) pero no se borrará la fila en sí, sino que se borrará el valor por completo de la casilla.

También se puede asignar funciones de carga eligiendo la opción (function) en el cuadro de carga o si se busca un comportamiento totalmente diferente como carga y descarga se puede configurar manualmente cada valor de casilla individualmente hasta que se obtenga la función requerida.

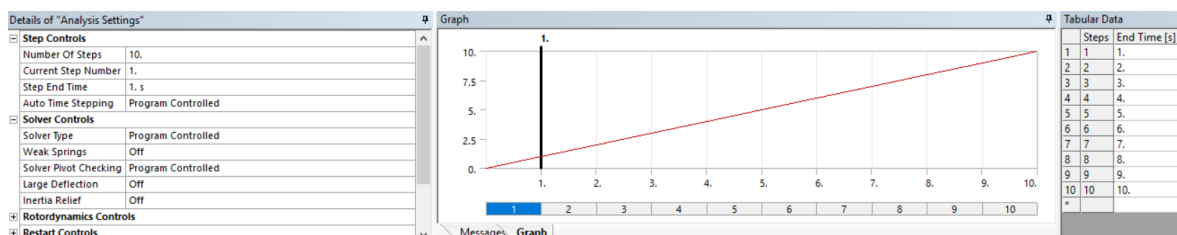


Figura 89.- Carga Progresiva a través de varios pasos

5.3.3.-Definición de Superficies de construcción en los Sólidos

A la hora de aplicar la carga en un cuerpo la más frecuente es que dicha carga o desplazamiento este aplicada en una cara, arista, vértice o punto existentes del cuerpo, pero en el caso de que la carga se encuentre en un punto que no forma parte de la construcción del solido es necesario crear este lugar para ubicar dicha carga, por ejemplo, si tenemos un hexaedro semejante a una columna no será posible aplicar la carga en todo el centro en la cara de aquella columna por lo que será necesario definir dicho lugar.

Existen 3 maneras de definir una ubicación, estas son: armar el cuerpo a partir de componentes como solidos individuales para luego unirlos por medio de contacto entre cuerpos; crear un solo cuerpo y luego cortarlo en secciones a conveniencias, y por último tenemos la opción de solamente definir superficies o aristas a partir de un cuerpo entero. Cualquiera que sea la opción es necesario comparar los resultados pues, nuestro modelo puede ser el mismo, las cargas pueden ser iguales y sus apoyos también, pero, aunque nosotros entendamos como igual estos tres casos sus resultados variaran dependiendo de la configuración.

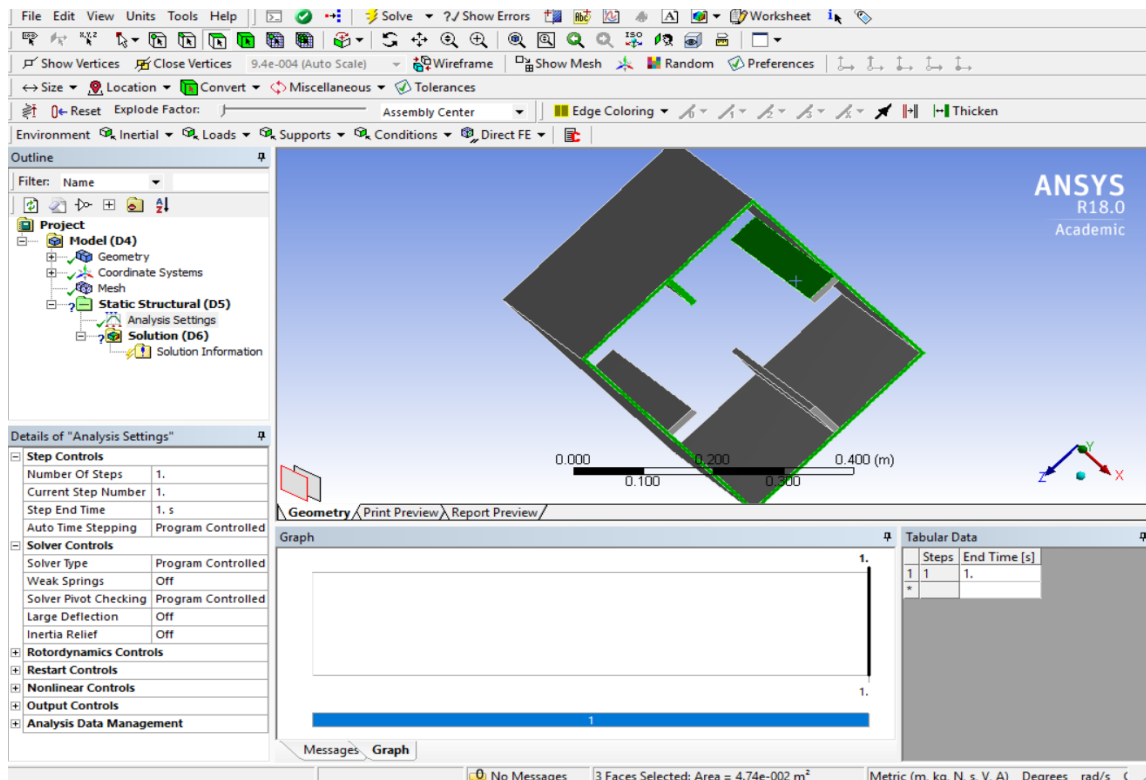


Figura 90.- Selección de Varias superficies en un cuerpo complejo

5.3.4.- Consideración de Plasticidad

La opción de Large Deflections es la opción que tiene Ansys mediante la Aplicación Workbench y Modulo de Mechanical para considerar análisis de materiales que pasan el rango elástico, proporcionándole la capacidad a los cuerpos de que sufran deformaciones inelásticas.

La opción Large Deflections se activa desde el módulo que se esté utilizando (generalmente Static Structural) y la sub sección Analysis Settings, en Solver Control encontramos esta opción por default en Off, pero para activarla basta con presionar On. Después de esto, es muy probable que al tratar de resolver el programa no finalice el cálculo y muestre un mensaje de error, es aquí donde tenemos algunas opciones para corregir este error como pueden ser:

- Se puede mejorar el mallado haciéndolo más grande y disminuyendo el número de elementos y nodos.
- Cambiar la opción de aplicación de carga y reemplazar las cargas por desplazamientos.
- Disminuir la carga hasta encontrar el valor límite de convergencia.
- Dar más sub pasos al ejercicio porque el problema principalmente se produce por una no convergencia de los resultados.
- Aumentar la tolerancia de los resultados.

De todas estas propuestas para que Ansys encuentre una respuesta, la más frecuente para resolver este problema es aumentar los sub pasos a aplicarse pues con esta opción el programa realiza interpolaciones en los resultados de tal manera que el programa, aunque realiza más procedimientos y da iteraciones con valores más cortos, es muy probable que encuentre un resultado; con esta opción realmente capturamos la deformación plástica descomponiendo la carga para que esta converja de tal manera que conseguimos un comportamiento plástico.

A Continuación, presentamos resultados obtenidos en un ejercicio de Compresión pura en una columna Sin Large Deflections y Con Large Deflections para analizar sus respuestas.

Sin Large Deflections

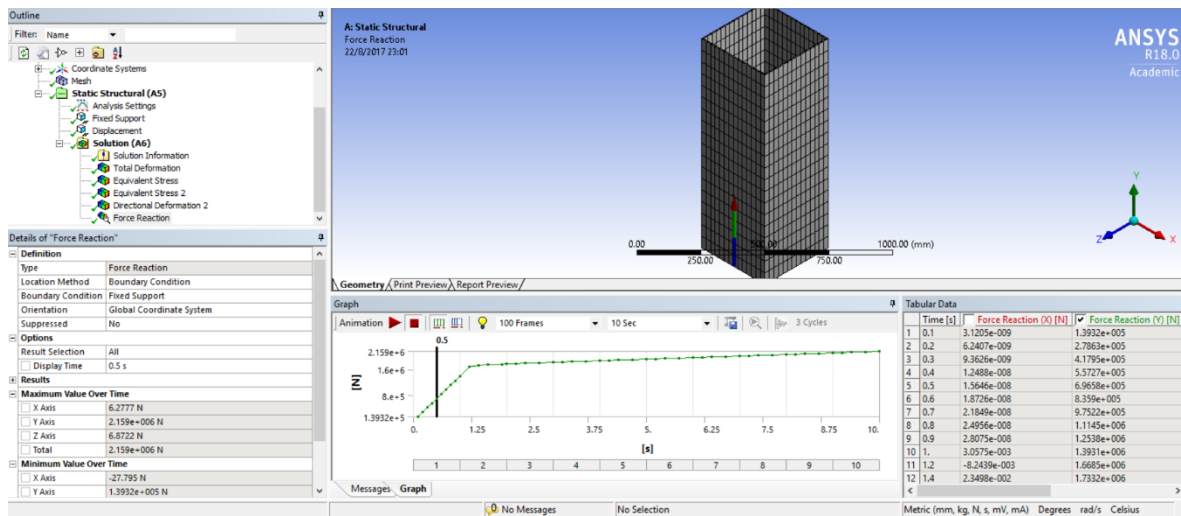
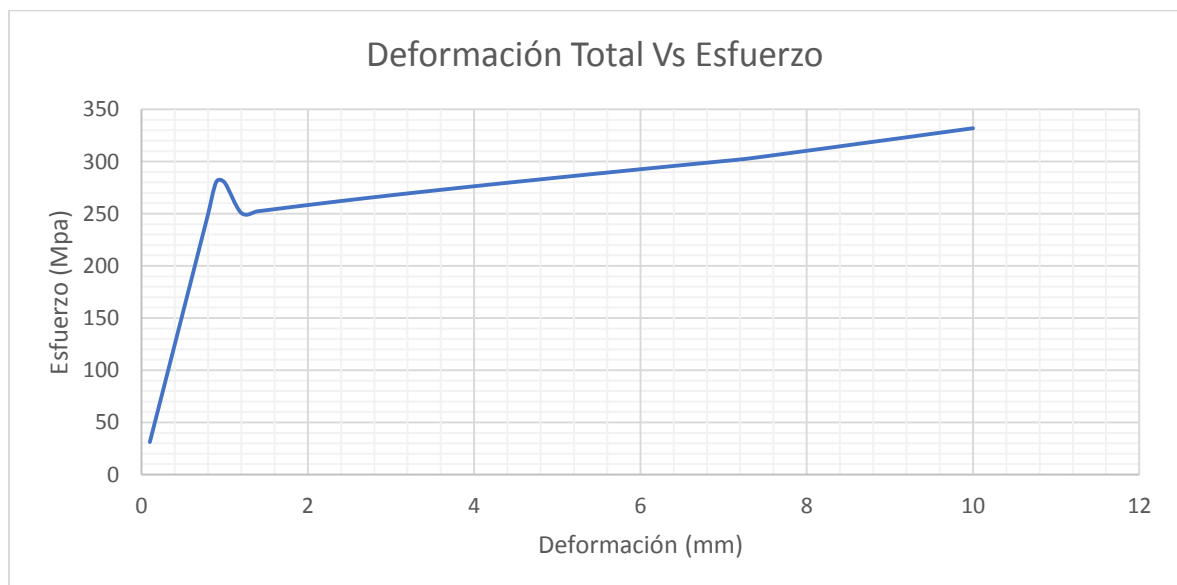


Figura 91.- Reacción de un cuerpo sin Activar Large Deflections

El ejercicio aplicado es una columna cuadrada hueca de 35 cm de cada lado y 5 mm de espesor y apoyos fijo en su parte inferior, también un apoyo libre en su parte superior al cual se le aplica una carga vertical de desplazamiento equivalente a 10 mm, 1 con una velocidad de 1 mm/s. Como se aprecia en la gráfica de tiempo (equivalente a desplazamiento) vs Reacción en el apoyo Fijo, el comportamiento del cuerpo es elástico lo cual implica que se seguirá deformando mientras la carga aumenta. En ese caso no hemos activado la opción de Large Deflections por lo que la carga solamente hará fluir a la materia enteramente.



Con Large Deflections

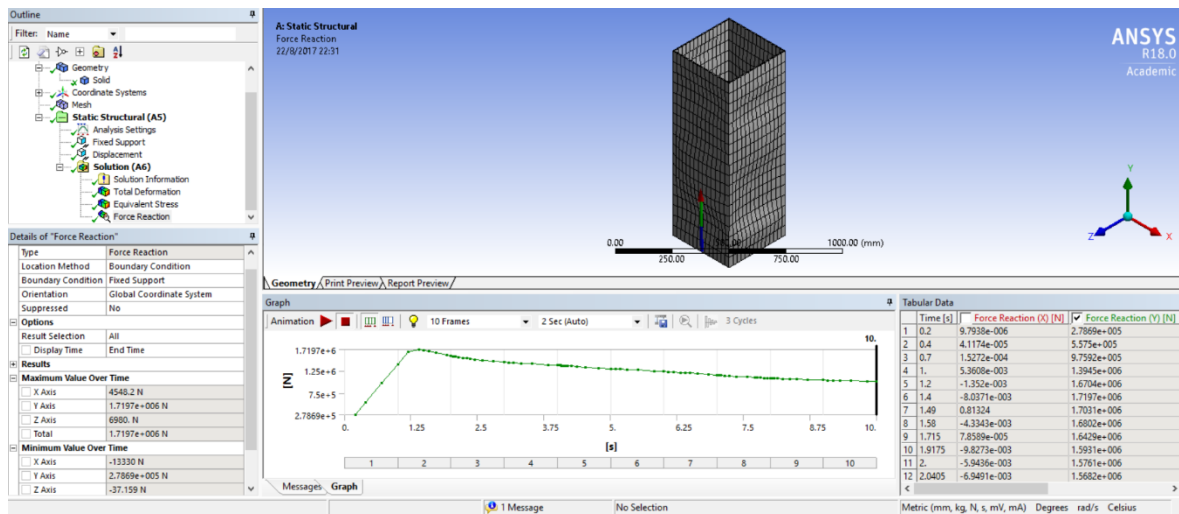
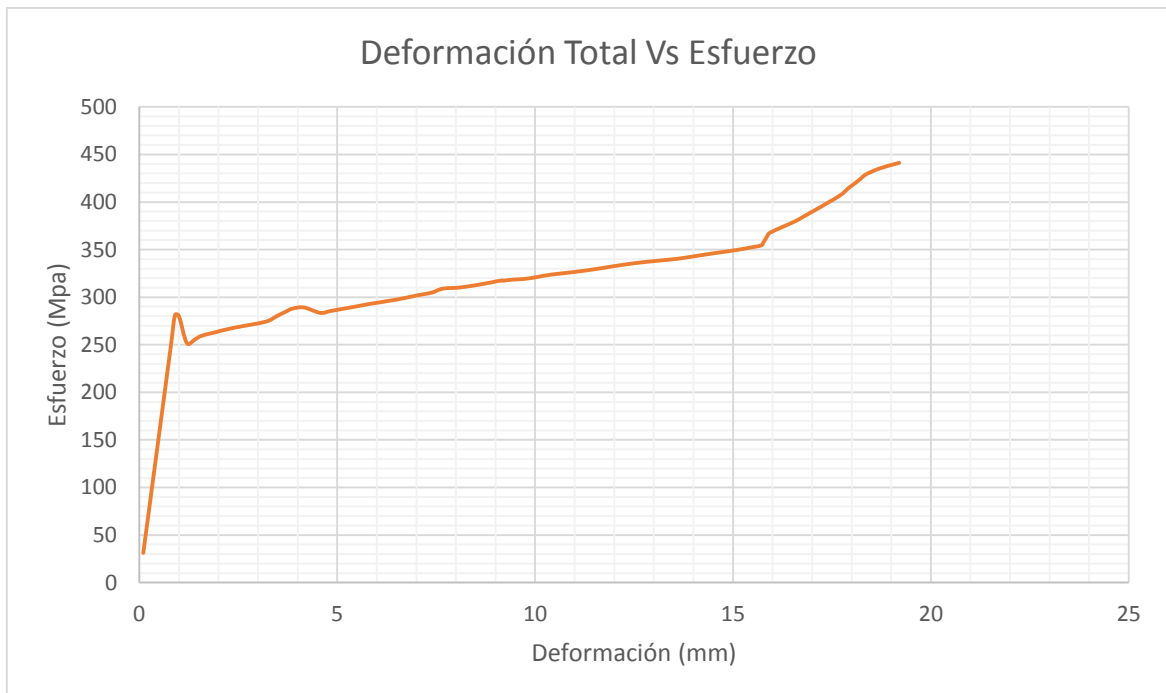


Figura 92.- Reacción de un cuerpo Activando Large Deflections

Este ejercicio es igual al planteado anteriormente con la excepción de que la opción de Large Deflections esta activada por lo que ya se puede apreciar alabeos en las placas de la columna, lo que quiere decir que la columna ya ha sufrido de pandeo local, los resultados obtenidos son más semejantes a la realidad pues la sección cuenta con elementos esbeltos.



5.3.5.- Superficies en Contacto¹⁸

Cuando existen dos o más cuerpos en interacción es necesario la asignación de las superficies que están en contacto transitoria o permanentemente entre ellas, desde un principio es necesario conocer los 2 tipos de superficie que Ansys permite asignar, la primera es la Superficie de Contacto (Contact Surface) y Superficie Objetiva (Target Surface), la primera de estas no permite penetrar a la segunda, la plataforma define colores para cada una de estas como son de color Rojo y Azul respectivamente.

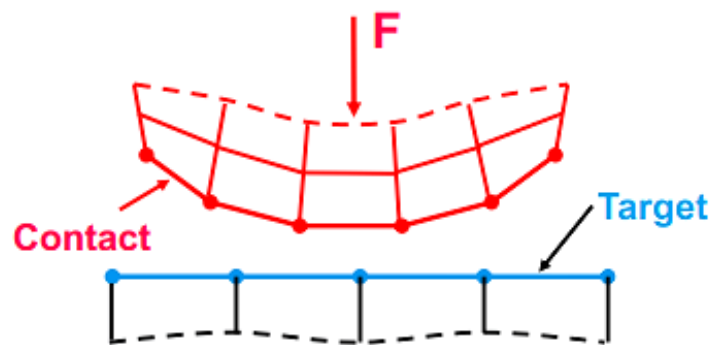


Figura 93.- Representación de Superficie en contacto y superficie objetiva en ANSYS

Fuente: Estudio del comportamiento transversal de secciones mixtas de hormigón y perfiles compuestos de GFRP

Ansys nos permite definir 5 tipos de contactos con diferentes características según sea necesario y a continuación se describe sus funciones:

- Bonded: Sin separación, sin penetración y no permite el deslizamiento entre sus caras, como si sus cuerpos estuvieran pegados.
- No Separation: Es similar a Bonded, pero si permite el deslizamiento entre sus caras sin fricción.
- Frictionless: No permite la penetración entre superficies y las superficies son libres de separarse y deslizarse sin resistencia.
- Rough: Es similar a Frictionless, pero no se permite el deslizamiento entre superficies.

¹⁸ Urruticoechea A, Universidad Politécnica de Catalunya, Estudio del comportamiento transversal de secciones mixtas de hormigón y perfiles compuestos de GFRP, 2014.

- Frictional: Permite el relativo deslizamiento entre sus superficies en contacto bajo el uso de un coeficiente de fricción, así también la separación entre las superficies es permitida sin resistencia.

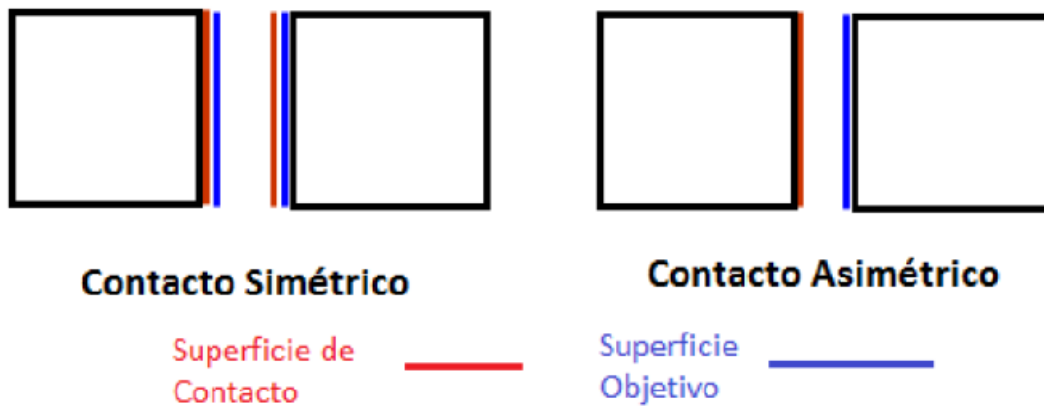


Figura 94.- Representación de Contactos Simétricos y no Simétricos en ANSYS

Ansys permite asignar 2 tipos de comportamientos, el comportamiento Asimétrico (Asymmetric) que nos permite seleccionar manualmente la superficie de contacto y superficie objetiva y esto permite la penetración entre superficies, en cambio el comportamiento Simétrico (Symmetric) establece que la superficie de Contacto no puede penetrar a la superficie objetiva, por lo que es importante diferenciar estos 2 tipos de comportamientos antes de correr el programa.

CAPÍTULO 6.- MODELACIÓN DE COLUMNAS EN ANSYS

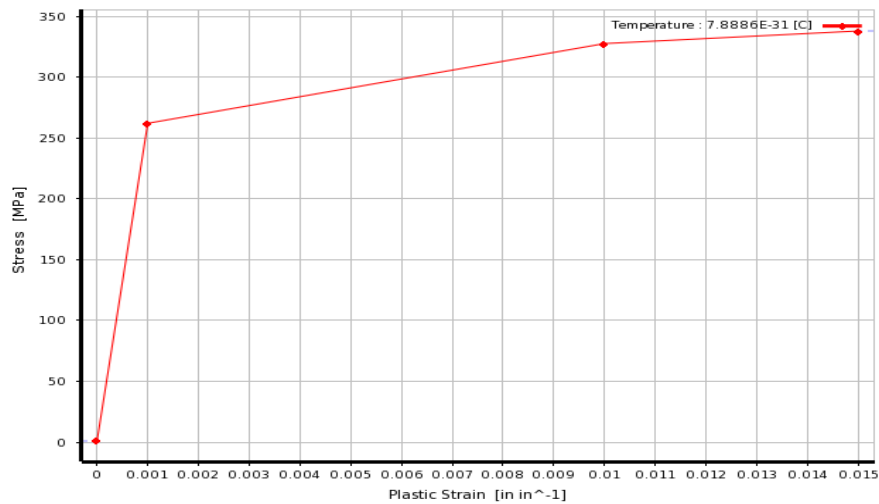
6.1.- Modelación de Columnas Rectangulares Huecas a Compresión

6.1.1.- Asignación de Material

Antes de realizar el dimensionamiento de la columna a modelar es importante asignar la curva *Esfuerzo - deformación unitaria* correspondiente al comportamiento del acero ASTM A 36 con un valor de $F_y = 250 \text{ Mpa} = 2530 \text{ kg/cm}^2$ sometido a una carga uniaxial a compresión. La curva esfuerzo deformación está definida por varias líneas por lo que para introducirla en el programa será necesario conocer el valor de los puntos y asignarlos en una tabla de comportamiento, Ansys nos permite usar la opción multilínea para esto de tal manera que la curva y su configuración quedará de la siguiente manera.

A partir de aquí en adelante se utilizará esta misma curva que fue obtenida del manual de ANSYS Mechanical: Advanced Nonlinear Materials - Workshop 1: Chaboche

Curva Esfuerzo-Deformación Unitaria Acero ASTM A 36



Tabulación de la curva

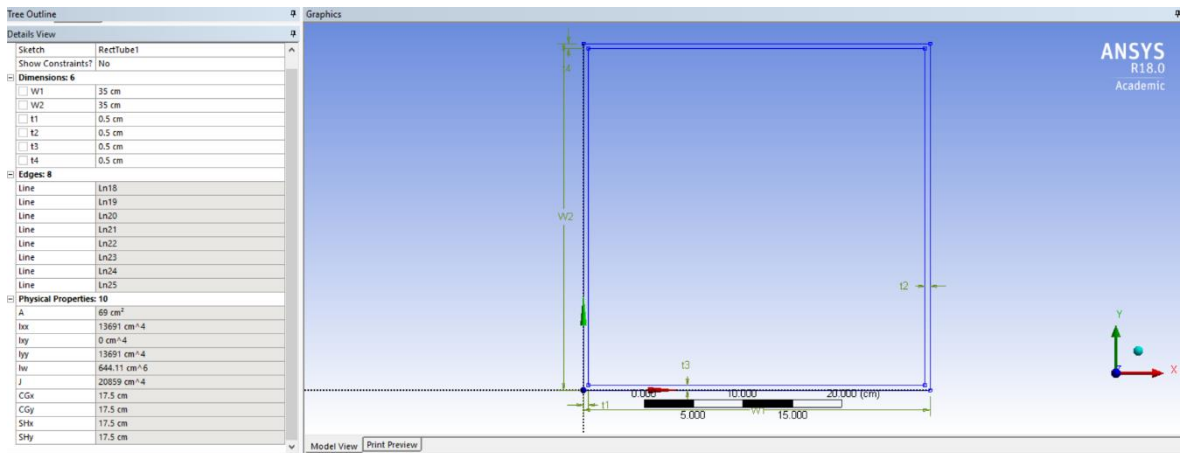
	B	C
1	Plastic Strain (mm mm ⁻¹)	Stress (MPa)
2	0	1
3	0.001	262
4	0.01	327.5
5	0.015	337.8
*		

Propiedades Mecánicas del Acero ASTM A 36

Properties of Outline Row 6: Structural Steel NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	2E+05	MPa	
7	Poisson's Ratio	0.3		
8	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa	
10	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular		
11	Scale	1		
12	Offset	0	MPa	
13	Specific Heat	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹	

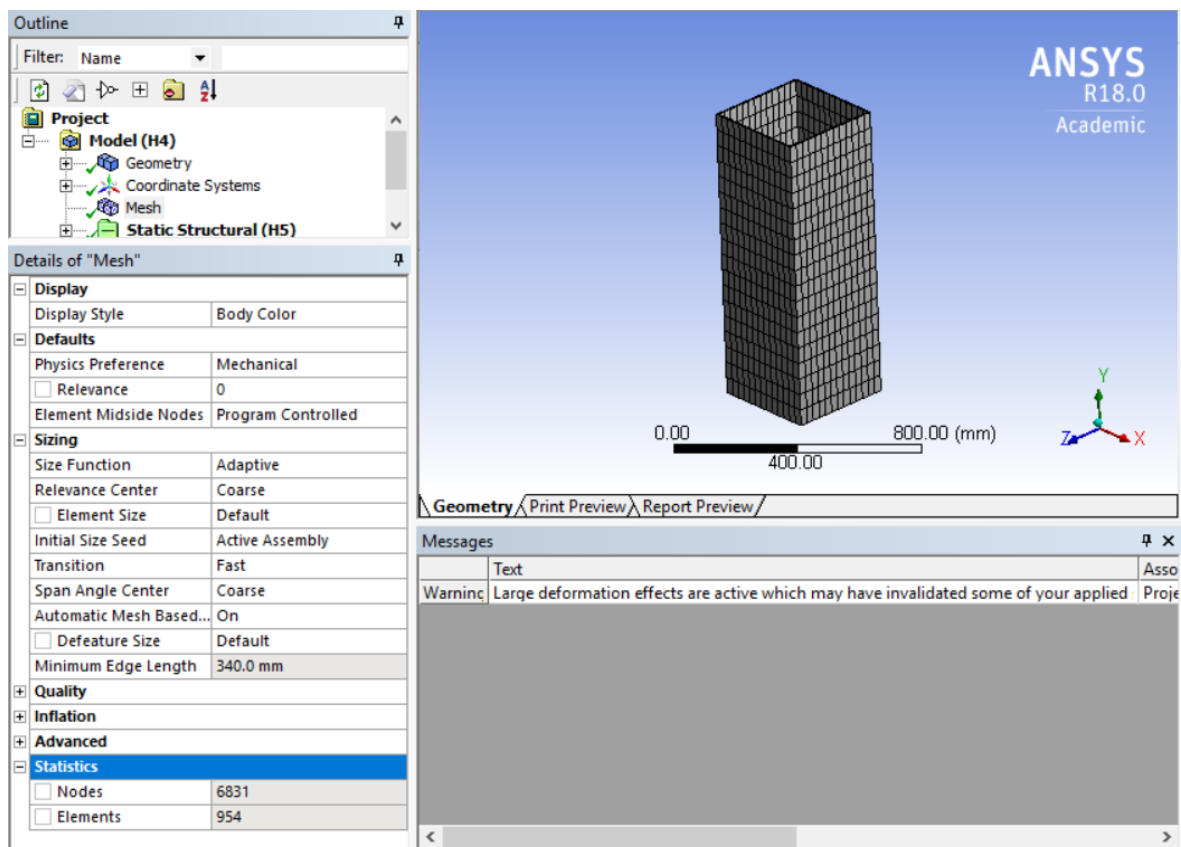
6.1.2.- Propiedades Geométricas de la Columna

La sección de la columna será un rectángulo hueco con lados de 35 cm * 35 cm y un espesor de placa de 5 mm y aun altura de 100 cm, para convertir esta sección en un Cuerpo Sólido es necesario aplicar extrude a dicha sección con una profundidad de 1 m, Ansys calcula automáticamente las propiedades geométricas de la sección dibujada y el sólido originado por extrude estas pueden ser observadas en la sección Detail View al desplegar la pestaña Physical Properties como son: su Área, Inercia con respecto a los diferentes ejes, Modulo de Torsión, entre otras.



6.1.3.- Mallado Del Cuerpo

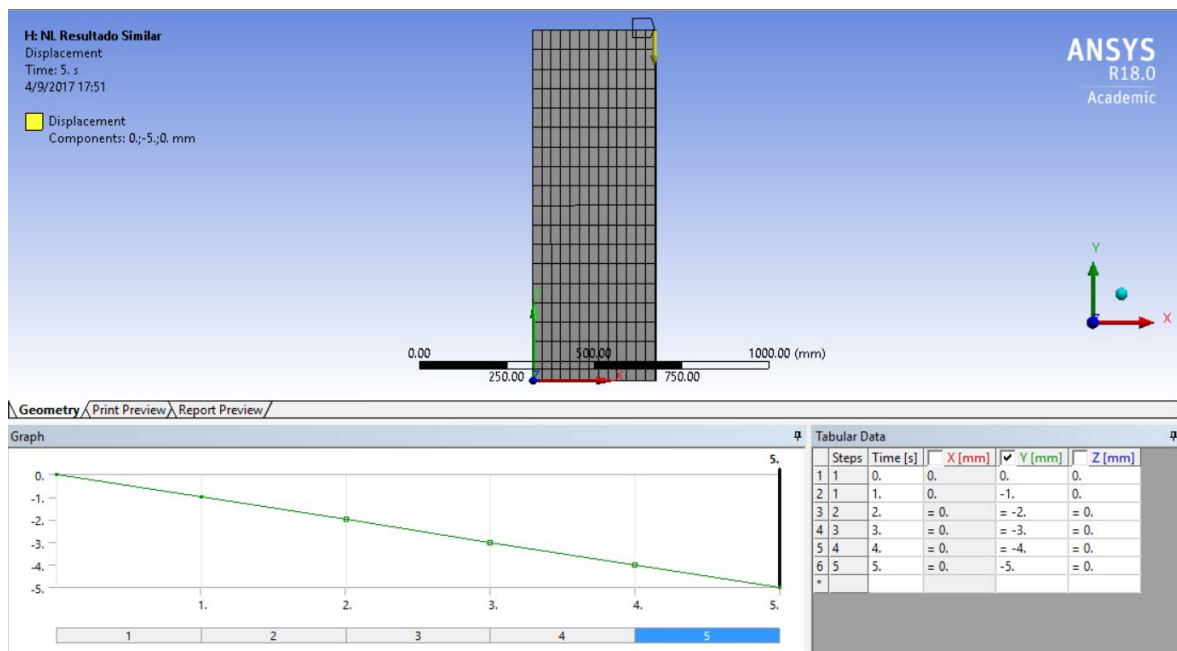
Para realizar el mallado del sólido no fue necesario realizar ajustes definidos, pues el que se crea por defecto consta de elementos hexaédricos regulares que definen de una forma uniforme el sólido, en el proceso se crearon se crearon 6831 Nodos y 954 Elementos, valores que son aceptables existiendo un límite para cada uno de estos. La versión de estudiante permite crear un máximo de 33 000 elementos y 33000 Nodos por lo que se trata de optimizar este recurso para los problemas por ejecutarse, como el sólido tiene valores mucho más bajos que estos es más que suficiente para realizar esta operación. En la versión completa del programa esta restricción no existe, el número de elementos y nodos es infinito, pero en este caso que se utilizó la versión de estudiante está restricción ha sido buena, pues permitió optimizar el mallado y reducir el número de elementos y de nodos, esto reduce el tiempo de resolución del problema.



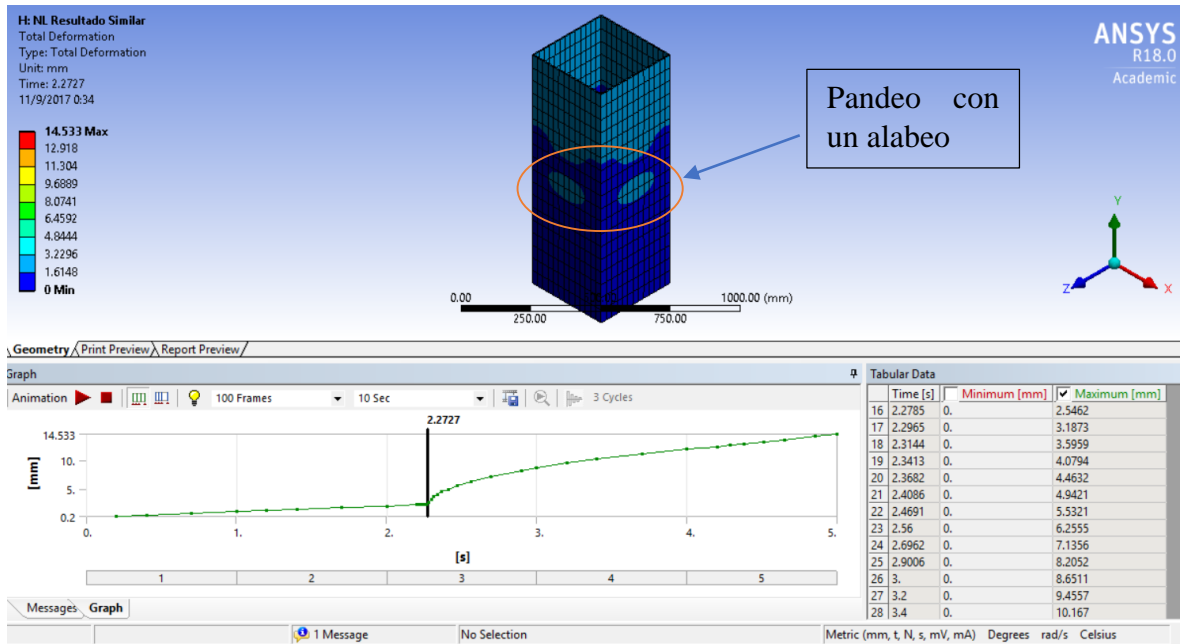
6.1.4.- Restricciones y Cargas

Antes de la aplicación de las cargas es importante activar la opción Large Deflections para que se considere la planificación del cuerpo al momento de igualar el esfuerzo de fluencia.

Para esta simulación se definirá la base de la columna como un apoyo fijo (Fixed Support), el apoyo superior de la columna tendrá restricción de desplazamiento en el mismo plano de la sección (plano XZ) y desplazamiento libre en la dirección Y, en este último se podría omitir la opción restricción de desplazamiento (displacement) con definir una carga de desplazamiento con sus componentes iguales a cero en las direcciones diferentes al de la dirección de la carga. El desplazamiento impuesto en Y es de 5 mm en compresión, y se medirá la reacción del apoyo fijo para analizar su comportamiento.

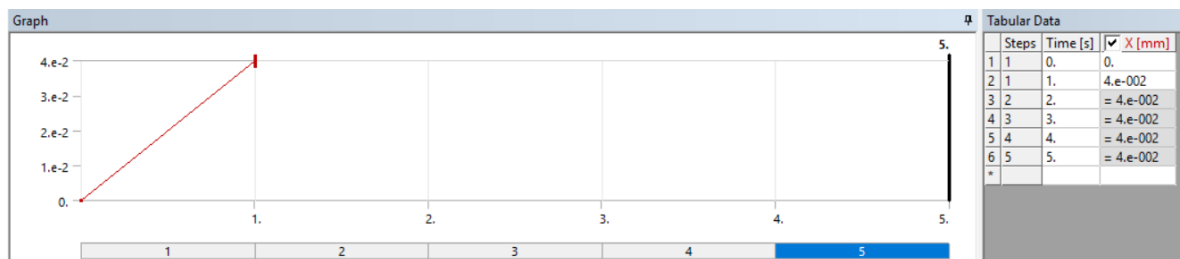


Al resolver el Modelo 1 podemos observar la reacción del apoyo, y su deformación. En el primero de estos observamos que en el instante 2.27 s existe un cambio en la reacción, ese es el momento exacto donde las placas de la columna comienzan a pandear, y su deformación deja de ser lineal, esto nos dice que a un desplazamiento de 2.27 mm la columna pandeo localmente.

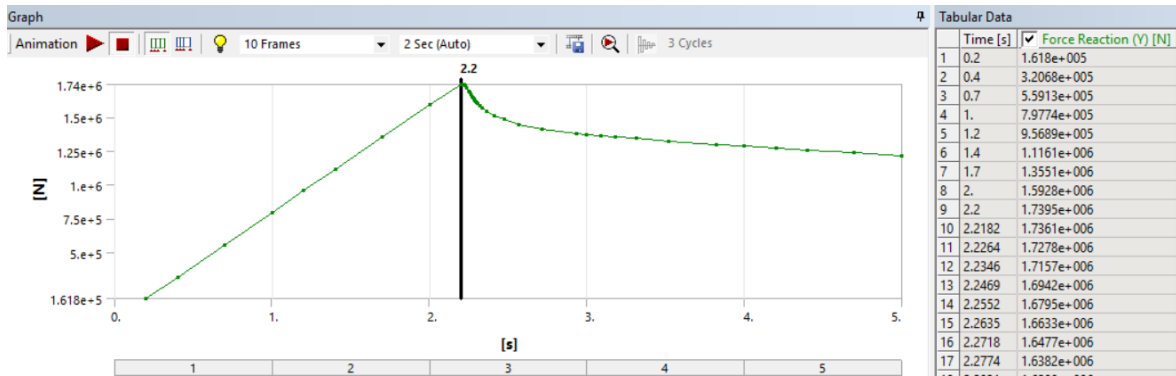


Este primer resultado nos muestra valores en un ambiente con condiciones ideales por lo será necesario crear una condición que asemeje este modelo a las condiciones de un laboratorio, incluso en este no se puede controlar en su totalidad la existencia de condiciones ideales como son imperfecciones en el material por lo que tendremos que crear esta condición.

