

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL
ECUADOR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE CIVIL**

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MÁSTER EN
INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS SISMORRESISTENTES**

**“ANÁLISIS POR COMPUTADORA DE TRES CONEXIONES DE USO COMÚN
NO CALIFICADAS MÁS FRECUENTES EN ESTRUCTURAS DE ACERO EN
QUITO”**

AUTOR: TRAJANO SAÚL GUEVARA MORALES

DIRECTOR: ING. OSCAR JARAMILLO MSC.

QUITO, 2024

TABLA DE CONTENIDO

1.	CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	15
1.1	ANTECEDENTES.....	15
1.2	ALCANCE.....	16
1.3	JUSTIFICACIÓN.....	16
1.4	OBJETIVO GENERAL.....	17
1.5	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.6	METODOLOGÍA.....	17
2.	CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.....	18
2.1	INTRODUCCIÓN:.....	18
2.2	DEFINICIONES GENERALES.....	18
2.2.1	Estructura Metálica.....	18
2.2.2	Tipos de estructuras metálicas.....	19
2.2.3	Perfiles de Acero.....	20
2.2.4	Soldadura.....	21
2.2.5	Tipos de soldaduras de uso común en las estructuras.....	28
2.2.6	Tipos de Juntas Soldadas.....	29
2.2.7	Simbología utilizada en soldadura.....	30
2.2.8	Conexiones Soldadas.....	31
2.2.9	Soldadura Precalificada.....	32
2.3	ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS.....	32

2.3.1	ANSYS	34
3.	CAPITULO 3: NORMATIVA	42
3.1	DEFINICIONES Y ESPECIFICACIONES DE NEC PARA ESTRUCTURAS DE ACERO.....	42
3.2	DEFINICIONES Y ESPECIFICACIONES DE LA AISC 360-22, AISC 358-22 Y AISC 341-22.....	42
3.2.1	AISC 360-22.....	43
3.2.2	AISC 358-22.....	46
3.2.3	AISC 341-22.....	48
4.	CAPITULO 4: ESTADO DEL ARTE DE LOS CASOS DE ESTUDIO	51
4.1	CASO 1	51
4.1.1	Propiedades de la viga	52
4.1.2	Determinación de la resistencia de la soldadura.....	53
4.1.3	Cálculo del momento plástico:	55
4.1.4	Cálculo del Momento probable de la rótula plástica	55
4.1.5	Fuerza cortante en la rótula plástica	55
4.1.6	Momento probable en la cara de la columna.....	55
4.2	CASO 2	56
4.2.1	Propiedades de la viga	57
4.2.2	Determinación de la resistencia de la soldadura.....	61
4.2.3	Cálculo del momento plástico:	63

4.2.4	Cálculo del Momento probable de la rótula plástica	63
4.2.5	Fuerza cortante en la rótula plástica	63
4.2.6	Momento probable en la cara de la columna.....	64
4.3	CASO 3	64
4.3.1	Propiedades de la viga	65
4.3.2	Determinación de la resistencia de la soldadura.....	67
4.3.3	Cálculo del momento plástico:	68
4.3.4	Cálculo del Momento probable de la rótula plástica	68
4.3.5	Fuerza cortante en la rótula plástica	69
4.3.6	Momento probable en la cara de la columna.....	69
5.	CAPÍTULO 5: ANÁLISIS POR COMPUTADORA	70
5.1	PROCESO DE MODELACIÓN PARA EL CASO 01.....	70
5.2	PROCESO DE SIMULACIÓN.....	70
5.2.1	Definición del material	71
5.2.2	Selección del módulo de análisis.....	72
5.2.3	Definición de parámetros.....	72
5.2.4	Materiales	73
5.2.5	Mallado.....	73
5.2.6	Análisis Estructural	73
5.2.7	Resolución y resultados para el caso 01	74
5.3	PROCESO DE MODELACIÓN PARA EL CASO 02.....	78

5.4	PROCESO DE SIMULACIÓN.....	79
5.4.1	Definición del material	79
5.4.2	Selección del módulo de análisis.....	80
5.4.3	Definición de parámetros.....	81
5.4.4	Materiales	82
5.4.5	Mallado.....	82
5.4.6	Análisis Estructural	82
5.4.7	Resolución y resultados para el caso 02	83
5.5	PROCESO DE MODELACIÓN PARA EL CASO 03.....	88
5.6	PROCESO DE SIMULACIÓN.....	89
5.6.1	Definición del material	89
5.6.2	Selección del módulo de análisis.....	90
5.6.3	Definición de parámetros.....	91
5.6.4	Materiales	92
5.6.5	Mallado.....	92
5.6.6	Análisis Estructural	92
5.6.7	Resolución y resultados para el caso 02	93
6.	CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	97
6.1	RESULTADOS CASO 01	99
6.2	RESULTADOS CASO 02	101
6.3	RESULTADOS CASO 03	103

7.	CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
7.1	CONCLUSIONES.....	105
7.2	RECOMENDACIONES	106
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Características del proceso SMAW	23
Tabla 2	Características proceso GTAW	26
Tabla 3	Áreas efectivas Caso 01.....	54
Tabla 4	Resistencias de soldadura Caso 01	54
Tabla 5	Áreas efectivas Caso 02.....	62
Tabla 6	Resistencias de soldadura Caso 02	62
Tabla 7	Especificaciones de materiales CASO 03	64
Tabla 8	Áreas efectivas Caso 03.....	68
Tabla 9	Resistencias de soldadura Caso 03	68
Tabla 10	Deformaciones FEMA 350 (FEMA-350, 2000)	74
Tabla 11	Deformaciones FEMA 350 (FEMA-350, 2000)	83
Tabla 12	Deformaciones FEMA 350 (FEMA-350, 2000)	93
Tabla 13	Comparativa de resultados	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Definición de conexión (Chazaro, 2019)	20
Figura 2	Proceso SMAW (LEADRP, 2024)	23

Figura 3 Proceso FCAW (FERREPRO, 2024).....	24
Figura 4 Proceso GTAW-TIG (Prosoldes, 2024).....	25
Figura 5 Proceso SAW (Prosoldes, 2024).....	27
Figura 6 Soldadura a Filete (McCormac & Csernak, 2012).....	28
Figura 7 Esquema Filete (McCormac & Csernak, 2012).....	28
Figura 8 Soldadura de ranura (McCormac & Csernak, 2012).....	29
Figura 9 Tipo de juntas soldadas (McCormac & Csernak, 2012).....	30
Figura 10 Símbolos básicos de soldadura (McCormac & Csernak, 2012).....	30
Figura 11 Símbolos suplementarios de soldadura (McCormac & Csernak, 2012).....	30
Figura 12 Notación estándar de soldadura (McCormac & Csernak, 2012).....	31
Figura 13 Notas a considerar (McCormac & Csernak, 2012).....	31
Figura 14 Elementos y nodos (ESSS, 2024).....	34
Figura 15 Entorno de ANSYS.....	35
Figura 16 Toolbox ANSYS.....	36
Figura 17 Endurecimiento vs plastificación perfecta (ANSYS, 2024).....	37
Figura 18 Ensayos de laboratorio para materiales (ANSYS, 2024).....	37
Figura 19 Modelo bilineal (ANSYS, 2024).....	38
Figura 20 Isotropic Hardening (ANSYS, 2024).....	39
Figura 21 Endurecimiento cinemático (ANSYS, 2024).....	39
Figura 22 Endurecimiento por carga cíclica (ANSYS, 2024).....	40
Figura 23 Endurecimiento isotrópico por cargas cíclicas (ANSYS, 2024).....	41
Figura 24 Endurecimiento cinemático para cargas cíclicas (ANSYS, 2024).....	41
Figura 25 Propiedades Acero A36 (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015).....	42
Figura 26 Resistencia disponible de la junta soldada. (ANSI/AISC 360 -22, 2022).....	45
Figura 27 Resistencia disponible de la junta soldada. (ANSI/AISC 360 -22, 2022).....	45

Figura 28 Ciclos conexión viga columna	48
Figura 29 Ciclos conexión viga-columna	48
Figura 30 Esquema deformaciones AISC 341	49
Figura 31 Curva de histéresis de la conexión (ANSI/AISC 341 -22, 2022)	49
Figura 32 Especificación de materiales CASO 01	51
Figura 33 Esquema Conexión Caso 01	51
Figura 34 Foto real Conexión Caso 01	52
Figura 35 Viga Caso0 1	52
Figura 36 Columna Caso 01	52
Figura 37 Propiedades de la sección Caso 01	53
Figura 38 Esfuerzos en la soldadura Caso 01	54
Figura 39 Especificación de materiales CASO 02	56
Figura 40 Esquema Conexión Caso 02	56
Figura 41 Viga Caso 02	57
Figura 42 Columna Caso 02	57
Figura 43 Sección Caso 02 con placas de respaldo	57
Figura 44 Modelo 3D Caso 02	58
Figura 45 Propiedades sección Caso 02	58
Figura 46 Propiedades de la sección Caso 02	59
Figura 47 Propiedades viga Caso 02 ETABS	60
Figura 48 Caso 02 ETABS	61
Figura 49 Esfuerzos en la soldadura Caso 02	62
Figura 50 Caso 03 - Foto Real	65
Figura 51 Viga-Columna	65
Figura 52 Propiedades de la sección CASO 03	66

Figura 53 Propiedades de la sección CASO 03.....	67
Figura 54 Esfuerzos en la soldadura Caso 03.....	67
Figura 55 Caso 01 Inventor	70
Figura 56 Asignación de materiales ANSYS	71
Figura 57 BKH Acero A36.....	71
Figura 58 Definición del Caso 01 ANSYS.....	72
Figura 59 Parámetros generales Caso ANSYS.....	72
Figura 60 Materiales Caso 01	73
Figura 61 Mallado ANSYS Caso 01	73
Figura 62 Ejecución ANSYS solver Caso 01	74
Figura 63 Ingreso de ciclos de deformación.....	74
Figura 64 Solver ANSYS	75
Figura 65 Esfuerzos Totales ANSYS Caso 01 último ciclo.....	75
Figura 66 Esfuerzos máximos Caso 01	75
Figura 67 Esfuerzos máximos Caso 01	76
Figura 68 Deformación total ANSYS Caso 01	76
Figura 69 Deformación máxima Caso 01	76
Figura 70 Valores de deformación Caso 01	77
Figura 71 Curva de Histéresis Caso 01	77
Figura 72 Curva histéresis a 0.04 rad	78
Figura 73 Caso 02 Inventor	79
Figura 74 Asignación de materiales ANSYS	79
Figura 75 BKH Acero A36.....	80
Figura 76 Definición del Caso 02 ANSYS.....	81
Figura 77 Parámetros generales Caso ANSYS.....	81

Figura 78 Materiales Caso 02.....	82
Figura 79 Mallado ANSYS Caso 02	82
Figura 80 Ejecución ANSYS solver Caso 02.....	83
Figura 81 Ingreso de ciclos de deformación.....	83
Figura 82 Solver ANSYS	84
Figura 83 Esfuerzos Totales ANSYS Caso 02 último ciclo.....	84
Figura 84 Esfuerzos máximos Caso 02	85
Figura 85 Esfuerzos máximos Caso 02	85
Figura 86 Deformación total Ansys Caso 02.....	85
Figura 87 Deformación máxima Caso 02.....	86
Figura 88 Valores de deformación Caso 02	86
Figura 89 Curva de Histéresis Caso 02	87
Figura 90 Curva de histéresis a 0.04 rad	88
Figura 91 Caso 03 Inventor	89
Figura 92 Asignación de materiales ANSYS	89
Figura 93 BKH Acero A36.....	90
Figura 94 Definición del Caso 03 ANSYS.....	91
Figura 95 Parámetros generales Caso ANSYS.....	91
Figura 96 Materiales Caso 03.....	92
Figura 97 Mallado ANSYS Caso 03	92
Figura 98 Ejecución ANSYS solver Caso 03.....	93
Figura 99 Ingreso de ciclos de deformación.....	93
Figura 100 Solver ANSYS	94
Figura 101 Esfuerzos Totales ANSYS Caso 03 último ciclo.....	94
Figura 102 Esfuerzos máximos Caso 03	94

Figura 103 Esfuerzos máximos Caso 03	95
Figura 104 Deformación total ANSYS Caso 03	95
Figura 105 Deformación máxima Caso 03.....	95
Figura 106 Valores de deformación Caso 03	95
Figura 107 Curva de Histéresis Caso 03	96
Figura 108 Curva de histéresis a 0.04 rad	97
Figura 109 Defectos de soldadura – porosidades	98
Figura 110 Discontinuidad del cordón	98
Figura 111 Poros en la soldadura longitudinal de viga tipo cajón.....	99
Figura 112 Esfuerzos máximos en la cara de la columna Caso 01.....	99
Figura 113 Máximo esfuerzo Caso 01.....	100
Figura 114 Deformación en la cara de la columna Caso 01	100
Figura 115 Esfuerzo en la cara de la columna Caso 02.....	101
Figura 116 Zona de falla Caso 02.....	102
Figura 117 Deformación Caso 02 en la cara de la columna.....	102
Figura 118 Fallo conexión Caso 03.....	103
Figura 119 Deformación máxima en la cara de la columna	104
Figura 120 Caso 03 esfuerzos en los puntos de aplicación de carga.....	104
Figura 121 Geometría de conexión mejorada (Jaramillo, 2024).....	106
Figura 122 Curva histéresis conexión OJ (Jaramillo, 2024)	107
Figura 123 Curva de histéresis - Conexión OJ (Jaramillo, 2024)	108
Figura 124 Deformación OJ (Jaramillo, 2024).....	109

AGRADECIMIENTO

A mis papás por no dejar de apoyarme nunca.

A mis hermanas y sobrinas por ser ese apoyo incondicional.

A Alisson por su apoyo y paciencia.

A mis compañeros de IMPORDISPAC CIA. LTDA. por su apoyo constante.

*Al Ing. Oscar Jaramillo por su paciencia y adecuada guía para la realización de este
proyecto.*

*A la Pontificia Universidad Católica por darme la oportunidad de aprender nuevas cosas
y enfrentar nuevos retos académicos.*

DEDICATORIA

A Trajano y Rosa por darme los recursos y las ganas de superarme a diario.

A Alisson por su cariño y paciencia durante este proceso de formación.

A mis amigos Alexander y David por brindarme su apoyo como equipo.

A mi equipo de trabajo por la paciencia y el esfuerzo con el que trabajaron mientras estudiaba.

RESUMEN

En los últimos años se ha popularizado el uso del acero para construir edificaciones en Ecuador, caracterizado por la construcción informal sin una regulación adecuada de los entes de control pertinentes. Al estar en una zona de alta peligrosidad sísmica se hace indispensable conocer la forma en que se construye y diseña en el país, de tal forma que se puedan tomar acciones preventivas y correctivas con el propósito de evitar desgracias que pongan en peligro a la ciudadanía en general y su patrimonio. Con este proyecto se analizó el comportamiento de tres de las conexiones no precalificadas que se usan con frecuencia en la ciudad de Quito y que se replican a nivel nacional, evaluadas bajo los criterios establecidos en las normas como la (ANSI/AISC 341 -22, 2022) y (FEMA-350, 2000) empleando el programa (ANSYS, 2024) teniendo como resultado la curva de histéresis de cada conexión, así como se emitieron comentarios al respecto de la soldadura de unión sugiriendo el uso apropiado de la (AWS D1.1, 2020).

ABSTRACT

In recent years, the use of steel to construct buildings in Ecuador has become popular, characterized by informal construction without adequate regulation by the relevant control entities. Being in a zone of high seismic danger, it is essential to know the way in which construction and design are carried out in the country, so that preventive and corrective measures can be taken to avoid disasters that endanger the general public and their assets. With this project, the behavior of three of the non-prequalified connections that are frequently used in the city of Quito and that are replicated nationwide was analyzed, evaluated under the criteria established in standards such as (ANSI / AISC 341 -22, 2022) and (FEMA-350, 2000) using the program (ANSYS, 2024) resulting in the hysteresis curve of each connection, as well as comments were issued regarding the joint welding suggesting the appropriate use of (AWS D1.1, 2020)

1. CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Actualmente la ingeniería sismorresistente tiene soluciones adecuadas para reducir el riesgo sísmico mediante el uso de materiales estructurales, sistemas constructivos, dispositivos para el control de vibraciones y demás criterios y recomendaciones de diseño, sin embargo, (Crisafulli, 2018) menciona que esta reducción del riesgo sísmico no se ha alcanzado de manera uniforme a nivel mundial y depende de varios factores sociales, culturales y económicos y más aún en Latinoamérica donde existe mucha discrepancia entre los criterios de diseño y la estructura ya construida.

La industria de la construcción en Ecuador ha evolucionado en los últimos años, con la aplicación de nuevos conceptos constructivos y de diseño, como el uso de sistemas estructurales hechos de acero, destacando su ventaja en el tiempo de montaje como principal característica, así como menor peso. Para respaldo de estos conceptos, existen normas internacionales que establecen parámetros y sugerencias de diseño con el fin de garantizar que las estructuras se comporten como fueron concebidas, en la cual existe una normativa específica que trata el tema de las conexiones entre elementos. Cabe destacar que en Ecuador existe incertidumbre sobre su utilización, por la cual se hace importante un análisis detallado de las conexiones que se usan comúnmente en el medio.

Los sistemas constructivos usados actualmente son los conformados por pórticos resistentes a momento (SMF), los cuales se caracterizan por ser altamente dúctiles, es por ello por lo que requieren que las conexiones viga columna desarrollen rótulas plásticas ante eventos sísmicos.

Es importante recordar que las conexiones precalificadas aparecieron luego del terremoto de Northridge – Estados Unidos, donde, según (Venture-FEMA, 2000) el Código Uniforme de Construcción de 1988 (ICBO, 1988) introdujo un único diseño de conexión de momento precalificado denominado prescriptivo para aplicaciones sísmicas. La “calificación” de esta conexión se basó en las investigaciones de Popov y Stephen a principios de los años 1970. La conexión precalificada de la UBC se adoptó posteriormente en las Disposiciones sísmicas del AISC de 1992 y luego en otros códigos de construcción modelo.

Este evento sísmico de 1994 demostró que esta conexión, tal como se estaba utilizando en la práctica contemporánea, era inadecuada para las demandas sísmicas previstas, por lo que las agencias de aplicación de la ley adoptaron cambios de emergencia a los códigos de construcción, eliminando la conexión prescriptiva y exigiendo que todos los detalles de conexión utilizados en marcos resistentes a momentos para aplicaciones sísmicas estén calificados para su idoneidad a través de un programa de pruebas de prototipos.

1.2 ALCANCE

El presente proyecto tiene como alcance la simulación y análisis de tres conexiones de uso común no calificadas más frecuentes en estructuras de acero que se utilizan en Quito a través del uso del programa de elementos finitos ANSYS.

La investigación que se usó es de tipo descriptiva y correlacional y se usó criterios de las normas: AISC 341-22, FEMA 350 y La Normativa Ecuatoriana de la Construcción para sacar conclusiones relevantes y recomendaciones.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El estudio y simulación de las conexiones en estructuras de acero en Quito, permitirá entender su funcionamiento y problemas frecuentes y con los resultados obtenidos de la

simulación se podrán proponer mejoras con el propósito de mejorar la respuesta de estas ante eventos sísmicos con el propósito de tener construcciones más seguras en nuestro país.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Simular y analizar tres conexiones de uso común no calificadas más frecuentes en estructuras de acero que se utilizan en Quito a través del uso de un software computacional.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar tres de las conexiones de uso común más frecuentes usadas en estructuras de Acero usadas en Quito
- Modelar y simular tres conexiones de uso común en Quito.
- Analizar los resultados del análisis y proponer mejoras

1.6 METODOLOGÍA

La profundidad del estudio del presente trabajo de titulación llegó hasta la etapa de modelamiento y simulación a través del uso del programa ANSYS.

Para el cumplimiento del primer objetivo, se hizo un estudio exploratorio, gracias al cual se pudo recolectar información de las conexiones de uso común en estructuras de acero en Quito, de donde se extrajo la geometría, materiales usados y los procesos de fabricación y montaje.

Para el cumplimiento del segundo y tercer objetivo, se modelaron los datos obtenidos en el software ANSYS, asignando materiales, condiciones de apoyo y los casos de carga que sugiere la AISC-341 para de esta forma obtener la curva de histéresis de cada conexión.

2. CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN:

El acero es, quizá el material más versátil que existe, caracterizado por su alta resistencia, poco peso en comparación a otros materiales empleados en la construcción común, su facilidad de fabricación, etc. Cuando se habla acerca del acero estructural, se habla de un conjunto de aceros diseñados para construir edificios, galpones, instalaciones industriales, etc., cuya configuración consiste en vigas y columnas de manera frecuente.

Gran parte del buen desempeño de una estructura de acero depende de sus conexiones, mismas que dependen de varios factores, que van desde la concepción del proyecto, la selección del tipo de junta, si es empernada o soldada, la forma en la que los elementos distribuyen los esfuerzos, el montaje, las propiedades de los materiales usados, entre otros.

Desde el punto de vista económico, el costo de las uniones representa un porcentaje importante del valor total de la estructura, lo cual hace importante elegir la o las conexiones más económicas sin dejar de lado el cumplimiento de los requisitos exigidos por las normas de diseño vigentes en cada zona.

2.2 DEFINICIONES GENERALES

2.2.1 Estructura Metálica

Es aquella construcción en la cual al menos un 80% de sus partes son de acero y está conformada por una estructura principal, que es la encargada de transferir las cargas a los cimientos y la estructura secundaria que hace referencia a la fachada y cubierta.

Este tipo de estructuras se utilizan cuando se busca reducir tiempos de construcción y mano de obra, pero se debe tener en cuenta que la inversión es mucho más elevada con respecto a construcciones de hormigón.

Las estructuras metálicas se caracterizan por:

- Tener una rigidez adecuada que impida la deformación de sus componentes cuando se apliquen cargas a ellas.
- Ser estables y capaces de no volcarse.
- Ser durables a través del tiempo y que el mantenimiento requerido es mínimo.

2.2.2 Tipos de estructuras metálicas

Según (Aceros Torices, 2024), entre las estructuras más comunes destacan las siguientes

- **Estructuras entamadas:** Son las más habituales y se emplean en la construcción de casas y edificios. Su disposición consiste en colocar barras de acero en forma horizontal y vertical.
- **Estructuras trianguladas:** Este tipo de configuración se emplea en la construcción de puentes.
- **Estructuras colgantes:** Su configuración resulta de la combinación de perfiles de acero con cables o tirantes.
- **Estructuras laminares:** Este tipo de estructuras consiste en dar forma a láminas de acero y se observa su aplicación en la construcción de aviones y autos.
- **Estructuras abovedadas:** Este tipo de estructuras se emplea en la construcción de techos parabólicos.

2.2.3 Perfiles de Acero

2.2.3.1 Conexión

Es el resultado, según (Chazaro, 2019), de la intersección de varios elementos cuyo propósito es transmitir esfuerzos de unos a otros y están unidos por medio de pernos con características específicas o soldadura, tal como se muestra en la figura descrita a continuación:

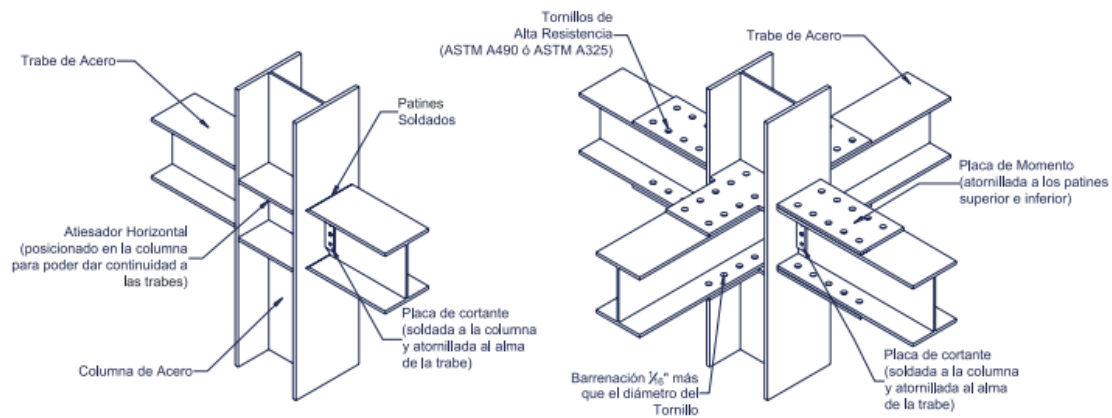


Figura 1 Definición de conexión (Chazaro, 2019)

2.2.3.1.1 Tipos de conexiones

Según (Cañizares, 2018), en AISC existen 2 tipos de conexiones que se muestran a continuación:

- **Conexión simple:** permite la rotación de los miembros adyacentes y transmite un momento despreciable.
- **Conexión a momento:** transmite momento y se clasifica en:
- **Conexión a momento totalmente rígida (FR):** El ángulo entre los elementos constituyentes tiende a ser constante luego de la aplicación de las cargas. Transfiere momento mediante una pequeña rotación en la conexión, se puede ignorar.
- **Conexión a momento parcialmente restringida (PR):** Transfiere momento mediante rotación, no se puede ignorar. Para ser considerada en el análisis

estructural requiere de la respuesta fuerza-deformación de la conexión. El ángulo entre los elementos no permanece constante luego de la aplicación de las cargas.

2.2.3.1.2 Características de la unión

Los elementos de unión tales como los tornillos de alta resistencia y la soldadura son los que se encargarán de que las conexiones funcionen de manera adecuada y las provean de seguridad. Por otra parte (Chazaro, 2019) menciona que en la actualidad las conexiones soldadas están en tendencia a desaparecer con la llegada de los tornillos de alta resistencia, sin embargo, la soldadura no desaparecerá en su totalidad del taller de fabricación de estructuras sobre todo en la fabricación y montaje de placas de conexión tipo End - Plate.

2.2.3.2 Pernos de Alta Resistencia

La aplicación de los pernos de alta resistencia data de 1951, donde se publicaron por primera vez las especificaciones y recomendaciones de uso. La ventaja de usar este tipo de elemento de unión es su gran capacidad para soportar tracción, sin embargo, es importante recordar que los pernos no trabajan a corte.

Según (Chazaro, 2019) los primeros pernos de alta resistencia que se desarrollaron y siguen siendo usados son los ASTM- A325 (NOM-H-124); posteriormente y con el objetivo de contar con capacidades aún mayores, se desarrollaron los ASTM-A490 (NOM-H-123). El acero del cual están hechos estos pernos son tratados térmicamente para controlar sus propiedades mecánicas.

2.2.4 Soldadura

Según la (AWS D1.1, 2020), la soldadura es un proceso de fusión de elementos a través del calor o presión, misma que puede ser con material de aporte o fundiendo las piezas en sí. Es

importante destacar que el material de aporte debe tener un punto de fusión similar al de los materiales que están siendo soldados.

La AWS (Asociación Americana de Soldadura) clasifica en 6 grupos los procesos de soldadura que se muestran a continuación:

- Soldadura blanda (soldering)
- Soldadura en estado sólido
- Soldadura fuerte (brazing)
- Soldadura por oxi-combustible
- Soldadura por resistencia eléctrica
- Soldadura por arco

De los grupos anteriores se pueden destacar los procesos más comunes en la industria metalmeccánica ecuatoriana como son:

2.2.4.1 Soldadura por electrodo revestido (SMAW)

Es común, dice (Grupo Acura, 2024), su uso en la industria metalmeccánica por su simplicidad y efectividad ya que se usa para unir aceros al carbono, inoxidable y de baja aleación, así como fundiciones y metales no féreos como el aluminio, cobre, níquel, etc. Es conocida también como soldadura por arco de metal sumergido ya que la fusión del metal se da por el calor generado por un arco eléctrico creado en el extremo de un electrodo revestido y el metal base que se va a unir.

Stick Welding / Shielded Metal Arc Welding

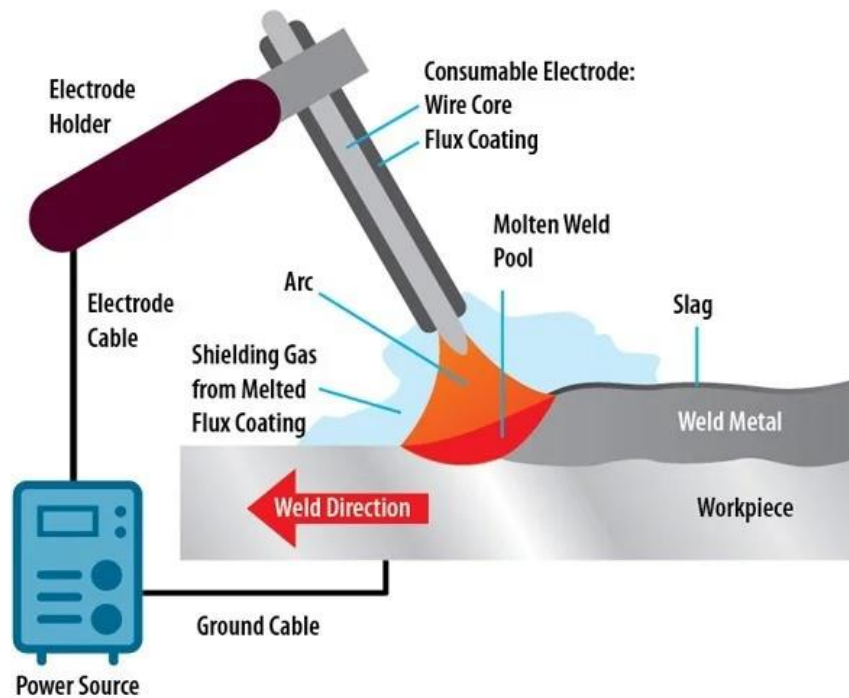


Figura 2 Proceso SMAW (LEADRP, 2024)

Para soldar con SMAW es importante tener los siguientes elementos:

- Fuente de poder
- Pinza porta-electrodos
- Electrodo revestido
- Conexión a masa
- Cables de sondeo

Es importante cumplir con las normativas de seguridad para ejecutar este proceso de soldadura, ya que se pueden alcanzar temperaturas en el arco de hasta 5500 °C

Entre las ventajas y desventajas de utilizar este proceso se destacan las siguientes:

Tabla 1 Características del proceso SMAW

Ventajas	Desventajas
Portátil	Lento

Aplicable a espesores mayores a 2 mm	Se requiere personal calificado
No se necesita protección del arco adicional	No se sugiere utilizar para espesores mayores a 38 mm
Se puede soldar variedad de materiales	No se puede soldar metales con bajo punto de fusión.

2.2.4.2 Soldadura por arco con núcleo fundente (FCAW)

Este proceso, dice (FERREPRO, 2024), se caracteriza porque se alimenta de un alambre tubular y por medio del arco eléctrico se crea el depósito de soldadura en el material base para unir los elementos.



Figura 3 Proceso FCAW (FERREPRO, 2024)

Este proceso se destaca por su gran capacidad de penetración lo que permite soldar placas de grandes espesores y a diferencia del proceso SMAW, este permite soldar metales con óxido y otro tipo de contaminantes.

Al tener disponible alimentación continua por alambre, se puede soldar más rápido con respecto a otros procesos como SMAW y no se requiere de gran habilidad del soldador para tener un cordón perfecto.

Para soldar con FCAW es importante tener los siguientes elementos:

- Electrodo
- Rodillos de accionamiento
- Fuente

2.2.4.3 Soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW-TIG)

Según (Prosoldes, 2024), este proceso se caracteriza por generar un arco entre el electrodo de tungsteno y el punto de soldadura, usando gas de protección.

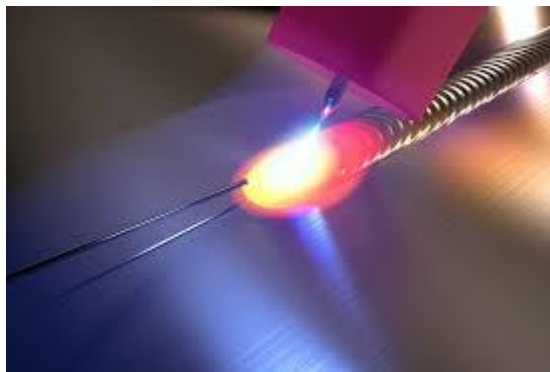


Figura 4 Proceso GTAW-TIG (Prosoldes, 2024)

Este proceso, por su versatilidad, se emplea para soldar metales ferrosos y no ferrosos en todas las posiciones de soldadura y al no usar fundente, se pueden soldar metales delgados.

Existen varios electrodos de tungsteno que se clasifican según su composición química y deben cumplir los requisitos descritos en la ANSI-AWS D1.1.

Para soldar con GTAW es importante tener los siguientes elementos:

- Máquina de soldadura AC/DC.
- Gas de protección.
- Regulador de gas protegido.
- Caudalímetro para gas.
- Manguera de gas.

- Cable del electrodo y la manguera.
- La antorcha de soldadura.
- El electrodo de tungsteno.
- Material de aporte.

La principal característica de este proceso de soldadura es que sus cordones visualmente son perfectos y no genera escoria.

A continuación, se muestra un resumen de las principales ventajas y desventajas de este proceso:

Tabla 2 Características proceso GTAW

Ventajas	Desventajas
Calidad en el cordón	Genera altos índices de rayos ultravioletas
Se puede soldar espesores finos	Se requiere soldadores calificados
No genera escoria	No es fácil su portabilidad
Se puede soldar con o sin material de aporte	No se recomienda soldar al aire libre
Se puede soldar en todas las posiciones	Es un proceso lento

2.2.4.4 Soldadura por arco sumergido (SAW)

Este proceso, menciona (Prosoldes, 2024), se caracteriza porque el arco y el baño de fusión están protegidos por un polvo granulado, el cual sirve para proteger al entorno de las altas temperaturas y a la soldadura de la atmósfera circundante.



Figura 5 Proceso SAW (Prosoldes, 2024)

En este proceso se utilizan corrientes que van de 200 a 2000 Amperios y se pueden soldar espesores desde 5 mm hasta 40 mm lo cual la hace apta para construir vigas y columnas de acero a gran escala ya que se caracteriza por ser un proceso automático.

Este proceso necesita los siguientes elementos:

- Fuente de poder de CC o CA (100% ciclo de trabajo).
- Sistema de control.
- Porta carrete de alambre.
- Alambre-electrodo.
- Tobera para boquilla.
- Recipiente porta-fundente.
- Metal base.
- Fundente.
- Alimentador de alambre

2.2.5 Tipos de soldaduras de uso común en las estructuras

Al criterio de (McCormac & Csernak, 2012), en la construcción de estructuras metálicas, los tipos de soldaduras más usuales son los de filete y el de ranura.

2.2.5.1 Soldadura de filete

Se utilizan para traspalar una superficie con otra y se caracterizan por ser económicas ya que casi no requieren preparación previa y tampoco se requieren soldadores con mucha experticia. Por lo general el 80% de las soldaduras de una estructura se realizan a filete.

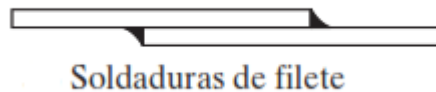


Figura 6 Soldadura a Filete (McCormac & Csernak, 2012)

Estudios indican que este tipo de soldadura es más resistente a tensión y compresión que a corte, de tal manera que este tipo de soldadura se chequea a corte.

En una soldadura a filete, el área efectiva se considera como la longitud de soldadura multiplicada por la garganta efectiva, donde, la garganta efectiva de una soldadura de filete es la menor distancia de la raíz hasta la superficie de la soldadura.

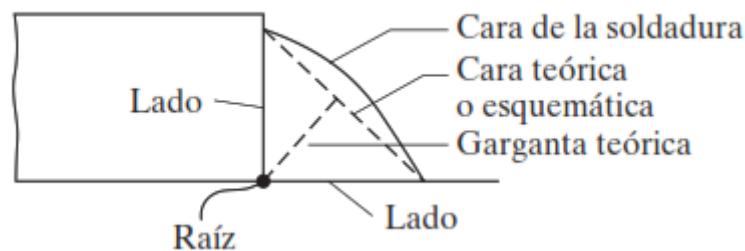


Figura 7 Esquema Filete (McCormac & Csernak, 2012)

2.2.5.2 Soldadura de Ranura

Este tipo de soldadura se utiliza cuando los elementos que se conectan están alineados en el mismo plano y son comúnmente usadas en los empalmes de las columnas y las conexiones a tope de los patines de las vigas hacia las columnas.

Estas soldaduras pueden ser de penetración completa o parcial según el requerimiento y son mucho más costosas que las soldaduras en filete, por los costos de preparación que implica.

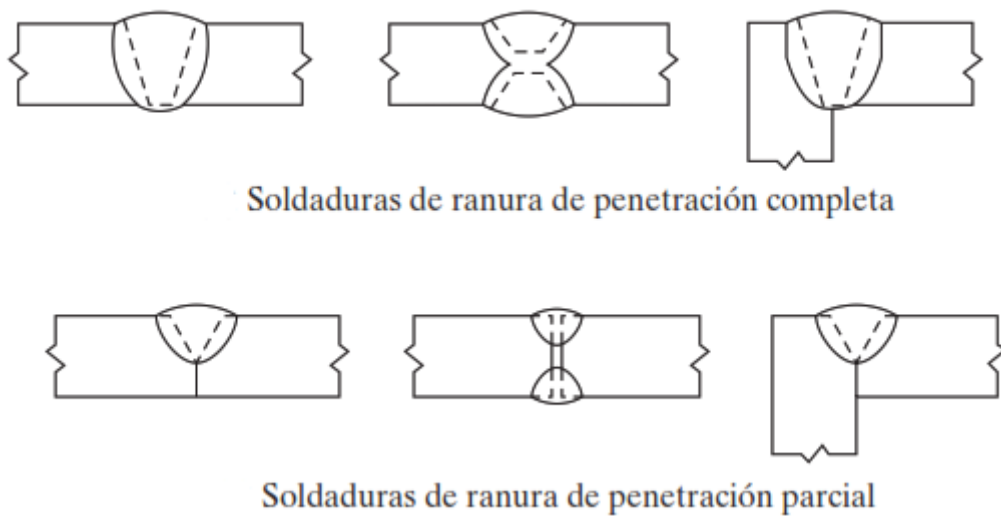


Figura 8 Soldadura de ranura (McCormac & Csernak, 2012)

2.2.6 Tipos de Juntas Soldadas

La soldadura también se la puede clasificar en función de la junta usada como se describe a continuación:

- Soldadura a tope
- Soldadura a traslape
- Soldadura en Te
- Soldadura de canto
- Soldadura en esquina

A continuación, se muestra un gráfico general de estos tipos:

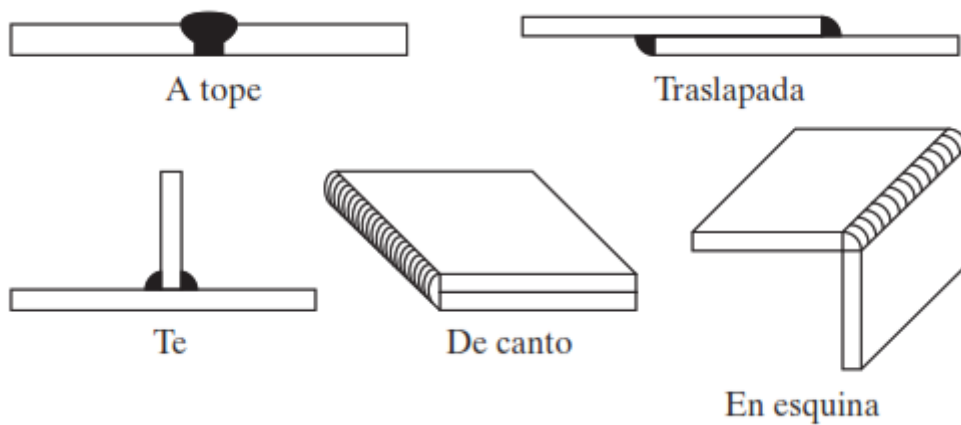


Figura 9 Tipo de juntas soldadas (McCormac & Csernak, 2012)

2.2.7 Simbología utilizada en soldadura

En la tabla mostrada a continuación, se indican los símbolos desarrollados por la AWS, en la cual se muestra toda la información necesaria para describir correctamente la información de la soldadura.