Utilizaremos el 2% de este desplazamiento para aplicarlo como una imperfección inicial que sea temporal en el mismo lugar y en la misma dirección donde pandea una de sus placas para así obtener un resultado más cercano a un comportamiento real. En este caso la imperfección será de 0.04 mm.



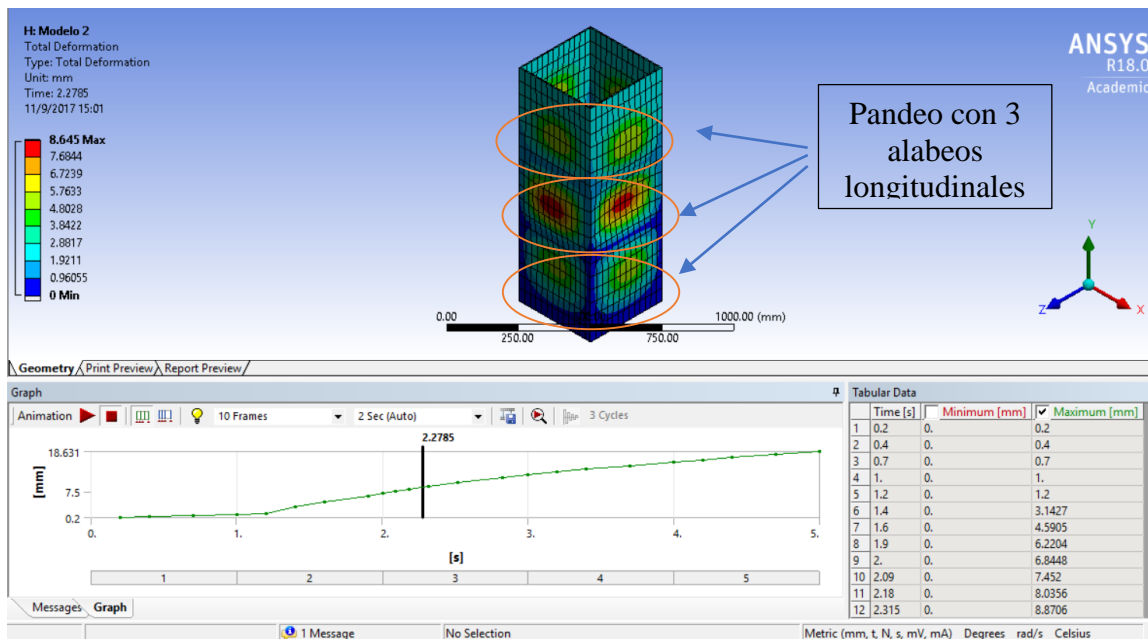
En programa resolverá el mismo modelo, pero ahora incluyendo tanto el desplazamiento a compresión como el desplazamiento de imperfección, esperando que el valor de la carga de pandeo se reduzca en comparación al primer modelo sin imperfección.



6.1.5.- Resultados

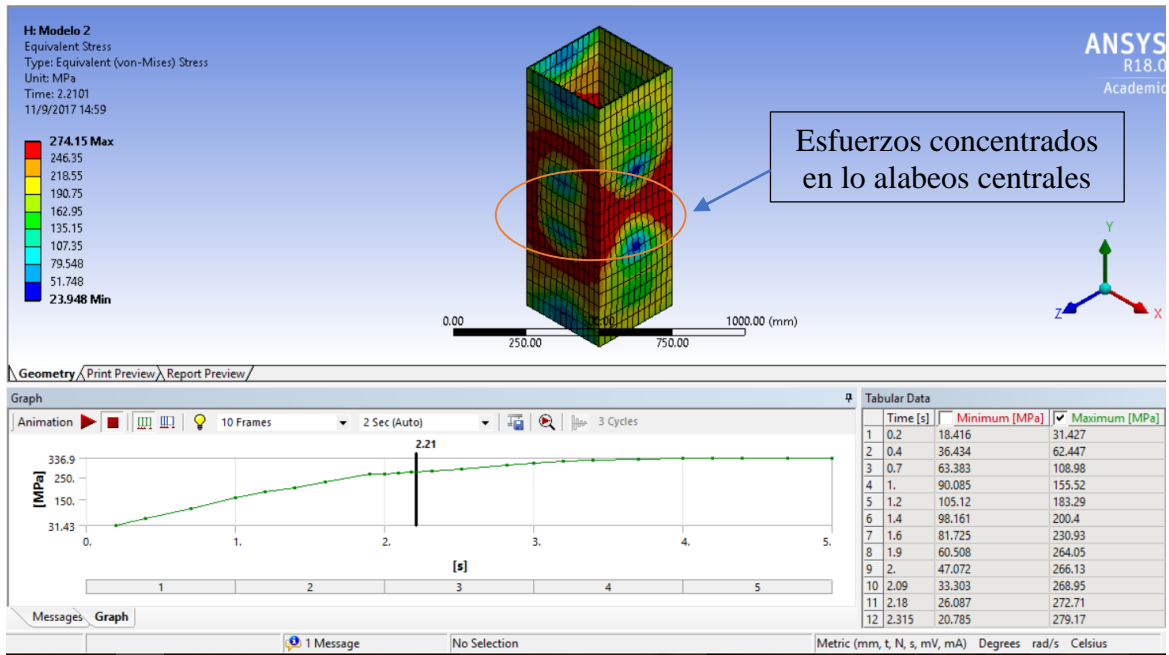
6.1.5.1.- Deformación total

Los resultados que obtenemos representan a la deformación total de cada uno de los nodos con respecto a él origen relativo de cada nodo, como la deformación no es una sola dirección esta respuesta representa a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada componente.



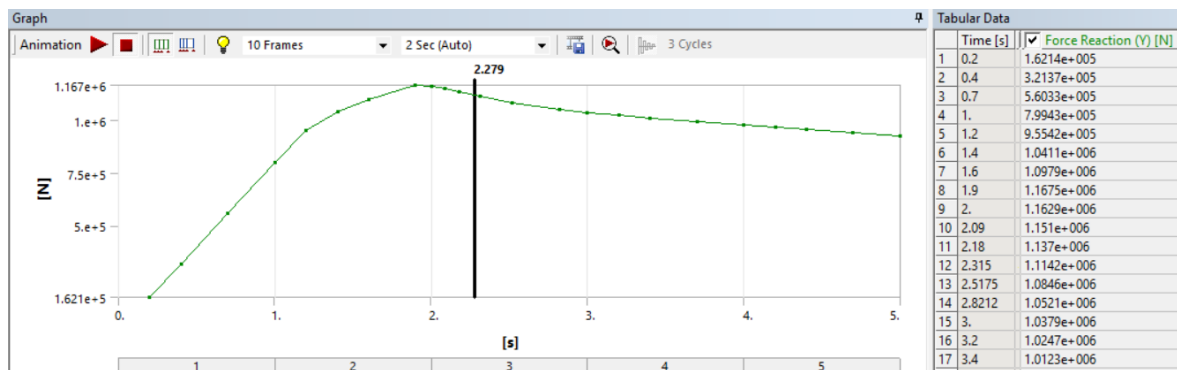
6.1.5.2.- Esfuerzo Total Equivalente

El resultado obtenido de Esfuerzo total equivalente es obtenido por medio de la teoría de plastificación de los materiales de Von Mises, en el capítulo 4.3 se expresa matemáticamente la forma de calcular este valor que es representado en el siguiente gráfico.



6.1.5.3.- Reacción en el Soporte Fijo

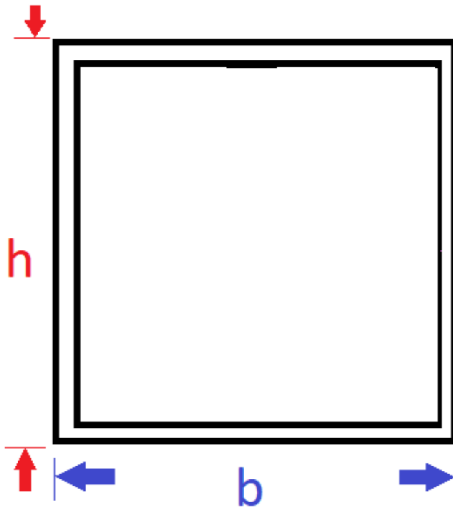
Al ver el resultado de la reacción de la columna en el soporte fijo podemos darnos cuenta de que en el segundo 2 la columna llega a su resistencia máxima antes de que haya un decrecimiento de su resistencia mientras el desplazamiento continúa, es aquí cuando la columna patea y aparecen los alabeos en todas las placas de la columna, el valor máximo de resistencia es de $1.1675 \cdot 10^6 \text{ N} = 118.96 \text{ t}$, como se esperaba este valor es menor a $1,74 \cdot 10^6 \text{ N} = 178 \text{ t}$.



6.1.6.- Resistencia a la Compresión en columnas Rectangulares Huecas

6.1.6.1.- AISC 360-10

Dimensiones de la sección	Sección
b =	35.00 cm
h =	35.00 cm
e =	0.50 cm
Inercia =	13690.75 cm ²
Área =	69.00 cm ²



Longitud de la Columna	L =	100.00 cm
Módulo de Elasticidad	E =	2038735.98 kg/cm ²
Esfuerzo de Fluencia	F _y =	2530.00 kg/cm ²
Inercia Total	I =	13690.75 cm ⁴
Área de la Sección	A =	69.00 cm ²
Tipo de Empotramiento	K =	0.7

Relación ancho Espesor

		λ_r		
b/e =	68	>	42.30	Esbelto Revisar por E7
h/e =	68	>	42.30	Esbelto Revisar por E7

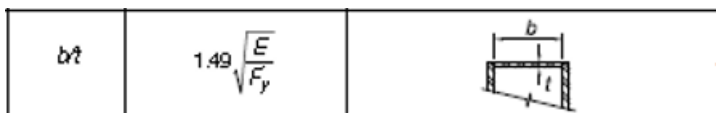


Figura 95.- Tabla B4.1. Fuente: ANSI/AISC 360-10

2.- Elementos esbeltos Atiesados

b =	34.00 cm
t =	0.50 cm
Fcr =	2526.71 kg/cm ²
Fy =	2530.00 kg/cm ²
Qs =	1.00

$$b/t = 68.00$$

-

(b) Cuando $b/t > 1.40\sqrt{(E/f)}$

$$1.4\sqrt{(E/Fy)} = 39.74$$

$$f = Fy$$

$$b_e = 1.92t \sqrt{\frac{E}{f}} \left[1 - \frac{0.38}{(b/t)} \sqrt{\frac{E}{f}} \right] \leq b \quad (E7 - 18)$$

$$b_e = 22.93 \text{ cm}$$

$$A_e = 46.86 \text{ cm}^2$$

$$Q_a = \frac{A_e}{A} \quad (E7 - 16)$$

$$Q_a = 0.68$$

-

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (E3 - 4)$$

$$F_e = 814784.58 \text{ kg/cm}^2$$

-

$$4.97 < 162.25$$

$$\frac{KL}{r} \quad (a) \quad 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$$

-

(a)

$$Q = Q_a * Q_s$$

$$Q = 0.68$$

$$F_{cr} = Q \left[0.658 \frac{Q F_y}{F_e} \right] * F_y \quad (E7 - 2)$$

$$F_{cr} = 1716.58 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_n = F_{cr} * A_g \quad (E7 - 1)$$

$$P_n = 118.44 \text{ t}$$

6.1.6.2.- AISI S100-07

b =	35.00 cm	w =	34.00 cm
e =	0.50 cm	t =	0.50 cm
K =	0.7	kp =	4.00
E =	2038735.98 kg/cm ²	Fy =	2530.00 kg/cm ²
L =	100.00 cm	u =	0.3
A =	69.00 cm ²	I =	13690.75

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2}$$

$$F_e = 814784.58 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda_c = \sqrt{F_y / F_e} = 0.06$$

$$0.06 < 1.50$$

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) * F_y \quad \text{Eq. C4.1-2}$$

$$F_n = 2526.71 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2 \quad \text{Eq. B2.1 - 5}$$

$$F_{cr} = 1593.97 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda = \sqrt{f / F_{cr}} \quad \text{Eq. B2.1 - 4}$$

$$\lambda = 1.26$$

$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right)}{\lambda} \quad \text{Eq. B2.1 - 3}$$

$$\rho = 0.66$$

$$w\rho = 22.27$$

$$A_e = 45.55 \text{ cm}^2$$

$$P_n = A_e * F_n$$

$$P_n = 115090.06 \text{ kg}$$

$$P_n = 115.09 \text{ t}$$

6.1.7.- Cálculo de la constante k para cada elemento de la sección

Esta sección ha sido escrita con la finalidad de encontrar el valor de k correspondiente a nuestros tipos de apoyo para los elementos placa que componen la sección a compresión.

Podemos examinar nuestra columna bajo esta teoría y compararla con los valores obtenidos con nuestro análisis. Para eso deberemos considerar a la columna como una combinación de 4 placas de igual dimensiones que soportan la carga uniformemente hasta antes del pandeo local que pudimos observar anteriormente.

De esta manera nuestro problema partirá con datos ya conocidos como son la carga crítica de $118 \text{ t} / 4 = 29.5 \text{ t}$ por placa, a continuación, se describe las condiciones de apoyo de nuestras placas.

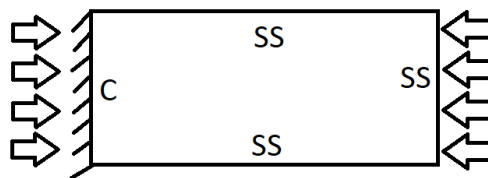


Figura 96.- Esquema de los apoyos en una placa externa

C = Clamped = Empotrado

SS = Simply Support = Soporte Simple

Free = Free Support = Soporte Libre

Diferentes investigaciones han podido determinar el valor del factor de alabeos para placas con soporte fijo, empotrado o libre y algunas combinaciones de ellas, estos valores son posibles verse en el Anexo D, para este caso no es aplicable pues no cumple con esas condiciones de apoyo. Tampoco es posible usar la fórmula de k siguiente, porque esta fórmula solo funciona para placas con soportes simplemente apoyados.

$$k = \left(\frac{m * b}{a} + \frac{a}{b} \right)^2$$

En su defecto calcularemos por iteración el valor de k que utilizara los valores escritos con la siguiente formula y los valores designados a continuación.

$$\sigma_{cr} = k * \frac{\pi^2 * E}{12(1 - \nu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2}$$

Número de Alabeos en a	m =	3.00
Dimensión del lado comprimido	a =	100.00 cm
Dimensión perpendicular al lado comprimido	b =	34.00 cm
Espesor de la placa	t =	0.50 cm
Coefficiente de Poisson	u =	0.30
Módulo de Elasticidad de la Placa	E =	2038735.98 kg/cm ²
Relación dimensional de la Placa	a/b =	2.94

k	σ_{cr} (kg/cm ²)	σ_{cr} (t)	σ_{cr} (N)
3.00	1195.48	20.32	199369.84
3.10	1235.33	21.00	206015.50
3.20	1275.18	21.68	212661.16
3.30	1315.03	22.36	219306.82
3.40	1354.87	23.03	225952.48
3.50	1394.72	23.71	232598.14
3.60	1434.57	24.39	239243.80
3.70	1474.42	25.07	245889.46
3.80	1514.27	25.74	252535.13
3.90	1554.12	26.42	259180.79
4.00	1593.97	27.10	265826.45
4.10	1633.82	27.77	272472.11
4.20	1673.67	28.45	279117.77
4.30	1713.52	29.13	285763.43
4.40	1753.37	29.81	292409.09
4.50	1793.22	30.48	299054.75
4.60	1833.07	31.16	305700.42

6.1.8.- Comparación de Resultados

De los resultados obtenidos podemos observar que los valores más cercanos al valor de pandeo local que obtuvimos del programa de simulación son los valores de $k = 4.3$ y 4.4 por lo que la constante para este tipo de apoyos ser de aproximadamente $k = 4.35$ lo que está dentro del rango esperado pues los valores de k para placas simplemente apoyas es $k = 4$ y para placas con los lados empotrados es $k = 6.9$ en el Anexo D, el valor de k obtenido por ANSYS y AISC 360-10 son similares.

Los porcentajes de diferencia entre los valores obtenidos son:

ANSYS y AISC 360-10 = 0.44 %

ANSYS y AISI S100-07 = 3.4 %

6.1.9.- Otros resultados

Al igual que los modelos mostrados anteriormente También se crearon secciones con diferentes dimensiones como son 30 cm * 30 cm, 35 cm * 35 cm, y 40 cm * 40 cm, en cada uno de estos casos con espesores correspondientes a secciones esbeltas, no esbeltas y compactas como y sus respectivos cálculos como se muestran a continuación.

Resumen de Resultados para Columnas Sin Atiesadores

		30cm*30cm	35cm*35cm	40cm*40cm
	e =	0.30 cm	0.60 cm	0.70 cm
Placas	Calculado	45.05 t	164.02 t	222.18 t
Externas	Ansys	49.24 t	181.45 t	259.94 t
Esbelto	% Diferencia	9.29%	10.63%	16.99%
	e =	1.20 cm	1.30 cm	1.50 cm
Placas	Calculado	349.10 t	442.75 t	583.82 t
Externas	Ansys	356.78 t	453.62 t	611.62 t
No Esbelto	% Diferencia	2.20%	2.45%	4.76%
	e =	1.60 cm	1.90 cm	2.10 cm
Placas	Calculado	458.97 t	635.55 t	804.59 t
Externas	Ansys	469.93 t	651.38 t	825.69 t
Compacto	% Diferencia	2.39%	2.49%	2.62%
Placas	e =	1.80 cm	2.10 cm	2.30 cm
Externas	Calculado	512.70 t	698.20 t	876.55 t
Sismicamente	Ansys	524.97 t	715.60 t	900.10 t
Compactas	% Diferencia	2.39%	2.49%	2.69%

Resultados obtenidos por la Especificación AISI y ANSYS para columnas compuestas por elementos Esbeltos

Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor		Carga Crítica		Factor Q		Carga a Compresión Máxima		ANSYS
30cm*30cm 0.3cm												
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	30.00 cm	Ancho/Espesor	λr	Descríp	r =	b/t =	98.00	kl/r =	5.77	
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	30.00 cm	b/e =	42.30	Esbelto	kl/r	1.4*√(E/fy) =	39.74	4.71√(E/Q*Fy)	189.08	
L =	100.00 cm	e =	0.30 cm	h/e =	42.30	Esbelto	4.71*√(E/fy) =	b/t > 1.4*√(E/fy)		kl/r <= 4.71√(E/Q*Fy)		9.29%
K =	0.7			Propiedades Mecánicas			Fe =	be =	14.55 cm	Fcr = Q*fy*(0.658)√(Q*fy/fe)		
		Área				Inercia	Fcr =	Ae =	17.82 cm ²	Fcr =	1263.99 kg/cm ²	483000.00 N
		At =	35.64 cm ²	It =	5240.15 cm ⁴		Fcr =	Qa =	0.50	Pcr =	45.05 t	49.24 t
		Ah =	35.64 cm ²	Ih =	5240.15 cm ⁴			Q =	0.50			
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor		Carga Crítica		Factor Q		Carga a Compresión Máxima		ANSYS
35cm*35cm 0.6cm												
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	35.00 cm	Ancho/Espesor	λr	Descríp	r =	b/t =	56.33	kl/r =	4.98	
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	35.00 cm	b/e =	42.30	Esbelto	kl/r	1.4*√(E/fy) =	39.74	4.71√(E/Q*Fy)	150.81	
L =	100.00 cm	e =	0.60 cm	h/e =	42.30	Esbelto	4.71*√(E/fy) =	b/t > 1.4*√(E/fy)		kl/r <= 4.71√(E/Q*Fy)		10.63%
K =	0.7			Propiedades Mecánicas			Fe =	be =	26.44 cm	Fcr = Q*fy*(0.658)√(Q*fy/fe)		
		Área				Inercia	Fcr =	Ae =	64.90 cm ²	Fcr =	1986.65 kg/cm ²	1780000.00 N
		At =	82.56 cm ²	It =	16287.99 cm ⁴		Fcr =	Qa =	0.79	Pcr =	164.02 t	181.45 t
		Ah =	82.56 cm ²	Ih =	16287.99 cm ⁴			Q =	0.79			
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor		Carga Crítica		Factor Q		Carga a Compresión Máxima		ANSYS
40cm*40cm 0.7cm												
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	40.00 cm	Ancho/Espesor	λr	Descríp	r =	b/t =	55.14	kl/r =	4.36	
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	40.00 cm	b/e =	42.30	Esbelto	kl/r	1.4*√(E/fy) =	39.74	4.71√(E/Q*Fy)	149.61	
L =	100.00 cm	e =	0.70 cm	h/e =	42.30	Esbelto	4.71*√(E/fy) =	b/t > 1.4*√(E/fy)		kl/r <= 4.71√(E/Q*Fy)		16.99%
K =	0.7			Propiedades Mecánicas			Fe =	be =	30.69 cm	Fcr = Q*fy*(0.658)√(Q*fy/fe)		
		Área				Inercia	Fcr =	Ae =	87.89 cm ²	Fcr =	2019.09 kg/cm ²	2550000.00 N
		At =	110.04 cm ²	It =	28334.93 cm ⁴		Fcr =	Qa =	0.80	Pcr =	222.18 t	259.94 t
		Ah =	110.04 cm ²	Ih =	28334.93 cm ⁴			Q =	0.80			

Resultados obtenidos por la Especificación AISC y ANSYS para columnas compuestas por elementos No Esbeltos

Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor			Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS
30cm*30cm I.2cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r =	kl/r =	
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	30.00 cm	b/e =	23	No Esbelto	At =	19143.48 cm ⁴		11.77 cm	
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	30.00 cm	h/e =	23	No Esbelto	Ah =	19143.48 cm ⁴		5.95	
		e =	1.20 cm							4.71* $\sqrt{(E/fy)}$ =	133.70
										Fe =	568658.73 kg/cm ²
L =	100.00 cm									Fcr = 0.658* $\sqrt{(E/fy)}$ *fy	
K =	0.7	dx =	27.60 cm							Fcr =	2525.29 kg/cm ²
											349.10 t
											3500000.00 N
											356.78 t
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor			Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS
35cm*35cm I.3cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r =	kl/r =	
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	35.00 cm	b/e =	24.92	No Esbelto	At =	33219.08 cm ⁴		13.77 cm	
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	35.00 cm	h/e =	24.92	No Esbelto	Ah =	33219.08 cm ⁴		5.08	
		e =	1.30 cm							4.71* $\sqrt{(E/fy)}$ =	133.70
										Fe =	778428.97 kg/cm ²
L =	100.00 cm									Fcr = 0.658* $\sqrt{(E/fy)}$ *fy	
K =	0.7	dx =	32.40 cm							Fcr =	2526.56 kg/cm ²
											442.75 t
											4450000.00 N
											453.62 t
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor			Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS
40cm*40cm I.5cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r =	kl/r =	
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	40.00 cm	b/e =	24.67	No Esbelto	At =	57153.25 cm ⁴		15.73 cm	
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	40.00 cm	h/e =	24.67	No Esbelto	Ah =	57153.25 cm ⁴		4.45	
		e =	1.50 cm							4.71* $\sqrt{(E/fy)}$ =	133.70
										Fe =	1015999.76 kg/cm ²
L =	100.00 cm									Fcr = 0.658* $\sqrt{(E/fy)}$ *fy	
K =	0.7	dx =	37.00 cm							Fcr =	2527.36 kg/cm ²
											583.82 t
											6000000.00 N
											611.62 t

Resultados obtenidos por la Especificación AISC y ANSYS para columnas compuestas por elementos Compactos

Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor		Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS					
30cm*30cm 1.7cm															
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	30.00 cm	Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r =	11.61 cm					
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	30.00 cm	b/e =	16.75	<	18.17	Compacto	At =	181.76 cm ²	It =	24510.94 cm ⁴	kl/r =	6.03	
		e =	1.60 cm	h/e =	16.75	<	18.17	Compacto	Ah =	181.76 cm ²	Ih =	24510.94 cm ⁴	Fe =	553766.07 kg/cm ²	2.39%
L =	100.00 cm												Fcr =	0.658*√(E/fy)*fy	
K =	0.7	dx =	26.80 cm										Fcr =	2525.17 kg/cm ²	4610000.00 N
														458.97 t	469.93 t
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor		Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS					
35m*35cm 2cm															
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	35.00 cm	Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r =	13.54 cm					
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	35.00 cm	b/e =	16.42	<	18.17	Compacto	At =	251.56 cm ²	It =	46086.63 cm ⁴	kl/r =	5.17	
		e =	1.90 cm	h/e =	16.42	<	18.17	Compacto	Ah =	251.56 cm ²	Ih =	46086.63 cm ⁴	Fe =	752312.06 kg/cm ²	2.49%
L =	100.00 cm												Fcr =	0.658*√(E/fy)*fy	
K =	0.7	dx =	31.20 cm										Fcr =	2526.44 kg/cm ²	6390000.00 N
														635.55 t	651.38 t
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor		Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS					
40cm*35cm 2.3cm															
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	40.00 cm	Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r =	15.50 cm					
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	40.00 cm	b/e =	17.05	<	18.17	Compacto	At =	318.36 cm ²	It =	76449.91 cm ⁴	kl/r =	4.52	
		e =	2.10 cm	h/e =	17.05	<	18.17	Compacto	Ah =	318.36 cm ²	Ih =	76449.91 cm ⁴	Fe =	986104.93 kg/cm ²	2.62%
L =	100.00 cm												Fcr =	0.658*√(E/fy)*fy	
K =	0.7	dx =	35.80 cm										Fcr =	2527.28 kg/cm ²	8100000.00 N
														804.59 t	825.69 t

Resultados obtenidos por la Especificación AISC y ANSYS para columnas compuestas por elementos Sismicamente Compactos

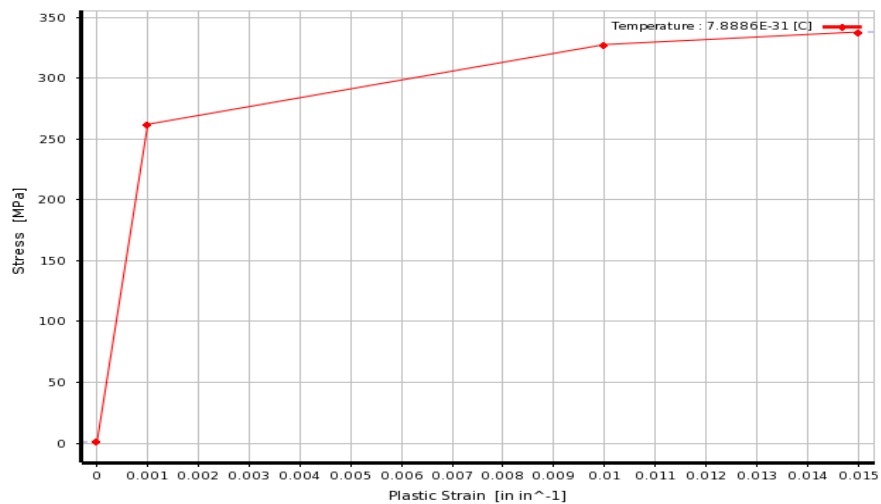
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor		Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS
30*30cm 0.3cm 0.3cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Área	Inercia	r =		
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	30.00 cm					kl/r =	11.54 cm	
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	30.00 cm	b/e =	14.67	At =	27020.56 cm ⁴	4.71* $\sqrt{(E/fy)}$ =	6.07	
		e =	1.80 cm	h/e =	14.67	Ah =	27020.56 cm ⁴	Fe =	133.70	2.39%
								Fcr =	546483.99 kg/cm ²	
L =	100.00 cm								0.658* $\sqrt{(E/fy)}$ *fy	
K =	0.7	dx	26.40 cm					Fcr =	2525.10 kg/cm ²	5150000.00 N
									512.70 t	524.97 t
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor		Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS
35*35cm 0.4cm 0.3cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Área	Inercia	r =		
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	35.00 cm					kl/r =	13.46 cm	
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	35.00 cm	b/e =	14.67	At =	50058.93 cm ⁴	4.71* $\sqrt{(E/fy)}$ =	5.20	
		e =	2.10 cm	h/e =	14.67	Ah =	50058.93 cm ⁴	Fe =	133.70	2.49%
								Fcr =	743825.44 kg/cm ²	
L =	100.00 cm								0.658* $\sqrt{(E/fy)}$ *fy	
K =	0.7	dx	30.80 cm					Fcr =	2526.40 kg/cm ²	7020000.00 N
									698.20 t	715.60 t
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor		Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS
40*40cm 0.4cm 0.3cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Área	Inercia	r =		
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	40.00 cm					kl/r =	15.42 cm	
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	40.00 cm	b/e =	15.39	At =	82465.83 cm ⁴	4.71* $\sqrt{(E/fy)}$ =	4.54	
		e =	2.30 cm	h/e =	15.39	Ah =	82465.83 cm ⁴	Fe =	133.70	2.69%
								Fcr =	976359.00 kg/cm ²	
L =	100.00 cm								0.658* $\sqrt{(E/fy)}$ *fy	
K =	0.7	dx	35.40 cm					Fcr =	2527.26 kg/cm ²	8830000.00 N
									876.55 t	900.10 t

6.2.- Modelación de Columnas con Atiesadores Longitudinales a Compresión

6.2.1.- Asignación de Material

El material que utilizares para este modelo será el mismo que se utilizó para columnas rectangulares huecas en compresión que es el de Acero A36 con $F_y = 250 \text{ Mpa} = 2530 \text{ kg/cm}^2$ con una curva Esfuerzo – Deformación Unitaria multilinear como se muestra continuación.

Curva Esfuerzo-Deformación Unitaria Acero ASTM A 36



Tabulación de la curva

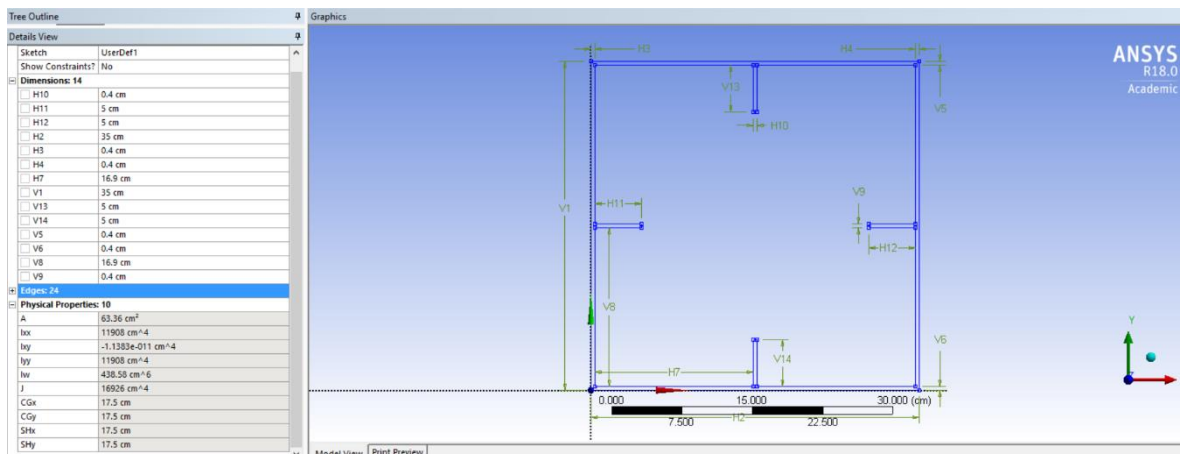
	B	C
1	Plastic Strain (mm mm ⁻¹)	Stress (MPa)
2	0	1
3	0.001	262
4	0.01	327.5
5	0.015	337.8
*		

Propiedades Mecánicas del Acero ASTM A 36

Properties of Outline Row 6: Structural Steel NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	2E+05	MPa	
7	Poisson's Ratio	0.3		
8	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa	
10	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular		
11	Scale	1		
12	Offset	0	MPa	
13	Specific Heat	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹	

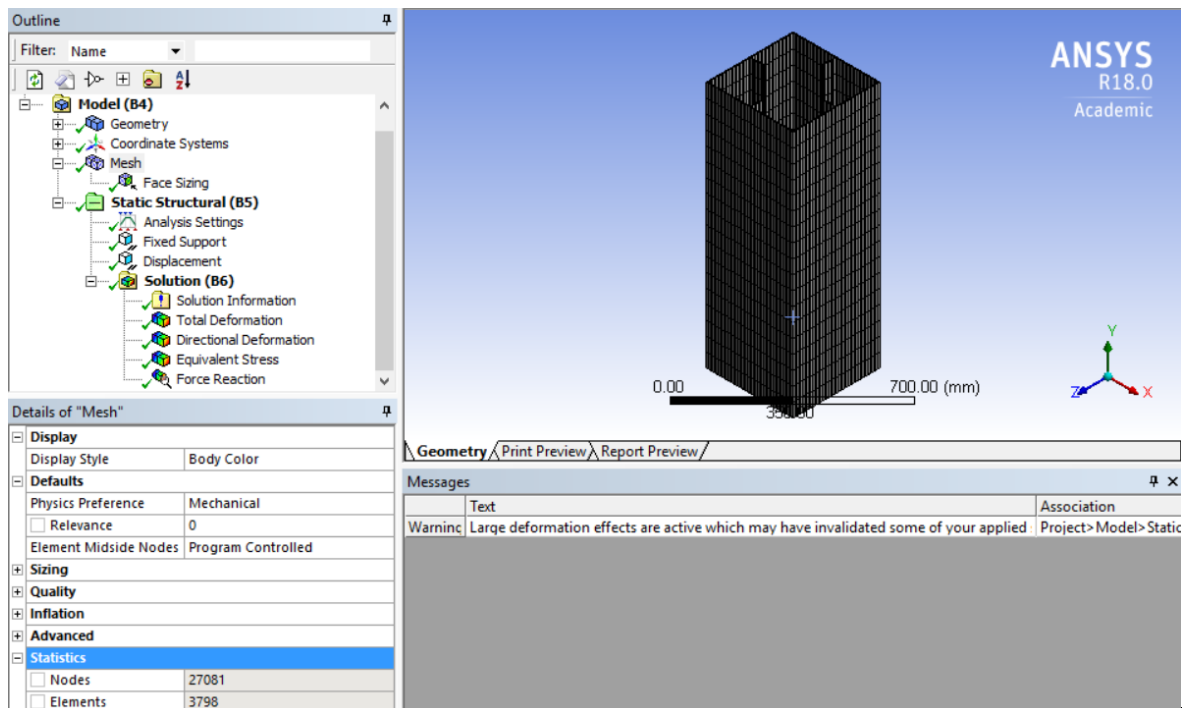
6.2.2.- Propiedades Geométricas de la Columna

La sección de la columna será de una sección rectangular con lados de 35 cm * 35 cm y un espesor de 4 mm con la inclusión de atiesadores longitudinales en la mitad de cada lado con dimensiones de 50 mm * 4 mm que compensarán el área reducida en las placas externas, para crear el sólido se aplica extrude a dicha sección con una profundidad de 1 m, Ansys calcula automáticamente las propiedades de esta sección que es visible desde Detail View, como se observa a continuación.



6.2.3.- Mallado Del Cuerpo

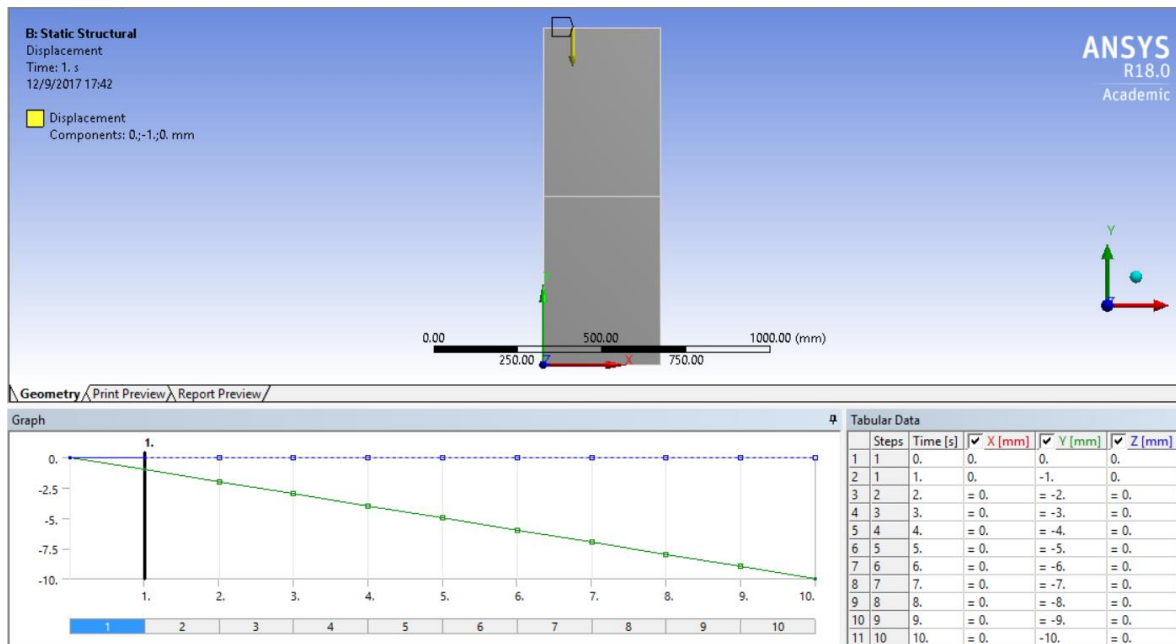
El mallado que se crea por defecto en el programa no fue uniforme, por lo que se fue necesario crea una configuración en la sección, de tal manera que los elementos que conforman el sólido puedan ser lo más regulares posibles, es aquí donde se incluyó la opción de Face Sizing con lados mínimos de 8 mm y de esta manera poder tener cuerpo con elementos más uniformes. Luego de aplicar esta configuración los elementos creados fueron de mejor calidad que al principio y de esto obtuvimos 27081 Nodos y 3798 Elementos que definen de mejor manera al. Tanto las placas externas como los atiesadores consiguieron una configuración regular de tal manera que, al momento de aplicar las cargas, esfuerzos y deformaciones, estas se distribuirán de una manera uniforme.