Símbolos básicos de soldadura									
Posterior	Filete	Tapón o ranura	Ranura o a tope						
			Cuadrado	V	Bisel	U	J	Ensanchamiento en V	Ensanchamiento de bisel

Figura 10 Símbolos básicos de soldadura (McCormac & Csernak, 2012)

Símbolos suplementarios de soldadura						
Respaldo	Espaciado	Soldadura todo alrededor	Soldadura de campo	Contorno		Véase AWS A2.4 para otros símbolos básicos y complementarios de soldadura
				Al ras	Convexo	

Figura 11 Símbolos suplementarios de soldadura (McCormac & Csernak, 2012)

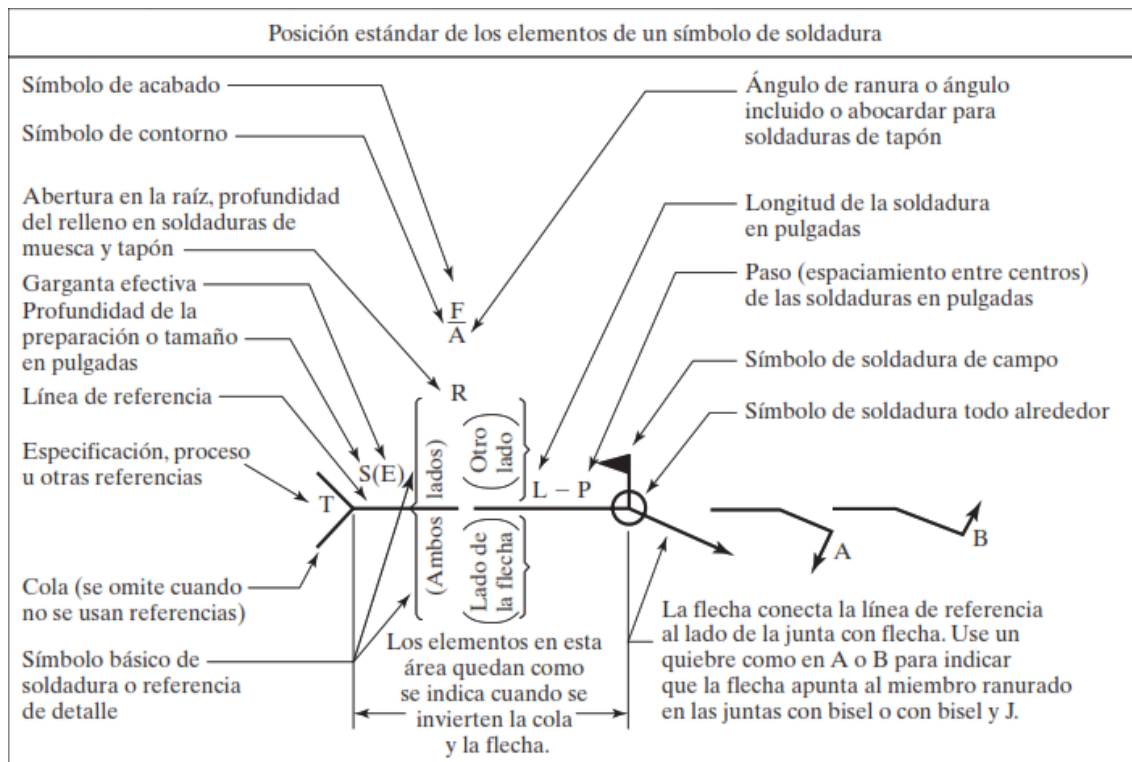


Figura 12 Notación estándar de soldadura (McCormac & Csernak, 2012)

Nota:

Tamaño, símbolo de la soldadura, longitud y espaciamento deben leerse en ese orden de izquierda a derecha sobre la línea de referencia. Ni la orientación de la línea de referencia ni la posición de la flecha alteran esta regla. El lado perpendicular de los símbolos Δ , ∇ , P , V , debe estar a la izquierda.

Las dimensiones de las soldaduras de filete deben mostrarse tanto en el lado con la flecha como en otro lado.

Los símbolos se aplican entre cambios bruscos en la dirección de la soldadura, a menos que se muestre el símbolo de "todo alrededor" o se indique algo diferente.

Estos símbolos no se refieren explícitamente al caso de ocurrencia frecuente en las estructuras, en donde material duplicado (por ejemplo, atiesadores) se localiza en el lado posterior de una placa de nudo o alma. Los fabricantes han adoptado la siguiente convención de estructuras: cuando en la lista de embarque del material en detalle se detecte la existencia de un miembro en el lado alejado, así como en el lado cercano, la soldadura mostrada para el claro cercano se duplicará para el lado alejado.

Figura 13 Notas a considerar (McCormac & Csernak, 2012)

2.2.8 Conexiones Soldadas

A través de la historia menciona (McCormac & Csernak, 2012), las conexiones soldadas no tuvieron relevancia en las construcciones ya que se pensaba que tenía poca resistencia a la fatiga y no se podía garantizar la calidad de las juntas soldadas, por esa razón era frecuente el uso de conexiones con pernos, sin embargo en la actualidad, luego de estudios y ensayos se ha validado que la soldadura tiene una resistencia considerable a la fatiga y también la

inspección se ha hecho más sencilla con el uso de normas y especificaciones dadas por la AWS (American Welding Society).

Con el uso de la soldadura se ha logrado reducir el peso de las estructuras, ya que, en el ámbito de las conexiones se necesitan menos placas de unión y empalme con respecto a los conjuntos empernados y al no usar elementos de empalme, se pueden tener estructuras más rígidas que las empernadas.

2.2.9 Soldadura Precalificada

Cuando se usa el término “precalificado/a” se refiere a que los procesos se aceptan sin necesidad de ensayos ni pruebas de laboratorio a través de procedimientos de calificación. Para el caso de las conexiones soldadas, los procesos aceptados por la especificación 1.3.1 del AWS son: SMAW, GMAW, FCAW y SAW.

Para una inspección adecuada de la soldadura es importante definir los procedimientos de soldadura adecuados, contratar soldadores calificados y emplear inspectores calificados tanto en obra como taller.

2.3 ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

La página de (Autodesk, 2024) menciona que este método consiste en modelar dentro de entornos virtuales, productos y sistemas, para buscar solución a problemas de rendimiento de estos. En el pasado, cuando se diseñaba un nuevo sistema o se buscaba optimizar los ya existentes, la forma de saber cómo se desempeñaban bajo el efecto de fuerzas y efectos externos era con la experimentación física, representando una gran inversión de recursos tangibles. Con el avance de la tecnología y enfoques matemáticos, hoy en día se puede simular en un entorno virtual los mismos efectos, optimizando el uso de recursos y teniendo incluso, mejores resultados.

Este enfoque matemático, fue desarrollado por el año de 1943 por Richard Courant, el mismo que usó el método de Ritz para el análisis numérico para resolver problemas en el campo oscilatorio. Dentro de la ingeniería, el uso de métodos numéricos sirve para dar soluciones aproximadas a ecuaciones diferenciales parciales muy complejas que no se pueden resolver de forma exacta con las matemáticas, basándose en el análisis de matrices de desplazamiento para posteriormente, mediante relaciones matemáticas, encontrar deformaciones, esfuerzos, etc.

Según (ESSS, 2024), la forma en que trabaja este método es, a la geometría del cuerpo en análisis, lo divide en partes más pequeñas que se les conoce como “elementos”, de tal forma que las ecuaciones que gobiernan el cuerpo macro ahora son más simples para resolverlas con el ordenador.

El método se basa en cambiar un infinito número de variables desconocidas, por un número limitado de elementos cuyo comportamiento esta ya definido. Por lo general las divisiones son triangulares, cuadrangulares, etc., y la precisión de los resultados dependerá del tamaño de los elementos.

Estos elementos se conectan entre si por puntos que se denominan nodos, donde a este conjunto se denomina malla.

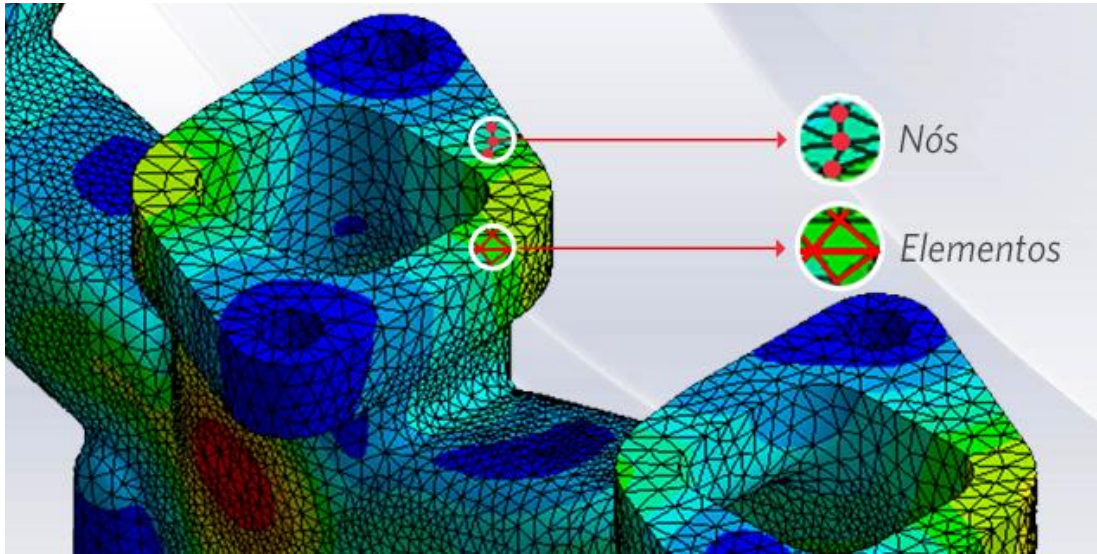


Figura 14 Elementos y nodos (ESSS, 2024)

El análisis por elementos finitos debe cumplir las siguientes fases:

- Preprocesamiento: Fase en la cual se define el modelo y se le atribuyen los factores externos que actúan sobre él. Para realizar la geometría se puede utilizar el mismo entorno del simulador o exportarlos de los programas de CAD existentes. En esta fase se realiza el mallado y es importante sectorizar las áreas de interés para una solución más precisa.
- Solución del análisis: Fase de solución matemática que consiste en resolver matrices y obtener resultados de deformación y escalarlos a esfuerzos, etc.
- Post-procesamiento: Fase de visualización de resultados.

2.3.1 ANSYS

Este programa de simulación se por tener las 3 fases del proceso de modelación y simulación en un mismo entorno y permite resolver problemas lineales y no lineales para estructuras, transferencia de calor, dinámica de fluidos, diseños acústicos y electromagnéticos.

A continuación, se muestra el entorno de trabajo del programa usado para este proyecto.

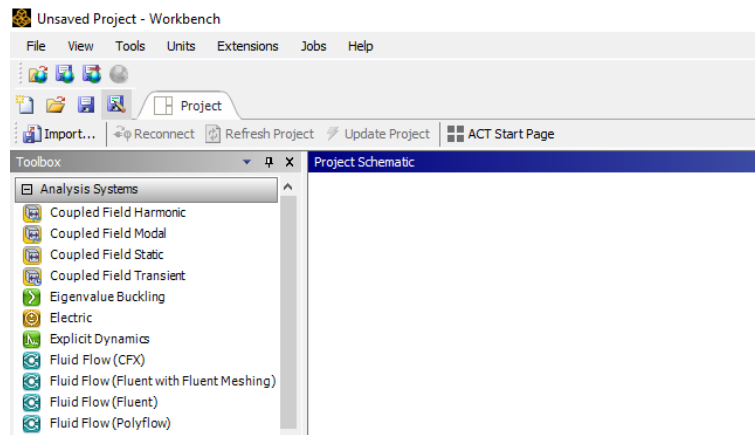


Figura 15 Entorno de ANSYS

2.3.1.1 Desventajas de usar ANSYS

La mayoría de los problemas se han ido superando en el tiempo, sin embargo, cabe destacar los siguientes puntos:

- Los resultados dependen de la calidad de la malla. Entre más elementos existan, más aproximados a la realidad serán los resultados, pero eso implica mayor uso de recursos computacionales.
- El mallado da problemas en los ángulos de las aristas.
- La mayoría de los datos deben ser ingresados por el usuario, lo que acarrea más errores en la definición de propiedades del material, entre otros.

2.3.1.2 Definición del material en ANSYS

ANSYS tiene varias formas de ingresar el material para las simulaciones tal como se muestra en la siguiente imagen:

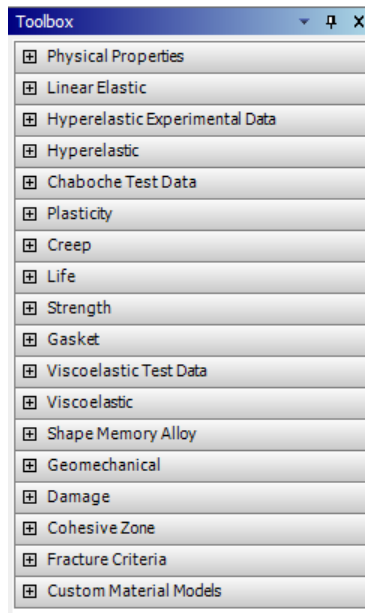


Figura 16 Toolbox ANSYS

Para este análisis se va a utilizar el módulo de plasticidad dado que nuestro sistema viga columna va a plastificar durante el ensayo que exige la norma. Es por eso por lo que se muestra a continuación algunas definiciones a considerar:

2.3.1.2.1 Plasticidad

Según el manual de ANSYS, se define a la plasticidad como la capacidad que tiene un material, para este caso el acero A36, para deformarse de forma permanente sin llegar a fracturarse.

Para definir un material en las simulaciones por elementos finitos, se parte de los datos proporcionados por el laboratorio o la literatura, de los cuales es importante definir el punto de fluencia del material a partir de donde empieza a plastificarse, situación en la cual el usuario decide si considera el endurecimiento o utiliza el concepto de plasticidad perfecta que arroja resultados conservadores. Cuando se asume que el material alcanza el punto de fluencia y plastifica de forma perfecta, cualquier incremento de carga provocará una deformación grande

En las figuras que se muestran a continuación, se presentan los diagramas considerando el endurecimiento y la plastificación perfecta:

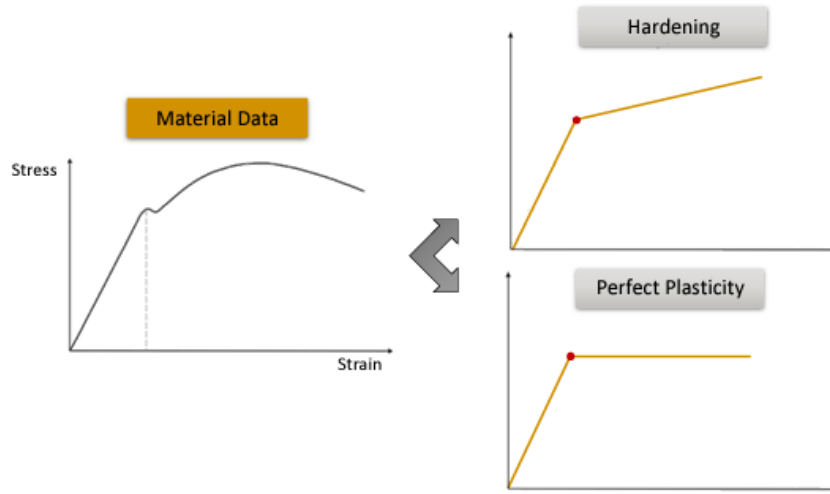


Figura 17 Endurecimiento vs plastificación perfecta (ANSYS, 2024)

A continuación, se muestra el gráfico obtenido de ensayos de laboratorio y en línea roja lo que se propone ingresar en el programa.

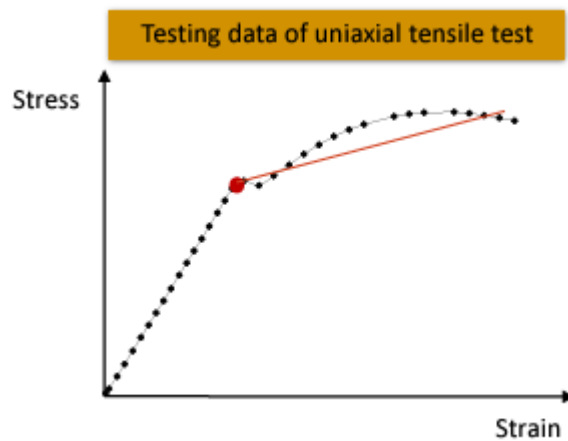


Figura 18 Ensayos de laboratorio para materiales (ANSYS, 2024)

Como en este proyecto los ensayos son cíclicos se propone considerar el endurecimiento, por lo cual, como se observó en la gráfica anterior, el usar todos los datos del laboratorio, hacen complejo el cálculo computacional tanto en tiempo como en recursos, por ende, la

forma de simplificarlos es definir un modelo bilineal (2 pendientes) en la cual se aproxime al efecto real del material tal como se muestra a continuación:

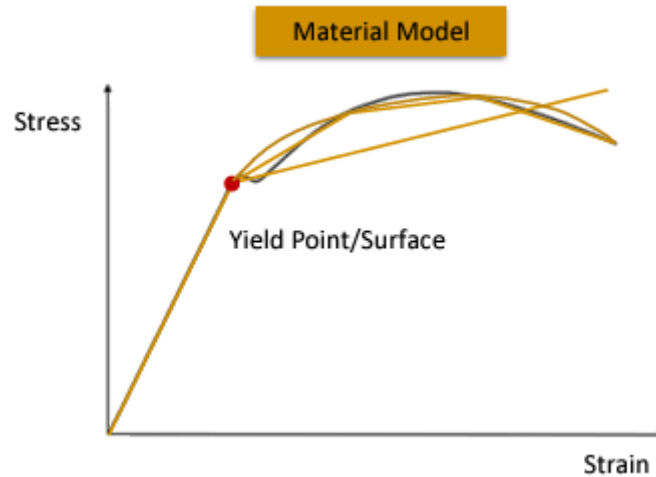


Figura 19 Modelo bilineal (ANSYS, 2024)

Para determinar las pendientes del endurecimiento Bilineal se necesario tener los siguientes parámetros y se los calcula de la siguiente manera:

Módulo de endurecimiento H:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{total} - \varepsilon_e$$

$$H = \frac{\sigma - \sigma_y}{\varepsilon_p} [MPa]$$

Donde:

- σ : Esfuerzo en el punto de análisis [MPa]
- σ_y : Esfuerzo de fluencia del material [MPa]
- ε_{total} : Deformación total
- ε_e : Deformación en la zona elástica

(Uribe Vallejo & Valencia Clement, 2009) en su investigación sugieren que el valor del módulo tangente debe ser aproximadamente 1/30 parte del módulo elástico del material, que

para este estudio oscila entre 190-210 MPa teniendo un módulo que varía entre 6333 y 7000 MPa.