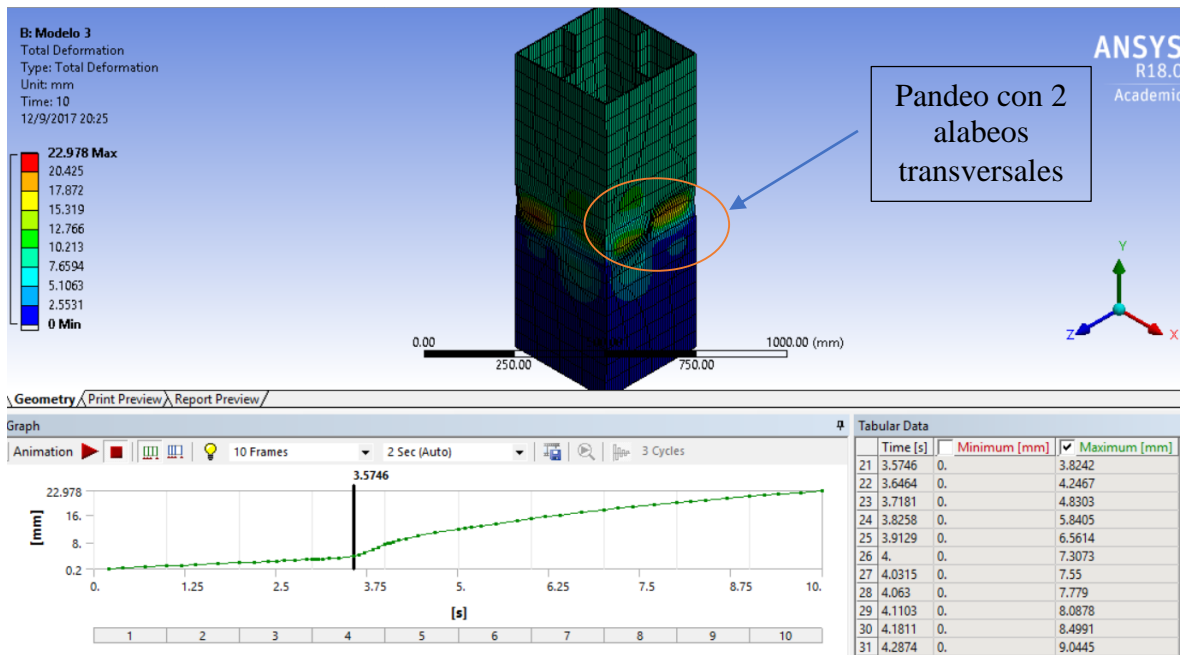
6.2.4.- Restricciones y Cargas

Para considerar la plastificación del material al igual que el anterior modelo, la opción Large Deflections se activa. Las restricciones serán iguales que el modelo de la columna sin atiesadores que son, un apoyo fijo en la base (Fixed Support) un apoyo que permite el libre desplazamiento en el eje Y en la parte superior sin posibilidad de desplazarse en el plano XZ, tampoco existe restricción a la rotación.

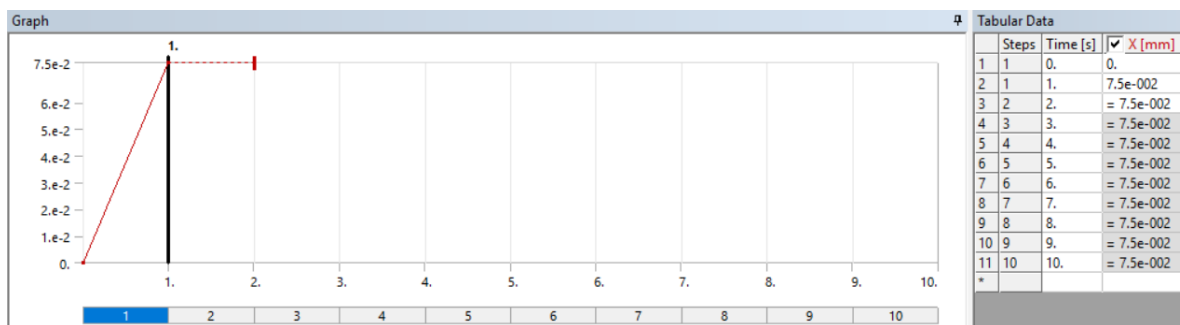
En este caso aumentaremos el rango de carga por desplazamiento a compresión, pues se espera que la resistencia de la columna aumente porque al añadir la atiesadores en la mitad de las placas de la columna, esta deja de tener elementos esbeltos. El desplazamiento aplicado será de 10 mm con 10 pasos de tal manera que la velocidad de carga sea de 1mm/s.



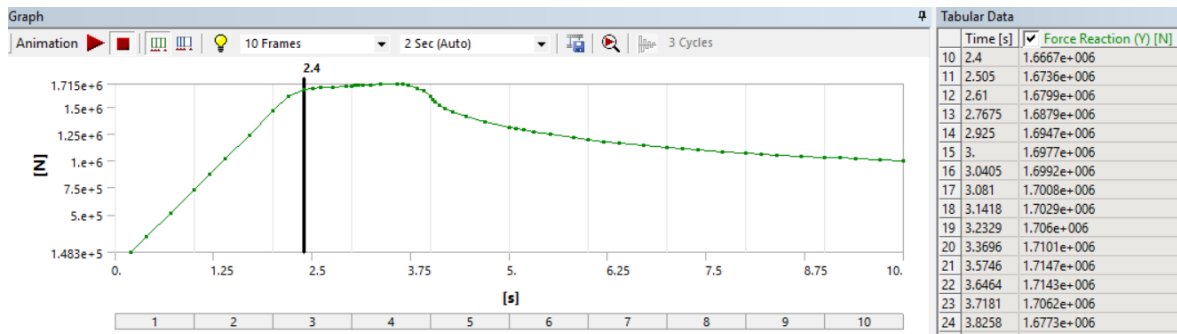
Después de resolver e Modelo 3 se puede observar la reacción del apoyo, y su deformación. En el primero de estos observamos que en el instante 3.5 existe un cambio en la reacción, las placas externas de la columna pandean, su deformación en el rango plástico, por lo que a partir de aquí la deformación es permanente, como existe un rigidizado en la mitad de las placas se forma un pandeo con 2 alabeos, 1 a cada lado del atiesador y de sentido invertido en cada placa adyacente.



Como en el Modelo 2 que es la modificación del Modelo 1 incluyendo imperfecciones, a este modelo también se le añadirá una imperfección de 2% para que se reduzca su resistencia, el desplazamiento necesario para que las placas de la columna pandeen es de 3.5 mm por lo que la imperfección será de 0.075 mm, la carga se aplica en el atiesador provocando la aceleración momentánea del pandeo en dicho punto, la carga se aplicada durante 2 segundos y se retirada inmediatamente para que el proceso de pandeo continúe por sí mismo.



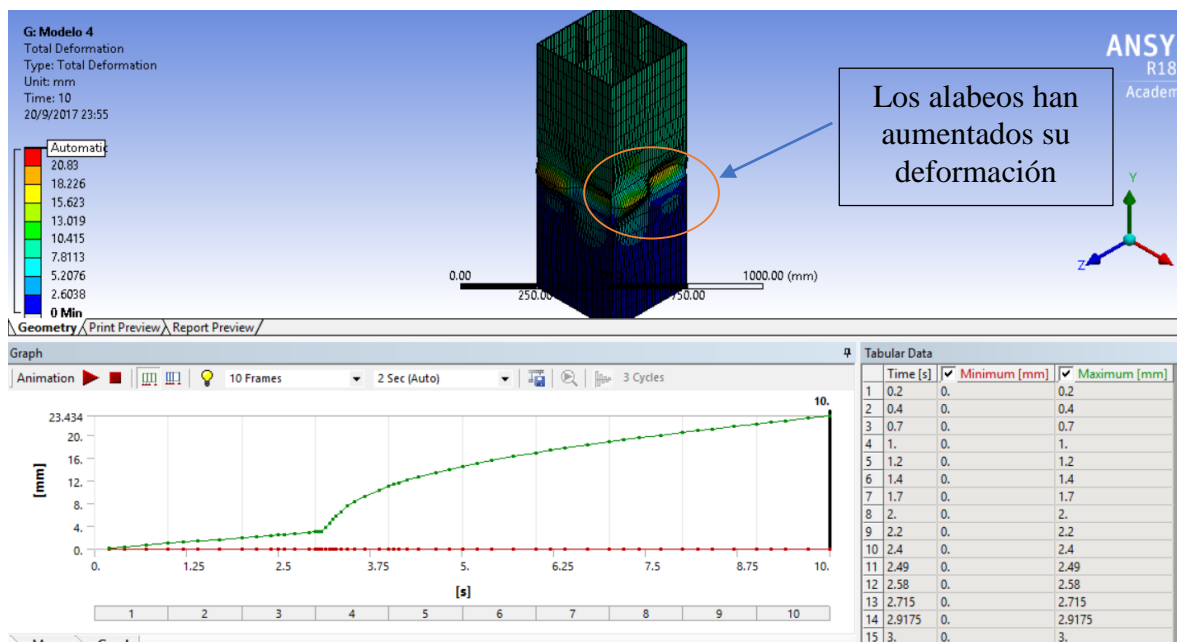
Con esta imperfección se espera que se reduzca la resistencia de la columna en comparación a la que no posee imperfección, el valor de este antes de que la columna pandee localmente es de $1.66 \cdot 10^6 \text{ N} = 169.21 \text{ t}$ en el instante 2.4 s.



6.2.5.- Resultados

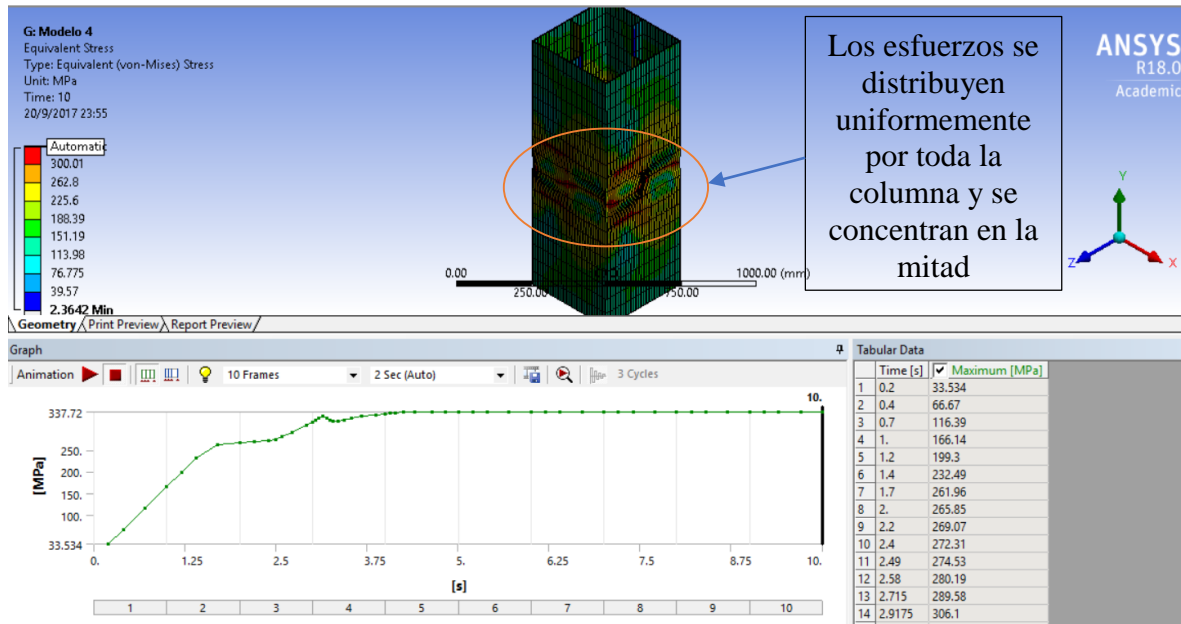
6.2.5.1.- Deformación total

En los resultados obtenidos para el modelo 4 se puede observar que el pandeo en las placas es similar al del modelo 3 pero con un ligero incremento en su deformación total que sigue manteniendo la misma dirección en los alabeos, aunque el incremento parezca minúsculo, hay una gran repercusión de este valor que reduce la resistencia de la columna.



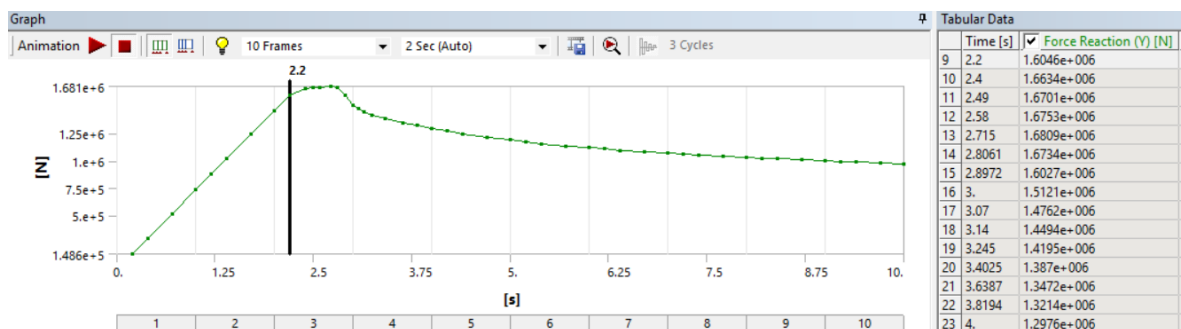
6.2.5.2.- Esfuerzo Total Equivalente

El resultado obtenido de Esfuerzo total equivalente el programa lo calcula por medio de la teoría de plastificación de los materiales de Von Mises, la cual está mejor descrita en el capítulo 4.3, se puede apreciar fácilmente que el cambio más brusco de esfuerzo ocurre al mismo tiempo que la deformación más abrupta lo que nos indica que en ese instante 3.2 ocurre el pandeo local de las placas externas.



6.2.5.3.- Reacción en el Soporte Fijo

Los resultados que se obtuvieron del análisis del Modelo 4 nos indican que a partir del instante 2.2 s, la columna comienza a comportarse de manera distinta, existe un aumento significativo en la deformación, hay una reducción significativa de en el esfuerzo que resisten los nodos y es el instante en el cual la reacción de del apoyo fijo en Y es máxima con un valor de $1.60 \cdot 10^6 \text{ N} = 163.1 \text{ t}$ que es un valor menor que el obtenido en el modelo 3 de $1.66 \cdot 10^6 \text{ N} = 169.21 \text{ t}$.



6.2.6.- Resistencia a la Compresión en Columnas Rectangulares con Atiesadores Longitudinales

6.2.6.1.- Dimensiones mínimas del atiesador

Requerimientos mínimos del Atiesador

$w = b - 2 * t - ea = 16.9$

$S = 1.28 * (E / Fy)^{0.5} = 36.34$

w/t	>	0.328 * S
42.25		11.92

Calcular I_a necesaria

$I_{aa} = 339 * t^4 * (w / (t * S) - 0.328)$

$I_{aa} = 5.94 \text{ cm}^4$

$I_a \text{ máx} = t^4 * (155 * w / (t * S) + 5)$

$I_a \text{ máx} = 3.55 \text{ cm}^4$

$I_a = \min(I_{aa}, I_a \text{ máx})$

$I_a = 3.55 \text{ cm}^4$

$l_a' = \sqrt[3]{I_a * 12 / ea}$

l_a'	<	l_a
4.74 cm		5.00 cm

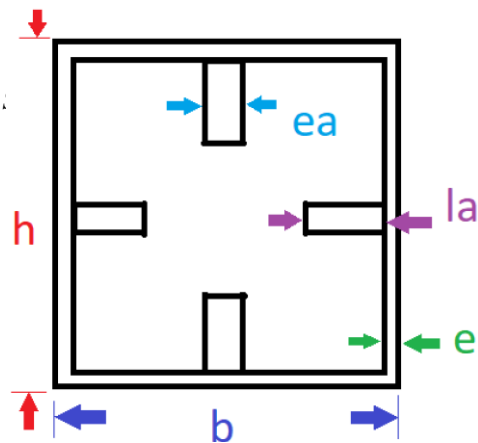
Dimensión l_a suficiente para rigidizar

6.2.6.2.- AISC 360-10

Dimensiones de la Sección

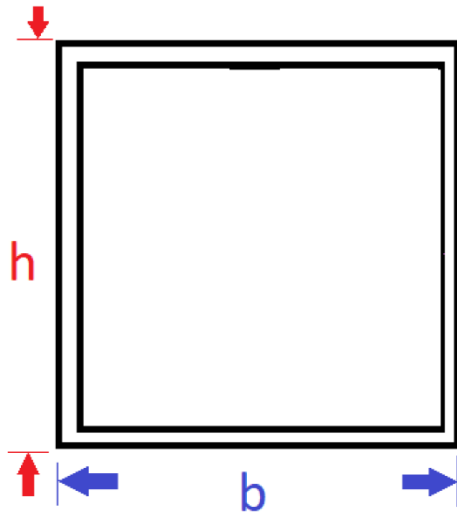
b =	35.00 cm
h =	35.00 cm
e =	0.40 cm
l_a =	5.00 cm
ea =	0.40 cm

$I_t = 11908.30 \text{ cm}^4$

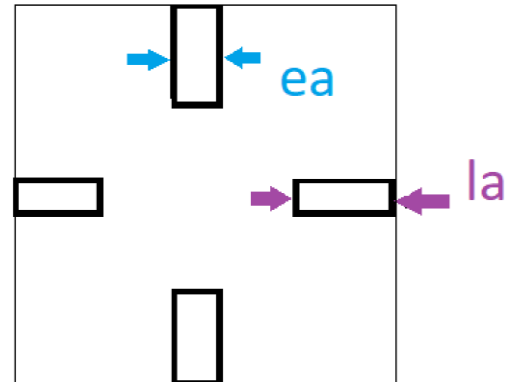


$$A_t = 63.36 \text{ cm}^2$$

Rectángulo Hueco



Atiesadores



$$I = 11047.27 \text{ cm}^4$$

$$I_a = 861.03 \text{ cm}^4$$

$$A = 55.36 \text{ cm}^2$$

$$A_a = 8.00 \text{ cm}^2$$

-
 Longitud de la Columna
 Módulo de Elasticidad
 Esfuerzo de Fluencia
 Inercia Total
 Área de la Sección
 Tipo de Empotramiento

$L = 100.00 \text{ cm}$
 $E = 2038735.98 \text{ kg/cm}^2$
 $F_y = 2530.00 \text{ kg/cm}^2$
 $I = 11908.30 \text{ cm}^4$
 $A = 63.36 \text{ cm}^2$
 $K = 0.7$

$$r = \sqrt{I/A}$$

$$r = 13.71 \text{ cm}$$

$$\frac{KL}{r} = 5.11$$

Carga Crítica de Euler

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (E3 - 4)$$

$$F_e = 771790.13 \text{ kg/cm}^2$$

$$4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad 133.70$$

$$5.11 < 133.70$$

(a) $4.71\sqrt{E/F_y}$

$$F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] * F_y \quad (E3 - 2)$$

$$F_{cr} = 2526.53 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_n = F_{cr} * A_g \quad (E3 - 1)$$

$$P_n = 160.08 \text{ t}$$

6.2.6.3.- AISI S100-07

Datos de la sección

b =	35.00 cm	w =	34.20 cm
e =	0.40 cm	t =	0.40 cm
K =	0.7	kp =	4.00
E =	2038735.98 kg/cm ²	Fy =	2530.00 kg/cm ²
L =	100.00 cm	la =	5.00 cm
A =	63.36 cm ²	ea =	0.40 cm
Is =	11047.27253	u =	0.3
Ia =	861.0266667	It =	11908.2992

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2}$$

$$F_e = 715986.04 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda_c = \sqrt{F_y/F_e} = 0.06$$

$$0.06 < 1.50$$

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) * F_y \quad \text{Eq. C4.1-2}$$

$$F_n = 2526.26 \text{ kg/cm}^2$$

$$I_{sp} = 18.75 \text{ cm}^4$$

$$\gamma_i = \frac{10.92 (I_{sp})_i}{b_o t^3} \quad \text{Eq. B5.1.2 - 4}$$

$$\gamma_i = 93.53$$

$$\omega_i = \sin\left(\pi \frac{c_i}{b_o}\right)^2 \quad \text{Eq. B5.1.2 - 5}$$

$$w_i = 1.00$$

$$\beta = \left(2 * \sum_{i=1}^n \gamma_i \omega_i + 1\right)^{1/4} \quad \text{Eq. B5.1.2 - 3}$$

$$\beta = 3.70$$

$$\delta_i = \frac{(A_s)_i}{b_o t} \quad \text{Eq. B5.1.2 - 6}$$

$$\delta_i = 0.15$$

$$k_d = \frac{(1 + \beta^2)^2 + 2 * \sum_{i=1}^n \gamma_i \omega_i}{\beta^2 (1 + 2 * \sum_{i=1}^n \delta_i \omega_i)} \quad \text{Eq. B5.1.2 - 2}$$

$$k_d = 22.77$$

$$R = \frac{11 - b_o/h}{5} \geq \frac{1}{2} \quad \text{Eq. B5.1 - 6}$$

$$R = 2.00$$

$$R_{kd} = 45.54$$

$$k_{loc} = 4 \left(\frac{b_o}{b_p} \right)^2 \quad \text{Eq. B5.1.2 - 1}$$

$$k_{loc} = 16.38$$

$$\mathbf{k = k_{loc} = 16.4}$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b_o} \right)^2 \quad \text{Eq. B5.1 - 4}$$

$$\mathbf{F_{cr} = 4129.00 \text{ kg/cm}^2}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} \quad \text{Eq. B5.1 - 3}$$

$$\lambda = 0.78$$

$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right)}{\lambda} \quad \text{Eq. B5.1 - 2}$$

$$\rho = 0.92$$

$$w_p = 31.41$$

$$A_e = 59.54 \text{ cm}^2$$

$$P_n = A_e * F_n$$

$$P_n = 150408.87 \text{ kg}$$

$$\mathbf{P_n = 150.41 \text{ t}}$$

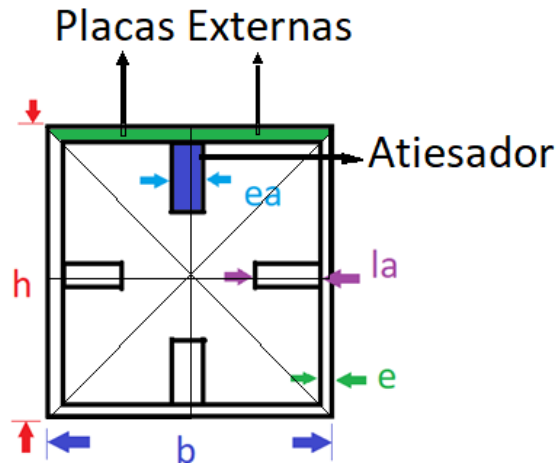
6.2.7.- Cálculo de la constante k para cada elemento de la sección

En este caso tenemos 2 tipos de placas con diferentes condiciones y propiedades geométricas que analizar, en primer lugar, tenemos las placas que se encuentran al exterior de la columna y que por presencia de los atiesadores reducen una de sus dimensiones a la mitad, y el segundo tipo son los atiesadores propiamente dichos.

Con en el caso anterior de una columna hueca sometida a compresión, analizaremos si el modelo 4 satisface los requisitos necesarios para cumplir con la teoría de placas de la columna con atiesadores. Como dato importante fruto de los resultados obtenidos por los varios modelos que se han ejecutados para el análisis de pandeo de las placas externas, se ha apreciado que, así como los atiesadores le proporcionan la rigidez necesaria para soportar cargas mayores a las placas externas, también pierden capacidad una vez que los atiesadores ya se han pandeado. Por lo que primero fallarán los atiesadores e inmediatamente después las placas externas. Así que podemos afirmar que ambos tipos de placa pandean al mismo tiempo por lo que es posible aplicar una distribución uniforme (Ley de Hooke) por área resistente para instantes antes de que la columna falle.

Con lo anteriormente dicho vamos al calcular de la capacidad del área total de la con el de cada placa por proporción mostradas a continuación:

Descripción	Carga Soportada por placa	Área por Placa	Porcentaje de Distribución de Carga	N° de placas en la Sección	Área por tipo de placas	Porcentaje de Distribución Total	Carga Total por tipo de placas
Placa Externa	17.81 t	6.92 cm ²	10.92%	8	55.36 cm ²	87.37%	142.51 t
Atiesador	5.15 t	2.00 cm ²	3.16%	4	8.00 cm ²	12.63%	20.59 t
					Valores Totales de la Columna		
					63.36 cm ²	100.00%	163.10 t



Estos valores nos servirán como datos de entrada para poder calcular el factor k en cada condición de apoyo, pues estos casos no son han sido tabulados en investigaciones anteriores, de tal manera que podemos compararlos dentro de condiciones similares y ubicarlo dentro de un rango.

Condiciones de apoyo de las placas

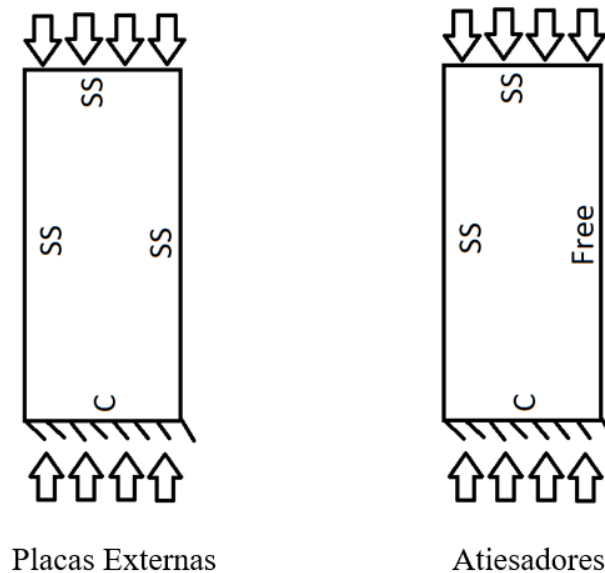


Figura 97.- Esquema que representa los diferentes tipos de apoyo de las placas en la columna

Es así como por medio de iteraciones en la fórmula de pandeo de placas y los datos de cada uno de los tipos de placas encontraremos los valores de k para cada una de estas condiciones.

$$\sigma_{cr} = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^2}$$

6.2.7.1.- *k de las Placa Externas*

Número de Alabeos en a	m =	1.00
Dimensión del lado comprimido	a =	100.00 cm
Dimensión perpendicular al lado comprimido	b =	16.90 cm
Espesor de la placa	t =	0.40 cm
Coefficiente de Poisson	u =	0.30
Módulo de Elasticidad de la Placa	E =	2038735.98 kg/cm ²
Relación dimensional de la Placa	a/b =	5.92

k	σ_{cr} (kg/cm ²)	σ_{cr} (t)	σ_{cr} (N)
2.10	2167.72	14.65	143753.91
2.20	2270.95	15.35	150599.33
2.30	2374.17	16.05	157444.76
2.40	2477.40	16.75	164290.18
2.50	2580.62	17.45	171135.61
2.60	2683.85	18.14	177981.03
2.70	2787.07	18.84	184826.46
2.80	2890.30	19.54	191671.88
2.90	2993.52	20.24	198517.30
3.00	3096.75	20.93	205362.73
3.10	3199.97	21.63	212208.15
3.20	3303.20	22.33	219053.58
3.30	3406.42	23.03	225899.00

6.2.7.2.- *k* de los Atiesadores

Número de Alabeos en a	m =	1.00
Dimensión del lado comprimido	a =	100.00 cm
Dimensión perpendicular al lado comprimido	b =	5.00 cm
Espesor de la placa	t =	0.40 cm
Coefficiente de Poisson	u =	0.30
Módulo de Elasticidad de la Placa	E =	2038735.98 kg/cm ²
Relación dimensional de la Placa	a/b =	20.00

k	σ_{cr} (kg/cm ²)	σ_{cr} (t)	σ_{cr} (N)
0.10	1179.28	2.36	23137.53
0.20	2358.57	4.72	46275.07
0.30	3537.85	7.08	69412.60
0.40	4717.13	9.43	92550.14
0.50	5896.42	11.79	115687.67
0.60	7075.70	14.15	138825.20
0.70	8254.98	16.51	161962.74
0.80	9434.26	18.87	185100.27
0.90	10613.55	21.23	208237.81
1.00	11792.83	23.59	231375.34
1.10	12972.11	25.94	254512.87
1.20	14151.40	28.30	277650.41
1.30	15330.68	30.66	300787.94
1.40	16509.96	33.02	323925.48
1.50	17689.25	35.38	347063.01
1.60	18868.53	37.74	370200.55
1.70	20047.81	40.10	393338.08
1.80	21227.10	42.45	416475.61
1.90	22406.38	44.81	439613.15
2.00	23585.66	47.17	462750.68

6.2.7.3- Comparación de Resultados

Después de realizar estos cálculos obtenidos con la teoría de pandeo de placas podemos comparar estos resultados con los valores de las tablas ya existentes, para el caso de las placas externas vemos que nuestras placas se asemejan a las condiciones en el Anexo D, Placas tipo D, pero en nuestro caso la placa está empotrada en un borde donde se aplica la carga, k para este tipo de secciones es de 4, en nuestro caso el valor de k esta entre 2.6 y 2.7 por lo que diríamos que para nuestro caso particular k tendría en valor de aproximadamente 2.65, este valor es inferior a 4 y puede ser justificado por varias razones, la primera de ellas es el hecho de que la relación ancho espesor de la sección está en el límite para que cumpla la condición de sección no esbelta, el elemento con 4 mm de espesor es un elemento No esbelto pero si disminuimos es espesor a 3 mm el elemento clasifica como Esbelto; la segunda razón es que la longitud de la placa es mucho más grande que sus otras dimensiones, siendo su longitud de 100 cm y los lados de la sección de 0.4 cm y 16.9 cm, y por último por su condición empotrada en uno de sus extremos, lo que impediría rotar a este lado, estas razones provocarían que el valor de k disminuirían a 2.65.

Con Atiesador de 4 mm

<i>Dimensiones de las Placas</i>		<i>Relación ancho Espesor</i>		
		λ_r		
b =	35.00 cm	b/e =	42.25 <	42.30 No Esbelto
h =	35.00 cm			
e =	0.40 cm	h/e =	42.25 <	42.30 No Esbelto
la =	5.00 cm			
ea =	0.40 cm	la/ea =	12.5 <	15.90 No Esbelto

Con Atiesadores de 3 mm

<i>Dimensiones de las Placas</i>		<i>Relación ancho Espesor</i>		
		λ_r		
b =	35.00 cm	b/e =	42.38 >	42.30 Esbelto
h =	35.00 cm			
e =	0.40 cm	h/e =	42.38 >	42.30 Esbelto
la =	5.00 cm			
ea =	0.30 cm	la/ea =	16.67 >	15.90 Esbelto

El valor de falla de Ansys para columnas con atiesadores longitudinales sometidas a compresión es de 163.1 t y el calculado por la especificación ANSI/AISC 360-10 de 160.1 t una diferencia muy pequeña.

En el caso de los atiesadores las consideraciones serian similares he incluso más desfavorables que las placas externas pues existe un borde que no tiene ningún tipo de apoyo y la relación ancho espesor es aún más grande que las exteriores de la columna, siendo la relación de los atiesadores $a/b = 20$ y el de las placas externas de $a/b = 5.92$.

Para este tipo de condiciones los casos más cercanos son los casos D y E, que bordan los valores de 0.2 y 0.7 respectivamente, que comparándolo con los valores iterados que van entre 0.2 y 0.3, podemos decir que con un valor de $k = 0.25$ las placas satisfacen todos los requerimientos mencionados.

Los porcentajes de diferencia entre los valores obtenidos son:

ANSYS y AISC 360-10 = 5.6 %

ANSYS y AISI S100-07 = 13.2 %

6.2.8.- Otros resultados

Otras secciones como 30 cm * 30 cm, 35 cm * 35 cm, 40 cm * 40 cm, también fueron modeladas con espesores correspondientes a secciones esbeltas, no esbeltas y compactas para poder obtener una gran variedad de resultados y compararlos entre sí.

Resumen de Resultados para Columnas Con Atiesadores

		30cm*30cm	35cm*35cm	40cm*40cm
	e =	0.30 cm	0.40 cm	0.40 cm
Placas	Calculado	105.15 t	155.03 t	175.30 t
Externas	Ansys	109.07 t	171.25 t	187.56 t
Esbelto	% Diferencia	3.73%	10.46%	7.00%
	e =	0.40 cm	0.50 cm	0.50 cm
Placas	Calculado	134.75 t	189.49 t	214.83 t
Externas	Ansys	137.61 t	193.68 t	219.16 t
No Esbelto	% Diferencia	2.13%	2.21%	2.02%
	e =	0.80 cm	1.00 cm	1.10 cm
Placas	Calculado	251.11 t	358.77 t	447.75 t
Externas	Ansys	256.88 t	367.99 t	459.73 t
Compacto	% Diferencia	2.30%	2.57%	2.68%

Resultados obtenidos por la Especificación AISC y ANSYS para columnas con atesadores esbeltos compuestas por elementos Esbeltos												
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor			Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS	
30*30cm 0.3cm 0.3cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r =			
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	30.00 cm						kl/r =	11.69 cm		
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	30.00 cm	b/e =	48.50	>	42.30	Esbelto	At =	4.71 * $\sqrt{(E/fy)}$	5.99	
		e =	0.30 cm	h/e =	48.50	>	42.30	Esbelto	Ah =	561423.61 kg/cm ²	133.70	3.73%
		la =	5.00 cm	la/ea =	16.67	>	15.90	Esbelto	Aa =	452.79 cm ⁴		
L =	100.00 cm	ea =	0.30 cm						Fcr =	2525.23 kg/cm ²	1070000.00 N	
K =	0.7	dx =	14.55 cm						Fcr =	105.15 t	109.07 t	
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor			Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS	
35*35cm 0.4cm 0.3cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r =			
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	35.00 cm						kl/r =	13.80 cm		
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	35.00 cm	b/e =	42.38	>	42.30	Esbelto	At =	4.71 * $\sqrt{(E/fy)}$	5.07	
		e =	0.40 cm	h/e =	42.38	>	42.30	Esbelto	Ah =	782539.34 kg/cm ²	133.70	10.46%
		la =	5.00 cm	la/ea =	16.67	>	15.90	Esbelto	Aa =	645.75 cm ⁴		
L =	100.00 cm	ea =	0.30 cm						Fcr =	2526.58 kg/cm ²	1680000.00 N	
K =	0.7	dx =	16.95 cm						Fcr =	155.03 t	171.25 t	
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor			Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS	
40*40cm 0.4cm 0.3cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r =			
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	40.00 cm						kl/r =	15.86 cm		
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	40.00 cm	b/e =	48.63	>	42.30	Esbelto	At =	4.71 * $\sqrt{(E/fy)}$	4.41	
		e =	0.40 cm	h/e =	48.63	>	42.30	Esbelto	Ah =	1032822.26 kg/cm ²	133.70	7.00%
		la =	5.00 cm	la/ea =	16.67	>	15.90	Esbelto	Aa =	883.50 cm ⁴		
L =	100.00 cm	ea =	0.30 cm						Fcr =	2527.41 kg/cm ²	1840000.00 N	
K =	0.7	dx =	19.45 cm						Fcr =	175.30 t	187.56 t	

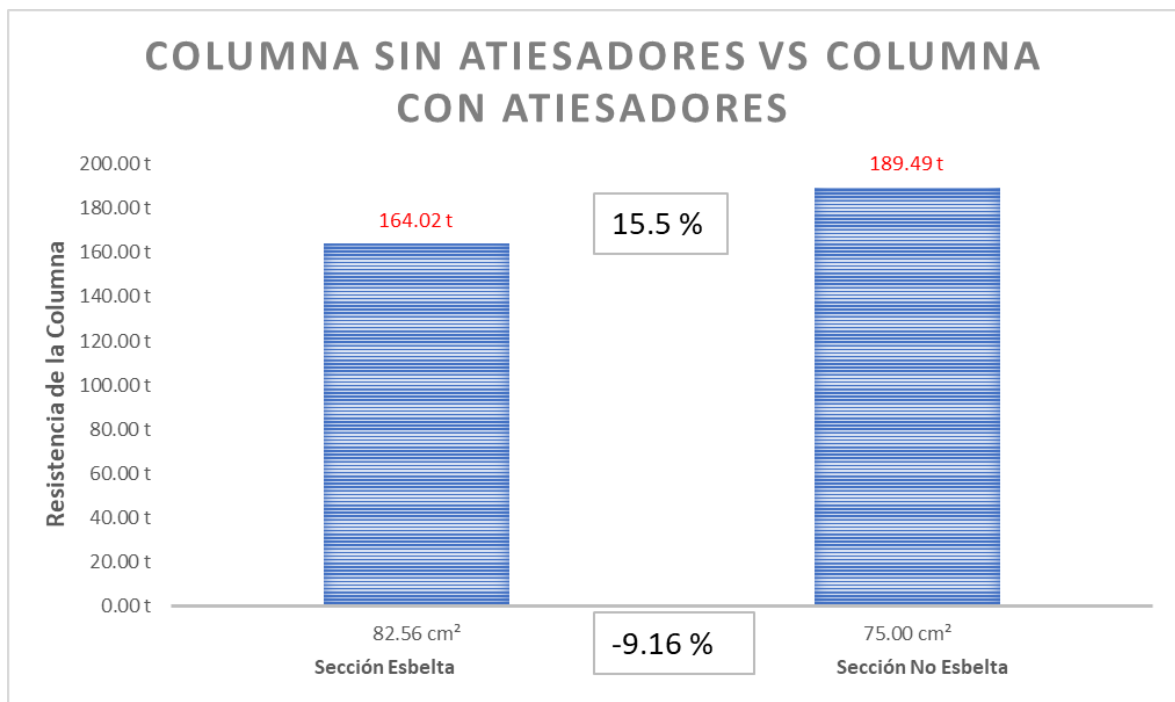
Resultados obtenidos por la Especificación AISC y ANSYS para columnas con atesadores esbeltos compuestas por elementos No Esbeltos															
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor			Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS				
30*30cm 0.4cm 0.3cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r =	kl/r =					
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	30.00 cm	b/e =	36.13	<	42.30	No Esbelto	At =	53.36 cm ²	It =	7362.59 cm ⁴	r =	11.75 cm	
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	30.00 cm	h/e =	36.13	<	42.30	No Esbelto	Ah =	47.36 cm ²	Ih =	6917.09 cm ⁴	kl/r =	5.96	
		e =	0.40 cm	la/ea =	16.67	>	15.90	Esbelto	Aa =	6.00 cm ²	Ia =	445.50 cm ⁴	Fe =	566603.63 kg/cm ²	2.13%
L =	100.00 cm	ea =	0.30 cm										Fcr =	2525.28 kg/cm ²	1350000.00 N
K =	0.7	dx =	14.45 cm										Fcr =	134.75 t	137.61 t
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor			Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS				
35*35cm 0.5cm 0.3cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r =	kl/r =					
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	35.00 cm	b/e =	33.70	<	42.30	No Esbelto	At =	75.00 cm ²	It =	14327.77 cm ⁴	r =	13.82 cm	
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	35.00 cm	h/e =	33.70	<	42.30	No Esbelto	Ah =	69.00 cm ²	Ih =	13690.75 cm ⁴	kl/r =	5.06	
		e =	0.50 cm	la/ea =	16.67	>	15.90	Esbelto	Aa =	6.00 cm ²	Ia =	637.02 cm ⁴	Fe =	784480.35 kg/cm ²	2.21%
L =	100.00 cm	ea =	0.30 cm										Fcr =	2526.59 kg/cm ²	1900000.00 N
K =	0.7	dx =	16.85 cm										Fcr =	189.49 t	193.68 t
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor			Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS				
40*40cm 0.5cm 0.3cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r =	kl/r =					
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	40.00 cm	b/e =	38.70	<	42.30	No Esbelto	At =	85.00 cm ²	It =	21419.86 cm ⁴	r =	15.87 cm	
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	40.00 cm	h/e =	38.70	<	42.30	No Esbelto	Ah =	79.00 cm ²	Ih =	20546.58 cm ⁴	kl/r =	4.41	
		e =	0.50 cm	la/ea =	16.67	>	15.90	Esbelto	Aa =	6.00 cm ²	Ia =	873.27 cm ⁴	Fe =	1034813.94 kg/cm ²	2.02%
L =	100.00 cm	ea =	0.30 cm										Fcr =	2527.41 kg/cm ²	2150000.00 N
K =	0.7	dx =	19.35 cm										Fcr =	214.83 t	219.16 t