(ANSYS, 2024) proporciona 2 opciones referentes al endurecimiento, los cuales son:

- Endurecimiento isotrópico
- Endurecimiento cinemático

Para el caso de endurecimiento isotrópico, la superficie de fluencia varía uniformemente en sentido radial como se muestra en la siguiente figura:

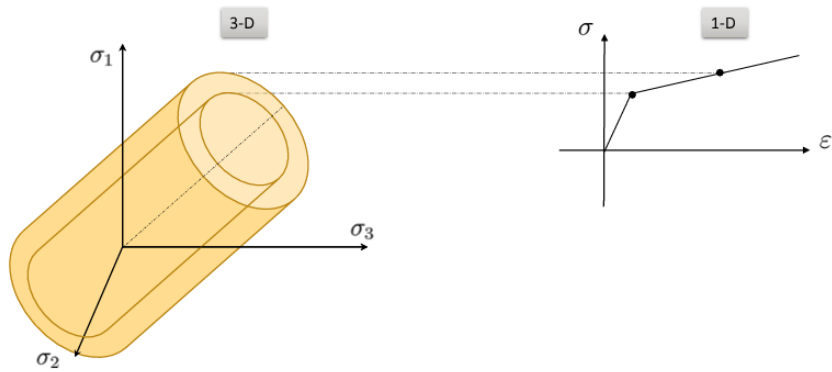


Figura 20 Isotropic Hardening (ANSYS, 2024)

En cambio, en el endurecimiento cinemático, la superficie de fluencia conserva la misma forma y tamaño dado que es una transformación rígida, como se muestra a continuación:

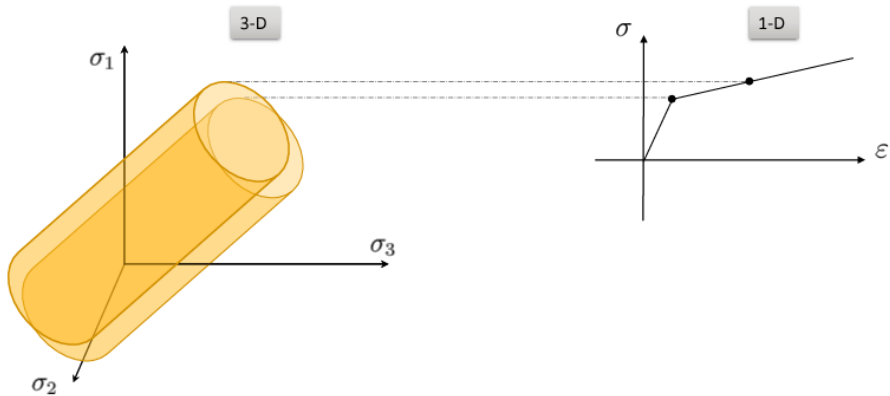


Figura 21 Endurecimiento cinemático (ANSYS, 2024)

2.3.1.2.2 Endurecimiento para carga cíclica

Cuando a un cuerpo o sistema se le aplica una carga y descarga sucesivamente y a su vez se aplica la misma carga, pero en sentido opuesto y posterior su descarga, a este proceso se lo denomina carga por ciclos.

En la siguiente figura, si se aplica una carga no cíclica desde el punto A al punto B, los resultados del endurecimiento tanto isotrópico como cinemático son los mismos, sin embargo, si se aplica una carga cíclica, el comportamiento final del material será diferente.

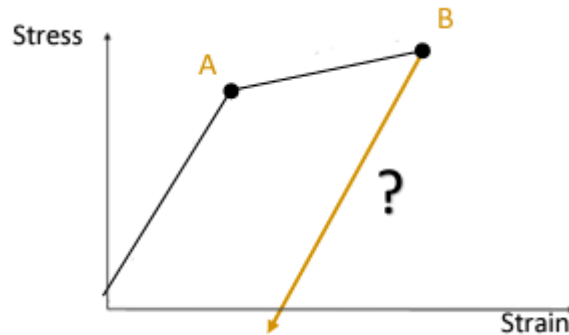


Figura 22 Endurecimiento por carga cíclica (ANSYS, 2024)

2.3.1.2.2.1 Endurecimiento isotrópico para cargas cíclicas

Para este caso de endurecimiento, los puntos de fluencia son simétricos respecto del eje de esfuerzo nulo del ciclo, tal como se observa en la figura mostrada a continuación:

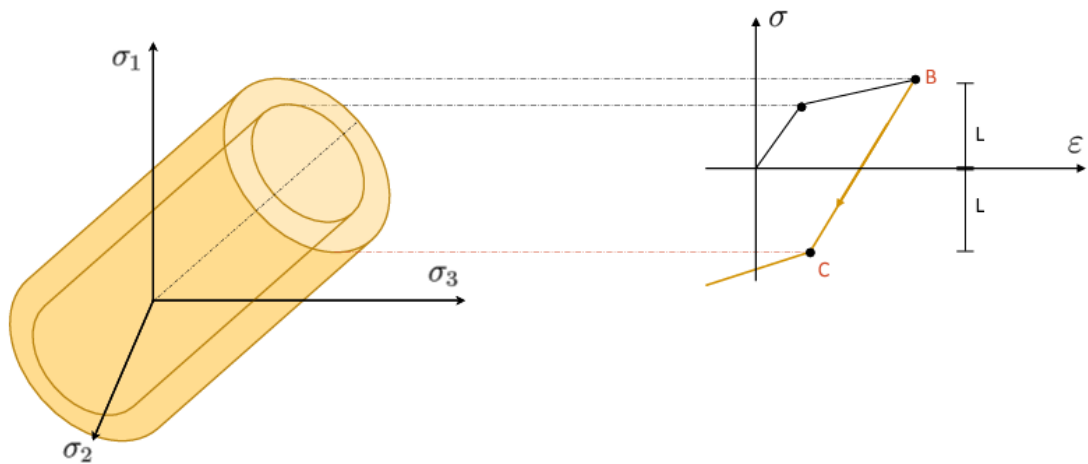


Figura 23 Endurecimiento isotrópico por cargas cíclicas (ANSYS, 2024)

2.3.1.2.2 Endurecimiento cinemático para cargas cíclicas

Para este caso de endurecimiento, los puntos de fluencia no son simétricos respecto del eje de esfuerzo nulo del ciclo, tal como se observa en la figura mostrada a continuación:

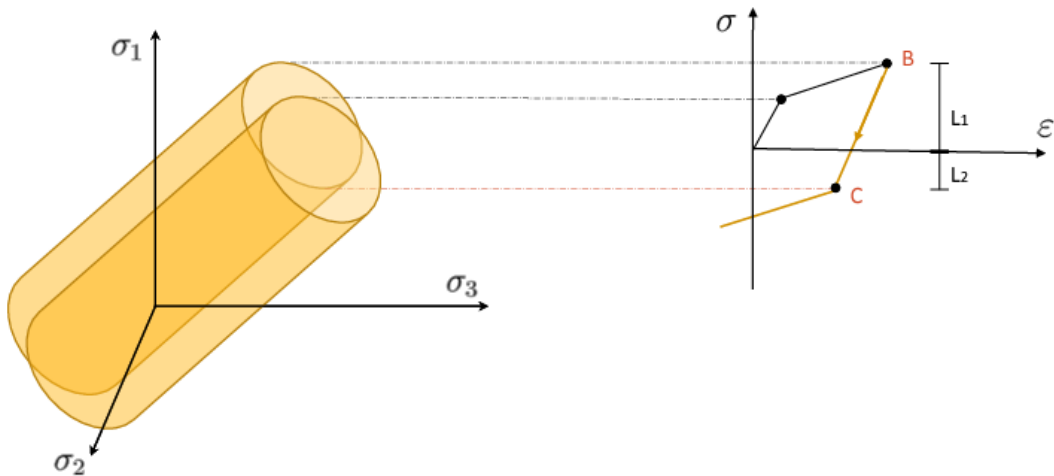


Figura 24 Endurecimiento cinemático para cargas cíclicas (ANSYS, 2024)

Es importante destacar que el cambio del punto de fluencia se denomina efecto Bauschinger, el cual es una propiedad de los materiales en que el esfuerzo de fluencia por compresión se reduce después de estar sometido a una carga de tracción.

Por lo tanto, según el manual de usuario de (ANSYS, 2024), la manera adecuada para seleccionar el método de endurecimiento presentado se basa en función del efecto

Bauschinger, si el sistema o cuerpo están sometidos a cargas cíclicas se debe emplear el endurecimiento cinemático para simular el comportamiento del material.

3. CAPITULO 3: NORMATIVA

A continuación, se muestra un breve resumen de la parte normativa usada en este proyecto:

3.1 DEFINICIONES Y ESPECIFICACIONES DE NEC PARA ESTRUCTURAS DE ACERO

Especificación ASTM		Mínimo (ksi)	Medio (ksi)	Máximo (ksi)
ASTMA36	Esfuerzo de Fluencia	36.00	47.12	63.00
	Resistencia a la Tensión	51.00	64.76	84.00
	F_y/F_u (%)	56.00	73.00	98.00
ASTMA572 Gr 50	Esfuerzo de Fluencia	49.00	55.36	70.00
	Resistencia a la Tensión	67.00	82.26	94.00
	F_y/F_u (%)	59.00	67.00	82.00
ASTMA588 Gr 50	Esfuerzo de Fluencia	50.00	58.38	73.00
	Resistencia a la Tensión	71.00	81.26	90.00
	F_y/F_u (%)	62.00	72.00	87.00

Figura 25 Propiedades Acero A36 (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

3.2 DEFINICIONES Y ESPECIFICACIONES DE LA AISC 360-22, AISC 358-22 Y AISC 341-22

El Instituto Americano de Construcción en Acero (AISC) (ANSI/AISC 360 -22, 2022), antes conocido como la Asociación Nacional de Fabricantes de Acero, es una asociación sin fines de lucro para el uso del acero estructural en la industria de la construcción en Estados Unidos, cuyo propósito es trabajar con agencias gubernamentales para generar políticas y regulaciones como respaldo para promover el crecimiento y desarrollo de la industria.

3.2.1 AISC 360-22

El código AISC 360-22, (ANSI/AISC 360 -22, 2022), busca brindar fundamentos teóricos y prácticos requeridos para el diseño estructural y sismorresistente de las edificaciones de acero estructural a través de la aplicación de la normativa internacional vigente (Norma ANSI/AISC360).

A continuación, se muestra un breve resumen del capítulo J correspondiente a “Diseño de conexiones”, de donde se obtendrán las ecuaciones para el diseño y validación de las conexiones en estudio.

3.2.1.1 Momento plástico M_p

Para determinar el momento plástico se usa la siguiente ecuación:

$$M_p = F_y * Z_x [Ton - m]$$

Donde:

- F_y : Esfuerzo de fluencia del material.
- Z_x : Módulo de sección plástica tomado alrededor del eje x.

3.2.1.2 Apartado J2: Diseño de soldadura – AISC 360-22

Es importante el cumplimiento de las disposiciones del código de soldadura AWS D1.1/D1.1 M.

3.2.1.3 Soldadura de ranura

Área efectiva: para este caso de estudio se tiene CJP, dónde la norma indica que la garganta efectiva será el espesor de la parte más delgada que se está uniendo. Teniendo como resultado el producto de la garganta por la longitud del cordón de soldadura.

Soldadura de filete: al igual que en la soldadura de ranura, el área efectiva será igual al producto de la garganta efectiva por la longitud del cordón, donde la garganta será la distancia más corta desde la raíz hasta la cara de la soldadura.

Cálculo de esfuerzos: La resistencia de diseño, ϕR_n , y la resistencia admisible, R_n/Ω , de uniones soldadas serán el menor valor de la resistencia del material base determinada según los estados límite de rotura por tracción y rotura por cortante y la resistencia del metal de soldadura determinada según el estado límite de ruptura de la siguiente manera:

- **Para el metal base:**

$$R_n = F_{nBM}A_{BM}$$

Para soldaduras de ranura con penetración completa y parcial de juntas, y soldaduras de tapón y ranura se tiene:

$$R_n = F_{nw}A_{we}$$

- **Para la soldadura de filete:**

$$R_n = F_{nw}A_{we}k_{ds}$$

Dónde:

- A_{BM} : área del metal base [mm²]
- A_{we} : área efectiva de la soldadura [mm²]
- F_{nBM} : resistencia nominal del metal base [MPa]
- F_{nw} : resistencia nominal de la soldadura [MPa]
- k_{ds} : factor de incremento de fuerza direccional

Donde se usará un valor de k_{ds} de 1.

De la tabla J2.5 que se muestra a continuación, y al tener penetración completa, el control viene dado por la resistencia del metal base.

TABLE J2.5 Available Strength of Welded Joints, ksi (MPa)					
Load Type and Direction Relative to Weld Axis	Pertinent Metal	ϕ and Ω	Nominal Stress, F_{nBM} or F_{nW} , ksi (MPa)	Effective Area, A_{BM} or A_{WE} , in. ² (mm ²)	Required Filler Metal Strength Level ^{[a][b]}
COMPLETE-JOINT-PENETRATION GROOVE WELDS					
Tension—normal to weld axis			Strength of the joint is controlled by the base metal.		Matching filler metal shall be used. For T- and corner-joints with backing left in place, notch tough filler metal is required. See Section J2.6.
Compression—normal to weld axis			Strength of the joint is controlled by the base metal.		Filler metal with a strength level equal to or one strength level less than matching filler metal is permitted.
Tension or compression—parallel to weld axis			Tension or compression in parts joined parallel to a weld is permitted to be neglected in design of welds joining the parts.		Filler metal with a strength level equal to or less than matching filler metal is permitted.
Shear			Strength of the joint is controlled by the base metal.		Matching filler metal shall be used. ^[c]
PARTIAL-JOINT-PENETRATION GROOVE WELDS INCLUDING FLARE-V-GROOVE AND FLARE-BEVEL-GROOVE WELDS					

Figura 26 Resistencia disponible de la junta soldada. (ANSI/AISC 360 -22, 2022)

Para la soldadura de filete se debe considerar los siguientes valores de la tabla J2.5 de la AISC 360-22.

TABLE J2.5 (continued) Available Strength of Welded Joints, ksi (MPa)					
Load Type and Direction Relative to Weld Axis	Pertinent Metal	ϕ and Ω	Nominal Stress, F_{nBM} or F_{nW} , ksi (MPa)	Effective Area, A_{BM} or A_{WE} , in. ² (mm ²)	Required Filler Metal Strength Level ^{[a][b]}
FILLET WELDS INCLUDING FILLETS IN HOLES AND SLOTS AND SKEWED T-JOINTS					
Shear	Base	Governed by J4			Filler metal with a strength level equal to or less than matching filler metal is permitted.
	Weld	$\phi = 0.75$ $\Omega = 2.00$	$0.60F_{EXX}$ ^[d]	See J2.2a	
Tension or compression—parallel to weld axis			Tension or compression in parts joined parallel to a weld is permitted to be neglected in design of welds joining the parts.		
PLUG AND SLOT WELDS					
Shear—parallel to faying surface on the effective area	Base	Governed by J4			Filler metal with a strength level equal to or less than matching filler metal is permitted.
	Weld	$\phi = 0.75$ $\Omega = 2.00$	$0.60F_{EXX}$	See J2.3a	

Figura 27 Resistencia disponible de la junta soldada. (ANSI/AISC 360 -22, 2022)

En los comentarios de la sección J de la AISC 360-22 apartado 4, indica que resistencia de una unión que contiene una soldadura de ranura de penetración completa de la junta (CJP), ya sea cargada en tensión o compresión, depende de la resistencia del metal base y no se requiere ningún cálculo de la resistencia de la soldadura de ranura CJP.

3.2.2 AISC 358-22

El código AISC 358-22, (ANSI/AISC 358 -22, 2022), busca brindar fundamentos teóricos y prácticos requeridos para el diseño de conexiones precalificadas con elementos soldados o atornillados.

A continuación, se muestra los parámetros de diseño de una conexión:

Factores de resistencia: Los factores de resistencia se muestran a continuación:

- Para estados límite dúctiles

$$\phi_d = 1,00$$

- Para estados límite no dúctiles

$$\phi_n = 0,90$$

3.2.2.1 Cálculo del momento máximo probable de la rótula plástica

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_y Z_e$$

Donde:

C_{pr} : factor para tener en cuenta la resistencia máxima de la conexión, incluido el endurecimiento por deformación, la restricción local, el refuerzo adicional y otras condiciones de la conexión. A menos que se indique específicamente lo contrario en esta norma, el valor de C_{pr} será:

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \leq 1.2$$

F_u : Esfuerzo último del elemento [MPa]

F_y : Esfuerzo de fluencia del elemento [MPa]

R_y : Relación entre el esfuerzo esperado de fluencia y el esfuerzo mínimo especificado de fluencia F_y

Z_e : Módulo plástico efectivo de la sección o conexión en la ubicación de la articulación plástica. [mm^3]

3.2.2.2 Fuerza cortante en la rótula plástica

A continuación, se muestra la manera de determinar la fuerza cortante V_h :

$$V_h = \frac{2M_{pr}}{L_h} + V_{gravedad}$$

Donde:

- L_h : distancia entre las ubicaciones de las rótulas plásticas [mm]
- $V_{gravedad}$: fuerza cortante resultante de $1.2D + f_1L + 0.15S$ que actúa sobre la viga entre las ubicaciones de las rótulas plásticas, donde D es la carga muerta, S es la carga de nieve y f_1 es el factor de carga determinado por el código de construcción aplicable para cargas vivas, pero no menos de 0.5 kips (N)

3.2.2.3 Momento probable en la cara de la columna

A continuación, se muestra la ecuación que permite determinar el momento probable en la cara de la columna:

$$M_f = M_{pr} + V_h S_h$$

Donde:

- M_f : Momento probable en la rótula plástica [$N - mm$]
- S_h : Distancia de la cara de la columna hasta la rótula plástica [mm]
- V_h : Fuerza cortante en la rótula plástica [N]

3.2.3 AISC 341-22

El código AISC 341-22, (ANSI/AISC 341 -22, 2022), busca brindar fundamentos teóricos y prácticos requeridos para el diseño sismorresistente de las estructuras.

3.2.3.1 Secuencia de carga para conexiones de momento entre viga y columna

Los ensayos cíclicos de calificación de conexiones de momento entre vigas y columnas en SMF, IMF, C-SMF y C-IMF se deben realizar controlando el ángulo de deriva del piso, θ , impuesto a la muestra de ensayo, como se especifica a continuación:

- 6 cycles at $\theta = 0.00375$ rad
- 6 cycles at $\theta = 0.005$ rad
- 6 cycles at $\theta = 0.0075$ rad
- 4 cycles at $\theta = 0.01$ rad
- 2 cycles at $\theta = 0.015$ rad
- 2 cycles at $\theta = 0.02$ rad
- 2 cycles at $\theta = 0.03$ rad
- 2 cycles at $\theta = 0.04$ rad

Figura 28 Ciclos conexión viga columna

A continuación, se muestra una gráfica de los ciclos que se deben aplicar a la conexión:

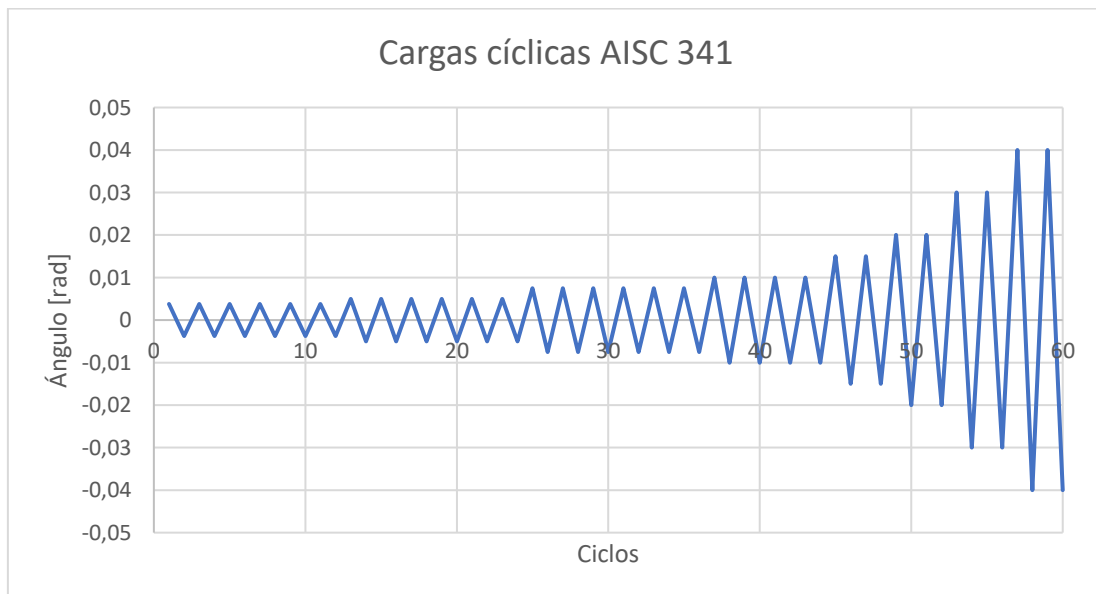


Figura 29 Ciclos conexión viga-columna

Las deformaciones se muestran en el esquema adjunto, donde el desplazamiento debe coincidir con el eje de simetría de la viga:

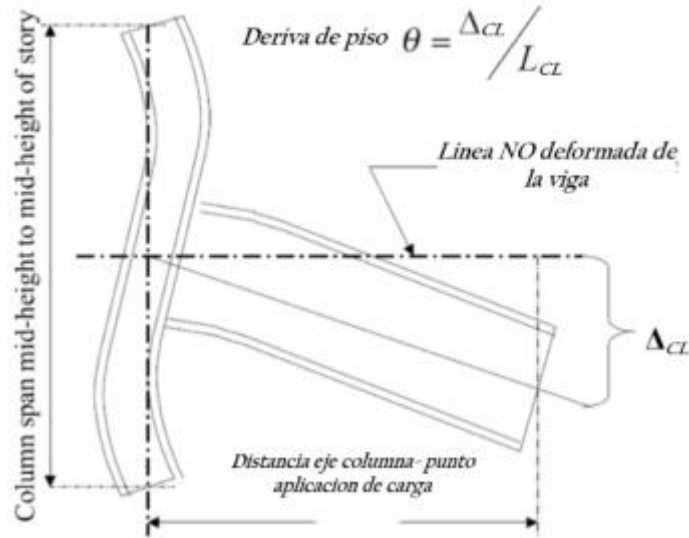


Figura 30 Esquema deformaciones AISC 341

Con cuyos resultados de la unión viga columna, se debe obtener una gráfica como la que se muestra a continuación:

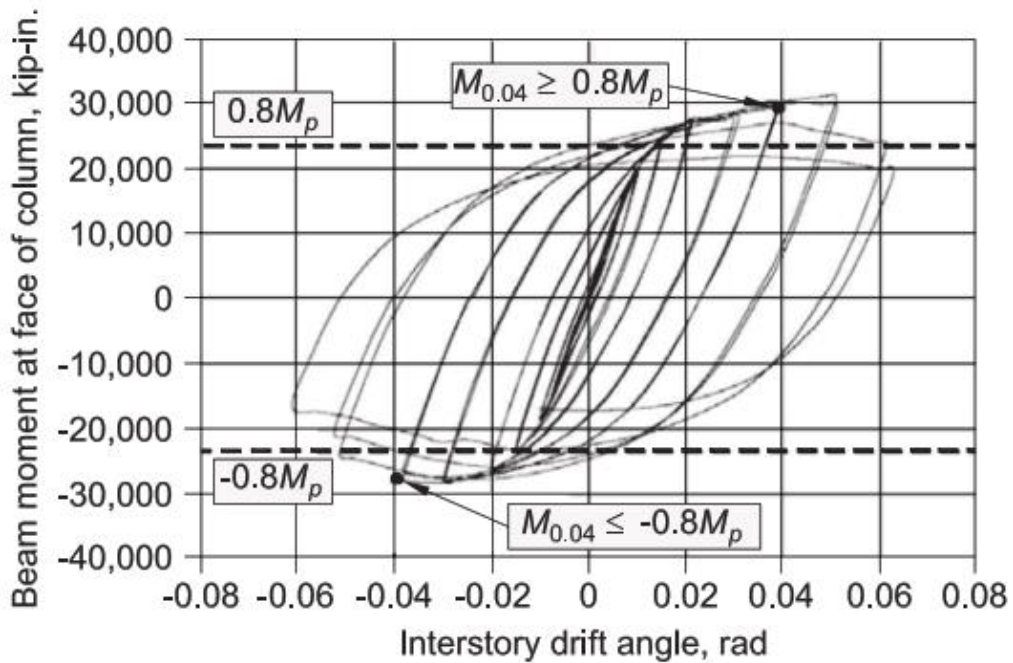


Figura 31 Curva de histéresis de la conexión (ANSI/AISC 341 -22, 2022)

3.2.3.2 Criterios de aceptación o rechazo

Los comentarios de la sección E de la (ANSI/AISC 341 -22, 2022) proporciona los requisitos de diseño y desempeño de las conexiones, estos requisitos son derivados de los establecidos en la (FEMA-350, 2000).

La (FEMA-350, 2000) establece 2 criterios para el ángulo de deriva calificado para SMF:

- Ángulo de falla de la conexión
- Ángulo donde la resistencia de la conexión se degrada a menos de la capacidad plástica nominal.

El ángulo de deriva calificado de degradación de la resistencia se establece en 0.04 rad y el máximo en 0.06 rad. Dichos valores son el resultado de muchas evaluaciones probabilísticas del desempeño de varios sistemas estructurales estudiados en (FEMA-350, 2000).

La calificación de las conexiones se enfoca en el nivel de rotación plástica alcanzada por los elementos, sin embargo, la tendencia de las conexiones a experimentar degradación en su resistencia a mayores deformaciones también debería ser considerado, ya que puede incrementar las demandas de rotación debido a los efectos P-DELTA juntamente con la inestabilidad del marco.

Es por esta razón que la degradación no disminuya la resistencia a la flexión medida en un ángulo de deriva de 0.04 rad a menos del 80% del momento plástico.

Cabe destacar que la limitación del 0.8 Mp fue adoptada antes de que los códigos de construcción o ASCE/SEI 7 adoptaran criterios cuantitativos. Con este valor, lo que se busca es el no colapso de las construcciones durante terremotos graves.

4. CAPITULO 4: ESTADO DEL ARTE DE LOS CASOS DE ESTUDIO

A continuación, se muestra el análisis de los 3 casos de estudio.

4.1 CASO 1

A continuación, se muestra el tipo de conexión, materiales y componentes, proceso de ensamble y geometría correspondiente al caso 1.

ESPECIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Material	Acero ASTM A36 – Hormigón 210 kg/cm^2
Columna	2G_200X50X15X4 mm + Hormigón
Viga	250x100x4x6 mm
Tipo de unión	Soldadura – Filete-E7018

Figura 32 Especificación de materiales CASO 01

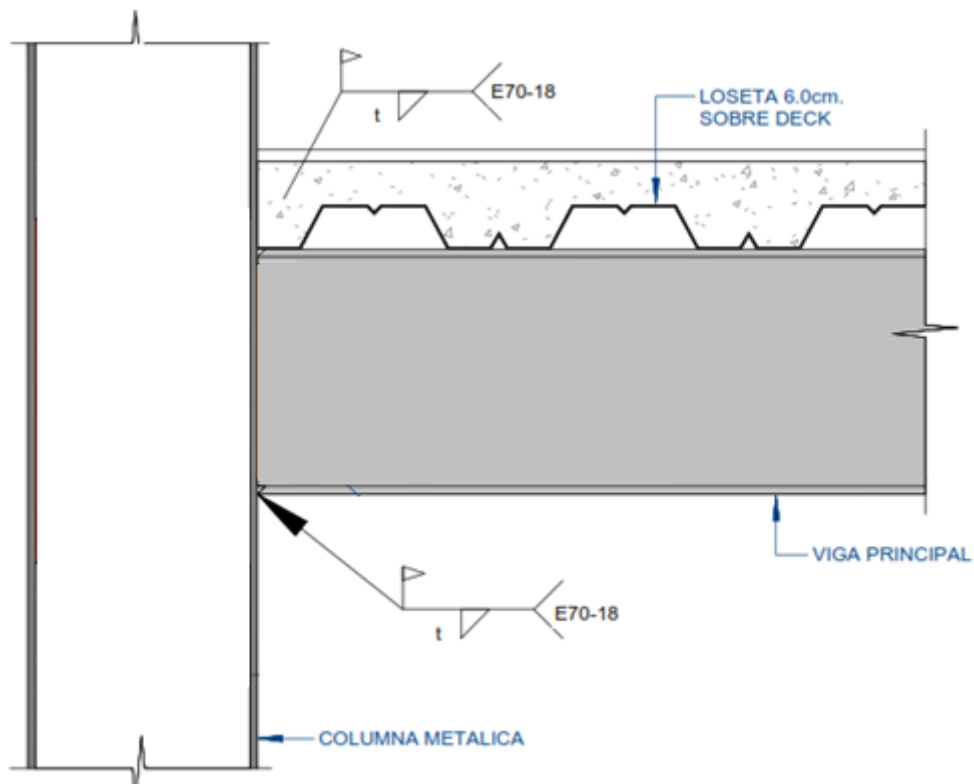


Figura 33 Esquema Conexión Caso 01



Figura 34 Foto real Conexión Caso 01

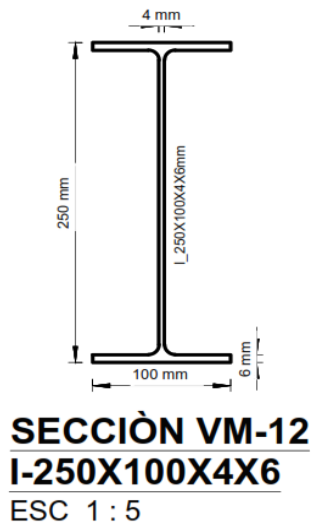


Figura 35 Viga Caso 01



Figura 36 Columna Caso 01

4.1.1 Propiedades de la viga

A continuación, se muestra una imagen con las propiedades de la viga usada, obtenida con ETABS-21:

Property Name	
Section Name	VM-12
Base Material	A36
Properties	
Item	Value
Area, mm2	2152
AS2, mm2	999,3
AS3, mm2	1079,5
I33, mm4	22358157,3
I22, mm4	1001269,3
S33Pos, mm3	178865,3
S33Neg, mm3	178865,3
S22Pos, mm3	20025,4
S22Neg, mm3	20025,4
R33, mm	101,9
R22, mm	21,6
Z33, mm3	203044
Z22, mm3	30952
J, mm4	19605,3
Cw, mm6	14884000000
CG Offset 3 Dir, mm	0
CG Offset 2 Dir, mm	0
PNA Offset 3 Dir, mm	0
PNA Offset 2 Dir, mm	0

Figura 37 Propiedades de la sección Caso 01

4.1.2 Determinación de la resistencia de la soldadura

La soldadura de esta junta fue realizada en campo, empleando proceso SMAW con electrodo E7011 con una garganta efectiva de 6 mm, soldando todo el borde como se muestra en la figura anterior.

En el siguiente esquema se muestra los cordones de soldadura que actúan a corte y flexión:

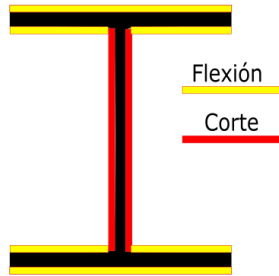


Figura 38 Esfuerzos en la soldadura Caso 01

Para determinar la resistencia de la soldadura se emplea las siguientes ecuaciones tomadas de la AISC 360-22:

$$R_n = F_{nw} A_{we} k_{ds}$$

4.1.2.1 Cálculo de las áreas efectivas del filete:

Tabla 3 Áreas efectivas Caso 01

	L soldadura [mm]	Garganta [mm]	Área efectiva [mm ²]
Flexión	392	6	2352
Corte	476	6	2856

4.1.2.2 Cálculo de las resistencias de la soldadura a filete:

Tabla 4 Resistencias de soldadura Caso 01

	E electrodo [Mpa]	Á efectiva [mm ²]	Rn [kN]
Flexión	483	2352	1136.01
Corte	483	2856	1379.94

Se analiza la falla a flexión.

4.1.3 Cálculo del momento plástico:

$$M_p = 203044 * 250 = 50761 \text{ [kN} - \text{mm]} = 5.71 \text{ [Ton} - \text{m]}$$

Donde su 80% para el análisis tiene un valor de 4.56 [Ton – m]

4.1.4 Cálculo del Momento probable de la rótula plástica

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_y Z_e$$

Para el acero A36 se tiene un $F_u = 450 \text{ MPa}$ y un $F_y = 250 \text{ MPa}$

Donde el C_{pr} tiene un valor de:

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \leq 1.2$$

$$C_{pr} = 1.4$$

Dada la condición de la ecuación se toma como 1.2

El R_y tiene un valor de 1.3 según la tabla de la NEC-SD-2015

El Z_e tiene un valor sacado de la tabla anterior de 203044 mm^3

$$M_{pr} = 79187.16 \text{ kN} - \text{mm} = 8.9 \text{ ton} - \text{m}$$

4.1.5 Fuerza cortante en la rótula plástica

Para determinar la distancia entre las rótulas plásticas, se asume que S_h es 0, por ende L_h será la distancia total de la viga, de cara a cara de las columnas.

Del plano arquitectónico se tiene que $L_h = 3.8 \text{ m} - 0.2 \text{ m} = 3.6 \text{ m}$

$$V_h = 4.94 \text{ ton}$$

4.1.6 Momento probable en la cara de la columna

Como S_h es 0, entonces el $M_f = M_{pr}$

4.2 CASO 2

A continuación, se muestra el tipo de conexión, materiales y componentes, proceso de ensamble y geometría correspondiente al caso 2.

ESPECIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Material	Acero ASTM A36 – Hormigón 210 kg/cm^2
Columna	2G_200X50X15X4 mm + Hormigón
Viga	250x100x4x6 mm
Tipo de unión	Soldadura – Filete-E7018

Figura 39 Especificación de materiales CASO 02

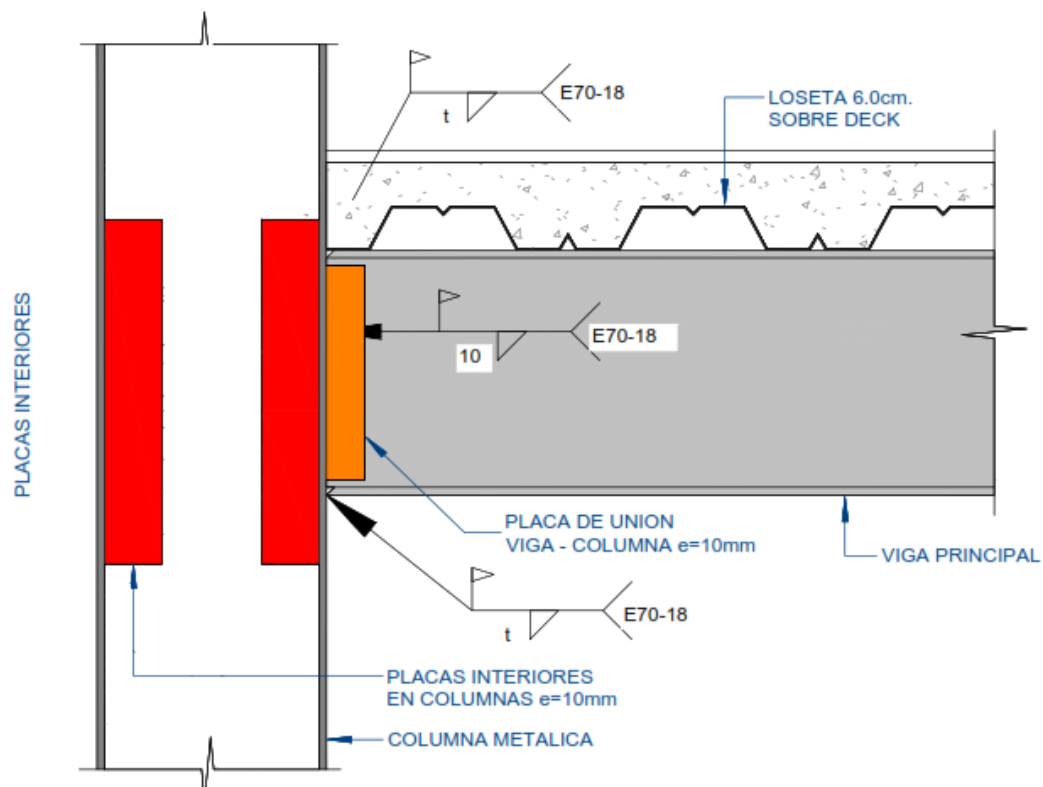


Figura 40 Esquema Conexión Caso 02

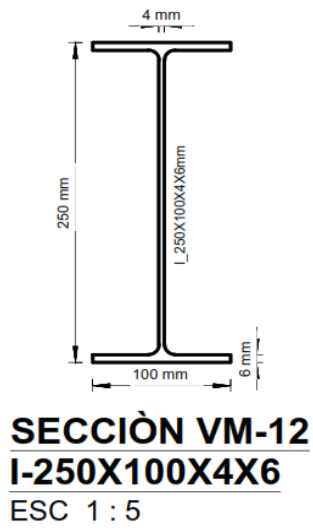


Figura 41 Viga Caso 02



Figura 42 Columna Caso 02

4.2.1 Propiedades de la viga

A continuación, se muestra una imagen con las propiedades de la viga usada, obtenida con INVENTOR 2025:

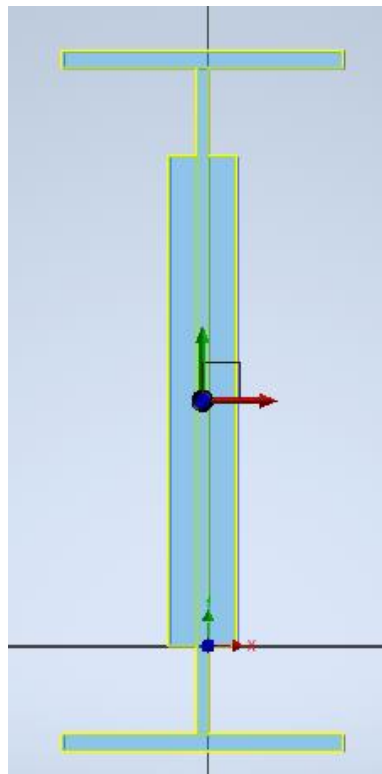


Figura 43 Sección Caso 02 con placas de respaldo

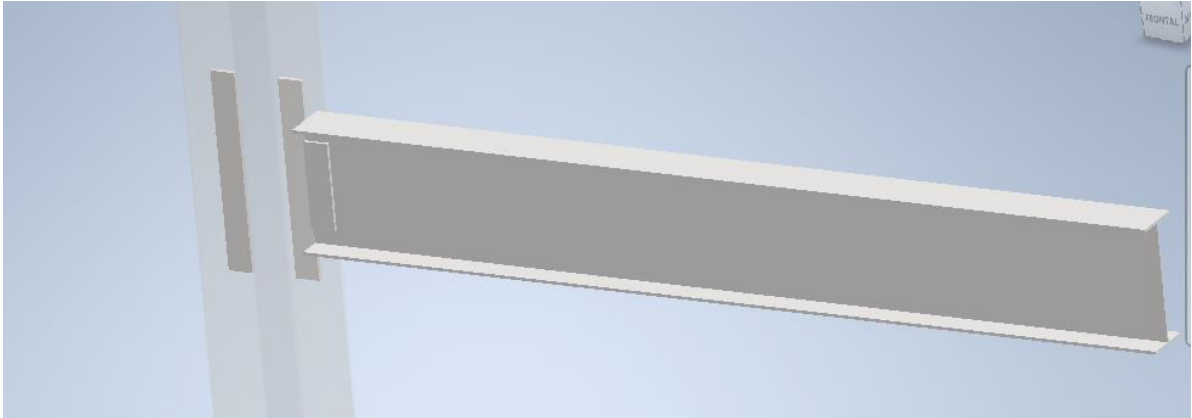


Figura 44 Modelo 3D Caso 02

Área = 5652 mm²
 Perímetro = 932 mm

 Centroide con respecto a origen de boceto (mm)
 x = -2
 y = 87,5

 Inercia con respecto a origen de boceto (mm):

 Tensor de inercia (mm⁴)
 Ixx = 74563574
 Ixy = -989100
 Iyx = -989100
 Iyy = 1224544

 Momento de inercia polar = 75788118 mm⁴

 Momentos de inercia de área con respecto a ejes principales (mm⁴):
 Ix = 31290449
 Iy = 1201936

 Momento de inercia polar = 32492385 mm⁴

 Ángulo de rotación desde origen de boceto proyectado a ejes
 principales (grados):
 Alrededor del eje Z = 0

 Radios de giro con respecto a ejes principales (mm):
 R1 = 74,405
 R2 = 14,583

Figura 45 Propiedades sección Caso 02

* Los siguientes son valores de unidades duales:

Área = 56,52 cm²
 Perímetro = 93,2 cm

Centroide con respecto a origen de boceto (cm)
 x = -0,2
 y = 8,75

Inercia con respecto a origen de boceto (cm):

Tensor de inercia (cm⁴)
 Ixx = 7456,357
 Ixy = -98,91
 Iyx = -98,91
 Iyy = 122,454

Momento de inercia polar = 7578,812 cm⁴

Momentos de inercia de área con respecto a ejes principales (cm⁴):
 Ix = 3129,045
 Iy = 120,194

Momento de inercia polar = 3249,239 cm⁴

Radios de giro con respecto a ejes principales (cm):
 R1 = 7,441
 R2 = 1,458

Figura 46 Propiedades de la sección Caso 02

Empleando ETABS se tienen las siguientes propiedades de la viga:

Property Name	
Section Name	VM-12
Base Material	A36
Properties	
Item	Value
Area, mm2	2152
AS2, mm2	999,3
AS3, mm2	1079,5
I33, mm4	22358157,3
I22, mm4	1001269,3
S33Pos, mm3	178865,3
S33Neg, mm3	178865,3
S22Pos, mm3	20025,4
S22Neg, mm3	20025,4
R33, mm	101,9
R22, mm	21,6
Z33, mm3	203044
Z22, mm3	30952
J, mm4	19605,3
Cw, mm6	14884000000
CG Offset 3 Dir, mm	0
CG Offset 2 Dir, mm	0
PNA Offset 3 Dir, mm	0
PNA Offset 2 Dir, mm	0

Figura 47 Propiedades viga Caso 02 ETABS

Usando ETABS se tienen las siguientes propiedades de la sección con las placas laterales:

Item	Value
Area, cm2	151,8
AS2, cm2	53,9
AS3, cm2	109,8
I33, cm4	17441,9
I22, cm4	816,4
S33Pos, cm3	1395,4
S33Neg, cm3	1395,4
S22Pos, cm3	163,3
S22Neg, cm3	163,3
R33, mm	107,2
R22, mm	23,2
Z33, cm3	2308,4
Z22, cm3	395,7
J, cm4	55,4
CG Offset 3 Dir, mm	0
CG Offset 2 Dir, mm	0
PNA Offset 3 Dir, mm	0
PNA Offset 2 Dir, mm	0

Figura 48 Caso 02 ETABS

4.2.2 Determinación de la resistencia de la soldadura

La soldadura de esta junta fue realizada en campo, empleando proceso SMAW con electrodo E7011 con una garganta efectiva de 6 mm, soldando todo el borde como se muestra en la figura anterior.

En el siguiente esquema se muestra los cordones de soldadura que actúan a corte y flexión:

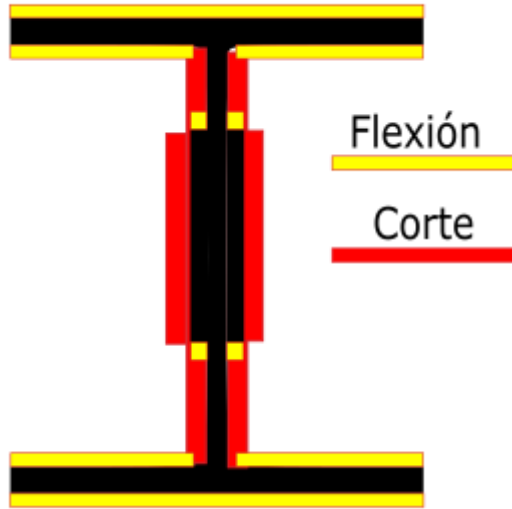


Figura 49 Esfuerzos en la soldadura Caso 02

Para determinar la resistencia de la soldadura se emplea las siguientes ecuaciones tomadas de la AISC 360-22:

$$R_n = F_{nw} A_{we} k_{ds}$$

4.2.2.1 Cálculo de las áreas efectivas del filete:

Tabla 5 Áreas efectivas Caso 02

	L soldadura [mm]	Garganta [mm]	Área efectiva [mm ²]
Flexión	402	6	2412
Corte	476	6	2856

4.2.2.2 Cálculo de las resistencias de la soldadura a filete:

Tabla 6 Resistencias de soldadura Caso 02

	E electrodo [Mpa]	Á efectiva [mm ²]	Rn [kN]
Flexión	483	2412	1164.99

Corte	483	2856	1379.44
-------	-----	------	---------

Se analiza la falla a flexión.

4.2.3 Cálculo del momento plástico:

$$M_p = 230843.5 * 250 = 57710.85 [kN - mm] = 6.49 [Ton - m]$$

Donde su 80% para el análisis tiene un valor de 5.19 [Ton - m]

4.2.4 Cálculo del Momento probable de la rótula plástica

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_y Z_e$$

Para el acero A36 se tiene un $F_u = 450 MPa$ y un $F_y = 250 MPa$

Donde el C_{pr} tiene un valor de:

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \leq 1.2$$

$$C_{pr} = 1.4$$

Dada la condición de la ecuación se toma como 1.2

El R_y tiene un valor de 1.3 según la tabla de la NEC-SD-2015

El Z_e tiene un valor sacado de la tabla anterior de 230843.5 mm^3

$$M_{pr} = 90028.96 kN - mm = 10.12 ton - m$$

4.2.5 Fuerza cortante en la rótula plástica

Para determinar la distancia entre las rótulas plásticas, se asume que S_h es 0, por ende L_h será la distancia total de la viga, de cara a cara de las columnas.

Del plano arquitectónico se tiene que $L_h = 3.8 m - 0.2m = 3.6 m$

$$V_h = 6.08 \text{ ton}$$

4.2.6 Momento probable en la cara de la columna

Como S_h es 0, entonces el $M_f = M_{pr}$

4.3 CASO 3

A continuación, se muestra el tipo de conexión, materiales y componentes, proceso de ensamble y geometría correspondiente al caso 3.

Tabla 7 Especificaciones de materiales CASO 03

ESPECIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Material	Acero ASTM A36
Columna	2G250X75X25X4
Viga	2G250X75X25X4
Tipo de unión	Soldadura – Filete-E70-18



Figura 50 Caso 03 - Foto Real

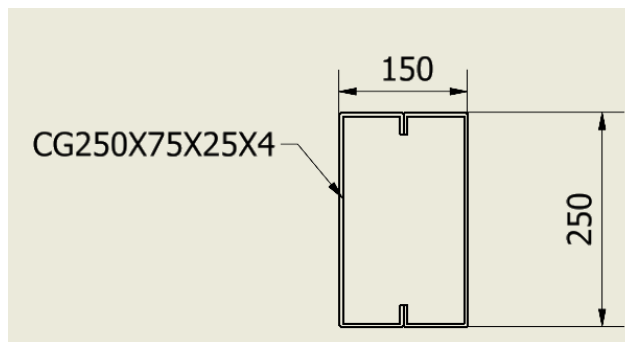


Figura 51 Viga-Columna

4.3.1 Propiedades de la viga

A continuación, se muestra una imagen con las propiedades de la viga usada, obtenida con ETABS-21:

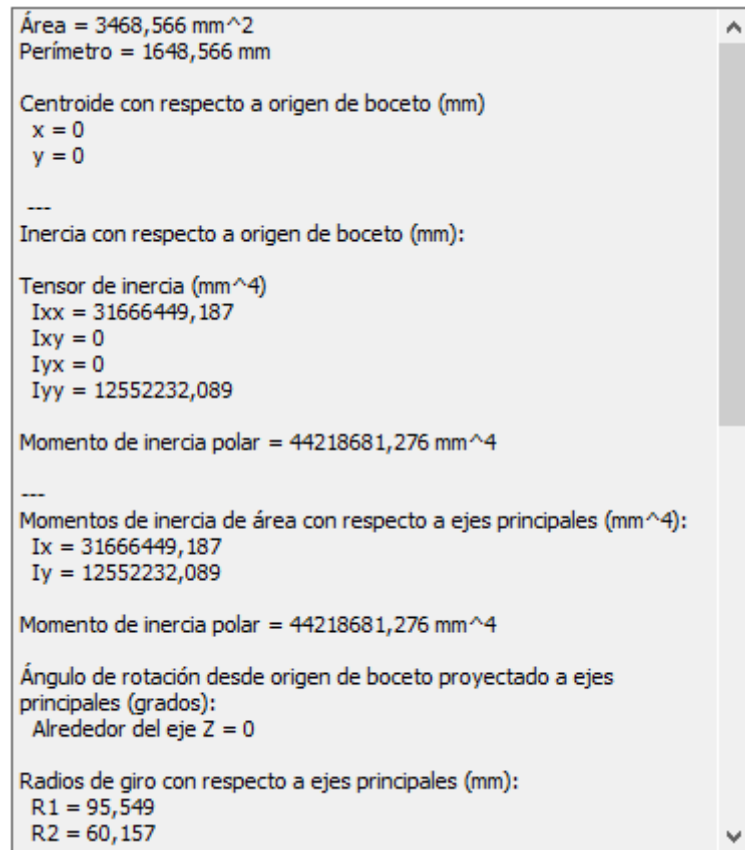


Figura 52 Propiedades de la sección CASO 03

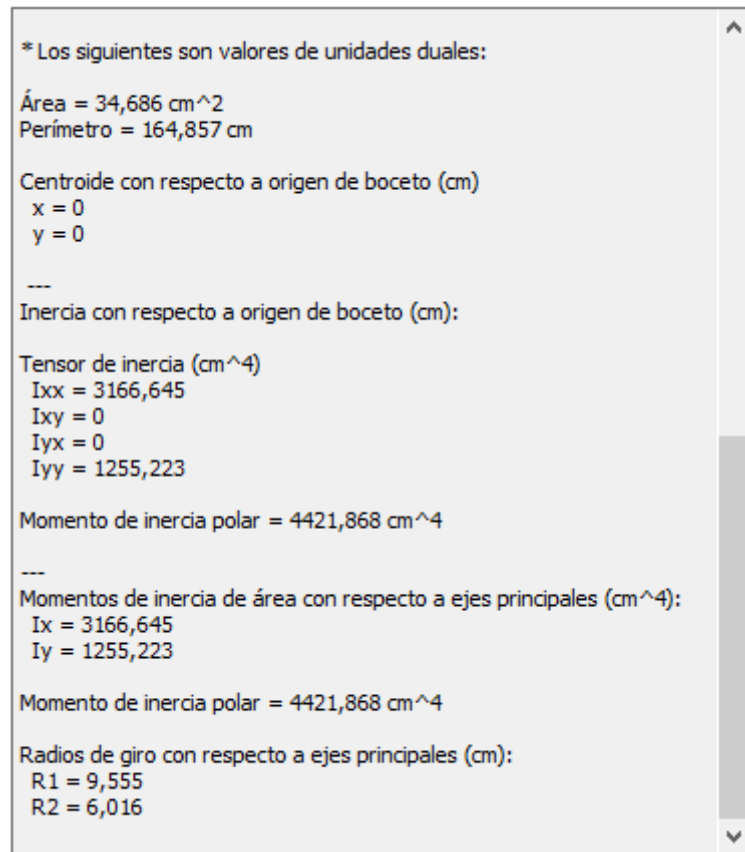


Figura 53 Propiedades de la sección CASO 03

4.3.2 Determinación de la resistencia de la soldadura

La soldadura de esta junta fue realizada en campo, empleando proceso SMAW con electrodo E7011 con una garganta efectiva de 6 mm, soldando todo el borde como se muestra en la figura anterior.

En el siguiente esquema se muestra los cordones de soldadura que actúan a corte y flexión:

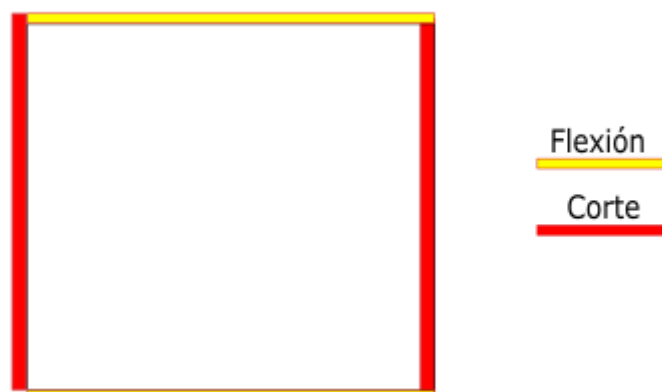


Figura 54 Esfuerzos en la soldadura Caso 03

Para determinar la resistencia de la soldadura se emplea las siguientes ecuaciones tomadas de la AISC 360-22:

$$R_n = F_{nw}A_{we}k_{ds}$$

4.3.2.1 Cálculo de las áreas efectivas del filete:

Tabla 8 Áreas efectivas Caso 03

	L soldadura [mm]	Garganta [mm]	Área efectiva [mm ²]
Flexión	300	6	1800
Corte	500	6	3000

4.3.2.2 Cálculo de las resistencias de la soldadura a filete:

Tabla 9 Resistencias de soldadura Caso 03

	E electrodo [Mpa]	Á efectiva [mm ²]	Rn [kN]
Flexión	483	1800	869
Corte	483	3000	1449

Se analiza la falla a flexión.

4.3.3 Cálculo del momento plástico:

$$M_p = 353749.474 * 250 = 88437.36 [kN - mm] = 9.94 [Ton - m]$$

Cuyo 80% para la evaluación tiene un valor de 7.95 [Ton - m]

4.3.4 Cálculo del Momento probable de la rótula plástica

$$M_{pr} = C_{pr}R_yF_yZ_e$$

Para el acero A36 se tiene un $F_u = 450 MPa$ y un $F_y = 250 MPa$

Donde el C_{pr} tiene un valor de:

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \leq 1.2$$

$$C_{pr} = 1.4$$

Dada la condición de la ecuación se toma como 1.2

El R_y tiene un valor de 1.3.

El Z_e tiene un valor sacado de la tabla anterior de 353749.474 mm^3

$$M_{pr} = 137962.29 \text{ kN} - \text{mm} = 15.51 \text{ ton} - \text{m}$$

4.3.5 Fuerza cortante en la rótula plástica

Para determinar la distancia entre las rótulas plásticas, se asume que S_h es 0, por ende L_h será la distancia total de la viga, de cara a cara de las columnas.

Del plano arquitectónico se tiene que $L_h = 4 \text{ m} - 0.15\text{m} = 3.85 \text{ m}$

$$V_h = 8.05 \text{ ton}$$

4.3.6 Momento probable en la cara de la columna

Como S_h es 0, entonces el $M_f = M_{pr}$

5. CAPÍTULO 5: ANÁLISIS POR COMPUTADORA

Para el análisis por computadora se usó ANSYS V17.2 y se procedió de la siguiente manera:

5.1 PROCESO DE MODELACIÓN PARA EL CASO 01

Para la modelación en 3D se utilizó la licencia estudiantil de Inventor Profesional versión 2024, en la cual se modeló los elementos de la siguiente manera:

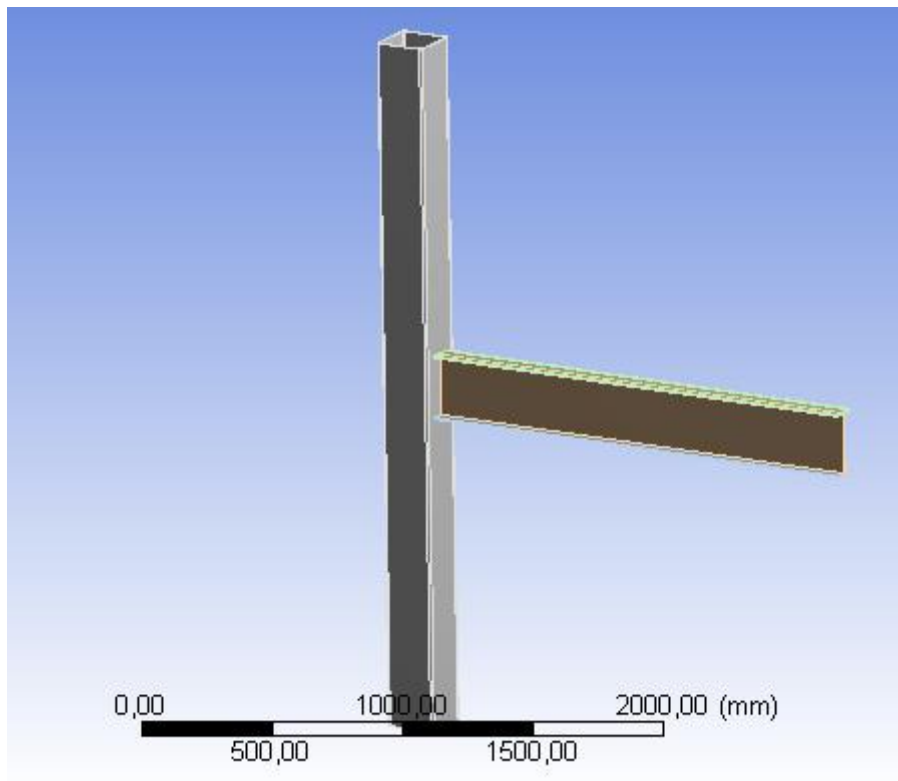


Figura 55 Caso 01 Inventor

Una vez realizado el modelo 3D se lo exportó en formato .STP para abrirlo en la interfaz de ANSYS.