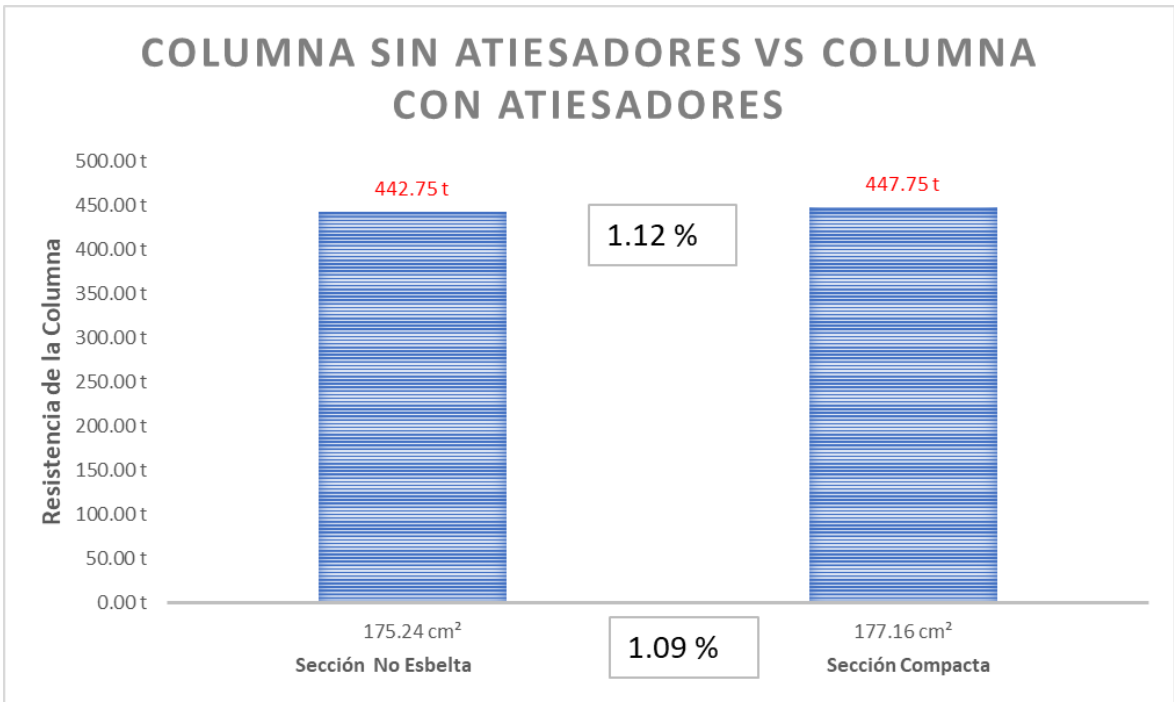
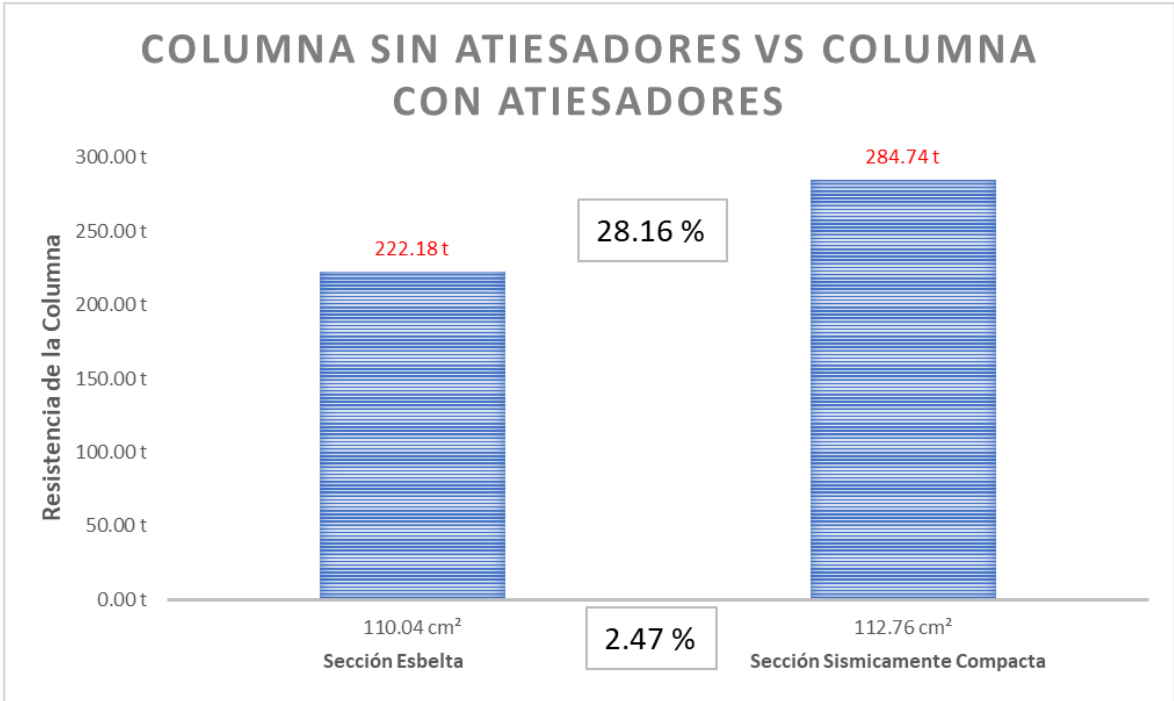
Resultados obtenidos por la Especificación AISC y ANSYS para columnas con atiesadores esbeltos compuestas por elementos Compactos																
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor			Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS					
30*30cm 0.4cm 0.3cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r	kl/r						
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	30.00 cm	b/e =	17.56	<	18.17	Compacto	At =	99.44 cm ²	It =	13705.36 cm ⁴	r =	11.74 cm		
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	30.00 cm	h/e =	17.56	<	18.17	Compacto	Ah =	93.44 cm ²	Ih =	13288.41 cm ⁴	kl/r =	5.96		
		e =	0.80 cm	la/ea =	16.67	>	15.90	Esbelto	Aa =	6.00 cm ²	Ia =	416.94 cm ⁴	Fe =	565970.60 kg/cm ²	2.30%	
L =	100.00 cm	ea =	0.30 cm						Fcr =	2525.27 kg/cm ²					2520000.00 N	
K =	0.7	dx =	14.05 cm						Fcr =	251.11 t					256.88 t	
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor			Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS					
35*35cm 0.5cm 0.3cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r	kl/r						
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	35.00 cm	b/e =	16.35	<	18.17	Compacto	At =	142.00 cm ²	It =	26819.61 cm ⁴	r =	13.74 cm		
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	35.00 cm	h/e =	16.35	<	18.17	Compacto	Ah =	136.00 cm ²	Ih =	26225.33 cm ⁴	kl/r =	5.09		
		e =	1.00 cm	la/ea =	16.67	>	15.90	Esbelto	Aa =	6.00 cm ²	Ia =	594.27 cm ⁴	Fe =	775583.75 kg/cm ²	2.57%	
L =	100.00 cm	ea =	0.30 cm						Fcr =	2526.55 kg/cm ²					3610000.00 N	
K =	0.7	dx =	16.35 cm						Fcr =	358.77 t					367.99 t	
Propiedades Sección		Dimensiones de la Sección		Relación Ancho/Espesor			Propiedades Mecánicas		Carga Crítica		ANSYS					
40*40cm 0.5cm 0.3cm		de la Sección		Ancho/Espesor	λr	Descrip	Área	Inercia	r	kl/r						
E =	2038735.98 kg/cm ²	b =	40.00 cm	b/e =	17.05	<	18.17	Compacto	At =	177.16 cm ²	It =	44014.51 cm ⁴	r =	15.76 cm		
Fy =	2530.00 kg/cm ²	h =	40.00 cm	h/e =	17.05	<	18.17	Compacto	Ah =	171.16 cm ²	Ih =	43201.35 cm ⁴	kl/r =	4.44		
		e =	1.10 cm	la/ea =	16.67	>	15.90	Esbelto	Aa =	6.00 cm ²	Ia =	813.15 cm ⁴	Fe =	1020222.33 kg/cm ²	2.68%	
L =	100.00 cm	ea =	0.30 cm						Fcr =	2527.38 kg/cm ²					4510000.00 N	
K =	0.7	dx =	18.75 cm						Fcr =	447.75 t					459.73 t	

6.2.9.- Comparación a Compresión: Columnas con Atiesadores Vs Columnas sin Atiesadores

Después de haber obtenido los resultados de columnas con atiesadores y columnas sin atiesadores podemos comparar estos valores, de tal manera que con la misma cantidad de recursos o aproximada, se pueda mejorar el comportamiento de estas columnas de gran manera sometidos a compresión. Además de lo dicho anteriormente, se pudo notar que estos modelos tenían mucha más resistencia al pandeo local, que incluso no se aprecia la aparición de alabeos, sino que en la columna entera mantenía su forma íntegramente.

En esta ocasión se presentarán 3 pares de los resultados obtenidos anteriormente por lo que sus cálculos son verificables en las secciones 6.1.9. y 6.2.8.



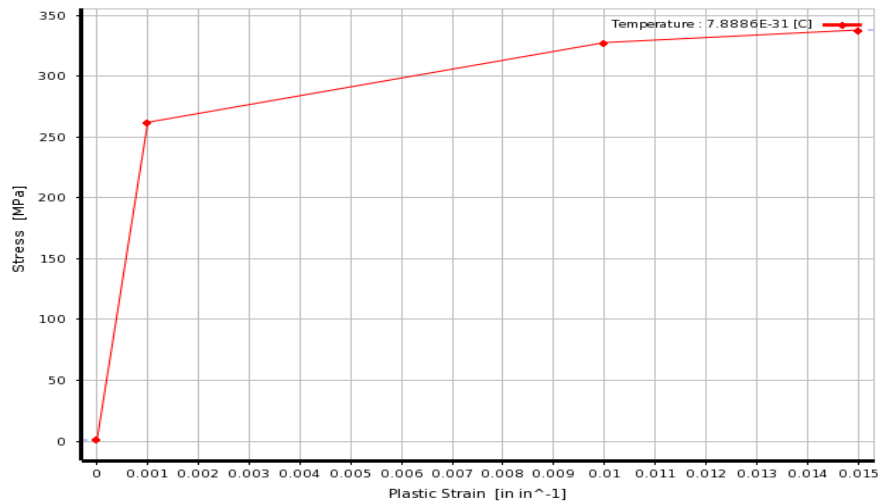


6.3.- Modelación de Columnas Rellenas de Hormigón

6.3.1.- Asignación de Material

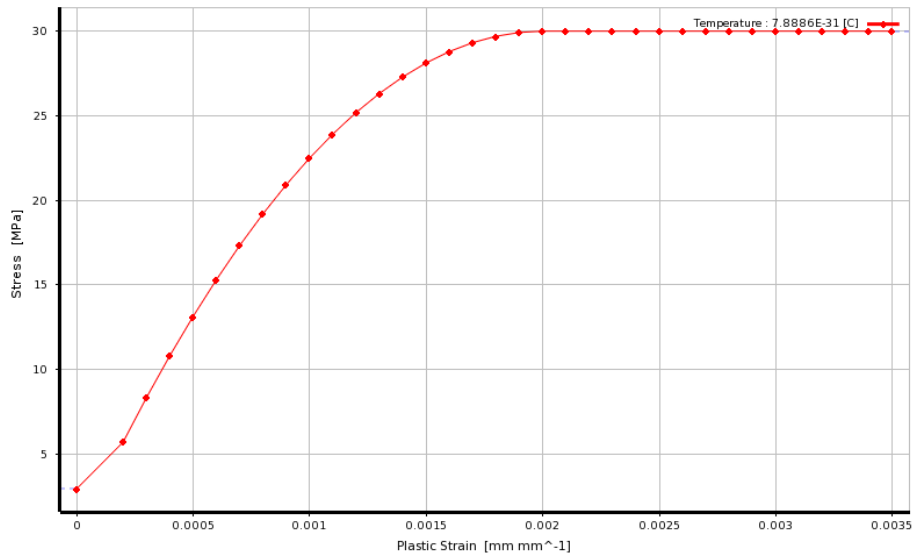
El material que utilizares para este modelo será el mismo que utilizamos para columnas rectangulares huecas en compresión que es el de Acero ASTM A36 con $F_y = 250 = 2530$ kg/cm² con una curva Esfuerzo – Deformación Unitaria multilineal siguiente:

Curva Esfuerzo-Deformación Unitaria Acero ASTM A 36



Para el hormigón se utilizó la curva Esfuerzo – Deformación Unitaria de una muestra de hormigón con resistencia de $f'_c = 30$ Mpa = 310 kg/cm².

Curva Esfuerzo – Deformación Unitaria Hormigón 30 Mpa



Hormigón $f'_c = 310 \text{ kg/cm}^2$		Acero $F_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$	
Plastic Strain (mm mm ⁻¹)	Stress (MPa)	B	C
0	2.925	1	Plastic Strain (mm mm ⁻¹)
0.0002	5.7	2	0
0.0003	8.325	3	0.001
0.0004	10.8	4	0.01
0.0005	13.125	5	0.015
0.0006	15.3	*	
0.0007	17.325		
0.0008	19.2		
0.0009	20.925		
0.001	22.5		
0.0011	23.925		
0.0012	25.2		
0.0013	26.325		
0.0014	27.3		
0.0015	28.125		
0.0016	28.8		
0.0017	29.325		
0.0018	29.7		
0.0019	29.925		
0.002	30		
0.0021	30		
0.0022	30		
0.0023	30		
0.0024	30		
0.0025	30		
0.0026	30		
0.0027	30		
0.0028	30		
0.0029	30		
0.003	30		
0.0031	30		
0.0032	30		
0.0033	30		
0.0034	30		
0.0035	30		

Propiedades Mecánicas del Acero ASTM A36

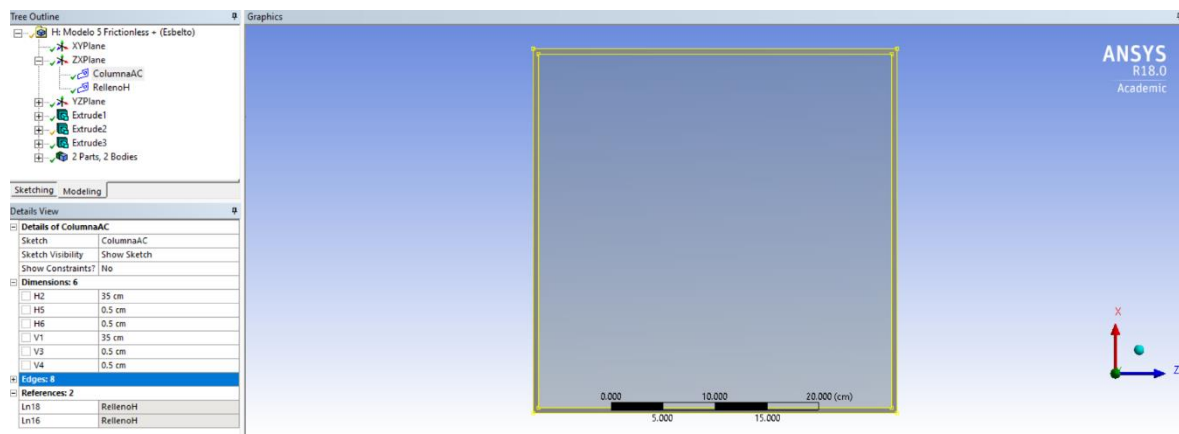
Properties of Outline Row 6: Structural Steel NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and P...		
6	Young's Modulus	2E+05	MPa	
7	Poisson's Ratio	0.3		
8	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa	
10	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular		
11	Scale	1		
12	Offset	0	MPa	

Propiedades Mecánicas del Hormigón

Properties of Outline Row 4: Concrete NL				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and P...		
6	Young's Modulus	30000	MPa	
7	Poisson's Ratio	0.18		
8	Bulk Modulus	1.5625E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1.2712E+10	Pa	
10	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular		
11	Scale	1		
12	Offset	0	MPa	

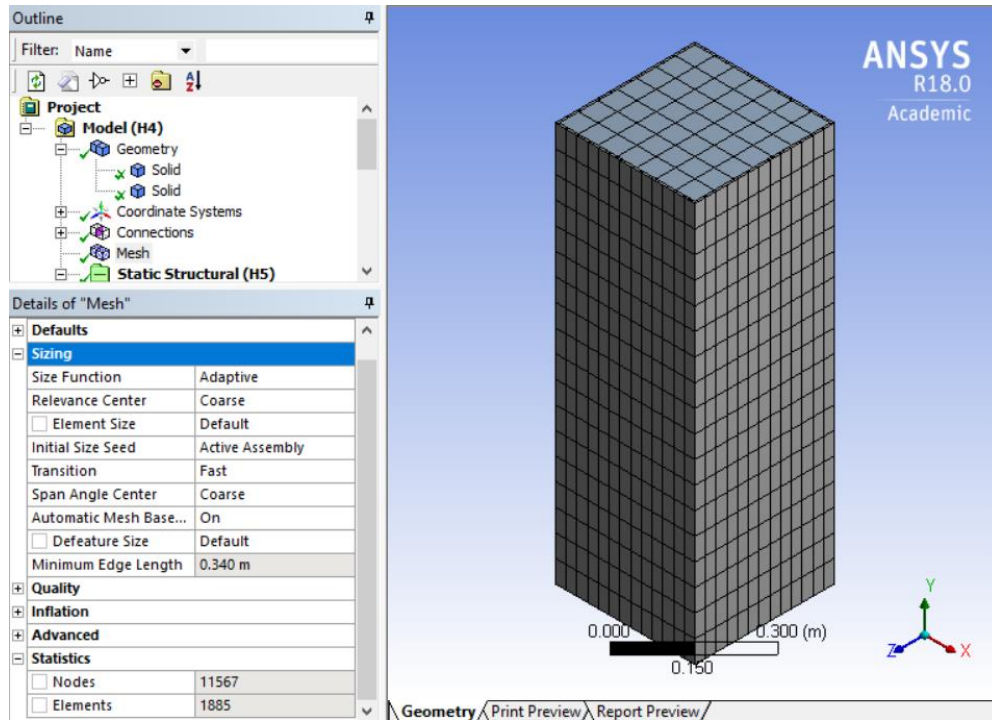
6.3.2.- Propiedades Geométricas de la Columna

Para la creación de esta sección se crearon 2 áreas diferentes, la columna de acero, y el relleno de hormigón, las dimensiones de la placa son 35 cm * 35 cm y un espesor de 0.5 cm la cual corresponde a una sección con elementos esbeltos y que el relleno de hormigón le proporcione resistencia al pandeo local de las placas de la columna.



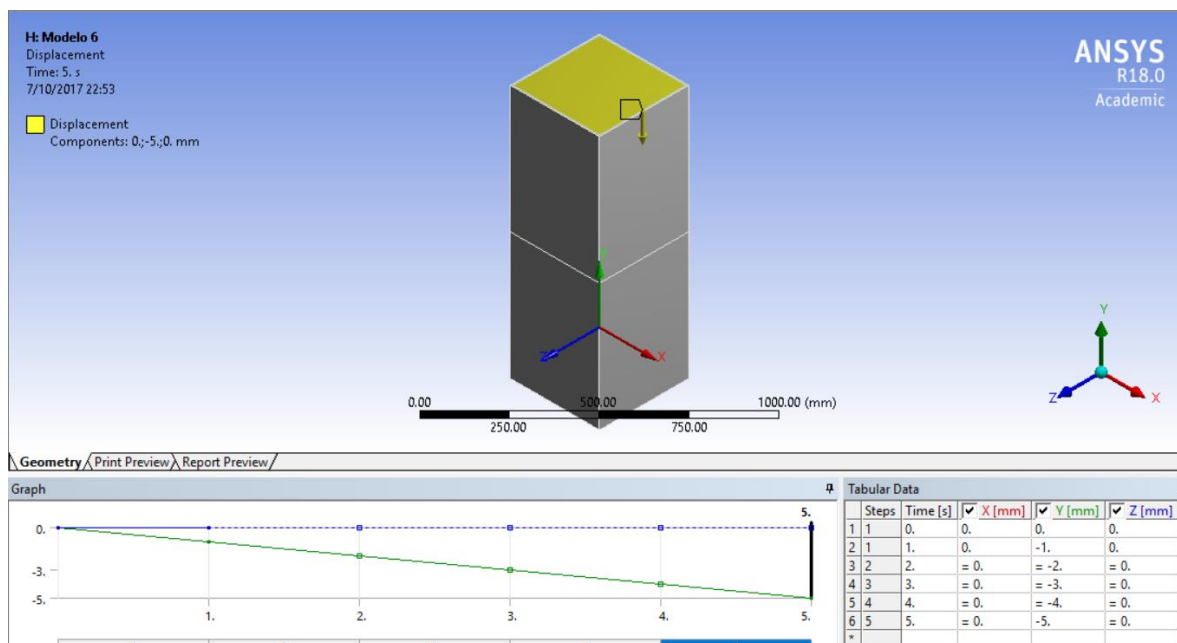
6.3.3.- Mallado Del Cuerpo

El mallado que genera el programa muestra una buena calidad de elementos por lo que no es necesario una configuración más avanzada, el número de nodos creado son de 11567 mientras que el número de elementos es de 1885, un cantidad relativamente baja y suficiente para obtener resultados aproximados a que posteriormente se verificarán mediante la especificación AISC.



6.3.4.- Restricciones y Cargas

La plastificación también es considerada con la activación de la opción Large Deflections, en la parte inferior se define un soporte fijo y se crean contactos entre superficies, de tal manera que la carga aplicada sea soportada tanto por el hormigón como por el acero estructural. El proceso de cálculo se desarrolla en 5 pasos y 5 mm, a una velocidad de 1s/mm.

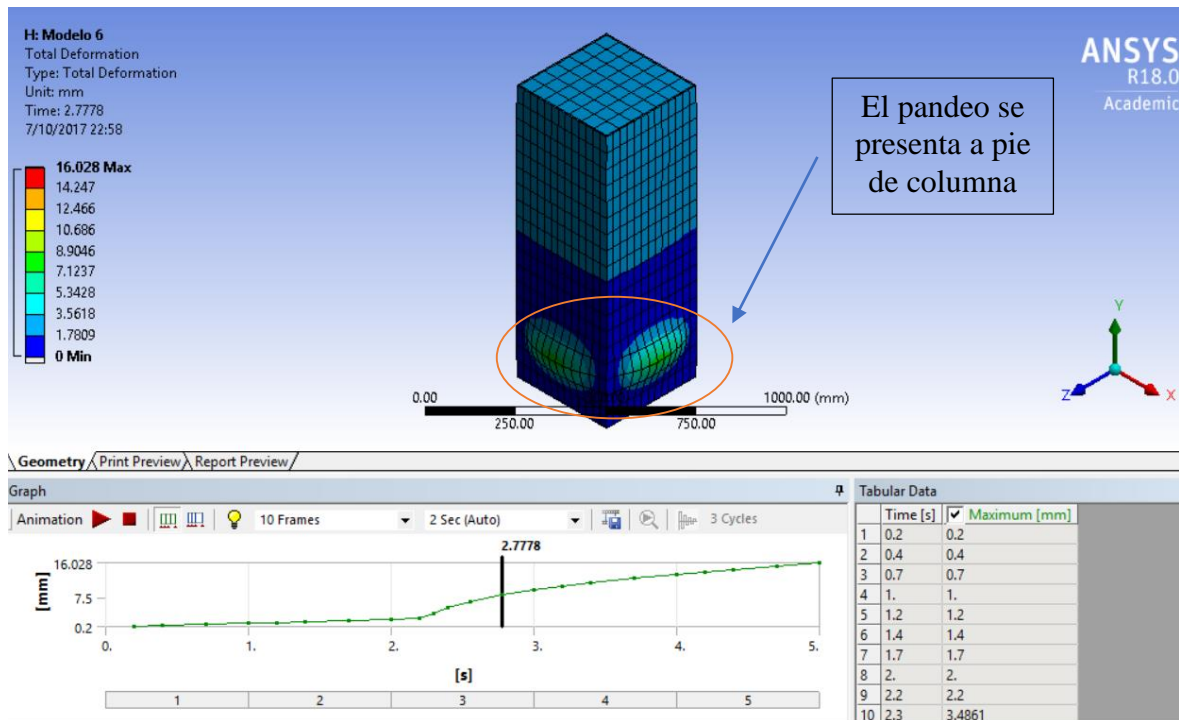


A diferencia de los modelos anteriormente presentados, en este modelo no se necesita añadir una imperfección pues el hormigón le proporciona soporte para que el pandeo no se produzca hacia dentro, pero si se permite que las placas pandeen.

6.3.5.- Resultados

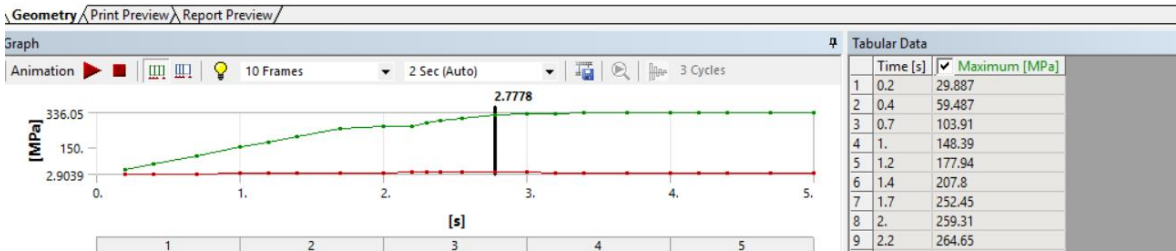
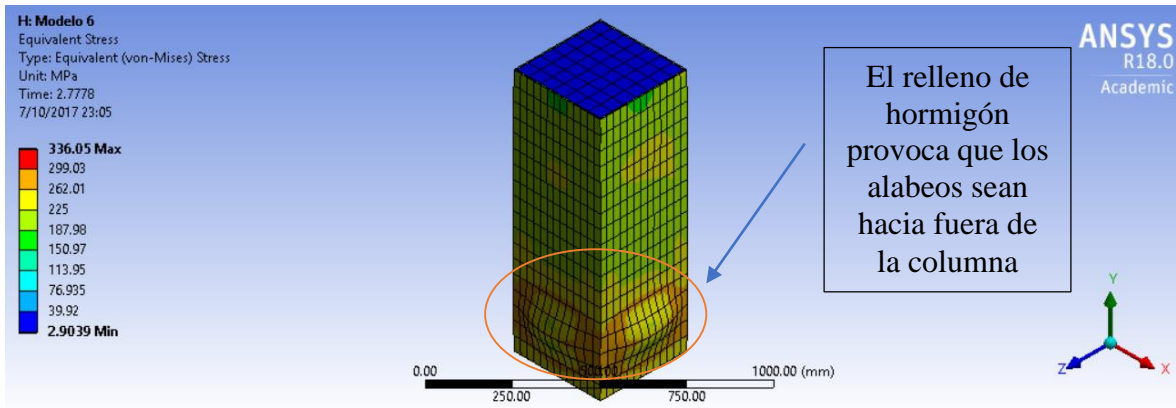
6.3.5.1.- Deformación total

En los resultados de deformación total podemos observar claramente que existe un instante en el cual la columna presenta pandeo local, en el segundo 2.2 existe un salto en el comportamiento y donde aparecen los alabeos.



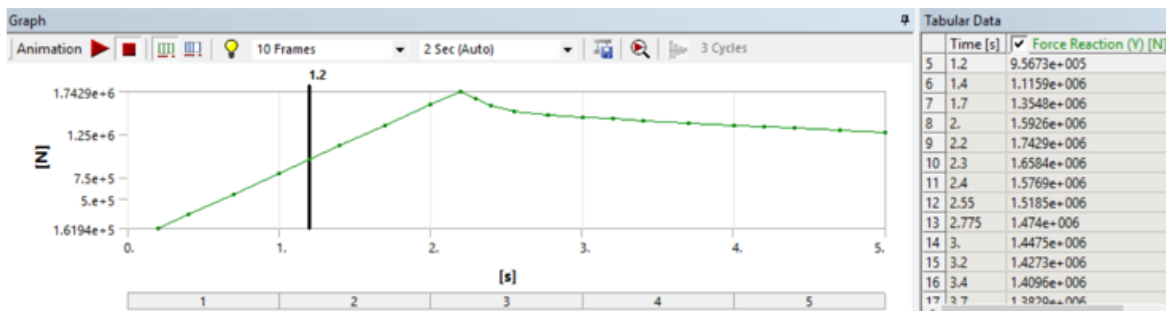
6.3.5.2.- Esfuerzo Total Equivalente

La siguiente ilustración nos muestra resultados de esfuerzos de las placas de la columna, el esfuerzo del hormigón no es mostrado, pero el comportamiento de ambos será mejor analizado en los resultados de reacción de cada uno de estos elementos.

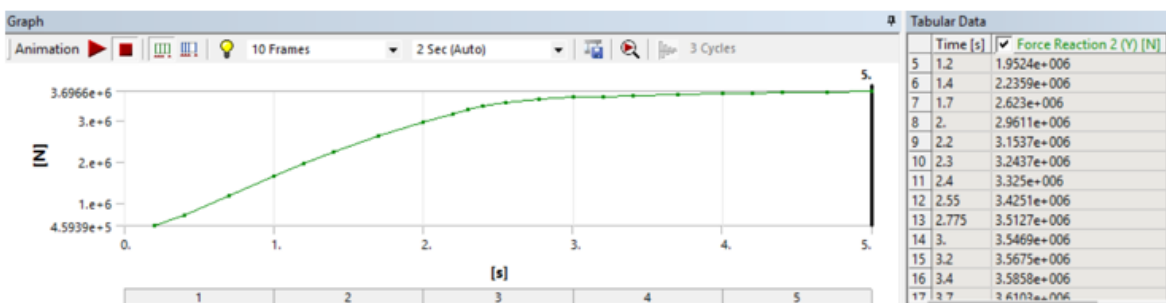


6.3.5.3.- Reacción en el Soporte Fijo

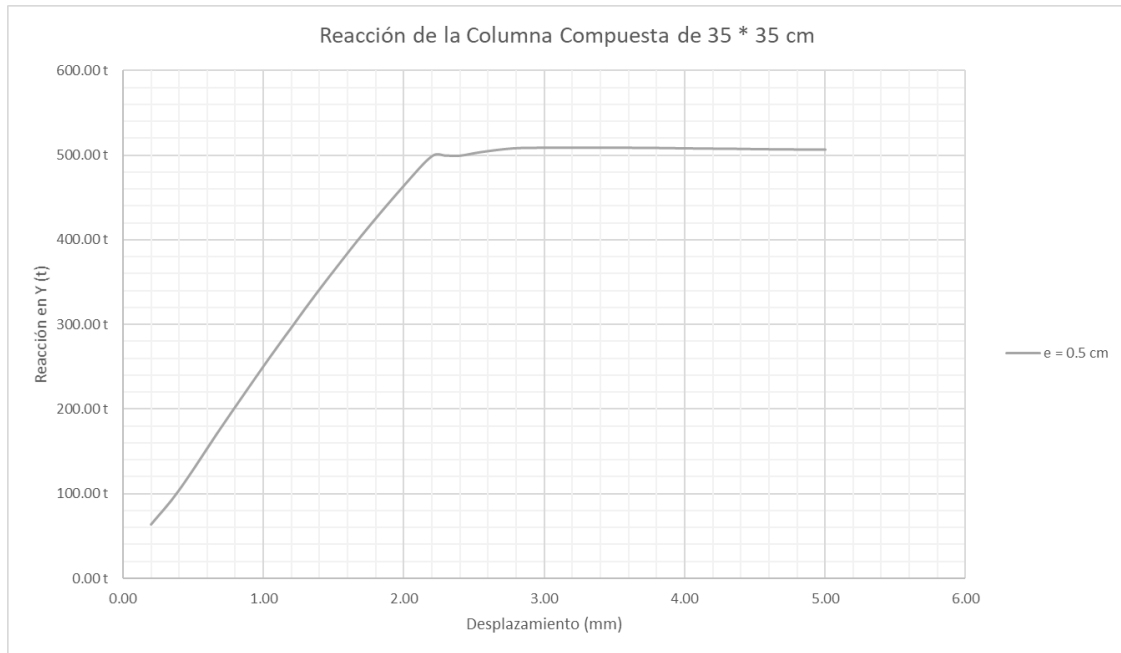
El programa registra la resistencia de cada uno de los elementos que forman la sección por separado, el resultado total de la sección compuesta es la suma de ambas reacciones.



Reacción del Acero



Reacción del Hormigón



6.3.6.- Resistencia a la compresión de Columnas Compuestas

Datos de la Sección Compuesta

As =	69.00 cm ²
Asr =	0.00 cm ²
Ac =	1156.00 cm ²
f'c =	310.00 kg/cm ²
Fy =	2530.00 kg/cm ²
Es =	2038735.98 kg/cm ²
Ec =	264206.93 kg/cm ²
C2 =	0.85
% As/Ac =	6%

(c) Para Secciones Esbeltas

$$F_{cr} = \frac{9.0E}{\left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (12 - 10)$$

$$F_{cr} = 3744.62 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{no} = F_{cr}A_s + 0.7f'_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (12 - 9e)$$

$$P_{no} = 509230.58 \text{ kg}$$

$$P_{no} = 509.23 \text{ t}$$

6.3.7.- Comparación de Resultados

Los resultados conseguidos con Ansys y los obtenidos por la Especificación AISC son muy similares, siendo que en el programa nos muestra la resistencia máxima de la sección compuesta de 500 t mientras que mediante AISC este valor es de 509.23 t con una diferencia de 1.85 %, lo que nos indica que los resultados son aproximados y con cierto grado de confiabilidad. Como se esperaba desde un inicio, los alabeos de la columna cambiaron de sentido, siendo que todos estos se produjeron hacia fuera de la columna pues el hormigón impide que sea por dentro.

6.3.8.- Otros Resultados

Datos de la Sección Compuesta

As =	136.00 cm ²
Asr =	0.00 cm ²
Ac =	1089.00 cm ²
f'c =	310.00 kg/cm ²
Fy =	2530.00 kg/cm ²
Es =	2038735.98 kg/cm ²
Ec =	264206.93 kg/cm ²
C2 =	0.85
% As/Ac =	12%

(b) Para Secciones No Compactas

$$P_y = F_y A_s + 0.7 f'_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (12 - 9d)$$

$$P_y = 580393.00 \text{ kg}$$

$$\lambda = 5.00 \sqrt{E/F_y}$$

$$\lambda = 42.30$$

$$\lambda_r = 3.00 \sqrt{E/F_y}$$

$$\lambda_r = 85.16$$

$$\lambda_p = 2.26\sqrt{E/F_y}$$

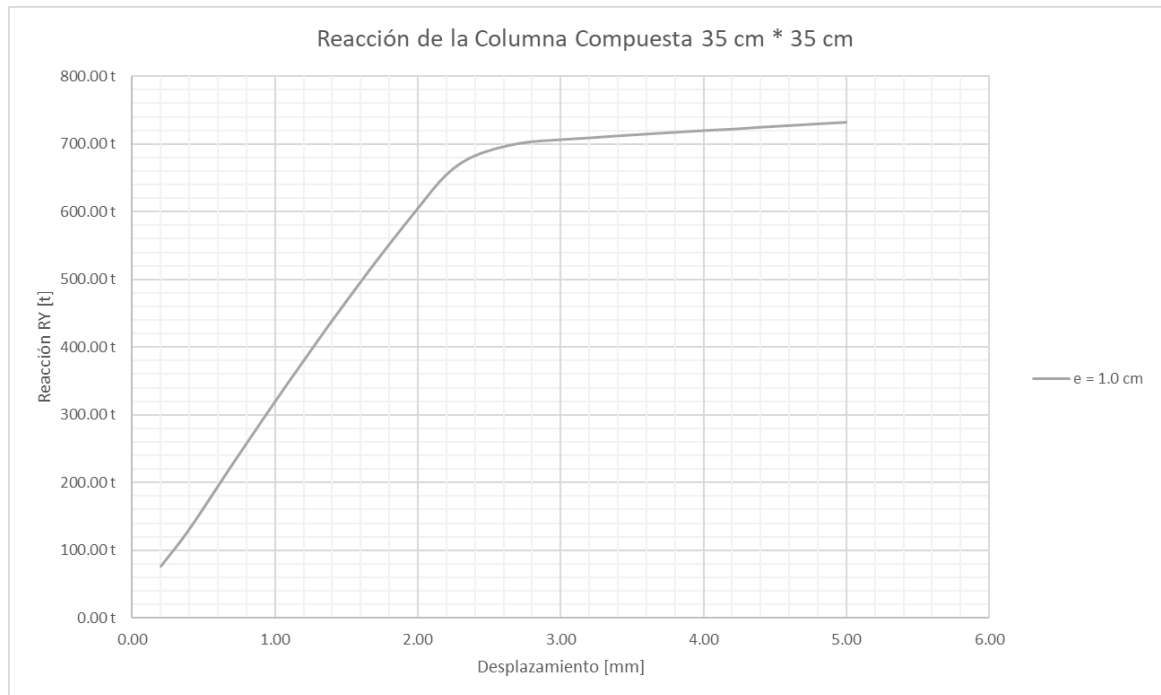
$$\lambda_p = 64.15$$

$$P_{no} = P_p - \frac{P_p - P_y}{(\lambda_r - \lambda_p)^2} (\lambda - \lambda_p)^2 \quad (12 - 9c)$$

$$P_{no} = 576203.95 \text{ kg}$$

$$P_{no} = 576.20 \text{ t}$$

Resultado de Ansys



Para columnas de sección compuesta con elementos compactos la carga obtenida por Ansys es de 654 t, mientras que el calculada fue de 576.2 t.

Datos de la Sección Compuesta

As =	264.00 cm ²
Asr =	0.00 cm ²
Ac =	961.00 cm ²
f'c =	310.00 kg/cm ²
fy =	2530.00 kg/cm ²
Es =	2038735.98 kg/cm ²
Ec =	264206.93 kg/cm ²
C2 =	0.85
% As/Ac =	27% > 1%

(a) Para Secciones Compactas

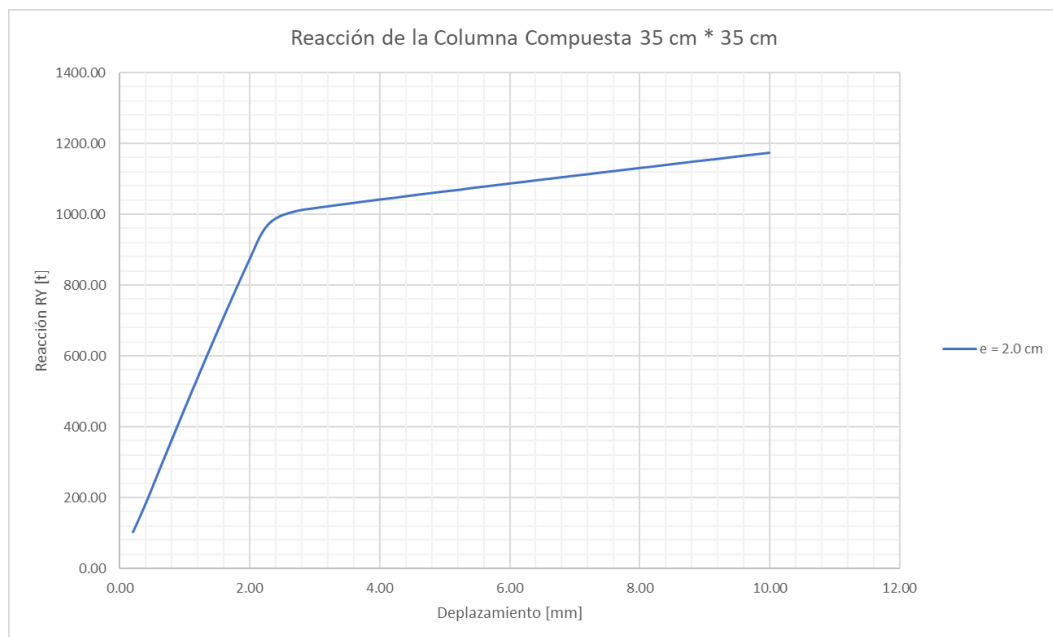
$$P_{no} = P_p \quad (12 - 9a)$$

$$P_p = F_y A_s + C_2 f'_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (12 - 9b)$$

$$P_{no} = 921143.50 \text{ kg}$$

$$P_{no} = 921.14 \text{ t}$$

Resultado de Ansys



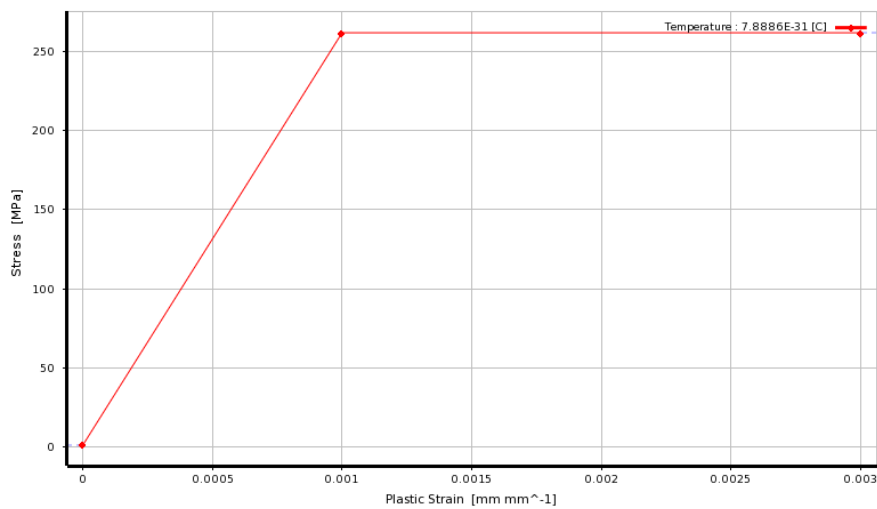
Para columnas de sección compuesta con elementos sísmicamente compactos, la carga obtenida por Ansys es de 952 t, mientras que el calculada fue de 921.14 t.

6.4.- Modelación de Columnas a Flexión

6.4.1.- Asignación de Material

El material que se utiliza para este modelo será el mismo que utilizamos para columnas rectangulares huecas en compresión que es el de Acero A36 con $F_y = 250 = 2530 \text{ kg/cm}^2$ con una curva Esfuerzo – Deformación Unitaria bilineal como se muestra continuación. La curva ha sido cambiada a propósito en este modelo, pues así es más fácil observar en el pandeo de la columna.

Curva Esfuerzo-Deformación Unitaria Acero ASTM A 36



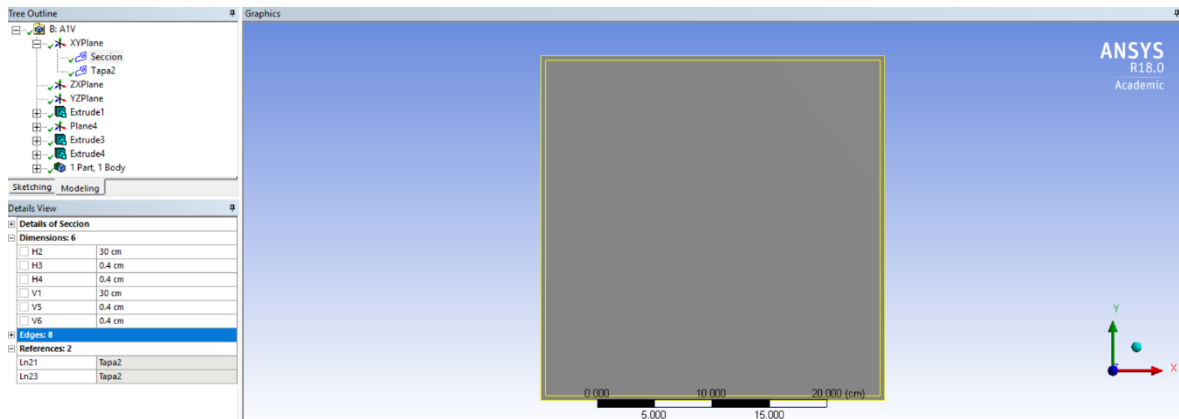
B	C
Plastic Strain (mm mm ⁻¹)	Stress (MPa)
0	1
0.001	262
0.003	262

Propiedades Mecánicas del Acero ASTM A36

Properties of Outline Row 9: Structural Steel_2					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus and Poiss...			
6	Young's Modulus	2E+11	Pa		
7	Poisson's Ratio	0.3			
8	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa		
9	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa		
10	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular			
11	Scale	1			
12	Offset	0	MPa		
13	Specific Heat	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹		

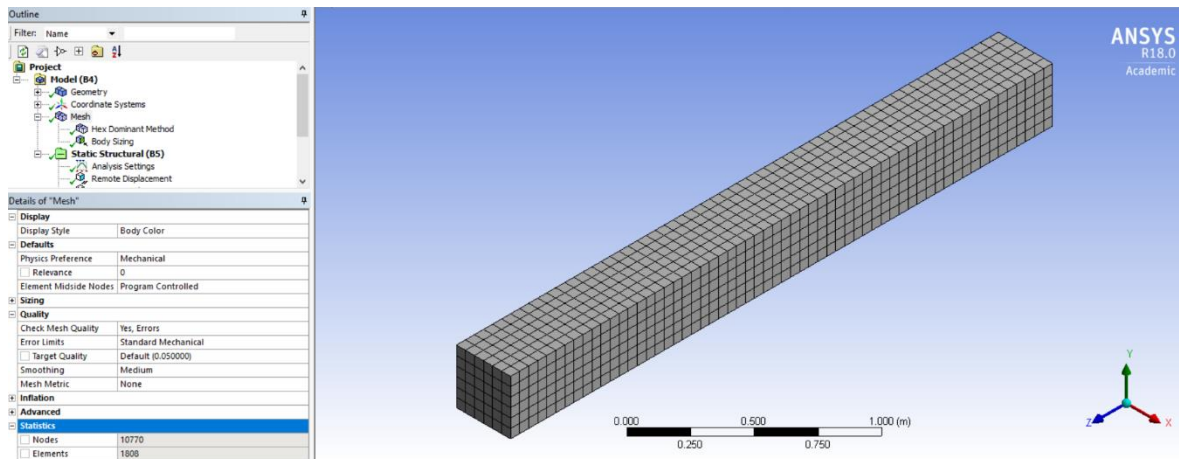
6.4.2.- Propiedades Geométricas de la Columna

En modelos iniciales al definir una sección hueca, el pandeo se concentraba en los extremos de las placas por lo que se decidió añadir placas que eviten este efecto en ambos extremos, la dimensión de la sección es de 30 cm * 30 cm y un espesor de 0.4 cm, además la longitud de la columna es de 3 m. Para fines prácticos y convencionales, la columna fue orientada de forma horizontal, por lo que a partir de ahora se presentará a la columna de esta manera.



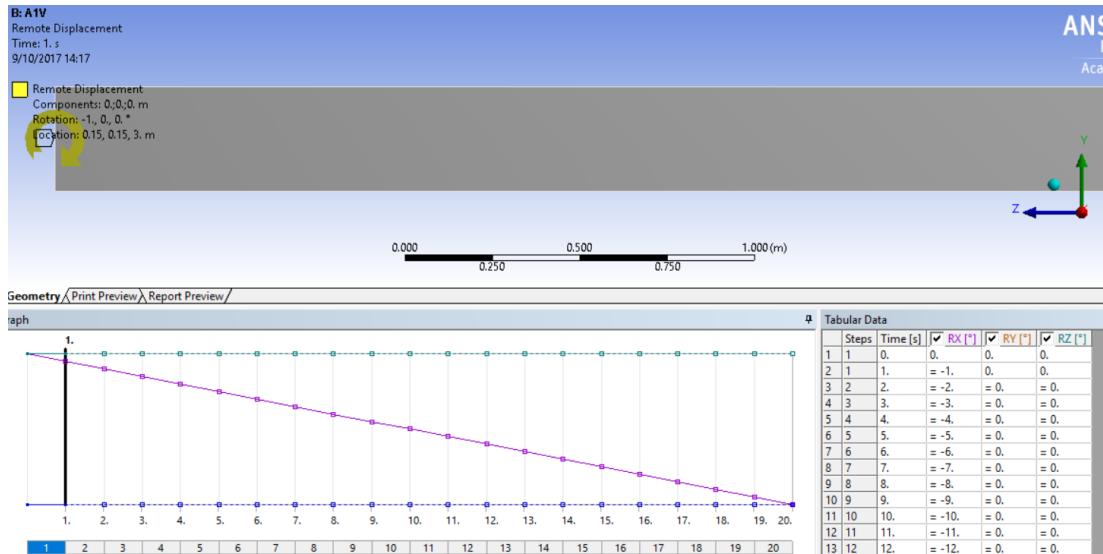
6.4.3.- Mallado Del Cuerpo

El proceso muestra un total de 10 770 nodos y 1808 elementos creados, fue necesario configurar el mallado con método de elementos hexagonales y un tamaño aproximado de 0.5 cm por arista del elemento ya que la configuración básica no mostraba una buena calidad de elementos.



6.4.4.- Restricciones y Cargas

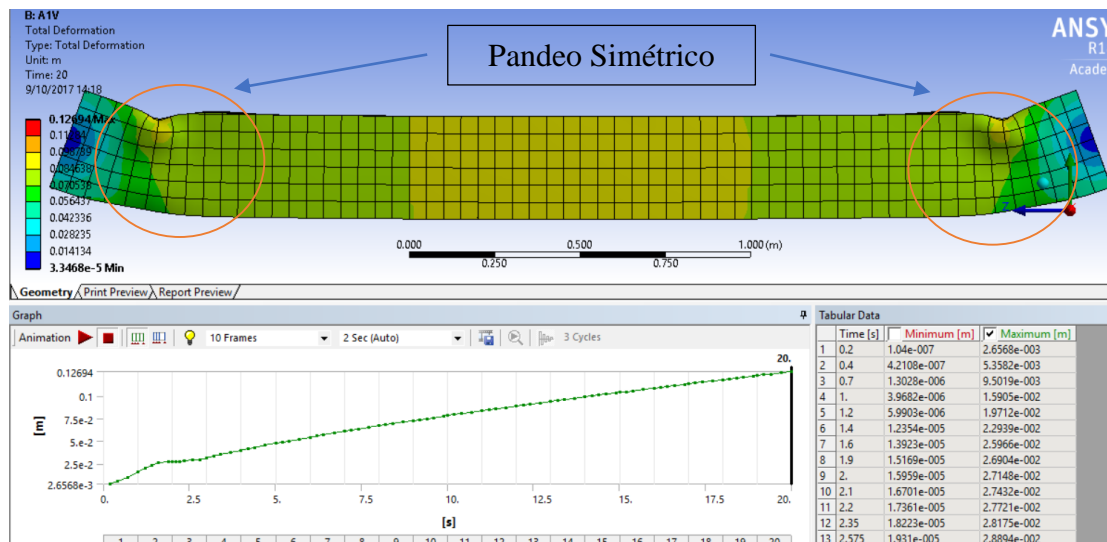
Al igual que los otros modelos, se activa la opción Large Deflections para considerar la plasticidad, en cada uno de sus extremos se aplica un giro positivo de 1° por cada paso y 20 pasos para tener un registro amplio de resultados, también se registrará el Momento actuante en las caras de los extremos de la columna.



6.4.5.- Resultados

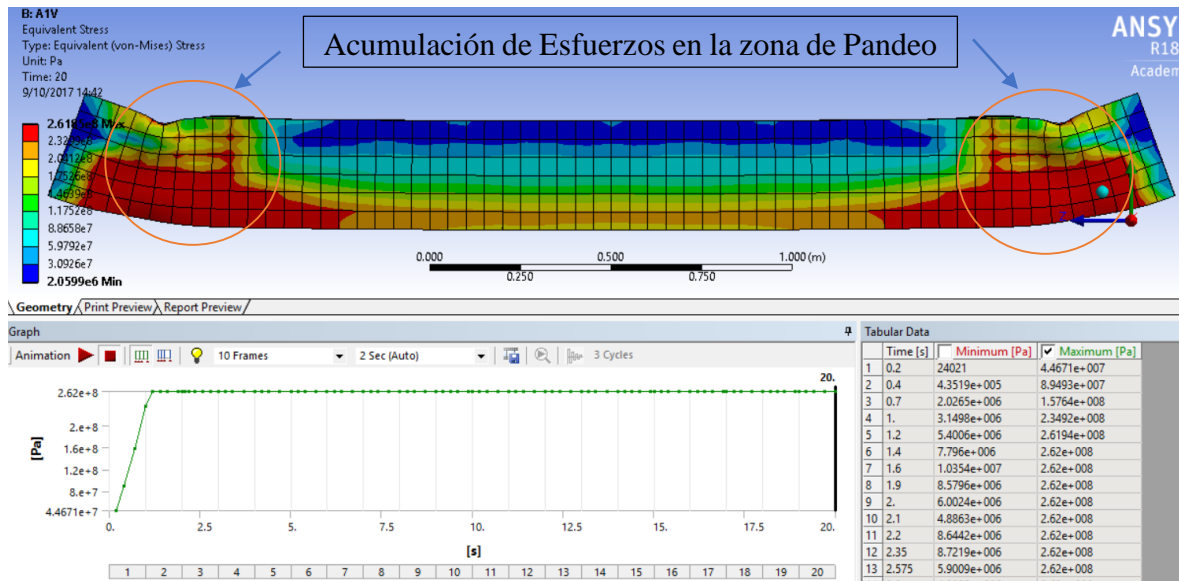
6.4.5.1.- Deformación total

En la siguiente gráfica de deformación podemos observar que alrededor del paso 2 existe un comportamiento no lineal, es aquí donde la columna comienza a pandear en ambos extremos simétricamente.



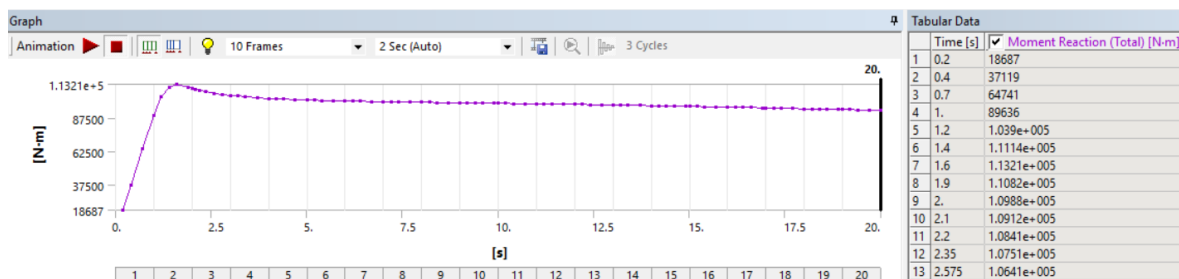
6.4.5.2.- Esfuerzo Total Equivalente

Podemos observar que el resultado de esfuerzo total llega a un máximo de 260 Mpa, es aquí donde se encuentra la plasticidad se produce y se mantiene así mientras se siga cargando al elemento.



6.4.5.3.- Reacción en los extremos

En esta ocasión se tomó la reacción de una de sus caras para poder observar el comportamiento de la columna a lo largo de la carga de rotación, el momento máximo que resiste la columna antes de pandear es de $1.312 \cdot 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$, a pesar de que la curva muestra una gran deformación, existen un rango hasta el cual se considera como valor útil.



6.4.6.- Resistencia a flexión de Columnas

6.4.6.1.- AISC 306-10

Los parámetros con los que podemos comparar nuestra sección son, el momento y rotación que soporta la sección con los valores límites de M_y Momento de fluencia y M_p Momento plástico mejor detallados en el Capítulo 4, sección 4.4.

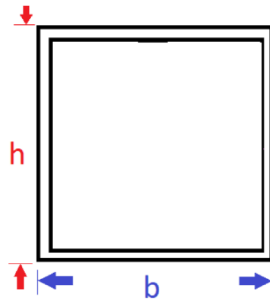
Calculo de M_y y M_p

$$M_y = 0.7 * F_y * S_x$$

$$M_y = 80116.04 \text{ N*m}$$

$$M_p = F_y * Z_x$$

$$M_p = 130482.01 \text{ N*m}$$



Dimensiones de la Sección

$$b = 30.00 \text{ cm}$$

$$h = 30.00 \text{ cm}$$

$$e = 0.40 \text{ cm}$$

Propiedades Geométricas

$$A_t = 47.36 \text{ cm}^2$$

$$I_t = 6917.09 \text{ cm}^4$$

$$c_{gx} = 15.00 \text{ cm}$$

$$c_{zx} = 11.10 \text{ cm}$$

$$S_x = 461.14 \text{ cm}^3$$

$$Z_x = 525.73 \text{ cm}^3$$

6.4.6.2.- AISI S100-07

b =	30.00 cm	w =	29.20 cm
e =	0.40 cm	t =	0.40 cm
K =	0.7	kp =	4.00
E =	2038735.98 kg/cm ²	Fy =	2530.00 kg/cm ²
L =	100.00 cm	u =	0.3
A =	47.36 cm ²	I =	6917.085867

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad \text{Eq. C4.1.1 - 1}$$

$$F_e = 599758.11 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda_c = \sqrt{F_y / F_e} = 0.06$$

$$0.06 < 1.50$$

$$F_n = (0.658^{\lambda c^2}) * F_y \quad \text{Eq. C4.1-2}$$

$$F_n = 2525.54 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w}\right)^2 \quad \text{Eq. B2.1 - 5}$$

$$F_{cr} = 1383.10 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda = \sqrt{f / F_{cr}} \quad \text{Eq. B2.1 - 4}$$

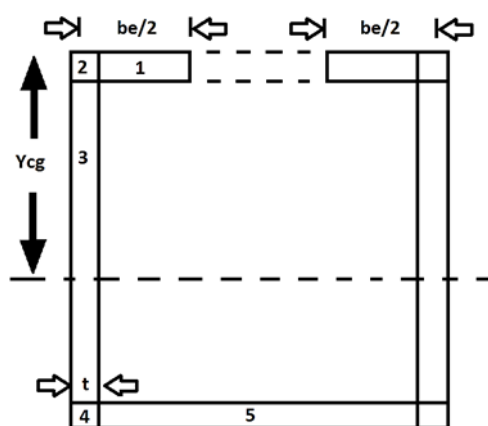
$$\lambda = 1.35$$

$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right)}{\lambda} \quad \text{Eq. B2.1 - 3}$$

$$\rho = 0.62$$

$$w\rho = 18.08 \text{ cm} = b_e$$

Sección Equivalente



Elemento	Longitud Efectiva	Dist. del centroide del elem. a la fibra superior	Producto	$L y^2$
n°	L	y	Ly	
1	18.08 cm	0.20 cm	3.62 cm ²	0.72 cm ³
2	0.80 cm	0.20 cm	0.16 cm ²	0.03 cm ³
3	58.40 cm	15.00 cm	876.00 cm ²	13140.00 cm ³
4	0.80 cm	29.80 cm	23.84 cm ²	710.43 cm ³

5	29.20 cm	29.80 cm	870.16 cm ²	25930.77 cm ³
Total	107.28 cm	75.00 cm	1773.78 cm ²	39781.96 cm ³

$$y_{cg} = \frac{\sum L y}{\sum L} = \frac{1773.78 \text{ cm}^2}{107.28 \text{ cm}} = \mathbf{16.53 \text{ cm}}$$

$$f_1 = 2530.00 \text{ kg/cm}^2 \quad \frac{16.13 \text{ cm}}{16.53 \text{ cm}} = 2468.79 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_2 = -2530.00 \text{ kg/cm}^2 \quad \frac{13.07 \text{ cm}}{16.53 \text{ cm}} = -1999.23 \text{ kg/cm}^2$$

$$\psi = |f_2/f_1| \quad \text{Eq. B2.3 - 1}$$

$$\psi = 0.81$$

$$k = 4 + 2(1 + \psi)^3 + 2(1 + \psi) \quad \text{Eq. B2.3 - 2}$$

$$k = 19.48$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w}\right)^2 \quad \text{Eq. B2.1 - 5}$$

$$F_{cr} = 6733.99 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda = \sqrt{f/F_{cr}} \quad \text{Eq. B2.1 - 4}$$

$$\lambda = 0.61 < 0.673$$

$$b = w \quad \text{Eq. B2.1 - 1}$$

$$b'e = 29.20 \text{ cm}$$

$$b_1 = b_e/(3 + \psi) \quad \text{Eq. B2.3 - 3}$$

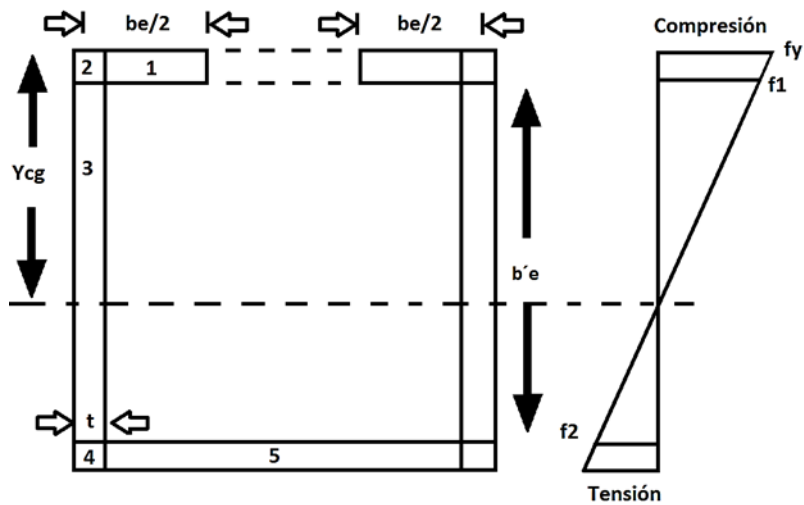
$$b_1 = 7.66 \text{ cm}$$

$$b_2 = b_e/2 \quad \text{Eq. B2.3 - 4}$$

$$b_2 = 14.60 \text{ cm}$$

$$b_1 + b_2 = 22.26 \text{ cm} > 16.13 \text{ cm}$$

El elemento a compresión trabaja completamente en todo su ancho efectiva como se muestra en la siguiente Ilustración.



Inercia Efectiva de la Sección

Elemento	Inercia = $b \cdot h^3 / 12$
I1	0.096 cm ⁴
I2	0.004 cm ⁴
I3	1659.806 cm ⁴
I4	0.004 cm ⁴
I5	0.156 cm ⁴
<i>It = I total</i>	<i>1660.067 cm⁴</i>

$$I_x = I_t + \sum (Ly^2) (t) - \left(\sum L \right) (y_{cg})^2 * (t)$$

$$I_x = 5841.53 \text{ cm}^4$$

$$S_e = I_x / Y_{cg}$$

$$S_e = 353.30 \text{ cm}^3$$

$$M_n = S_e F_y \quad \text{Eq. C3.1.1 - 1}$$

$$M_n = 893837.95 \text{ kg*cm}$$

$$M_n = 87685.50 \text{ N*m}$$

$$M_y = 0.7 * M_n$$

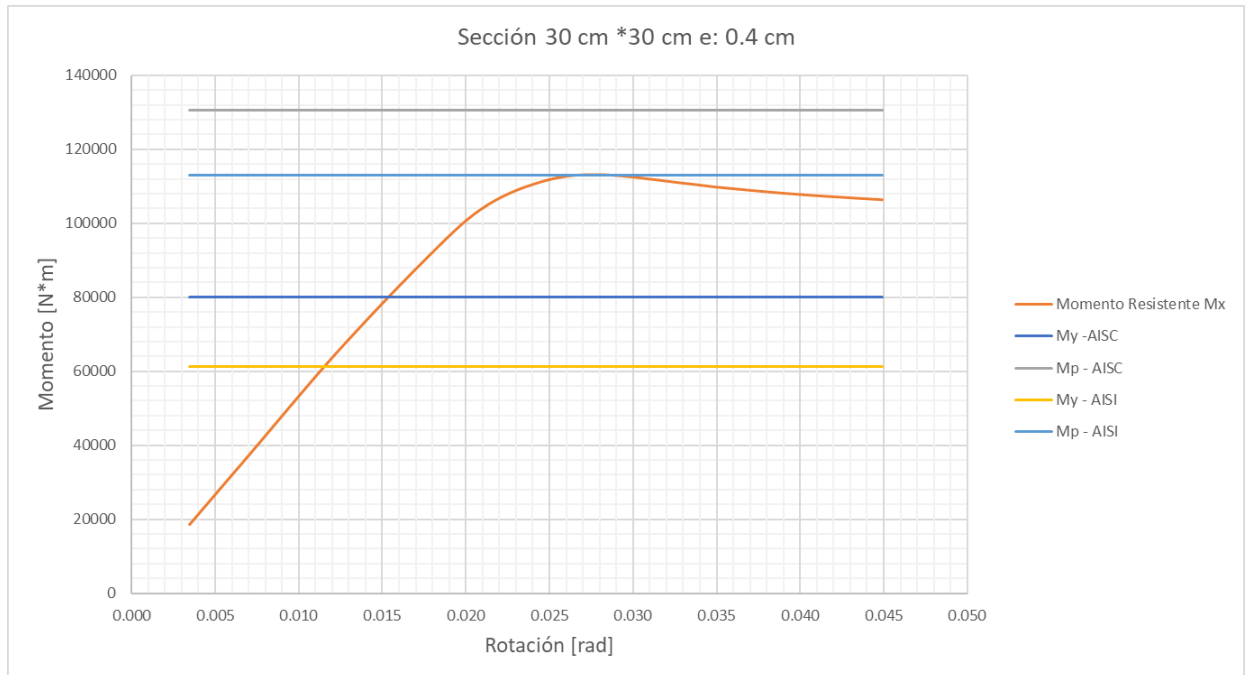
$$M_y = 61379.85 \text{ N*m}$$

$$Z_e = \sum A_i * d_i$$

$$Z_e = 454.94 \text{ cm}^3$$

$$M_p = 1151005.01 \text{ kg*cm}$$

$$M_p = \mathbf{112913.59 \text{ N*m}}$$

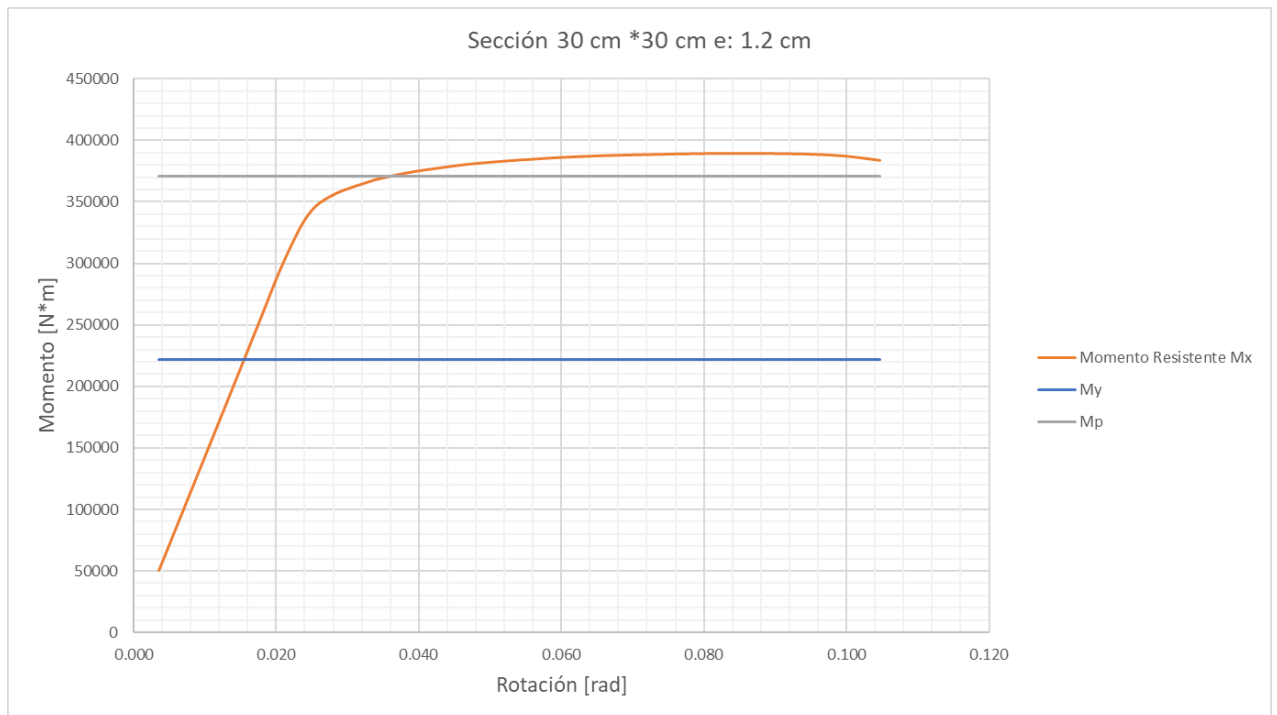


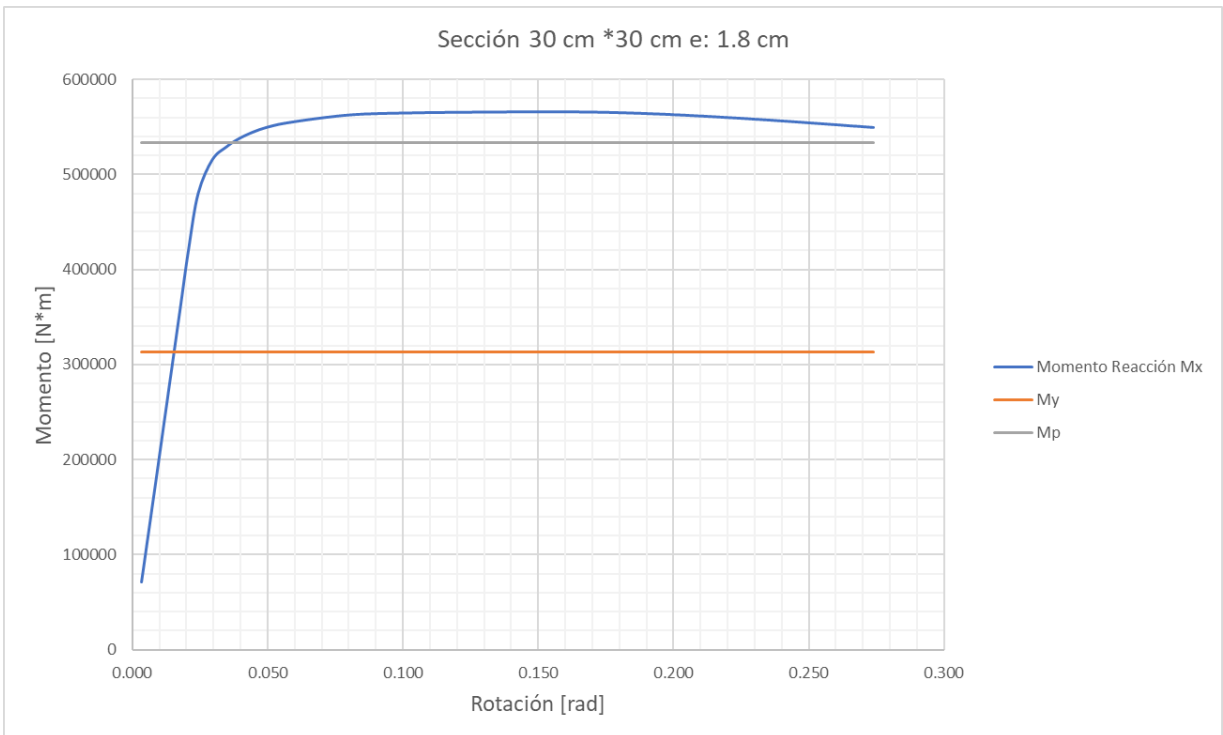
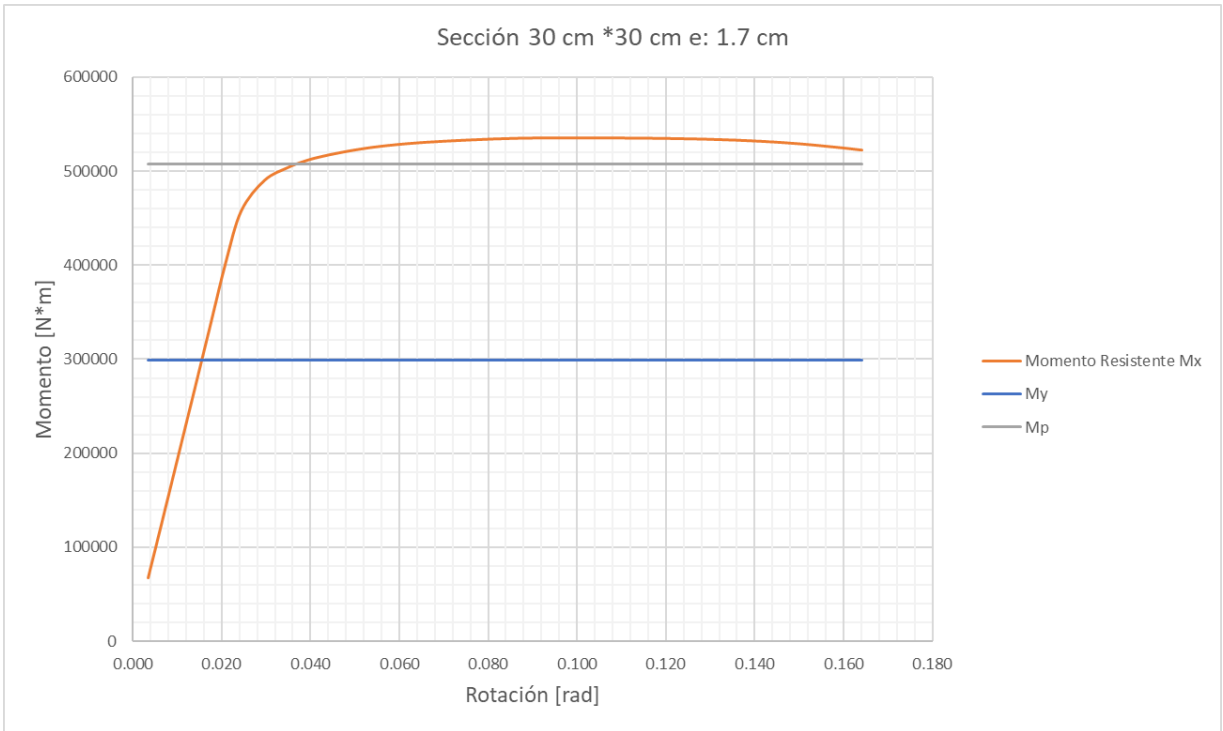
De aquí en adelante las gráficas estarán mostradas con los límites de momento de acuerdo con la especificación AISC 360-10.