5.2 PROCESO DE SIMULACIÓN

Para el proceso de simulación se realizó el siguiente proceso:

5.2.1 Definición del material

Se definió el material en función de su F_y y demás características como se muestra a continuación:

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m ⁻³	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
12	Bilinear Kinematic Hardening			
13	Yield Strength	250	MPa	
14	Tangent Modulus	6666	MPa	
15	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
19	Strain-Life Parameters			
27	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa	
28	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	
29	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa	
30	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

Figura 56 Asignación de materiales ANSYS

Para el análisis no lineal se usó el módulo de Bilinear Kinematic Hardening, como se muestra a continuación:

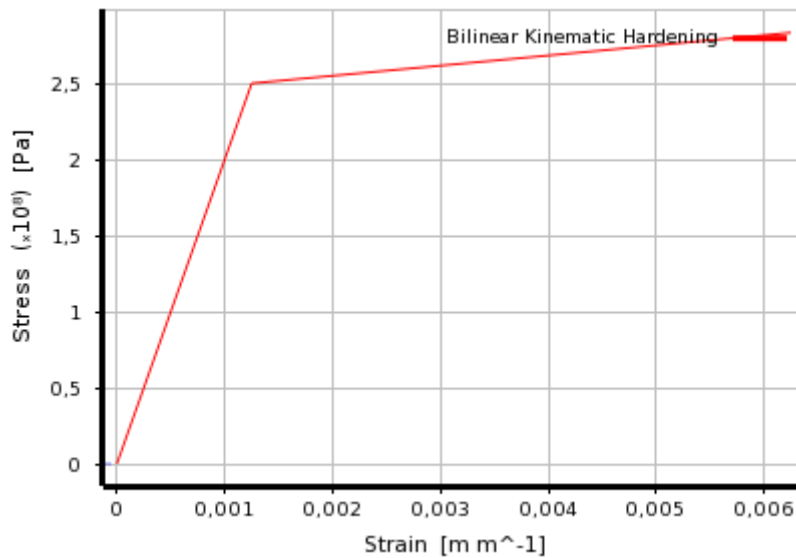


Figura 57 BKH Acero A36

5.2.2 Selección del módulo de análisis

Se selecciona el módulo de análisis estructural estático de la siguiente manera:

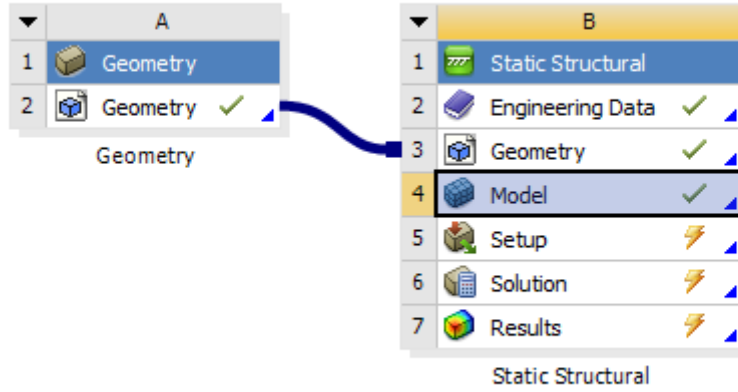


Figura 58 Definición del Caso 01 ANSYS

5.2.3 Definición de parámetros

La definición de los parámetros de simulación se realizó de la siguiente manera:

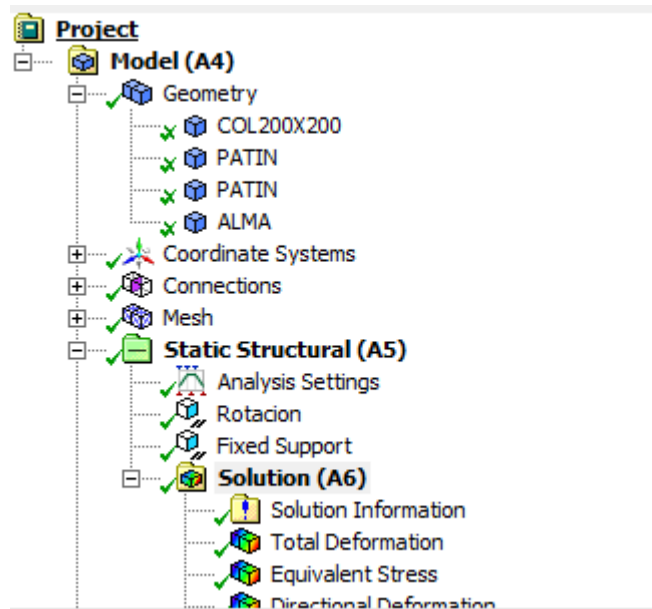


Figura 59 Parámetros generales Caso ANSYS

5.2.4 Materiales

Details of "PATIN"	
Reference Temperature	By Environment
Behavior	None
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Figura 60 Materiales Caso 01

5.2.5 Mallado

Para el proceso de mallado se usó para las vigas y columnas, un mallado de tamaño medio con hexaedros de 28 mm de lado y se refinó las áreas de interés para obtener mejores resultados.

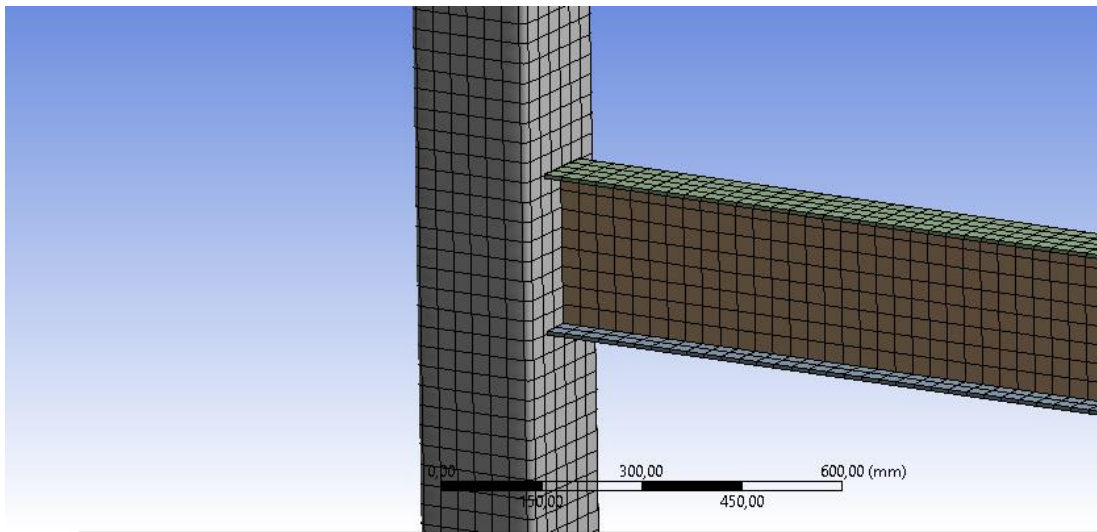


Figura 61 Mallado ANSYS Caso 01

5.2.6 Análisis Estructural

Para el análisis estructural se definieron los siguientes parámetros:

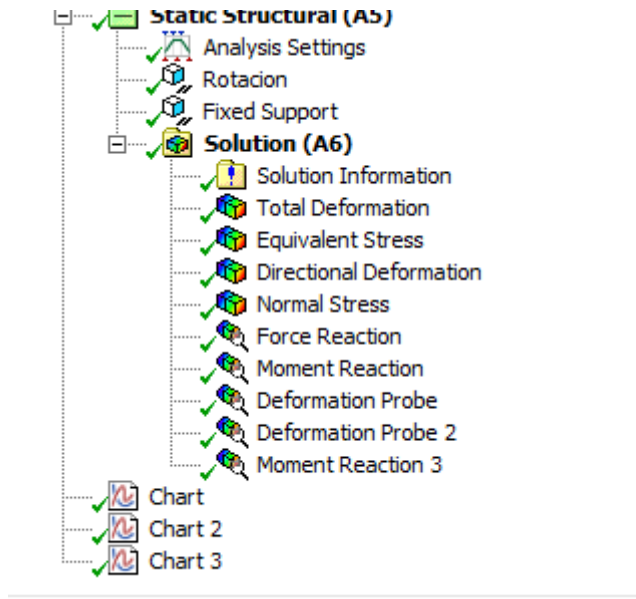


Figura 62 Ejecución ANSYS solver Caso 01

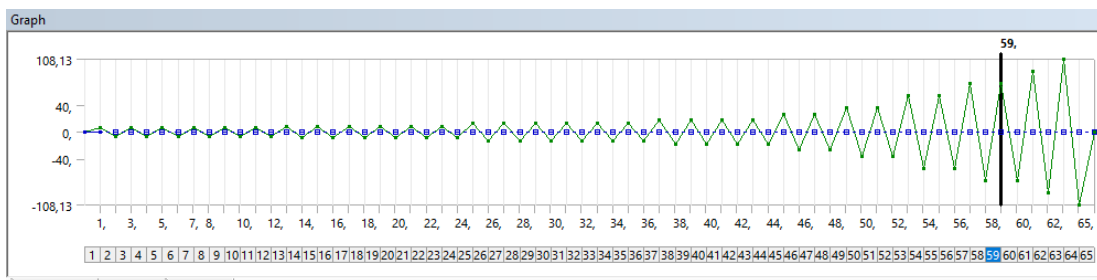


Figura 63 Ingreso de ciclos de deformación

5.2.7 Resolución y resultados para el caso 01

Utilizando el FEMA 350 y la AISC-341 22 se utilizan los siguientes valores para ingresar deformaciones en la viga y caracterizar la conexión:

Tabla 10 Deformaciones FEMA 350 (FEMA-350, 2000)

Paso	y [mm]	theta [rad]
1	6,75	0,00375
2	9,00	0,005
3	13,50	0,0075
4	18,00	0,01
5	27,00	0,015
6	36,00	0,02
7	54,02	0,03
8	72,04	0,04
9	90,08	0,05
10	108,13	0,06

A continuación, se muestra el proceso de simulación luego de ingresar los parámetros descritos anteriormente:

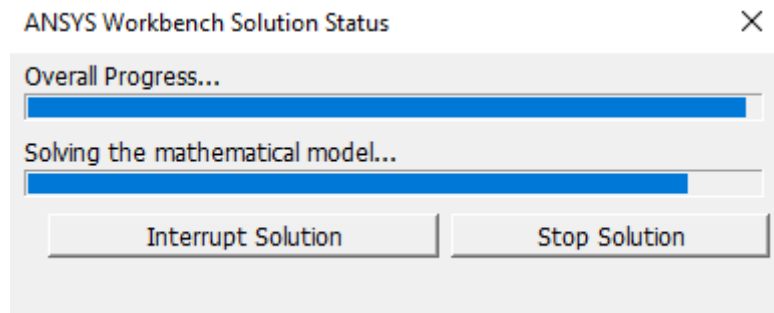


Figura 64 Solver ANSYS

Obteniendo las siguientes gráficas:

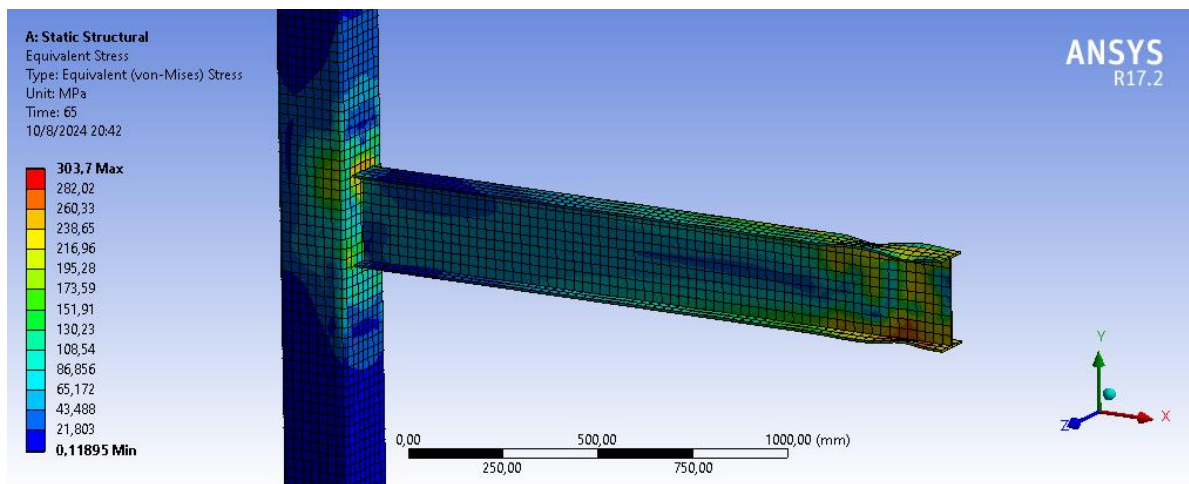


Figura 65 Esfuerzos Totales ANSYS Caso 01 último ciclo

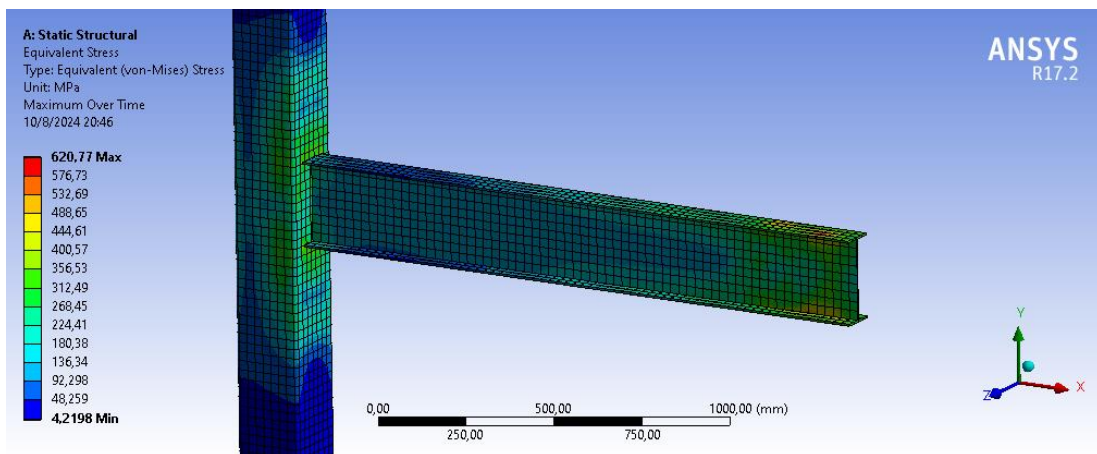


Figura 66 Esfuerzos máximos Caso 01

Details of "Equivalent Stress"	
[-] Definition	
Type	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Maximum Over Time
Identifier	
Suppressed	No
[-] Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
[-] Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	4,2198 MPa
<input type="checkbox"/> Maximum	620,77 MPa
Minimum Occurs On	COL200X200
Maximum Occurs On	PATIN

Figura 67 Esfuerzos máximos Caso 01

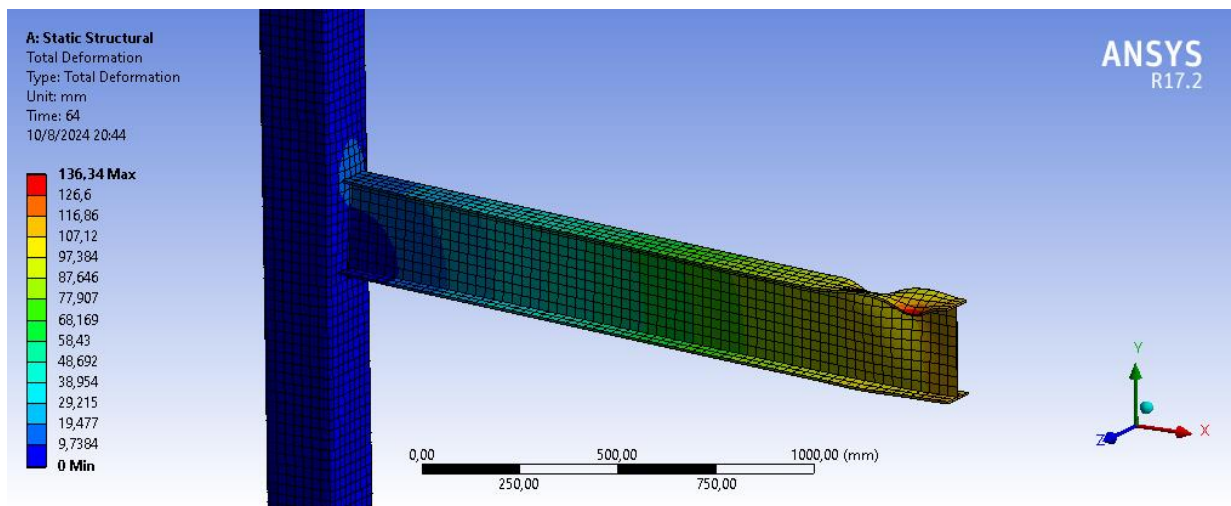


Figura 68 Deformación total ANSYS Caso 01

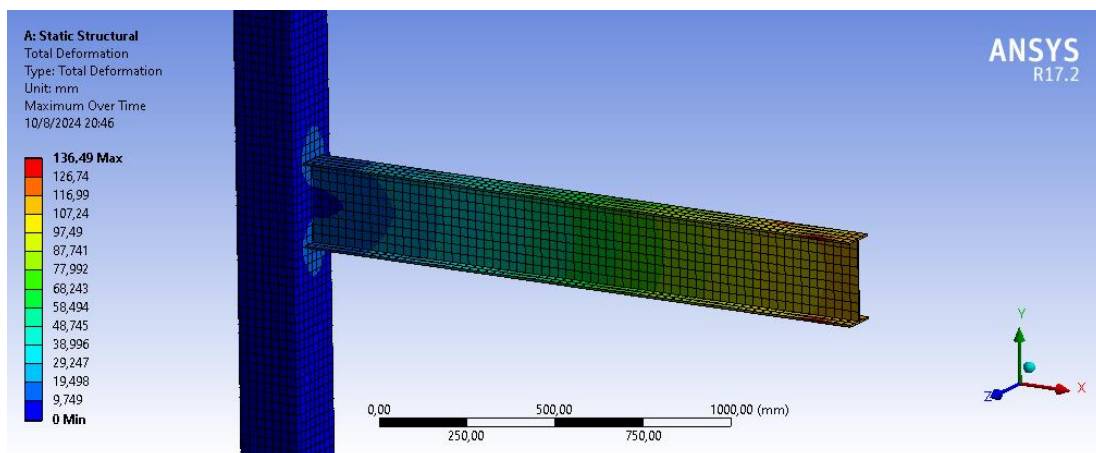


Figura 69 Deformación máxima Caso 01

Details of "Total Deformation"	
Type	Total Deformation
By	Maximum Over Time
Identifier	
Suppressed	No
Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	0, mm
<input type="checkbox"/> Maximum	136,49 mm
Minimum Occurs On	COL200X200
Maximum Occurs On	PATIN