6.4.7.- Comparación de Resultados

Para esta comparación elegiremos los modelos de columnas con dimensiones de 30 cm * 30 cm y espesores de 0.4, 1.2, 1.7 y 1.8 cm correspondientes a una columna esbelta, no compacta, compacta y sísmicamente compacta respectivamente. A medida que vamos aumentando el espesor de la sección vemos varias diferencias en su comportamiento, entre estos comportamientos vemos que la plastificación de cada una de estas columnas es cada vez más abrupta a medida que se aumenta el espesor, la segunda es obviamente que aumenta su Momento resistente y la tercera es que cada columna soporta más ángulo de flexión antes de fallar. Estos resultados son más apreciables en la gráfica que agrupa estos 4 comportamientos simultáneamente y semejante al comportamiento del Anexo E.

La norma AISI S100-07 indica un valor M_n (momento nominal) como momento resistente de la sección, pero los momentos M_y (Momento de fluencia) y M_{crd} (Momento crítico de pandeo) nos son más útiles pues son estos valores los que podemos comparar con la especificación AISC 360-10, que presentan una pequeña diferencia en cuanto a sus resultados.



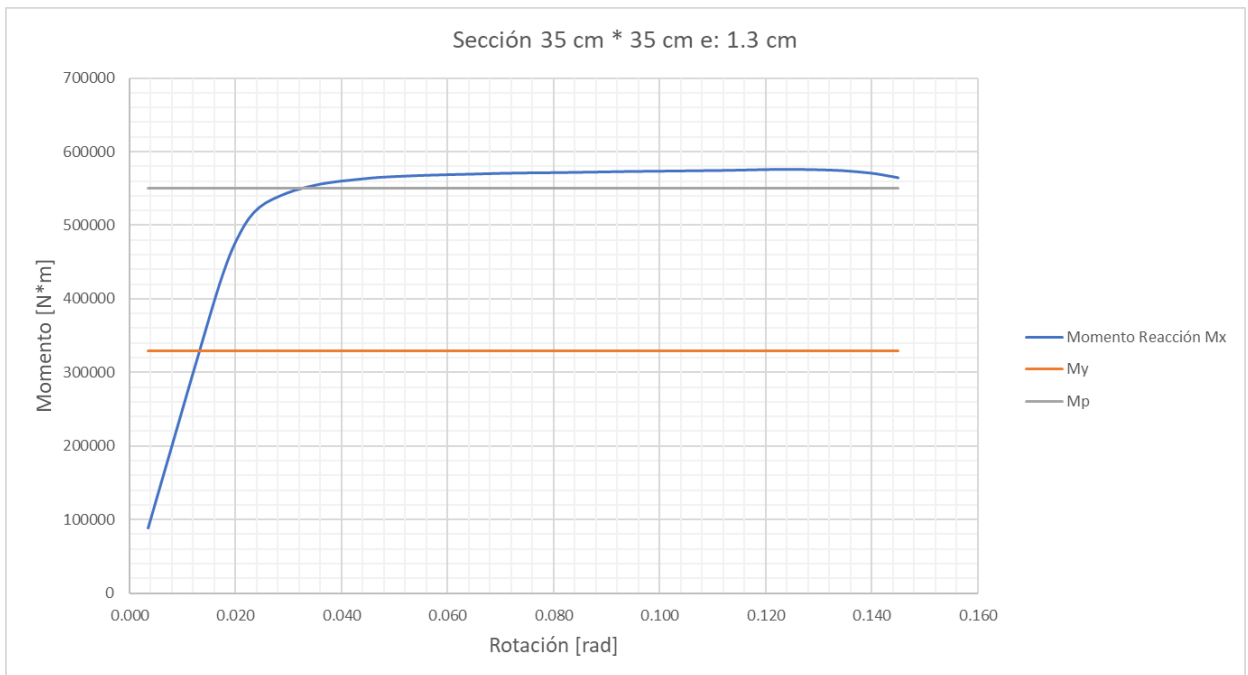
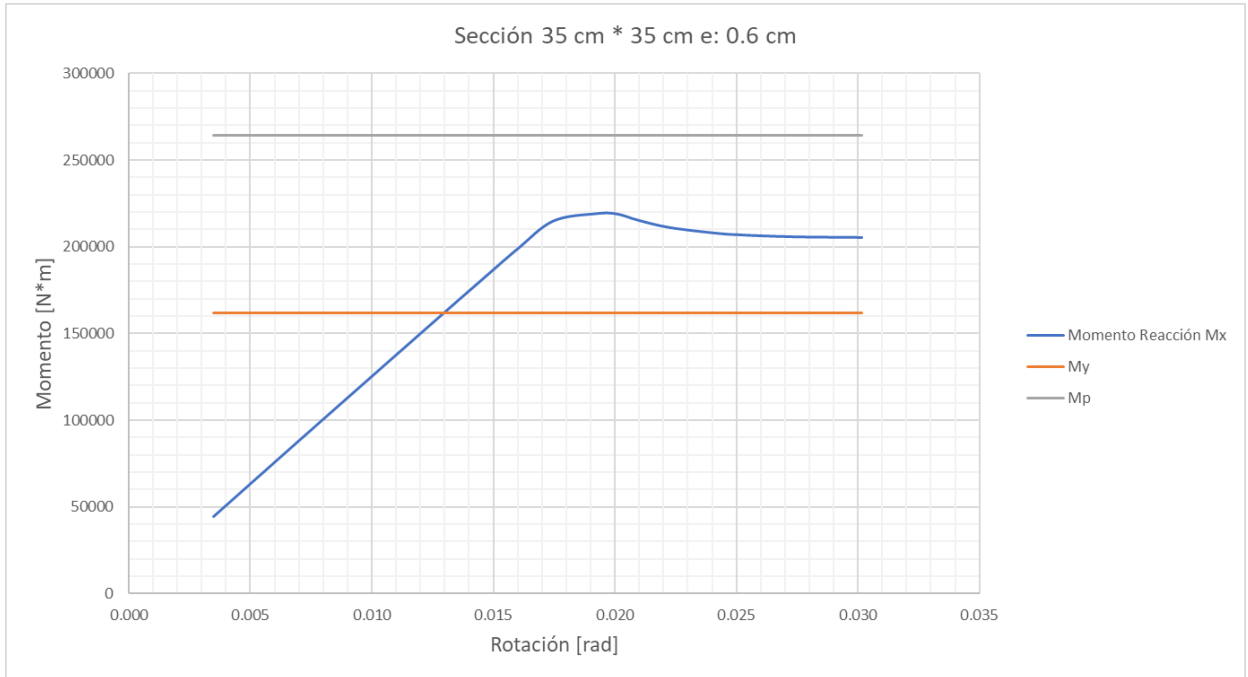


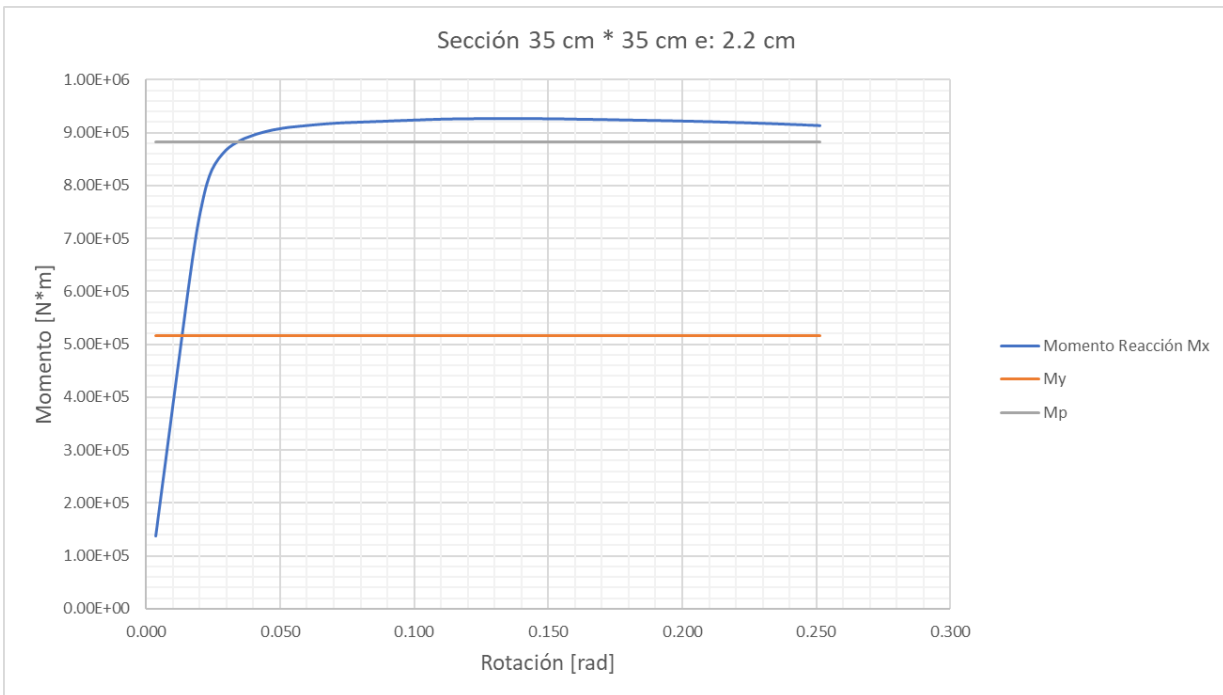
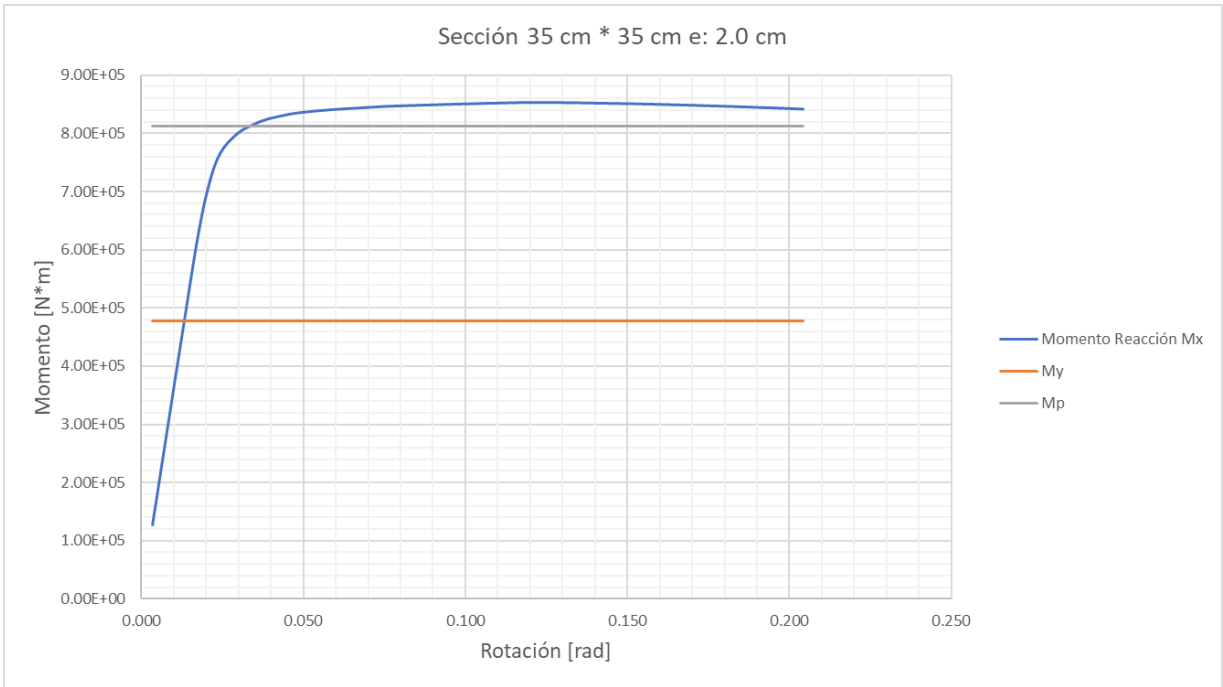
Comportamiento a flexión de una Columna 30 cm * 30 cm con diferente espesor



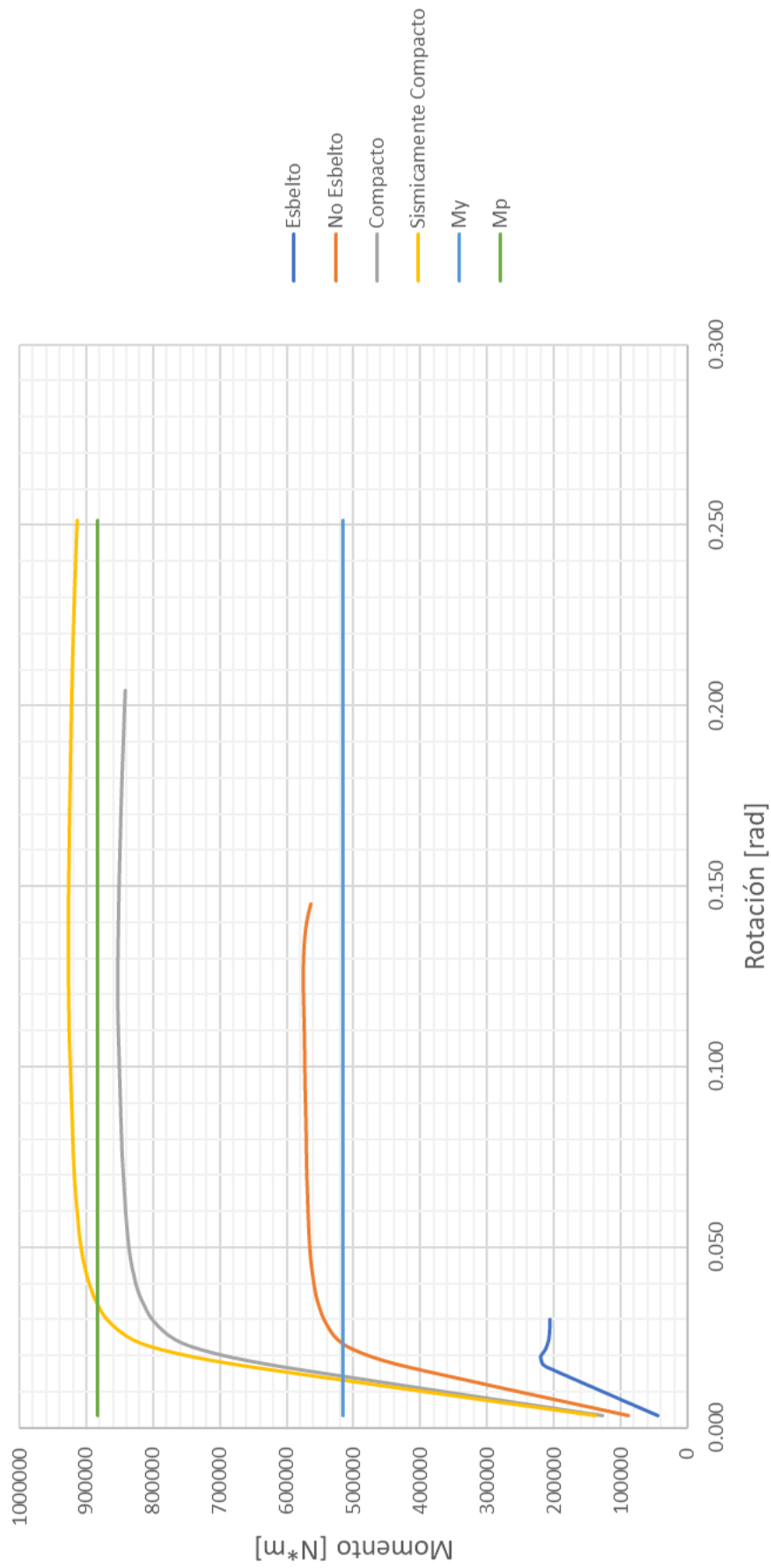
6.4.8.- Otros Resultados

Sección 35cm * 35 cm

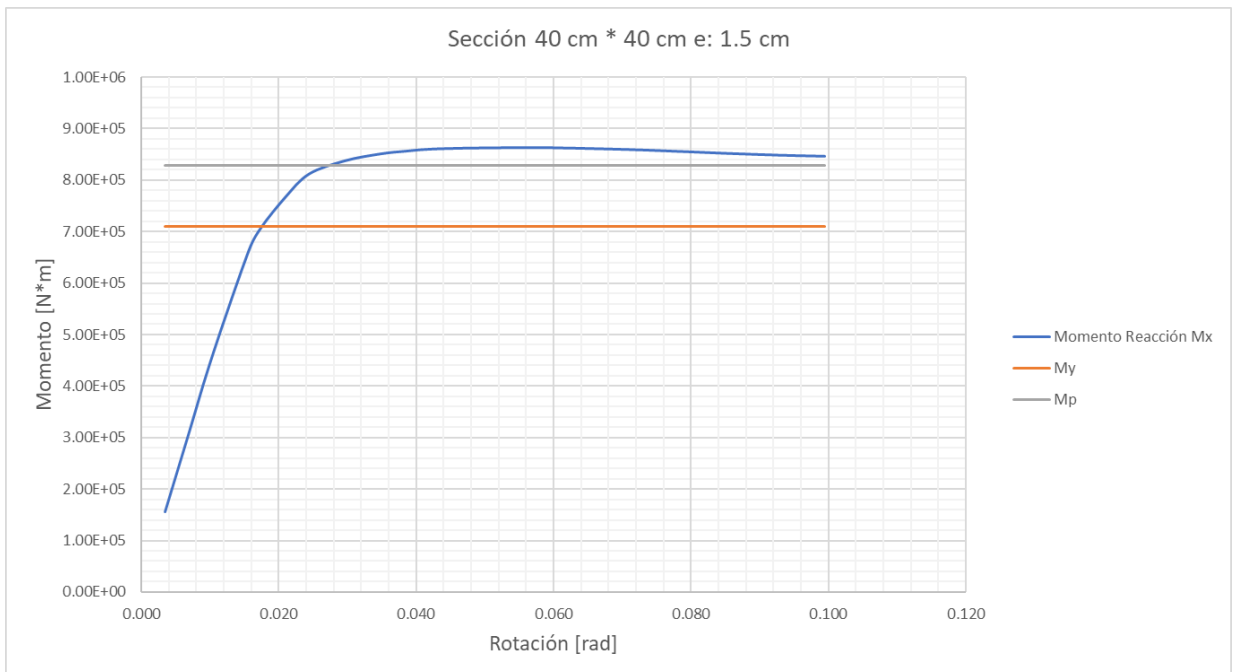
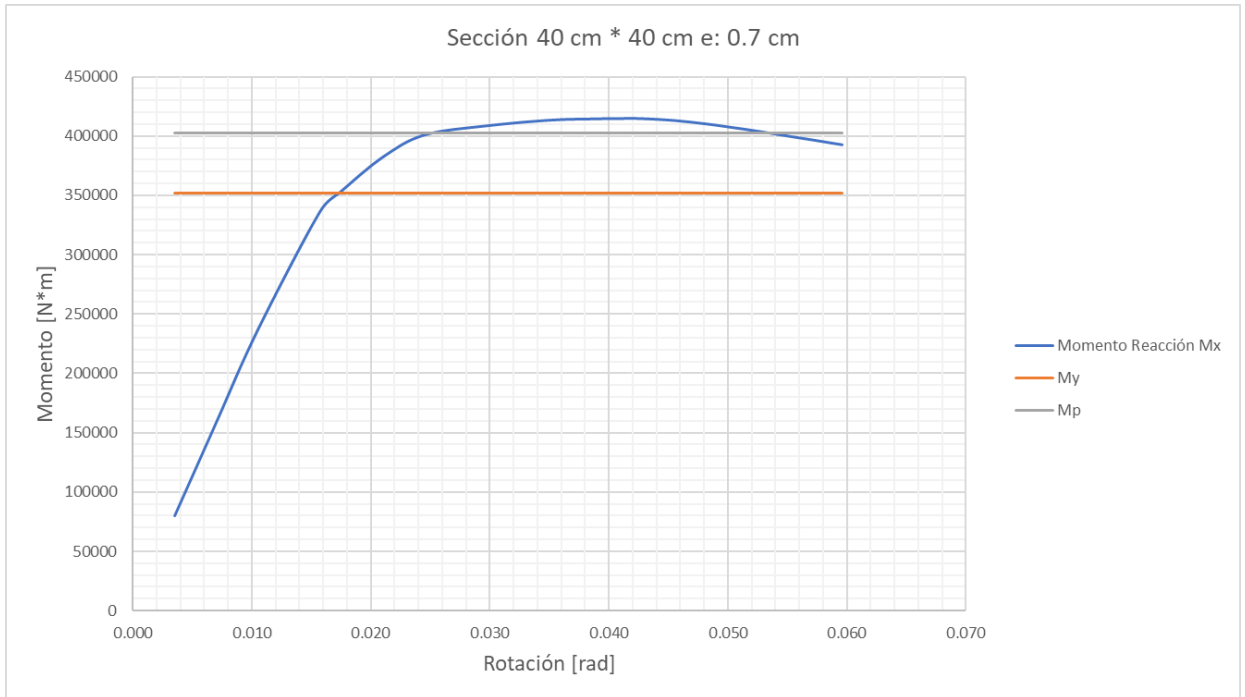


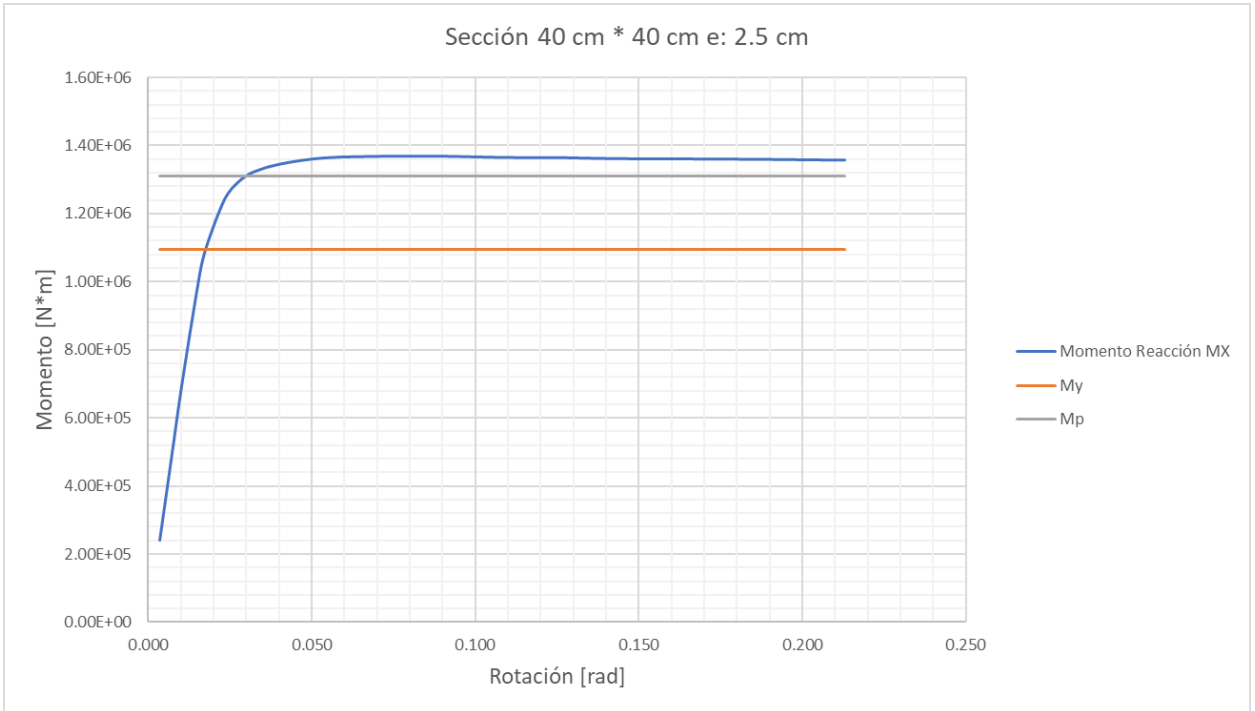
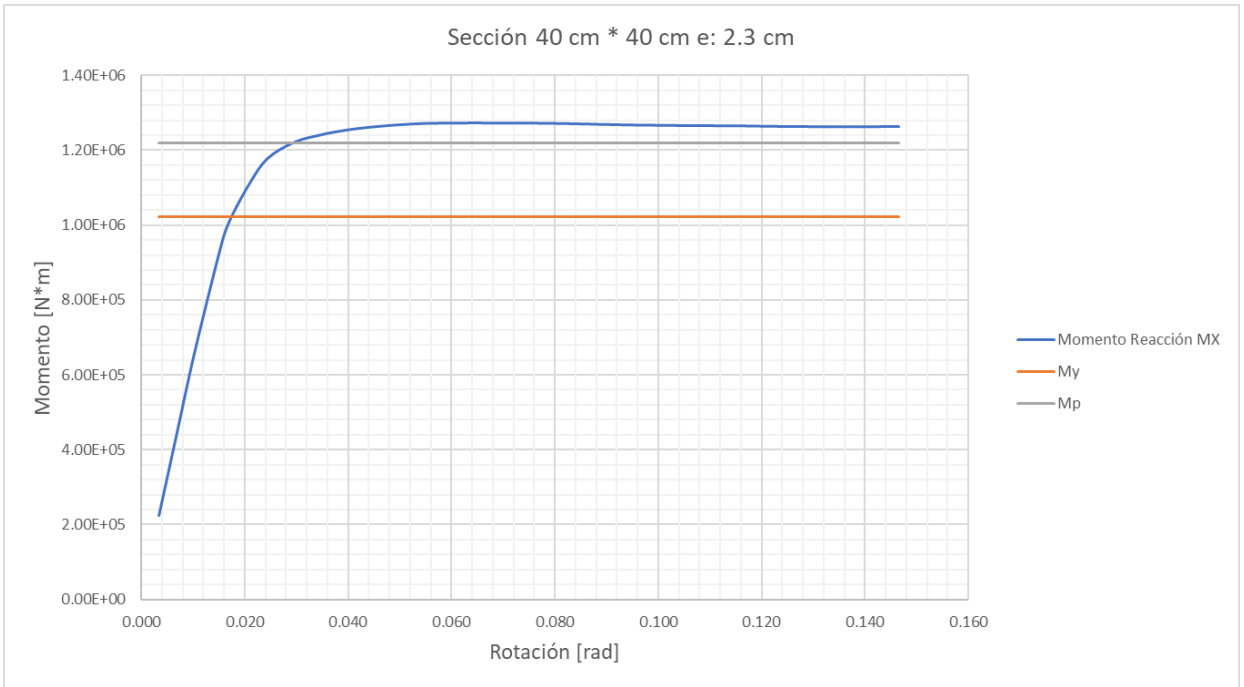


Comportamiento a flexión de una Columna 35 cm * 35 cm con diferentes espesores

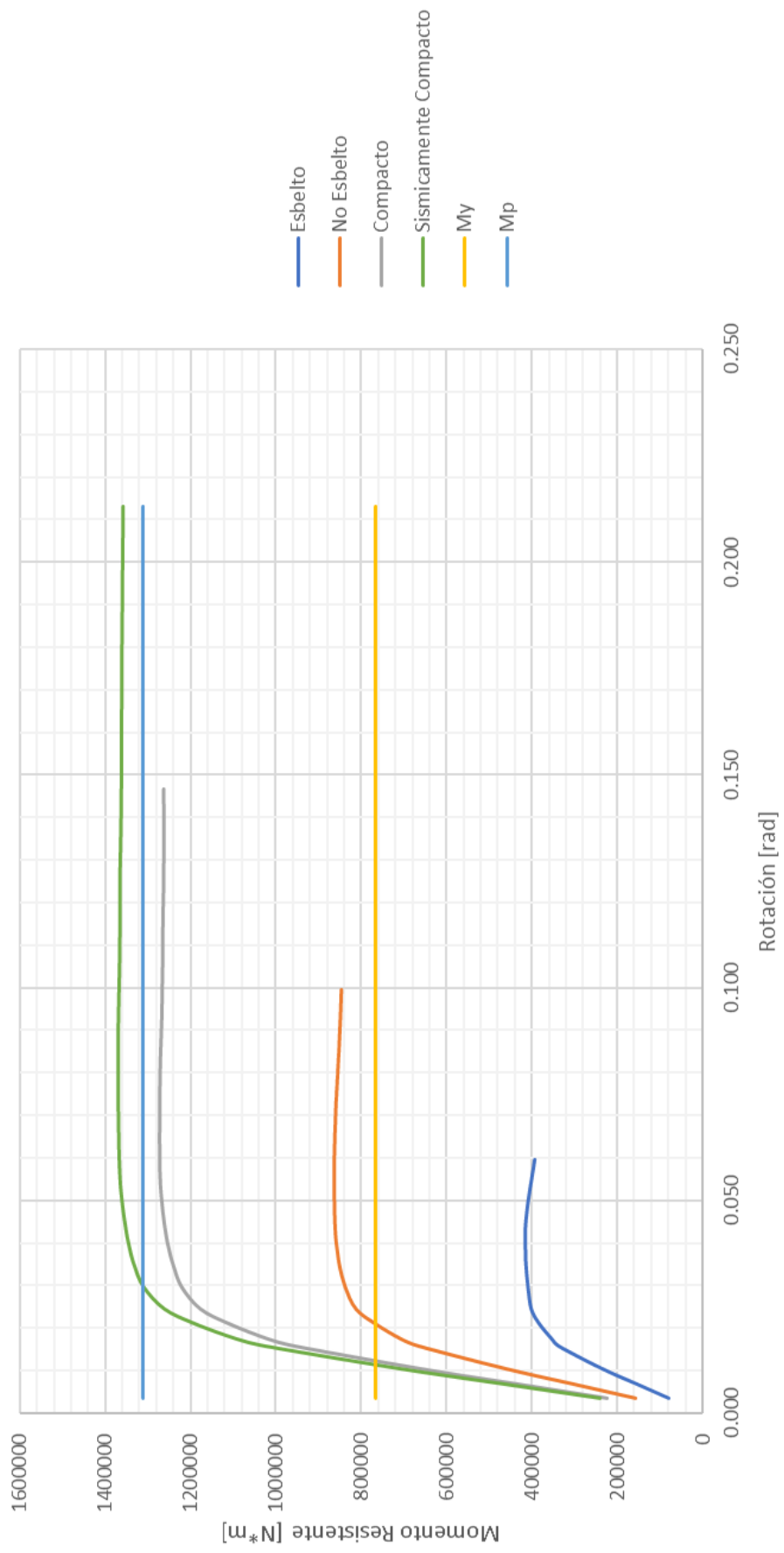


Sección 40cm * 40 cm





Comportamiento a flexión de una Columna 40 cm * 40 cm con diferentes espesores



6.5.- Modelación de Columnas con Atiesadores a Flexión

El proceso de modelación es similar al de la sección 6.4. y las propiedades mecánicas del material son las mismas por lo que esta sección se dedicará solamente a la presentación de resultados de columnas con atiesadores longitudinales sometidas a flexión usando ANSYS.

6.5.1.- Resultados

6.5.1.1.- Dimensiones Mínimas del Atiesador

Requerimientos mínimos del Atiesador

$$w = \quad \quad \quad b-2*t-ea = \quad 14.55$$

$$S = \quad 1.28*(E/Fy)^{0.5} = \quad 36.34$$

w/t	>	0.328 * S
48.5		11.92

Calcular Ia necesaria

$$I_{aa} = \quad 339*t^4 (w/(t*S)-0.328)$$

$$I_{aa} = \quad \quad \quad 3.30 \text{ cm}^4$$

$$I_{a \text{ máx}} = \quad t^4(155*w/(t*S)+5)$$

$$I_{a \text{ máx}} = \quad \quad \quad 1.28 \text{ cm}^4$$

$$I_a = \quad \quad \quad \min(I_{aa}, I_{a \text{ máx}})$$

$$I_a = \quad \quad \quad 1.28 \text{ cm}^4$$

$$I_a' = \quad \quad \quad \sqrt[3]{I_a*12/ea}$$

Ia'	<	Ia
3.72 cm		5.00 cm

Dimensión la suficiente para rigidizar

6.5.1.1.- AISC 360-10

Dimensiones de la Sección

$$b = 30.00 \text{ cm}$$

$$h = 30.00 \text{ cm}$$

$$e = 0.30 \text{ cm}$$

$$I_a = 5.00 \text{ cm}$$

Propiedades Geométricas

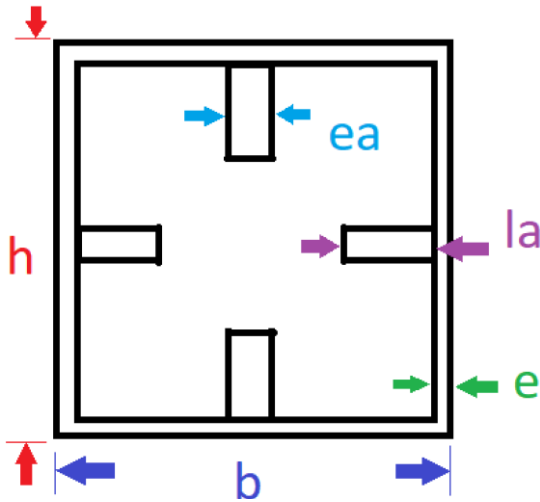
$$A = 41.64 \text{ cm}^2$$

$$I = 5692.94 \text{ cm}^4$$

$$c_{gx} = 15.00 \text{ cm}$$

$$c_{zx} = 11.50 \text{ cm}$$

$$ea = 0.30 \text{ cm}$$



$$S_x = 379.53 \text{ cm}^3$$

$$Z_x = 478.78 \text{ cm}^3$$

$$M_y = 0.7 * F_y * S_x$$

$$M_y = 65937.59 \text{ N*m}$$

$$M_p = F_y * Z_x$$

$$M_p = 118829.60 \text{ N*m}$$

6.5.1.2.- AISI S100-07

b =	30.00 cm	w =	29.40 cm
e =	0.30 cm	t =	0.30 cm
K =	0.7	kp =	0.50
E =	2038735.98 kg/cm ²	Fy =	2530.00 kg/cm ²
L =	100.00 cm	la =	5.00 cm
A =	41.64 cm ²	ea =	0.30 cm
Is =	5240.1492	u =	0.3
Ia =	452.7925	It =	5692.94 cm ⁴

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2}$$

$$F_e = 516770.35 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda_c = \sqrt{F_y / F_e} = 0.07$$

$$0.07 < 1.50$$

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) * F_y \quad \text{Eq. C4.1-2}$$

$$F_n = 2524.82 \text{ kg/cm}^2$$

$$c_g a = 0.54 \text{ cm}$$

$$I_{sp} = 10.82 \text{ cm}^4$$

$$\gamma_i = \frac{10.92 (I_{sp})_i}{b_o t^3} \quad Eq. B5.1.2 - 4$$

$$\gamma_i = 148.83$$

$$\omega_i = \sin\left(\pi \frac{c_i}{b_o}\right)^2 \quad Eq. B5.1.2 - 5$$

$$w_i = 1.00$$

$$\beta = \left(2 * \sum_{i=1}^n \gamma_i \omega_i + 1\right)^{1/4} \quad Eq. B5.1.2 - 3$$

$$\beta = 4.16$$

$$\delta_i = \frac{(As)_i}{b_o t} \quad Eq. B5.1.2 - 6$$

$$\delta_i = 0.17$$

$$k_d = \frac{(1 + \beta^2)^2 + 2 * \sum_{i=1}^n \gamma_i \omega_i}{\beta^2 (1 + 2 * \sum_{i=1}^n \delta_i \omega_i)} \quad Eq. B5.1.2 - 2$$

$$k_d = 27.28$$

$$R = \frac{11 - b_o/h}{5} \geq \frac{1}{2} \quad Eq. B5.1 - 6$$

$$R = 2.00$$

$$R k_d = 54.57$$

$$k_{loc} = 4 \left(\frac{b_o}{b_p}\right)^2 \quad Eq. B5.1.2 - 1$$

$$k_{loc} = 16.33$$

$$\mathbf{k = k_{loc} = 16.33}$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b_o}\right)^2 \quad Eq. B5.1 - 4$$

$$F_{cr} = 3133.39 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} \quad Eq. B5.1 - 3$$

$$\lambda = 0.90$$

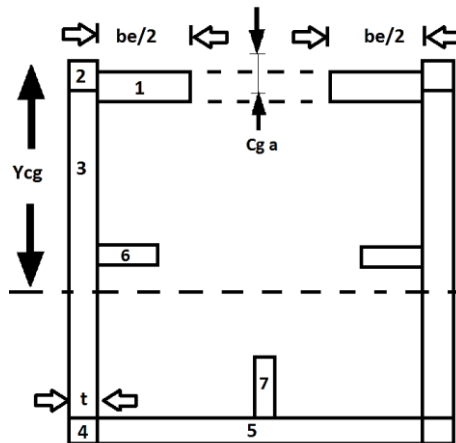
$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right)}{\lambda} \quad \text{Eq. B5.1 - 2}$$

$$\rho = 0.84$$

$$b_e = \rho \left(\frac{A_g}{t}\right) \quad \text{Eq. B5.1 - 1}$$

$$b_e = 28.91 \text{ cm}$$

Sección Equivalente



Elemento	Longitud Efectiva	Dist. del centroide del elem. a la fibra superior	Producto	L y ²
n°	L	y	Ly	
1	28.91 cm	0.54 cm	15.47 cm ²	8.28 cm ³
2	0.60 cm	0.15 cm	0.09 cm ²	0.01 cm ³
3	58.80 cm	15.00 cm	882.00 cm ²	13230.00 cm ³
4	0.60 cm	29.85 cm	17.91 cm ²	534.61 cm ³
5	29.40 cm	29.85 cm	877.59 cm ²	26196.06 cm ³
6	10.00 cm	15.00 cm	150.00 cm ²	2250.00 cm ³
7	5.00 cm	27.20 cm	136.00 cm ²	3699.20 cm ³

Total 133.31 cm 117.59 cm 2079.06 cm² 45918.17 cm³

$$y_{cg} = \frac{\sum L y}{\sum L} = \frac{2079.06 \text{ cm}^2}{133.31 \text{ cm}} = \mathbf{15.60 \text{ cm}}$$

$$f_1 = 2530.00 \text{ kg/cm}^2 \quad \frac{15.30 \text{ cm}}{15.60 \text{ cm}} = 2481.33 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_2 = -2530.00 \text{ kg/cm}^2 \quad \frac{14.10 \text{ cm}}{15.60 \text{ cm}} = -2288.06 \text{ kg/cm}^2$$

$$\psi = |f_2/f_1| \quad \text{Eq. B2.3 - 1}$$

$$\psi = 0.92$$

$$k = 4 + 2(1 + \psi)^3 + 2(1 + \psi) \quad \text{Eq. B2.3 - 2}$$

$$k = 22.05$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w}\right)^2 \quad \text{Eq. B2.1 - 5}$$

$$F_{cr} = 4229.90 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda = \sqrt{f/F_{cr}} \quad \text{Eq. B2.1 - 4}$$

$$\lambda = 0.77 > 0.673$$

$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right)}{\lambda} \quad \text{Eq. B2.1 - 3}$$

$$\rho = 0.93$$

$$b = \rho w \quad \text{Eq. B2.1 - 2}$$

$$b'e = 27.20 \text{ cm}$$

$$b_1 = b_e/(3 + \psi) \quad \text{Eq. B2.3 - 3}$$

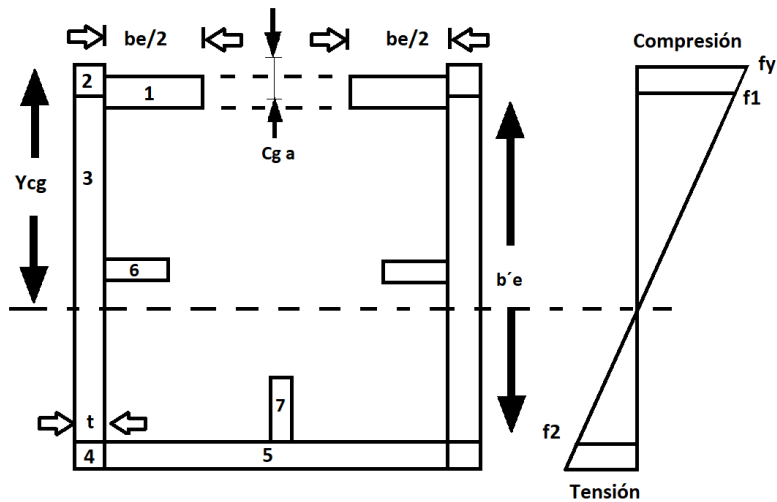
$$b_1 = 6.94 \text{ cm}$$

$$b_2 = b_e/2 \quad \text{Eq. B2.3 - 4}$$

$$b_2 = 13.60 \text{ cm}$$

$$b_1 + b_2 = 20.54 \text{ cm} > 15.30 \text{ cm}$$

El elemento a compresión trabaja completamente en todo su ancho efectivo $b'e$ como se muestra en la siguiente Ilustración.



Inercia Efectiva de la Sección

Elemento	Inercia = $b \cdot h^3 / 12$
I1	0.065 cm ⁴
I2	0.001 cm ⁴
I3	1270.609 cm ⁴
I4	0.001 cm ⁴
I5	0.066 cm ⁴
I6	0.023 cm ⁴
I7	3.125 cm ⁴
<i>It = I total</i>	<i>1273.891 cm⁴</i>

$$I_x = I_t + \sum (Ly^2) - \left(\sum L \right) (y_{cg})^2$$

$I_x = 5322.02 \text{ cm}^4$

$S_e = I_x / Y_{cg}$

$S_e = 341.25 \text{ cm}^3$

$M_n = S_e F_y$ Eq. C3.1.1 - 1

$M_n = 863360.97 \text{ kg} \cdot \text{cm}$

$M_n = 84695.71 \text{ N} \cdot \text{m}$

$M_y = 0.7 \cdot M_n$

$M_y = 59287.00 \text{ N} \cdot \text{m}$

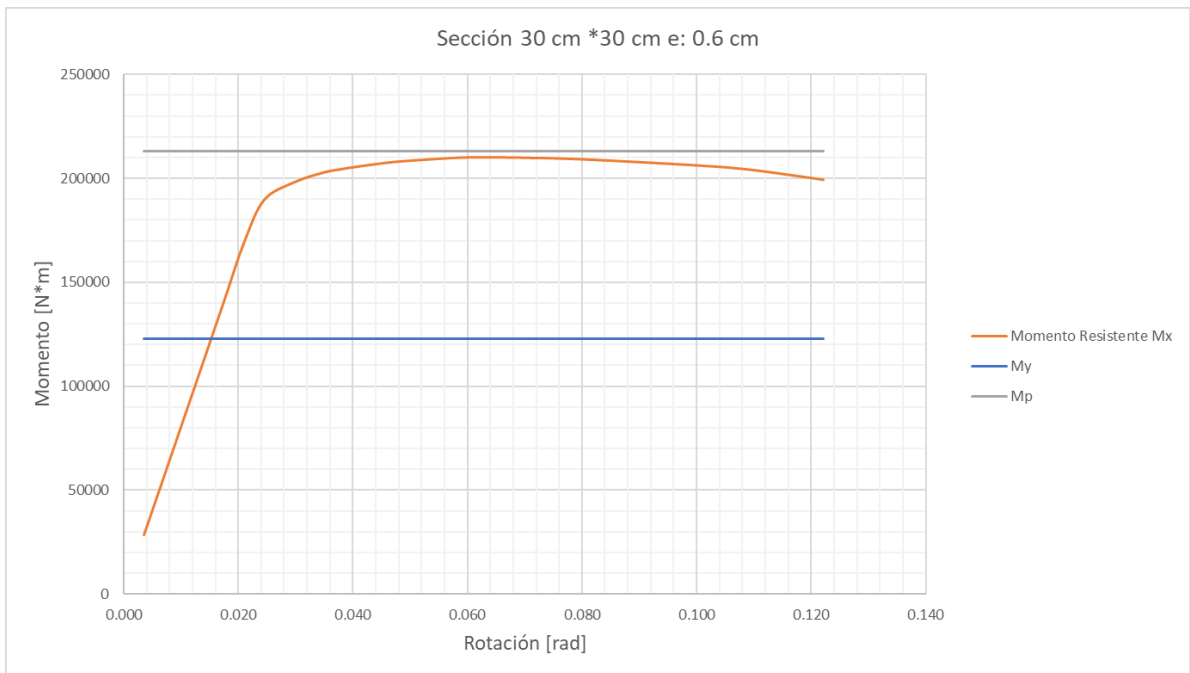
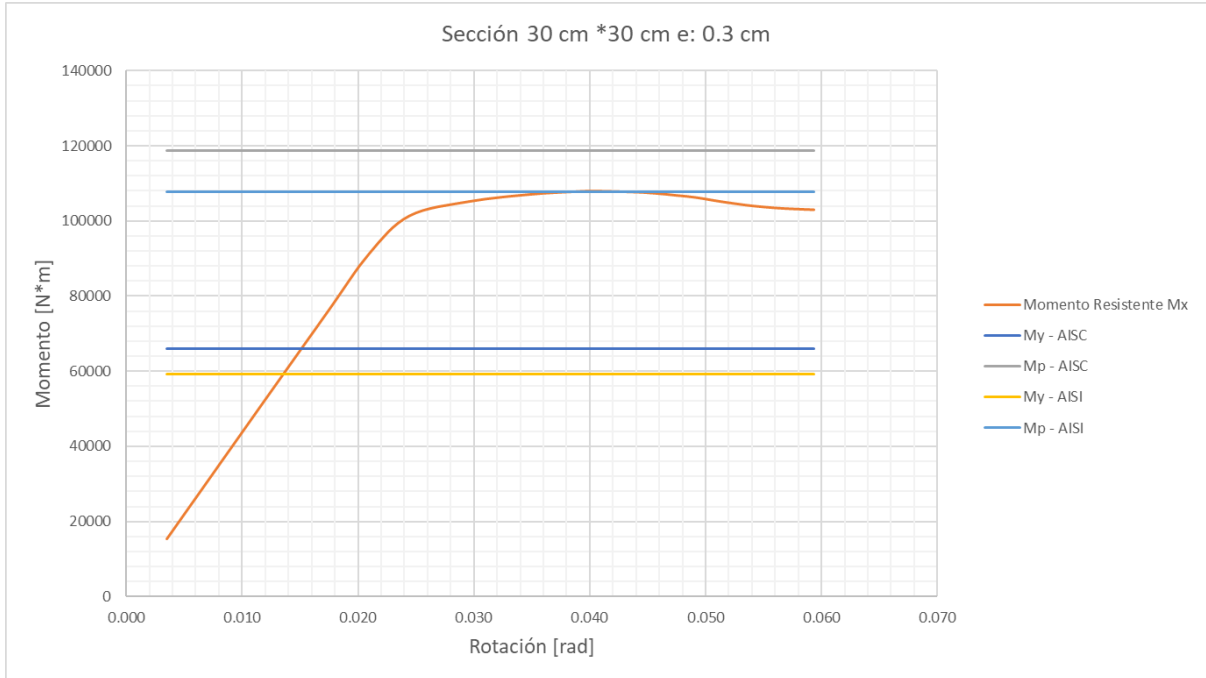
$Z_e = \sum A_i \cdot d_i$

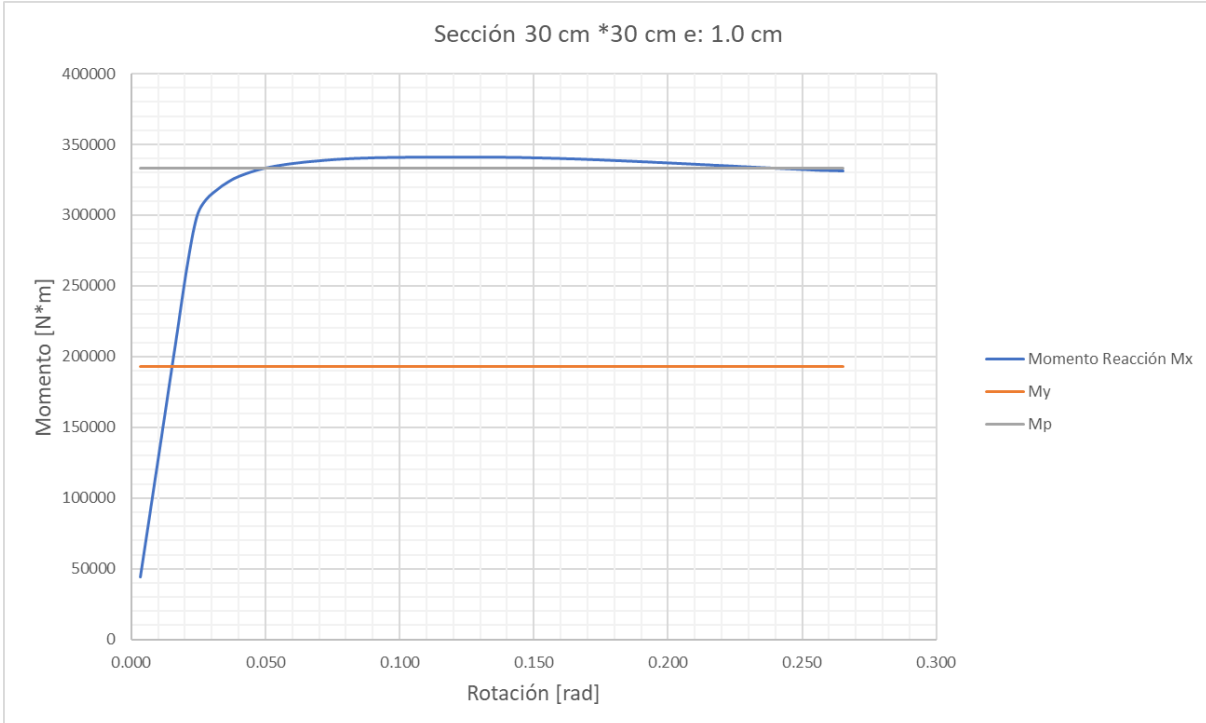
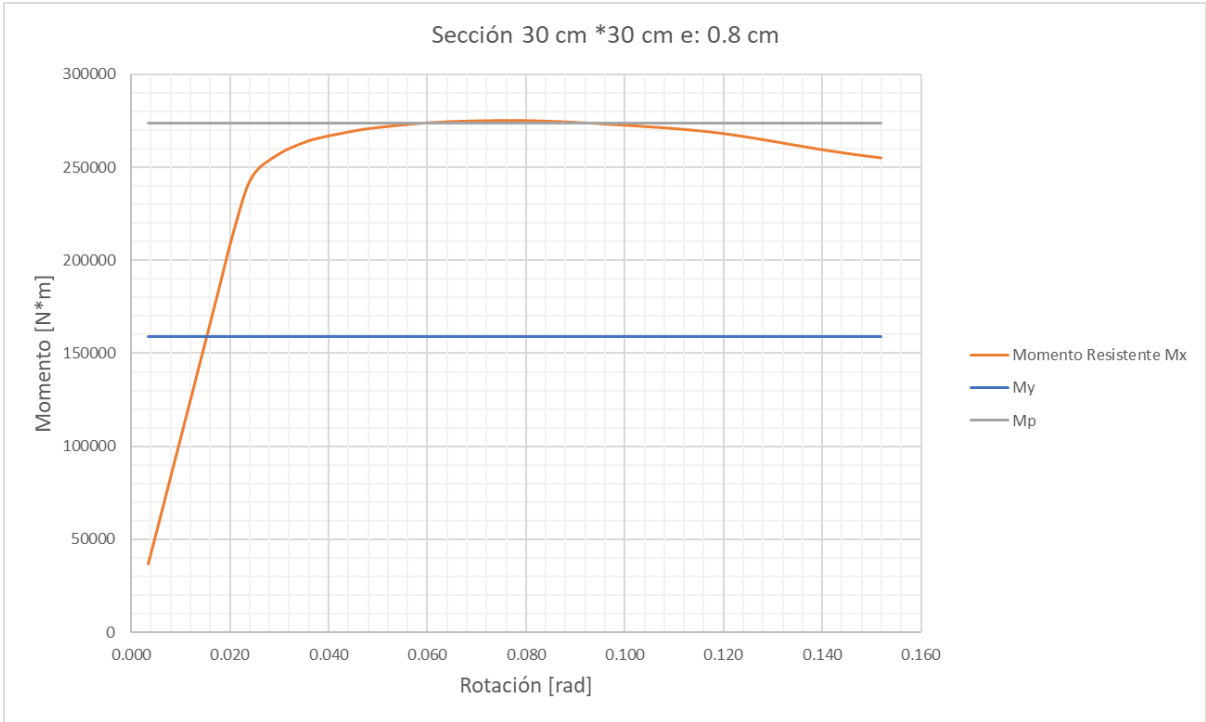
$Z_e = 434.14 \text{ cm}^3$

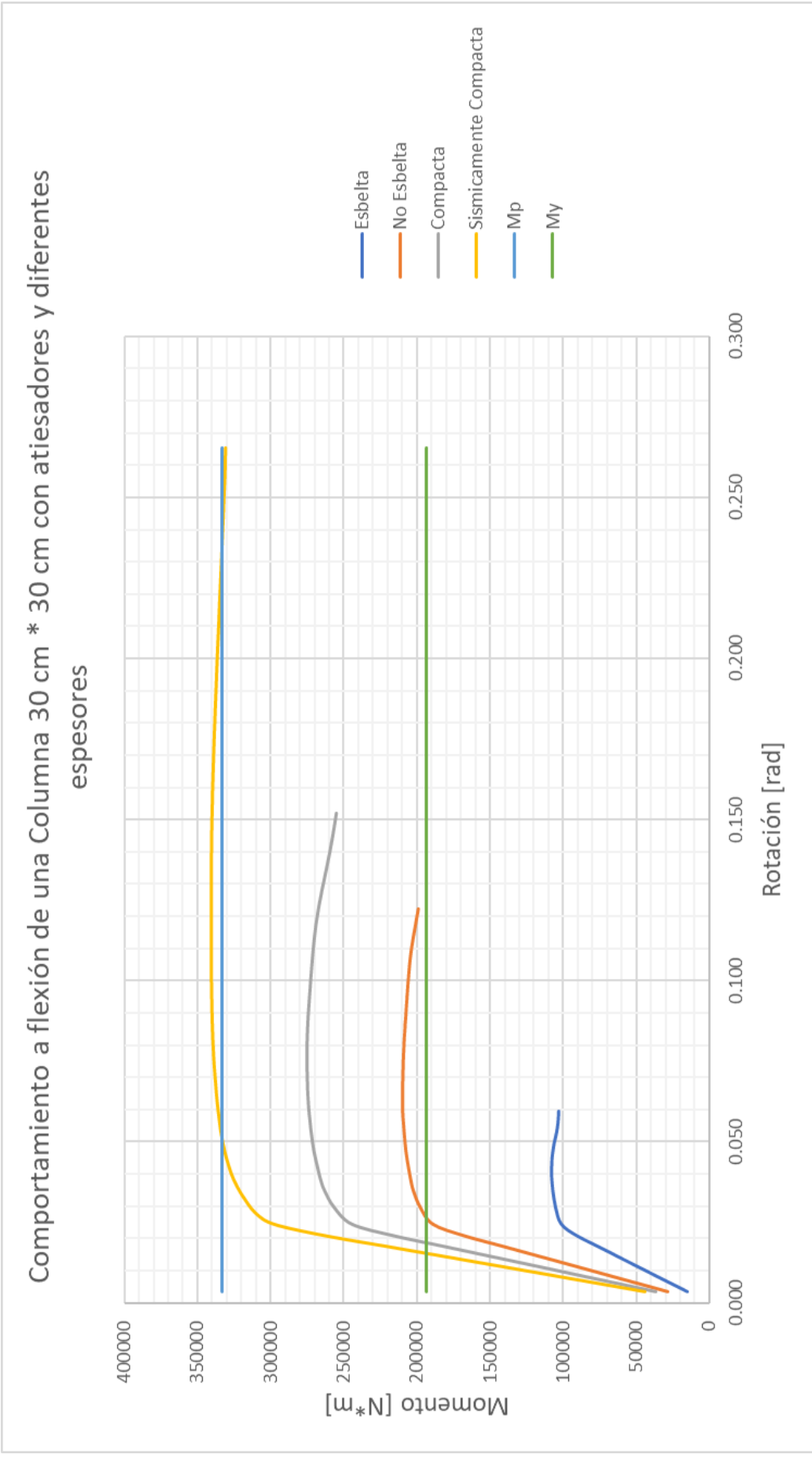
$M_p = Z_e \cdot F_y$

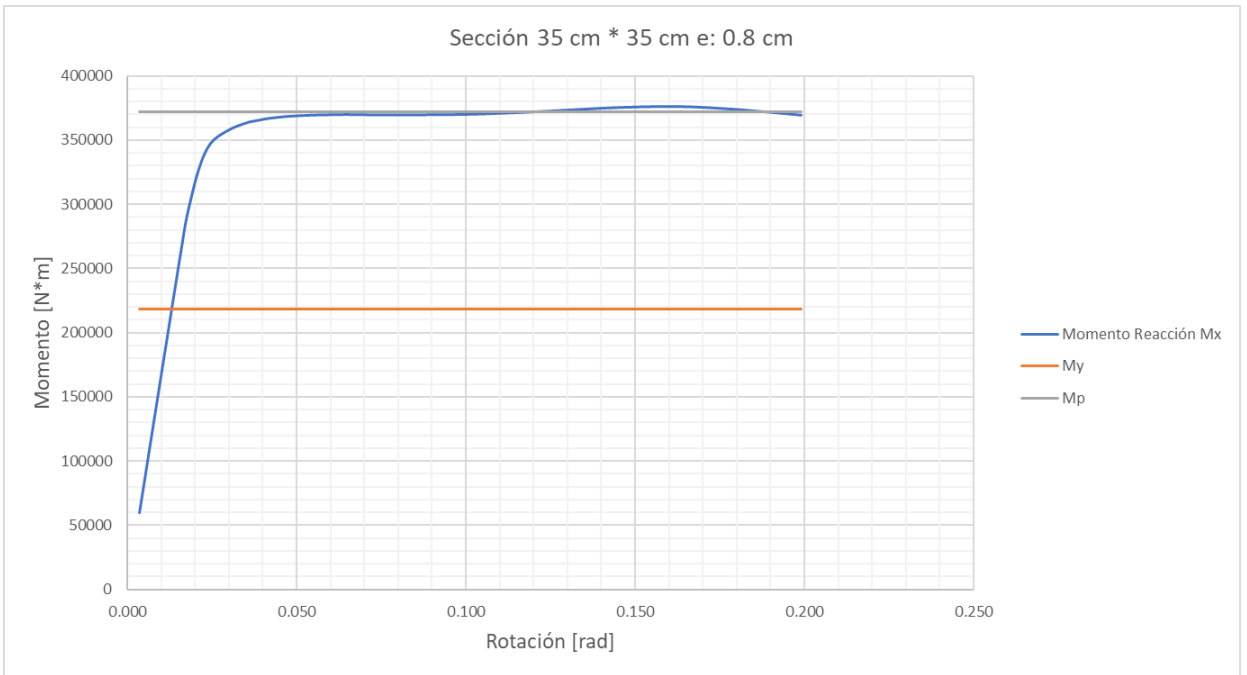
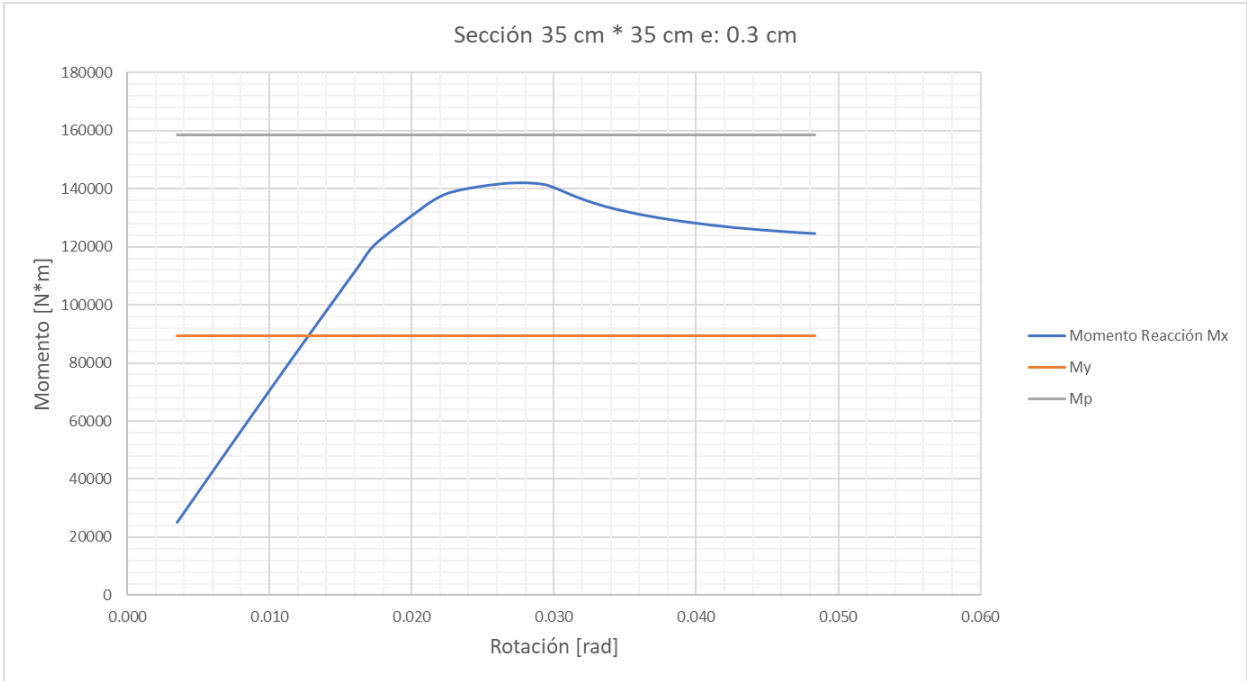
$M_p = 1098381.75 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

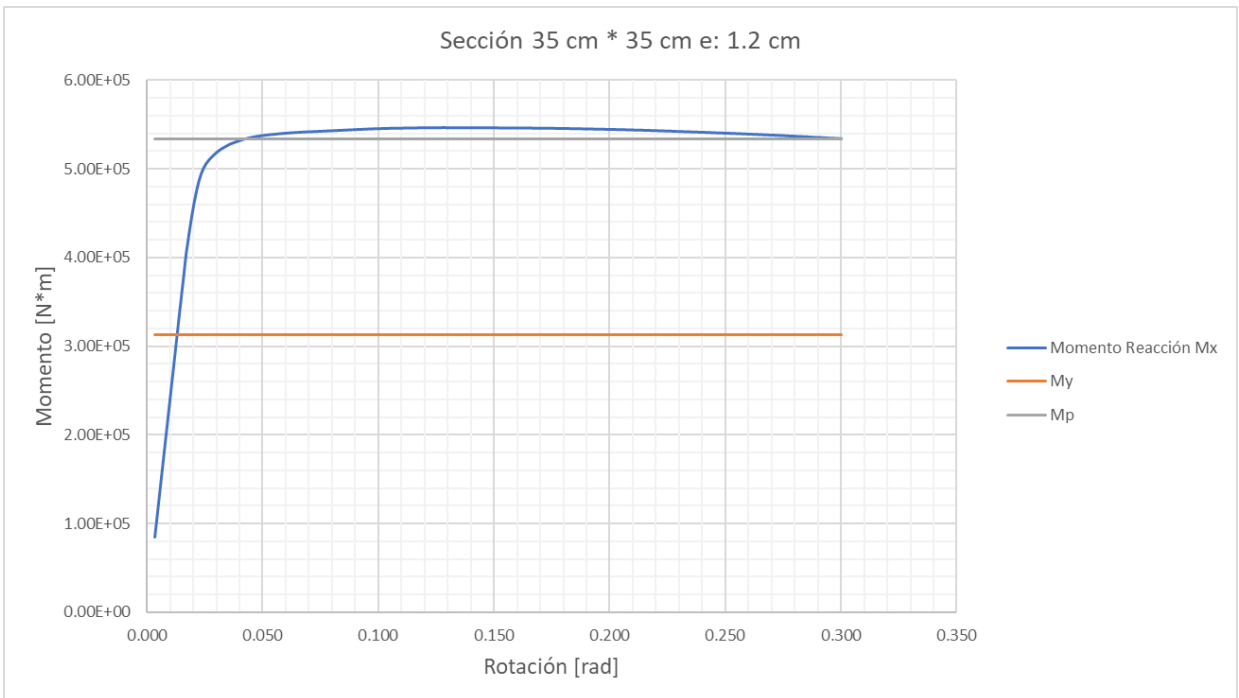
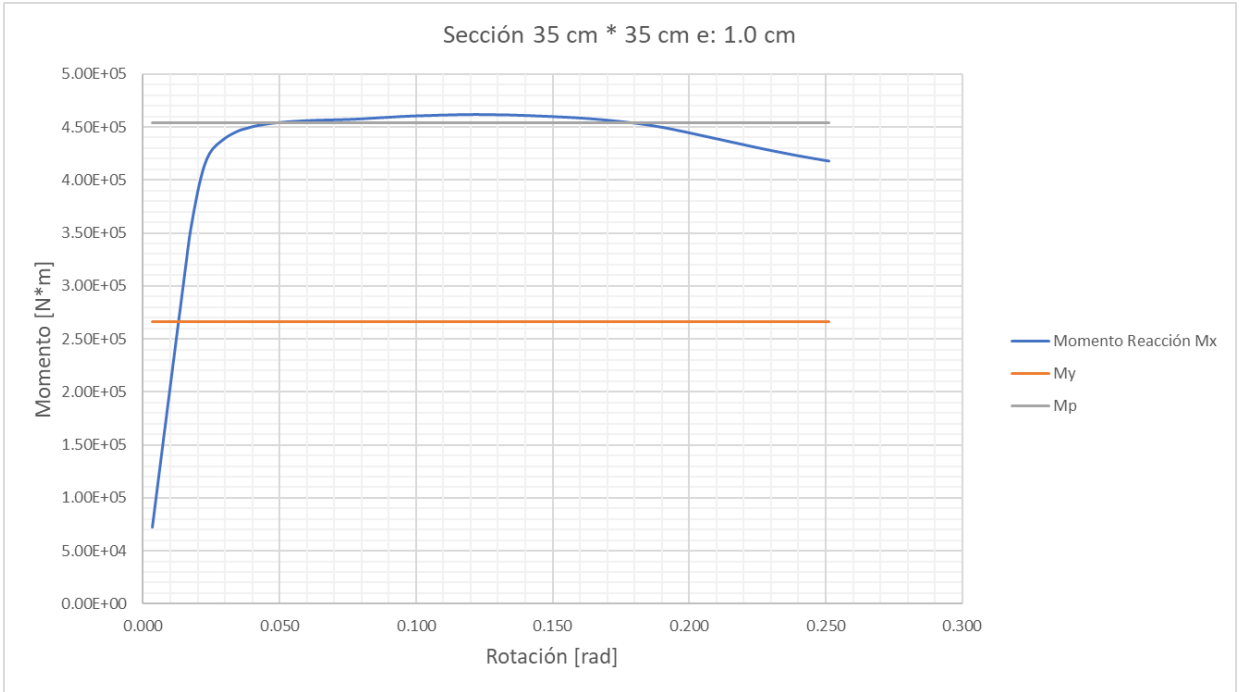
$M_p = 107751.25 \text{ N}\cdot\text{m}$



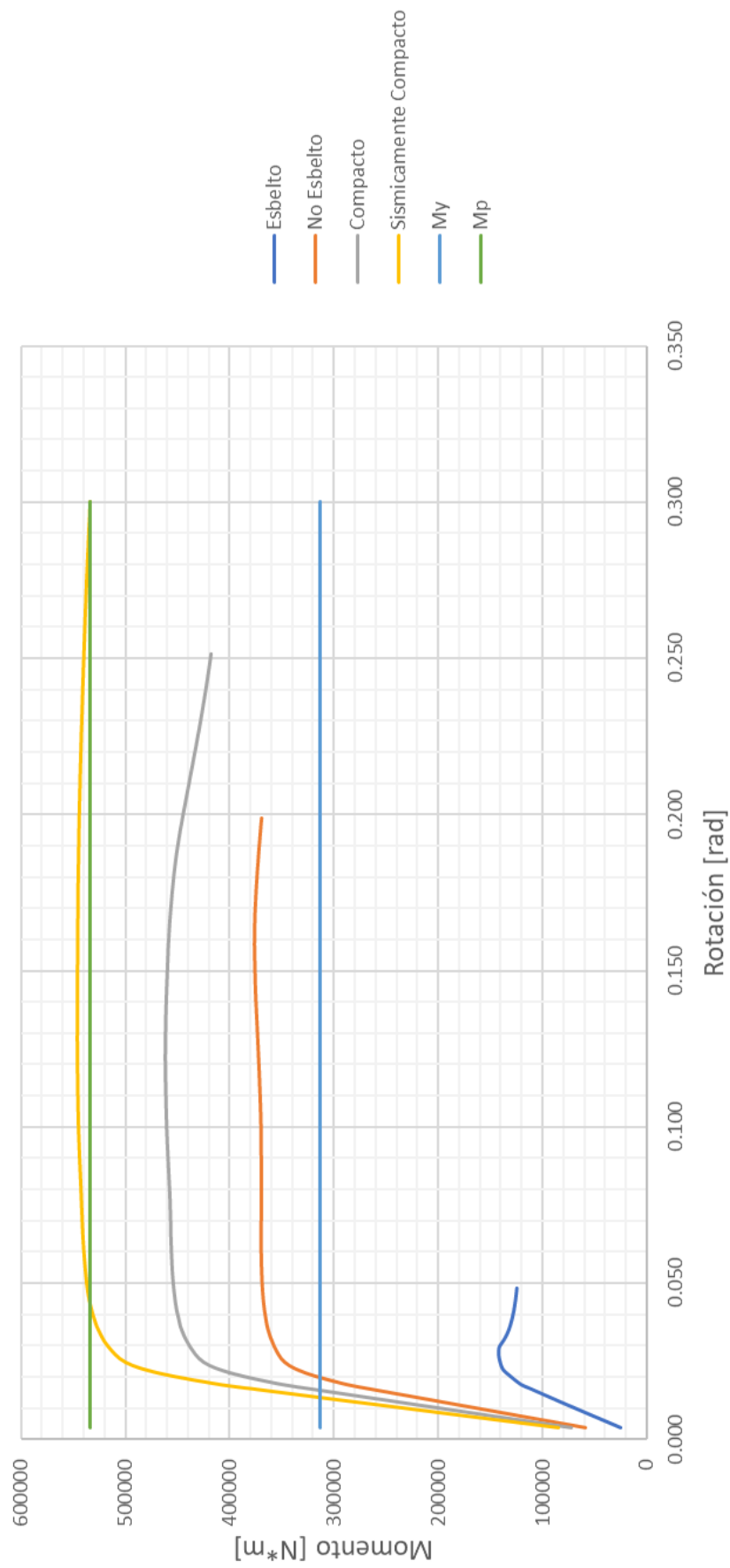


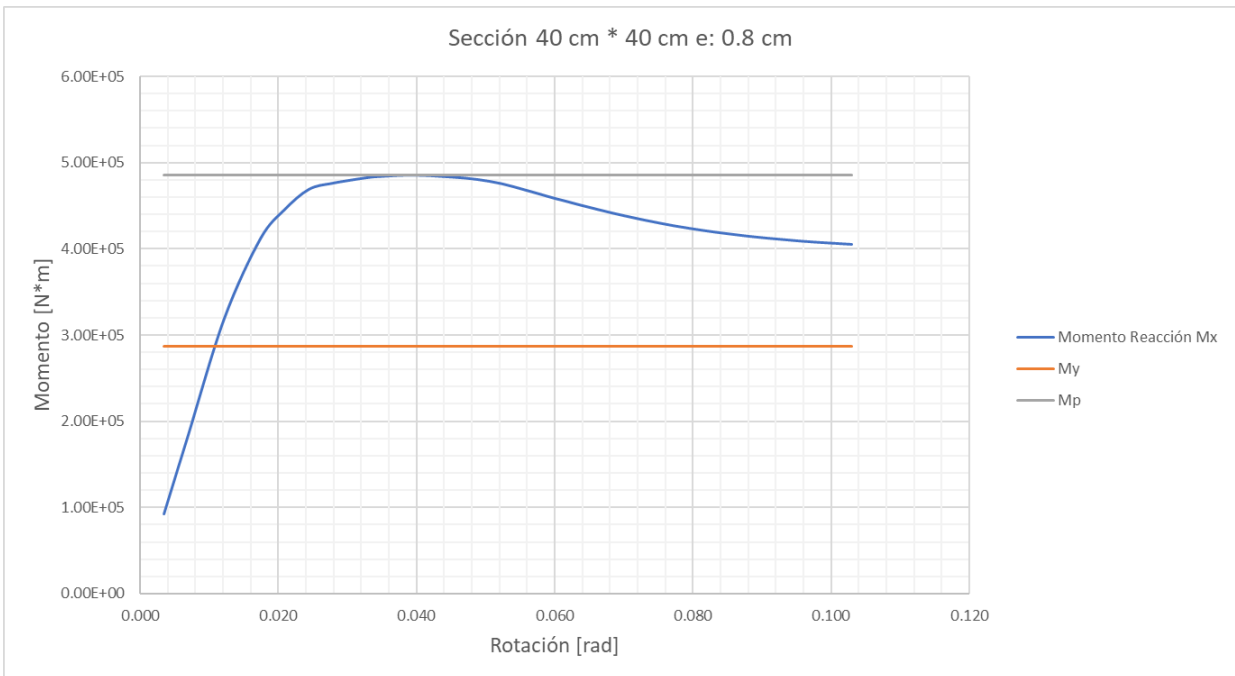
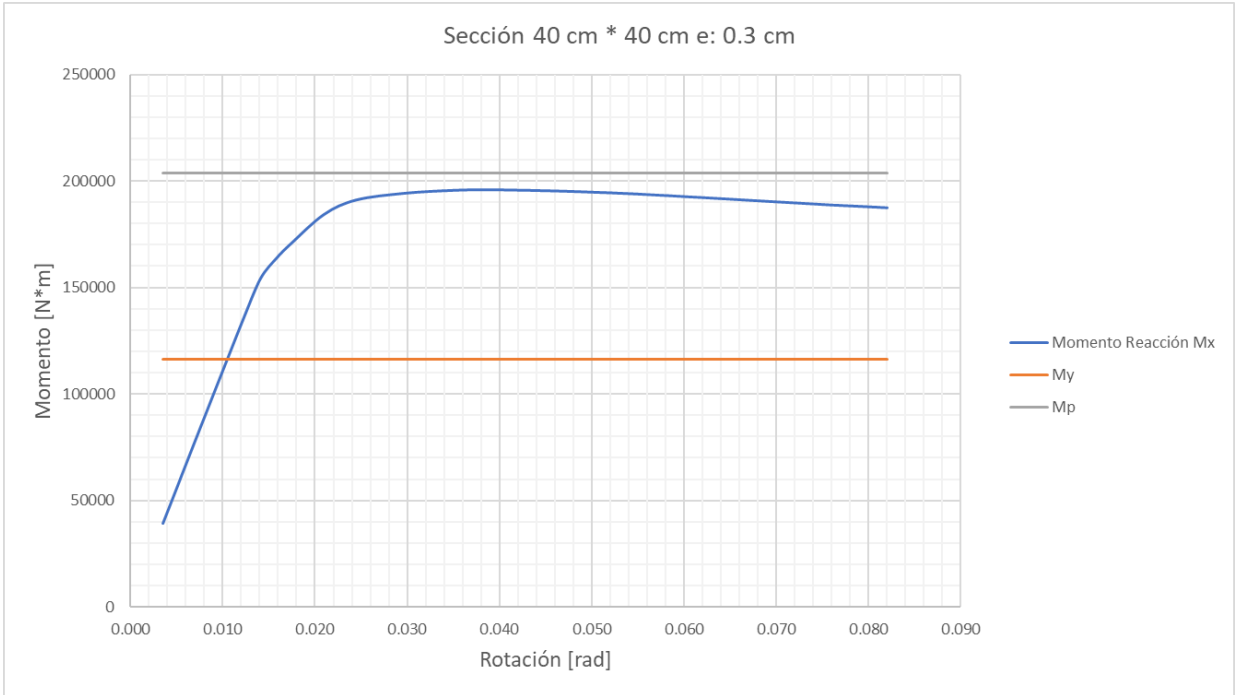


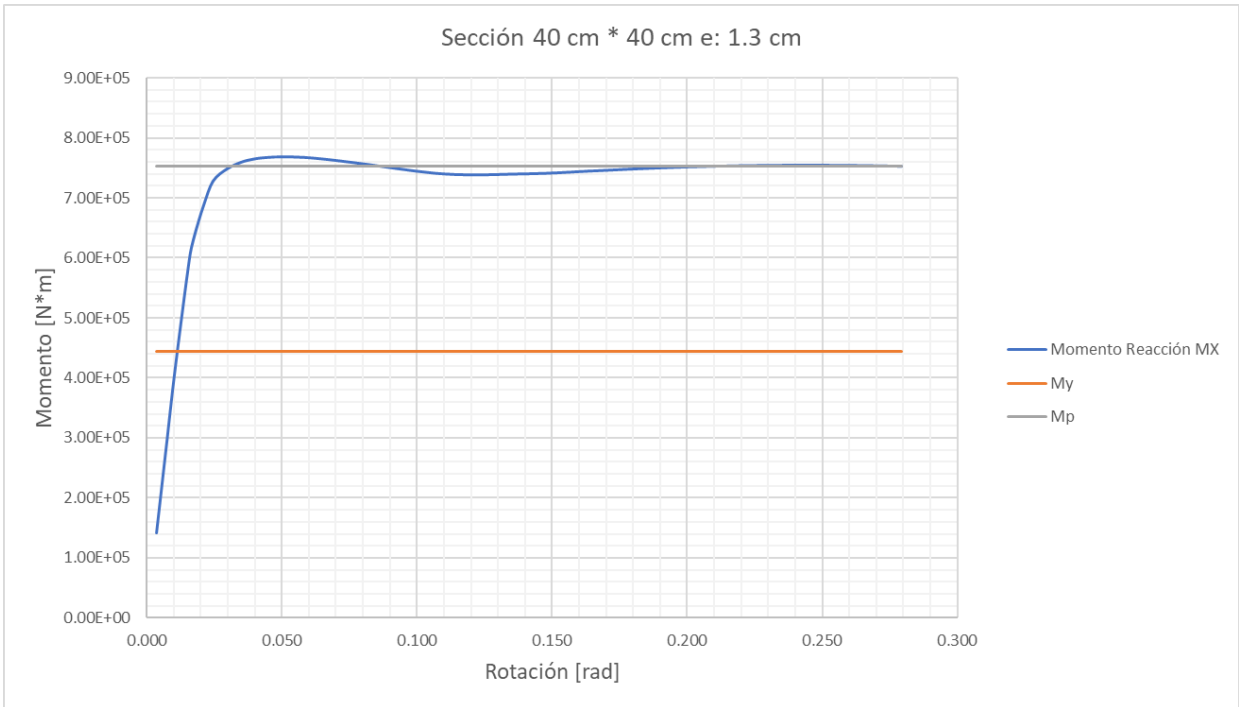
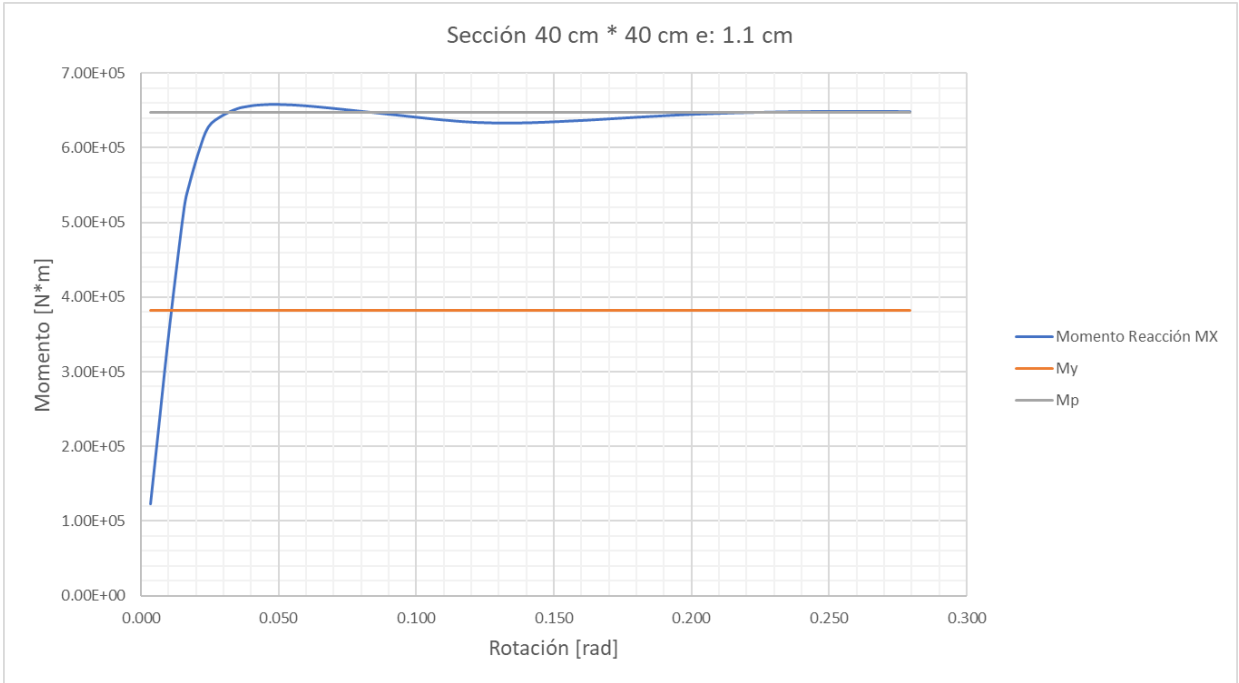




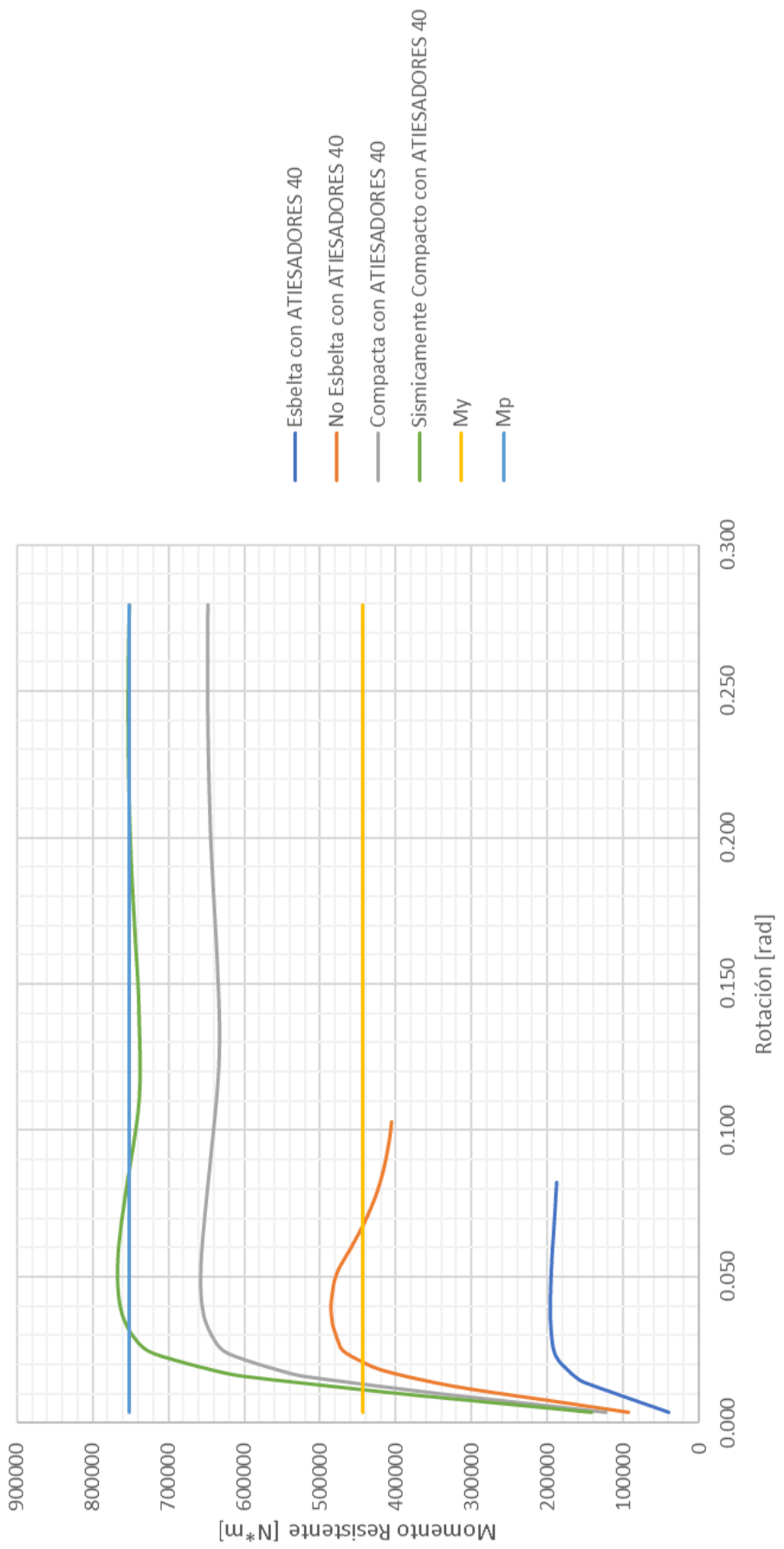
Comportamiento a flexión de una Columna 35 cm * 35 cm con atiesadores y diferentes espesores







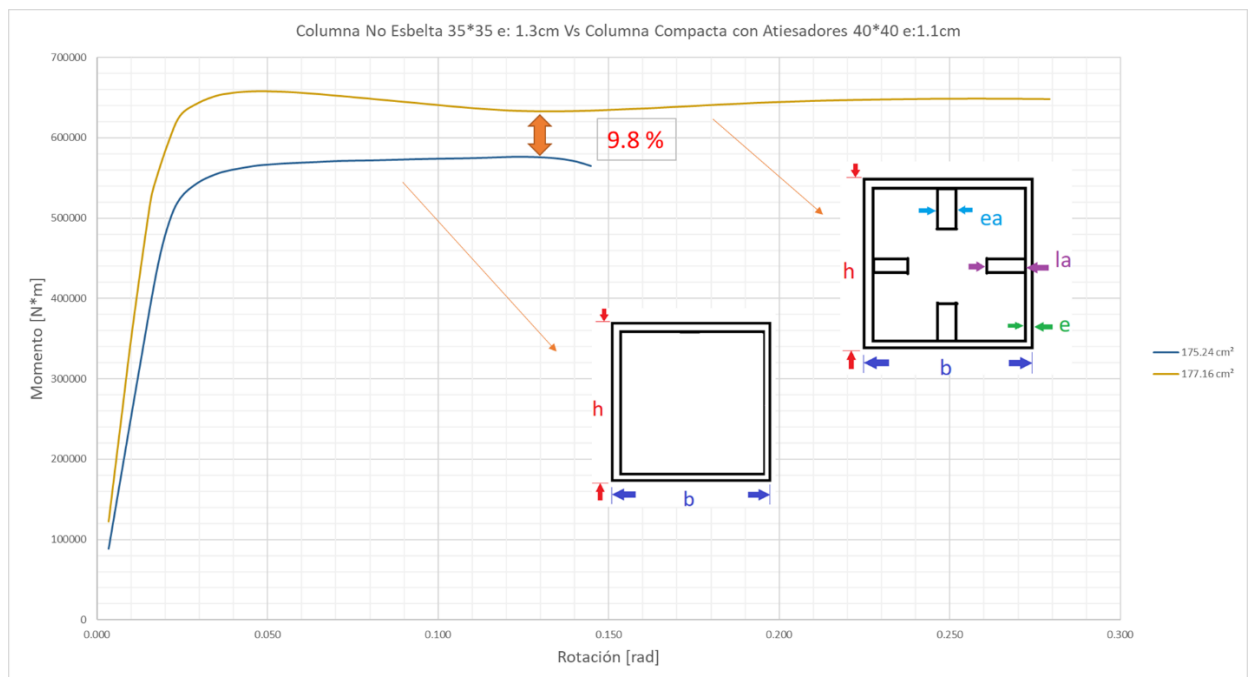
Comportamiento a flexión de una Columna 40 cm * 40 cm con diferentes espesores

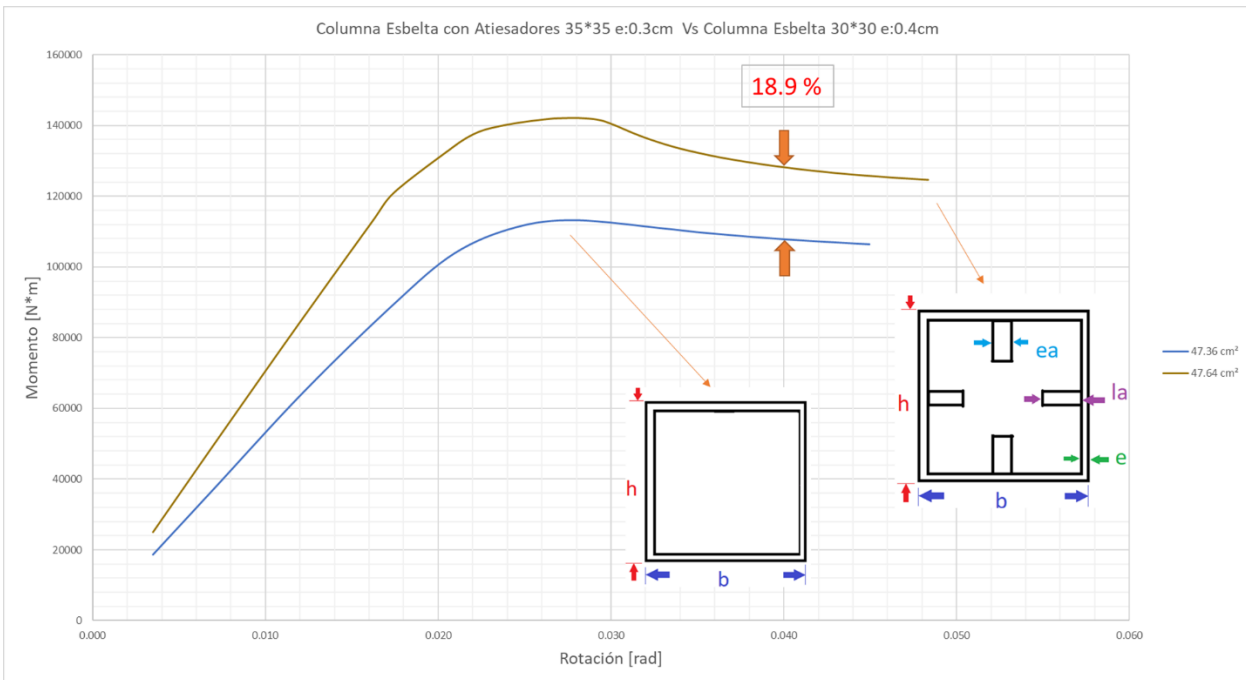
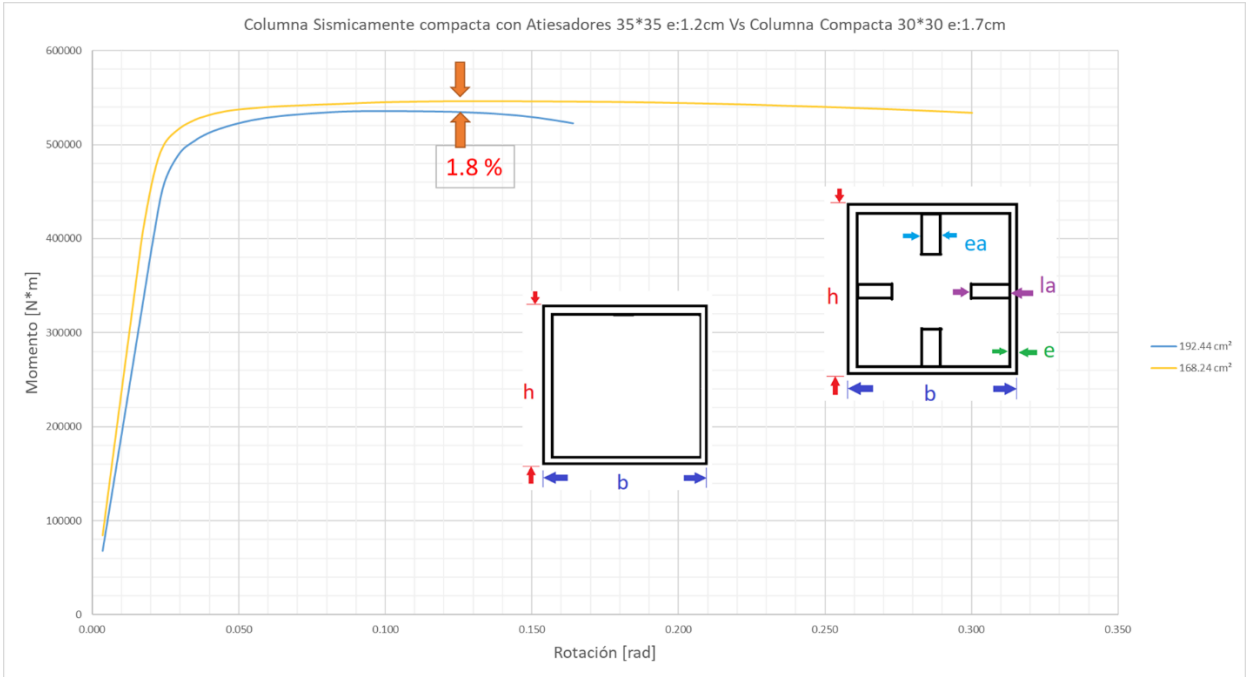


6.5.2- Comparación a Flexión: Columnas con Atiesadores Vs Columnas sin Atiesadores

Los resultados obtenidos tanto en columnas con atiesadores como en columnas sin atiesadores nos muestran que es posible utilizar la misma cantidad de acero para poder obtener un mejor rendimiento de las columnas cuando están sujetas a flexión, en los casos siguientes se muestran secciones de diferentes dimensiones, primero de columnas sin atiesadores y luego de columnas con atiesadores de tal manera que el comportamiento de ambos sea fácilmente visible, también se ha señalado el porcentaje de diferencia entre ambas secciones en el mismo instante de rotación.

Para esta comparación se utilizaron 3 pares de resultados obtenidos anteriormente por Ansys y mostradas en las secciones 6.4.8. y 6.5.1, estas gráficas no contienen los resultados Momento Elástico “My” o Momento Plástico “Mp”, porque no son relevantes en esta comparación, pero si es de interés del lector, las secciones ya mencionadas si las contienen.





7.- CONCLUSIONES

- Es importante considerar una imperfección en los modelos de Ansys, en los modelos mostrados se usaron imperfecciones que rondaban el 2 % de la carga crítica de pandeo, esto se hizo para acelerar el proceso de pandeo durante el primer paso de cada simulación.
- Los resultados obtenidos con Ansys, concuerdan con los resultados calculados por la especificación ANSI/AISC 360-10 y AISI S100-07.
- En la Tabla de resumen de columnas sin atiesadores (Sección 6.1.9) podemos observar que los valores que más difieren son los de las columnas con elementos esbeltos, variando hasta un 17 % de los de la especificación ANSI/AISC 360-10, mientras que para columnas con elementos no esbeltos, compactos y sísmicamente compactos se reduce hasta un 3 %.
- La variación porcentual del problema desarrollado entre ANSYS y AISC 360-10 para columnas sin atiesadores a compresión es de 0.4 % mientras que en columnas con atiesadores es de 5.6 %.
- La variación porcentual del problema desarrollado entre ANSYS y AISI S100-07 para columnas sin atiesadores a compresión es de 3.4 % mientras que en columnas con atiesadores es de 13.2 %.
- Los alabeos originados en compresión de columnas rellenas de hormigón son solamente uno en cada placa en comparación de las columnas sin relleno que generan más de un alabeo.
- Los valores de resistencia a compresión de columnas rellenas de hormigón obtenidos con Ansys son similares a los calculados mediante la especificación ANSI/AISC 360-10, siendo que el caso que más se asemeja es el de columnas rellenas de hormigón con elementos esbeltos con una diferencia de 1.8 % mientras que el resultado que más difiere es el de columnas rellenas con elementos compactos con un 13.5 % de diferencia.
- En todos los modelos de las columnas con atiesadores longitudinal se usaron atiesadores esbelto, estos son suficientes para darle rigidez a cada placa de la columna y esto a su vez reducir su dimensión b, permitiendo que las columnas aumenten de capacidad de carga antes de pandear. Esto es justificado en las secciones 6.2.6.1 y 6.5.1.1.
- Las columnas de sección esbelta con atiesadores longitudinales soportan mayor carga ante el pandeo local que su equivalente volumétrico en columnas sin atiesadores longitudinales.

- Las columnas de sección compuesta fallan a compresión cuando luego de que falla el hormigón, porque inmediatamente después de que esta falla, el perfil de acero también falla en el mismo lugar que fallo el hormigón, esto es apreciable en la sección 6.3.5.2.
- Aunque se utilizó el límite de $M_y = 0.7 * F_y * S_x$, el valor de 0.7 no era necesario pues los modelos de Ansys no presentaban esfuerzos residuales, en comparación a los perfiles conformados en frío que se comercializan y si presentan esta propiedad, sería motivo de otro estudio incluir este comportamiento en la modelación de elementos estructurales por programas de simulación.
- Los resultados obtenidos por Ansys para elementos estructurales en compresión tienen diferencia de hasta un 17 %, mientras que para elementos estructurales en flexión su diferencia es de hasta un 8 % en comparación a los valores obtenidos por la especificación AISC 360-10.
- Los resultados obtenidos por Ansys y mostrados en las secciones 6.4.8. y 6.5.1 están dentro de los límites obtenidos de momento M_y y M_p calculados por la especificación AISC.
- La forma de los elementos y la calidad que conforman los elementos estructurales influyen en gran manera a la solución de los modelos en Ansys, de tal manera que cuando se usa un mallado más fino, los resultados se aproximan más a los de las especificaciones de diseño.
- Existieron varias razones por la diferencia entre los resultados calculados y los obtenidos por el programa, la primera razón es que no se pudieron imitar a la perfección las condiciones existentes en un laboratorio en el cual se realizan este tipo de ensayos, la segunda razón es porque no se pudieron incluir totalmente las imperfecciones que presenta un elemento estructural en un ensayo de laboratorio, ya sea imperfecciones en la construcción o en la instalación del elemento estructural, otra razón es porque el módulo que usa Ansys soluciona solamente problemas estáticos y por lo que no considera la masa del elemento estructural ni la velocidad de carga, pero en la vida real estos factores sí influyen en el resultado.
- No se desarrollaron modelos de columnas con atiesadores longitudinales rellenas de hormigón porque el hormigón evita el pandeo de los atiesadores, esta razón es explicada en la sección I.2 de la especificación ANSI/AISC 360-10 pues no se considera pandeo en elementos embebidos.

8.- BIBLIOGRAFÍA

- Acero, A. L. (2014). *Diseño Sismorresistente de Construcciones de Acero*. Mendoza: 4ta Edición.
- AISC. (2010). *Specification for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 360-10*. Chicago: ANSI.
- AISI. (2007). *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*. México: CANACERO.
- Asociación Latinoamericana del Acero. (09 de 05 de 2010). *Acero Platea*. Obtenido de Especificación ANSI/AISC 360-10: www.aceroplatea.es/docs/comites/documento5_86.pdf
- CARAPAZ JIMÉNEZ, D. A., & ESCUDERO MÉNDEZ, E. I. (16 de 04 de 2015). *Escuela Politécnica Nacional*. Obtenido de Biblioteca Virtual: bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10370/4/CD-6169.pdf
- Carapaz, D., & Escudero, E. (2015). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DE COLUMNAS TUBULARES DE ACERO RELLENAS DE HORMIGÓN, SOMETIDAS A CARGA AXIAL*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.
- Escribano Ródenas, M. (2015). *El análisis por Elementos Finitos*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- M., P. E. (2010). *Ecuacion de Grandes Deformaciones*. Guanajuato: Universidad de Guanajuato.
- McCORMAC, J. C., & CSERNAK, S. F. (2013). *Diseño de Estructuras de Acero*. México: Alfaomega.
- MIDUVI. (2014). *NEC Estructuras de Acero*. Quito: S/N.
- Ministerio de Desarrollo y Urbanístico. (2014). *NEC - Estructuras de Acero*. Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Navarro, S. (2012). *Comparación Técnica-Económica de Elementos Compuestos vs. Elementos de Acero y Elementos de Hormigón Armado*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Rosario, C., & Valadez, O. (10 de 07 de 2017). *Geraursa*. Obtenido de www.gerdaucorsa.com.mx
- Santiuste, C. (2015). *Criterios de Plastificación*. Madrid: Canal YT.
- Shanley, F. (1971). *Mecánica de Materiales*. Los Angeles: Agencia Para el Desarrollo Internacional.
- Urruticoechea, A. T. (2014). *Estudio del comportamiento transversal de secciones mixtas de hormigón y perfiles compuestos de GFRP*. Catalunya: Universidad de Catalunya.
- Wei-Wen, Y., & LaBoube, R. (2010). *Cold-Formed Steel Design*. Hoboken: John Wiley & Sons 4° Edition.

9.- ANEXOS

Anexos A

TABLA I1.1b Razones Ancho-Espesor límites para elementos de acero comprimidos en miembros compuestos sujetos a flexión Para Uso con Sección I3.4				
Descripción del Elemento	Razón Ancho-espesor	λ_p Compacto/ No compacto	λ_r No compacto/ Esbelto	Máximo Permitido
Alas de secciones tubulares rectangulares (HSS) y de cajón de espesor uniforme	b/t	$2.26 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$3.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Almas de secciones tubulares rectangulares (HSS) y de cajón de espesor uniforme	D/t	$3.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Secciones tubulares (HSS) redondas	D/t	$\frac{0.09E}{F_y}$	$\frac{0.31E}{F_y}$	$\frac{0.31E}{F_y}$

Figura 98.- Tabla I1.1.b Límite de esbeltez para secciones a Flexión

Fuente: ANSI/AISC 360-10

TABLE D1.1
Limiting Width-to-Thickness Ratios for
Compression Elements For Moderately Ductile
and Highly Ductile Members

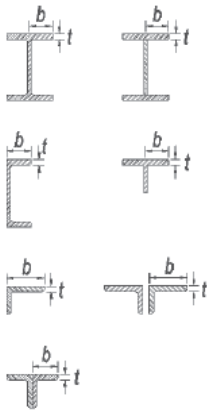
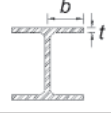

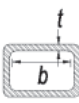
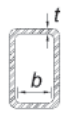
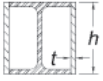
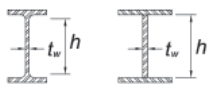
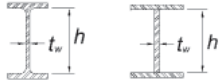
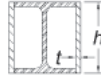
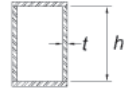
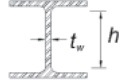
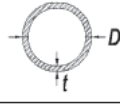


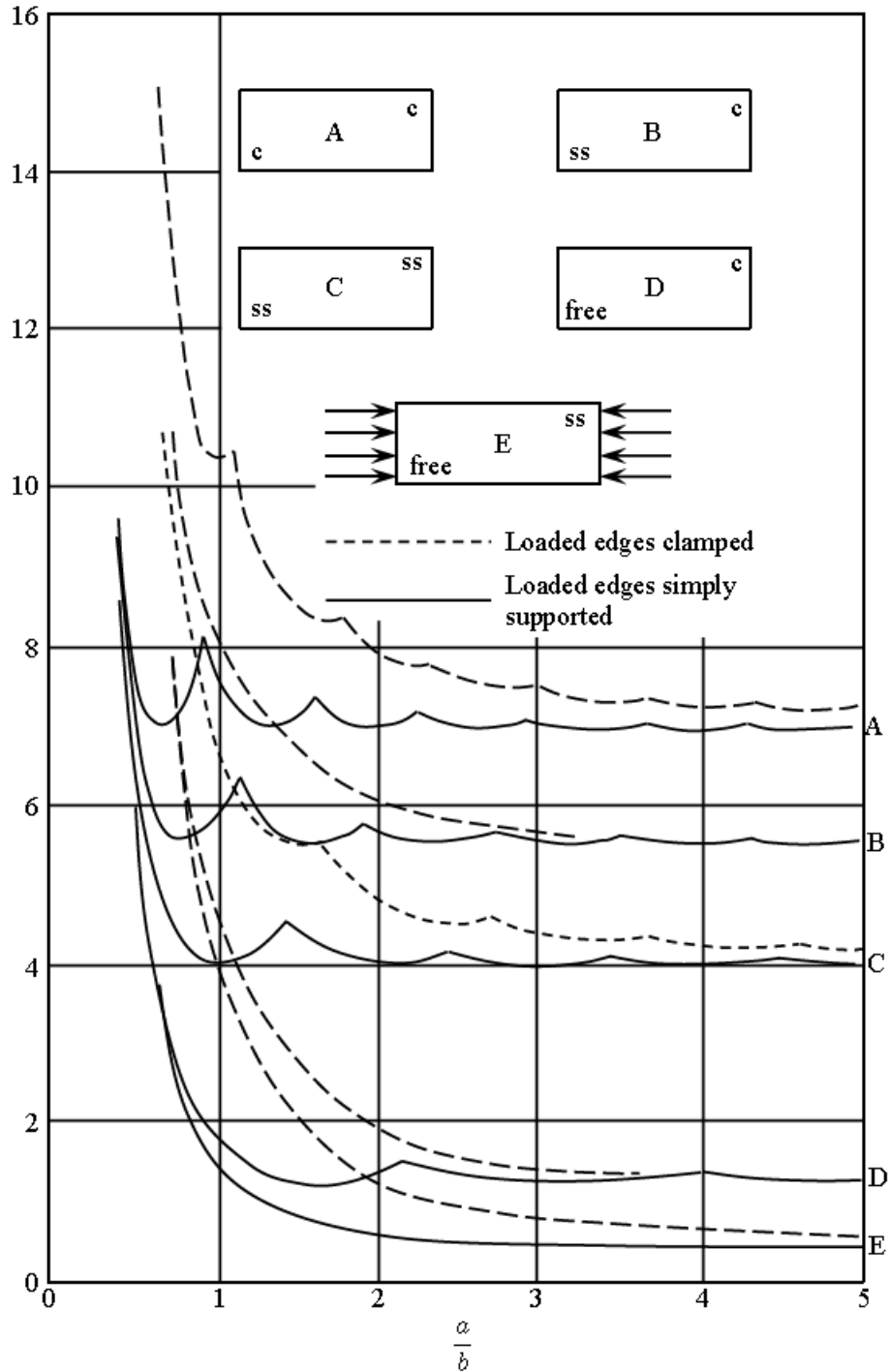
	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio		Example
			λ_{hd} Highly Ductile Members	λ_{md} Moderately Ductile Members	
Unstiffened Elements	Flanges of rolled or built-up I-shaped sections, channels and tees; legs of single angles or double angle members with separators; outstanding legs of pairs of angles in continuous contact	b/t	$0.30\sqrt{E/F_y}$	$0.38\sqrt{E/F_y}$	
	Flanges of H-pile sections per Section D4	b/t	$0.45\sqrt{E/F_y}$	not applicable	
	Stems of tees	d/t	$0.30\sqrt{E/F_y}^{[a]}$	$0.38\sqrt{E/F_y}$	
Stiffened Elements	Walls of rectangular HSS	b/t	$0.55\sqrt{E/F_y}^{[b]}$	$0.64\sqrt{E/F_y}^{[c]}$	
	Flanges of boxed I-shaped sections and built-up box sections	b/t			
	Side plates of boxed I-shaped sections and walls of built-up box shapes used as diagonal braces	h/t			
	Webs of rolled or built-up I-shaped sections used as diagonal braces	h/t_w	$1.49\sqrt{E/F_y}$	$1.49\sqrt{E/F_y}$	

TABLE D1.1 (CONTINUED)
Limiting Width-to-Thickness Ratios for
Compression Elements For Moderately Ductile
and Highly Ductile Members

	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio		Example
			λ_{hd} Highly Ductile Members	λ_{md} Moderately Ductile Members	
Stiffened Elements	Webs of rolled or built-up I-shaped sections used as beams or columns ^[a]	h/t_w	For $C_a \leq 0.125$ $2.45\sqrt{E/F_y}(1-0.93C_a)$	For $C_a \leq 0.125$ $3.76\sqrt{E/F_y}(1-2.75C_a)$	
	Side plates of boxed I-shaped sections used as beams or columns	h/t	For $C_a > 0.125$ $0.77\sqrt{E/F_y}(2.93-C_a)$ $\geq 1.49\sqrt{E/F_y}$	For $C_a > 0.125$ $1.12\sqrt{E/F_y}(2.93-C_a)$ $\geq 1.49\sqrt{E/F_y}$	
	Webs of built-up box sections used as beams or columns	h/t	where $C_a = \frac{P_u}{\phi_c P_y}$ (LRFD) $C_a = \frac{\Omega_c P_a}{P_y}$ (ASD)	where $C_a = \frac{P_u}{\phi_c P_y}$ (LRFD) $C_a = \frac{\Omega_c P_a}{P_y}$ (ASD)	
	Webs of H-Pile sections	h/t_w	$0.94\sqrt{E/F_y}$	not applicable	
	Walls of round HSS	D/t	$0.038E/F_y$	$0.044E/F_y$ ^[e]	
Composite Elements	Walls of rectangular filled composite members	b/t	$1.4\sqrt{E/F_y}$	$2.26\sqrt{E/F_y}$	
	Walls of round filled composite members	D/t	$0.076E/F_y$	$0.15E/F_y$	
<p>^[a] For tee shaped compression members, the limiting width-to-thickness ratio for highly ductile members for the stem of the tee can be increased to $0.38\sqrt{E/F_y}$ if either of the following conditions are satisfied: (1) Buckling of the compression member occurs about the plane of the stem. (2) The axial compression load is transferred at end connections to only the outside face of the flange of the tee resulting in an eccentric connection that reduces the compression stresses at the tip of the stem.</p> <p>^[b] The limiting width-to-thickness ratio of flanges of boxed I-shaped sections and built-up box sections of columns in SMF systems shall not exceed $0.6\sqrt{E/F_y}$.</p> <p>^[c] The limiting width-to-thickness ratio of walls of rectangular HSS members, flanges of boxed I-shaped sections and flanges of built-up box sections used as beams or columns shall not exceed $1.12\sqrt{E/F_y}$.</p> <p>^[d] For I-shaped beams in SMF systems, where C_a is less than or equal to 0.125, the limiting ratio h/t_w shall not exceed $2.45\sqrt{E/F_y}$. For I-shaped beams in IMF systems, where C_a is less than or equal to 0.125, the limiting width-to-thickness ratio shall not exceed $3.76\sqrt{E/F_y}$.</p> <p>^[e] The limiting diameter-to-thickness ratio of round HSS members used as beams or columns shall not exceed $0.07E/F_y$.</p>					

Anexos D

Factor k en placas a compresión en función de sus apoyos



C = Clamped = Empotrado
 SS = Simply Support = Soporte Simple
 Free = Free Support = Soporte Libre

Rango Aproximado de Rotación dependiendo del Tipo de Sección

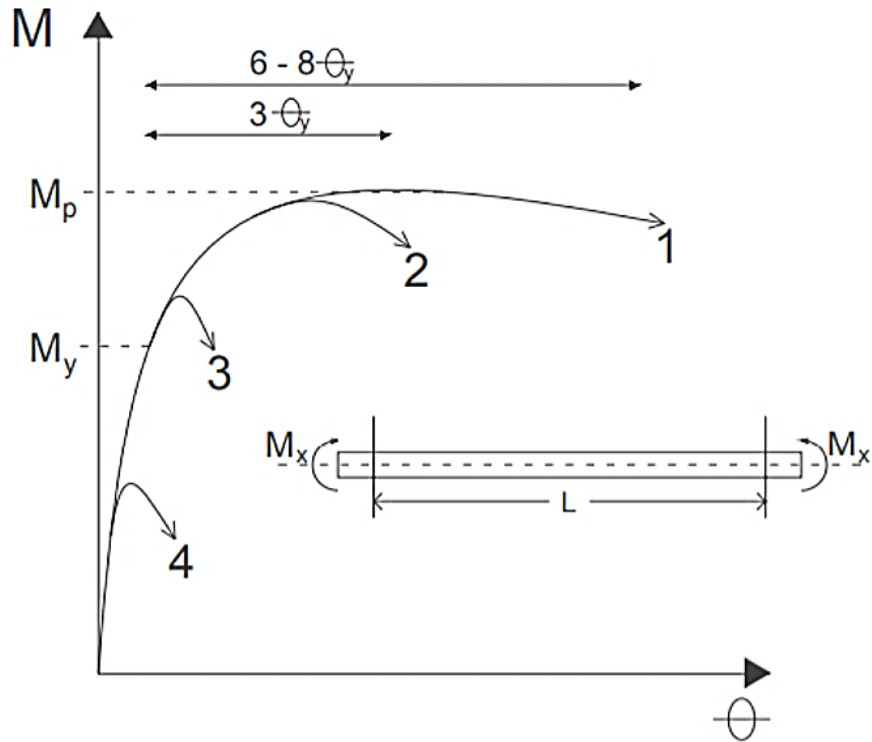


Figura 99.- Rangos Aproximados de Rotación momento en secciones de diferente espesor

Fuente: Diseño de Miembros en Flexión – GERDAU CORSA

Tipos de Secciones

Sección Tipo 1 = Sísmicamente Compactas = Altamente Dúctiles

Sección Tipo 2 = Compactas = Moderadamente Dúctiles

Sección Tipo 3 = No Esbeltas = No Compactas

Sección Tipo 4 = Esbeltas