Figura 70 Valores de deformación Caso 01

A continuación, se muestra la curva de histéresis luego de la aplicación de los ciclos solicitados en la (ANSI/AISC 341 -22, 2022) , sección 4, usando la no linealidad del material:

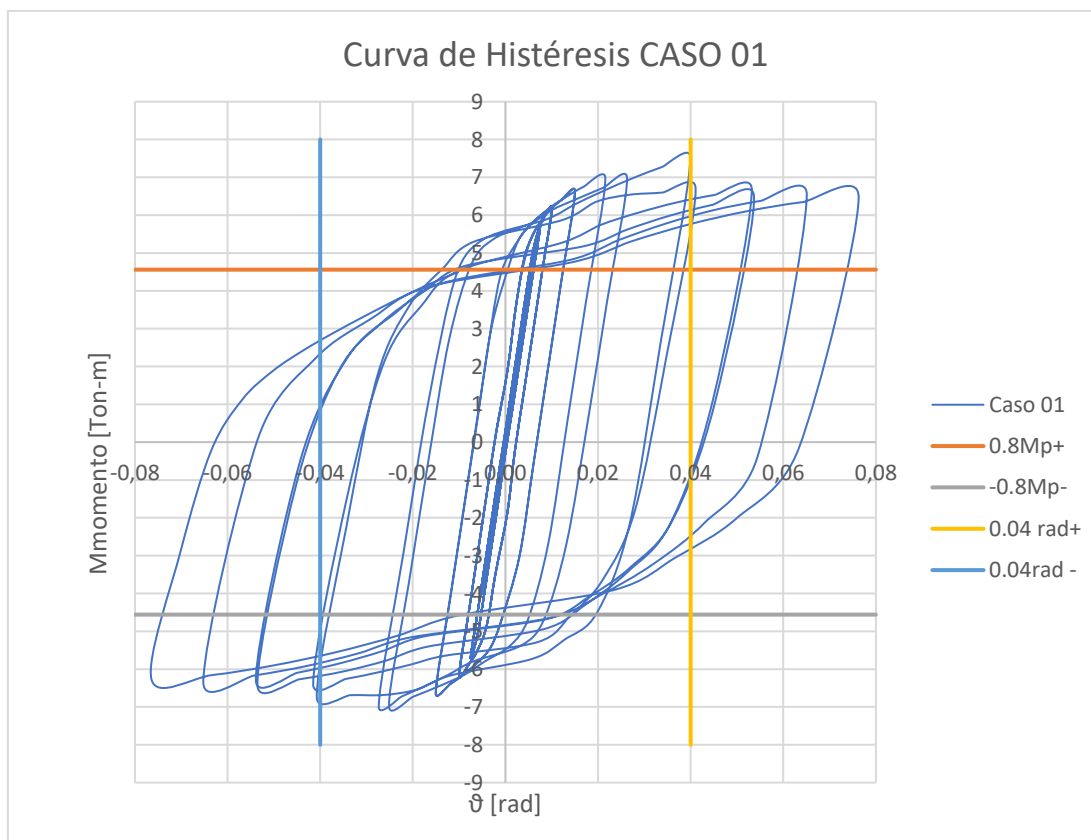


Figura 71 Curva de Histéresis Caso 01

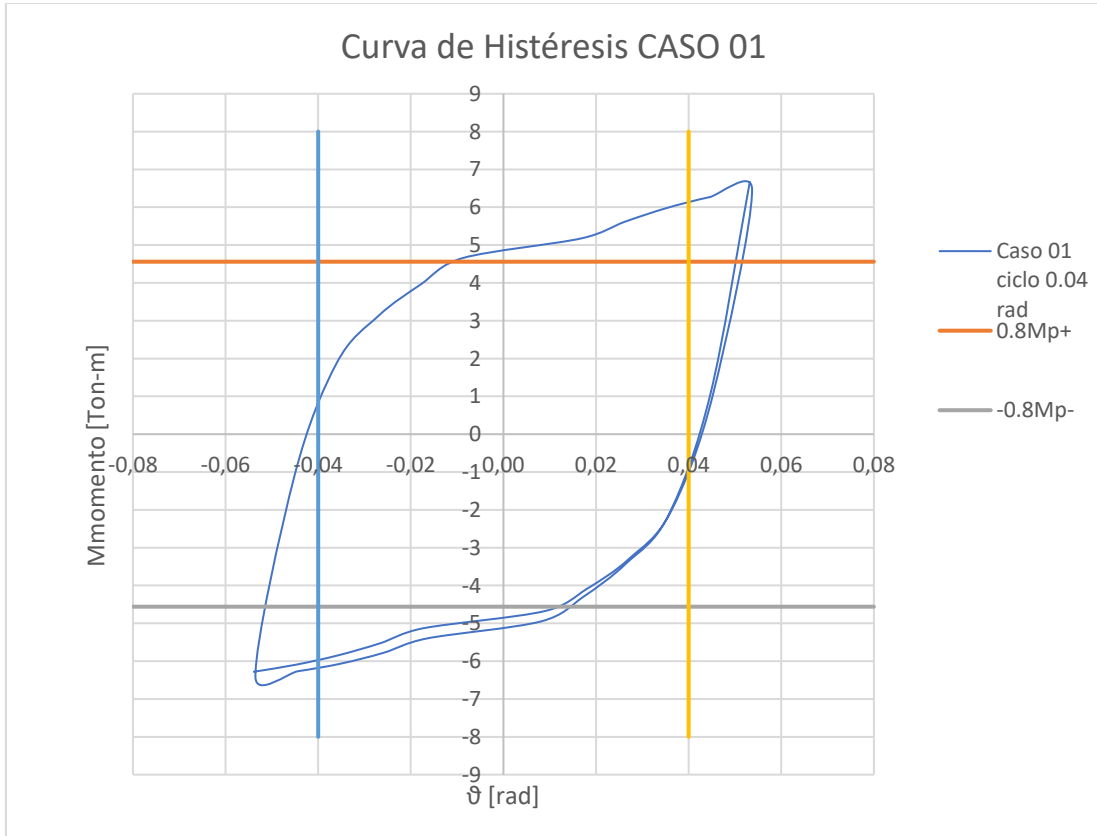


Figura 72 Curva histéresis a 0.04 rad

5.3 PROCESO DE MODELACIÓN PARA EL CASO 02

Para la modelación en 3D se utilizó la licencia estudiantil de Inventor Profesional versión 2024, en la cual se modeló los elementos de la siguiente manera:

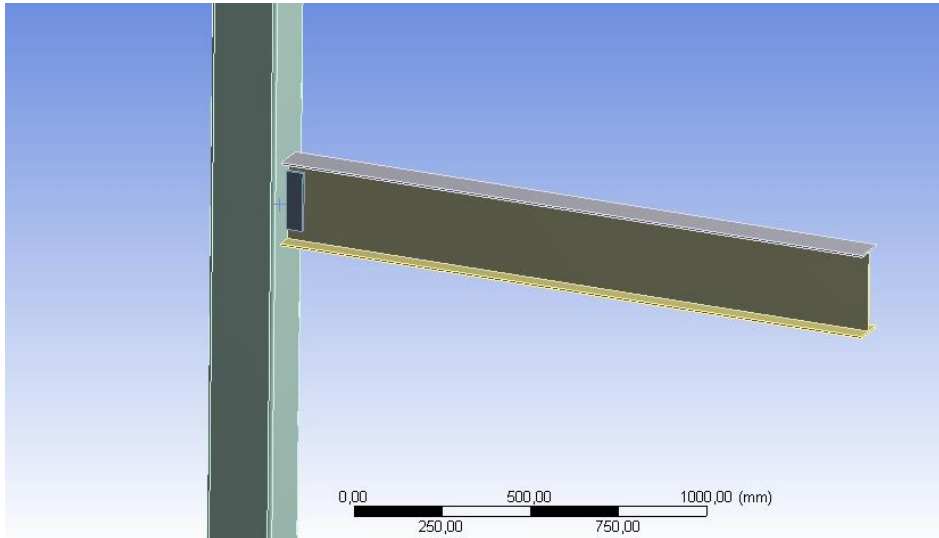


Figura 73 Caso 02 Inventor

Una vez realizado el modelo 3D se lo exportó en formato .STP para abrirlo en la interfaz de ANSYS.

5.4 PROCESO DE SIMULACIÓN

Para el proceso de simulación se realizó el siguiente proceso:

5.4.1 Definición del material

Se definió el material en función de su F_y y demás características como se muestra a continuación:

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
2	Density	7850	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>
6	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
12	Bilinear Kinematic Hardening			<input type="checkbox"/>
13	Yield Strength	250	MPa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
14	Tangent Modulus	6666	MPa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
15	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		<input type="checkbox"/>
19	Strain-Life Parameters			<input type="checkbox"/>
27	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
28	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
29	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
30	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

Figura 74 Asignación de materiales ANSYS

Para el análisis no lineal se usó el módulo de Bilinear Kinematic Hardening, como se muestra a continuación:

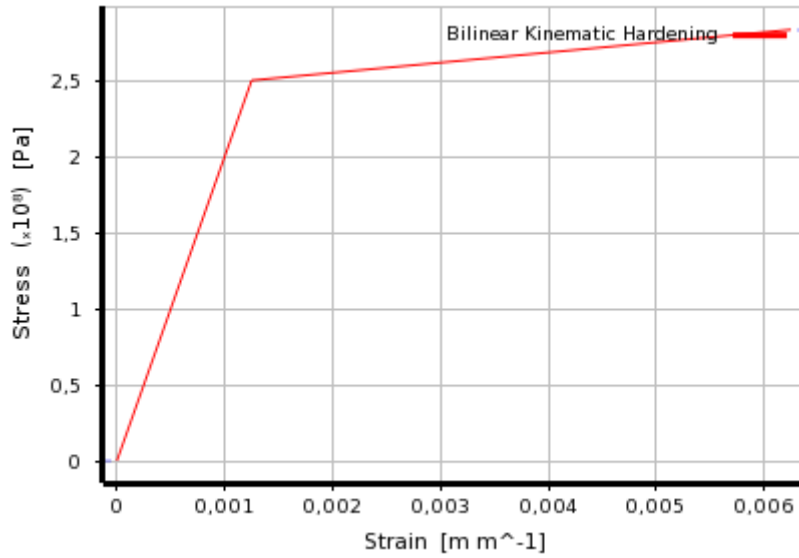


Figura 75 BKH Acero A36

5.4.2 Selección del módulo de análisis

Se selecciona el módulo de análisis estructural estático de la siguiente manera:

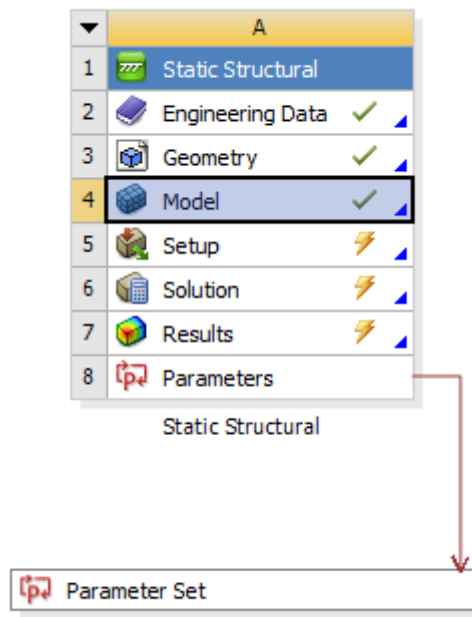


Figura 76 Definición del Caso 02 ANSYS

5.4.3 Definición de parámetros

La definición de los parámetros de simulación se realizó de la siguiente manera:

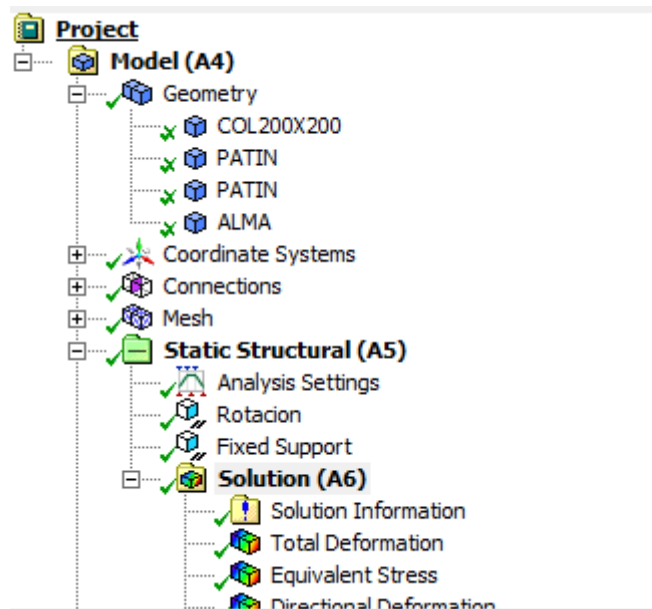


Figura 77 Parámetros generales Caso ANSYS

5.4.4 Materiales

Details of "PATIN"	
Reference Temperature	By Environment
Behavior	None
[-] Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
[+] Bounding Box	
[+] Properties	
[+] Statistics	

Figura 78 Materiales Caso 02

5.4.5 Mallado

Para el proceso de mallado se usó para las vigas y columnas, un mallado de tamaño medio con hexaedros de 27 mm de lado y se refinó las áreas de interés para obtener mejores resultados.

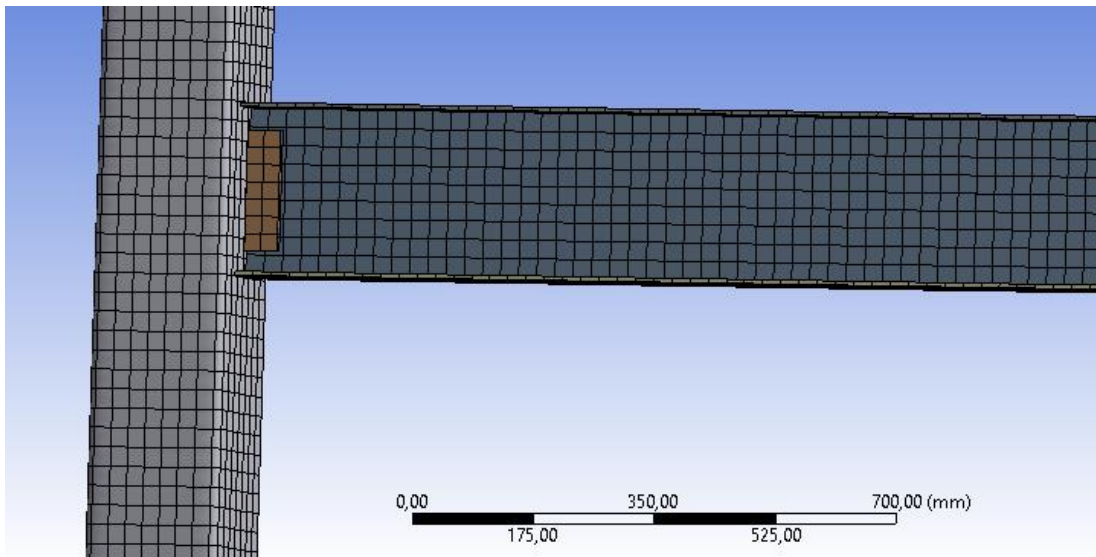


Figura 79 Mallado ANSYS Caso 02

5.4.6 Análisis Estructural

Para el análisis estructural se definieron los siguientes parámetros:

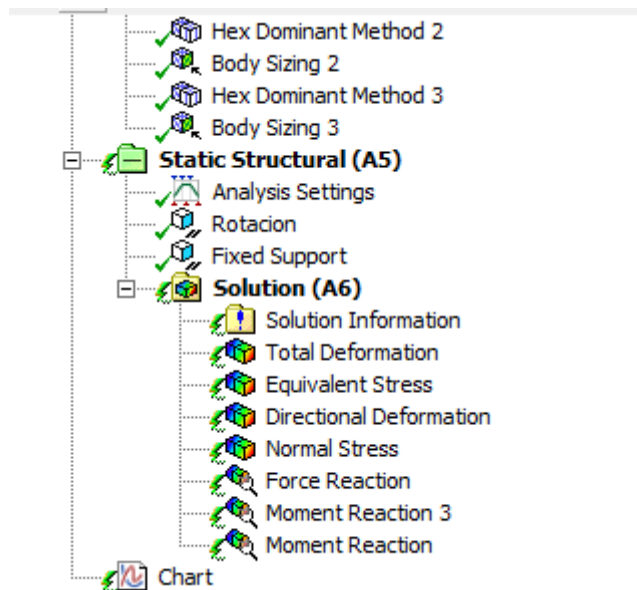


Figura 80 Ejecución ANSYS solver Caso 02

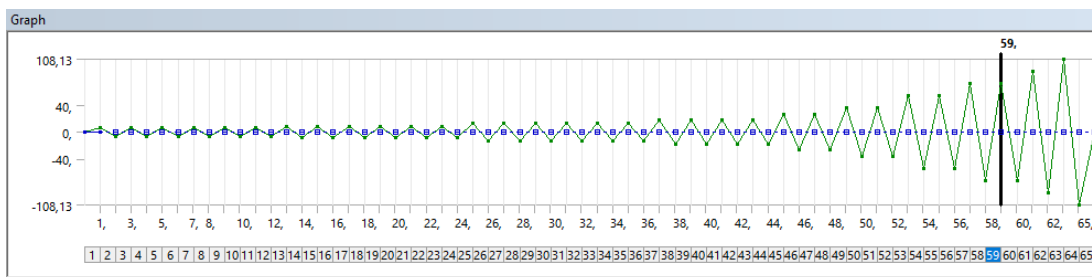


Figura 81 Ingreso de ciclos de deformación

5.4.7 Resolución y resultados para el caso 02

Utilizando el FEMA 350 y la AISC-341 22 se utilizan los siguientes valores para ingresar deformaciones en la viga y caracterizar la conexión:

Tabla 11 Deformaciones FEMA 350 (FEMA-350, 2000)

Paso	y [mm]	theta [rad]
1	6,75	0,00375
2	9,00	0,005
3	13,50	0,0075
4	18,00	0,01
5	27,00	0,015
6	36,00	0,02
7	54,02	0,03
8	72,04	0,04
9	90,08	0,05
10	108,13	0,06

A continuación, se muestra el proceso de simulación luego de ingresar los parámetros descritos anteriormente:

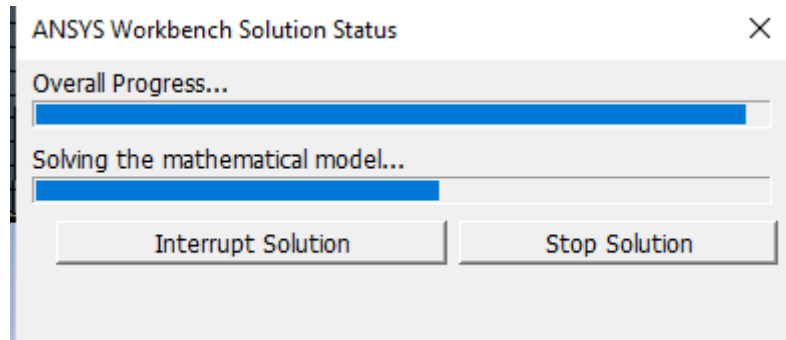


Figura 82 Solver ANSYS

Obteniendo las siguientes gráficas:

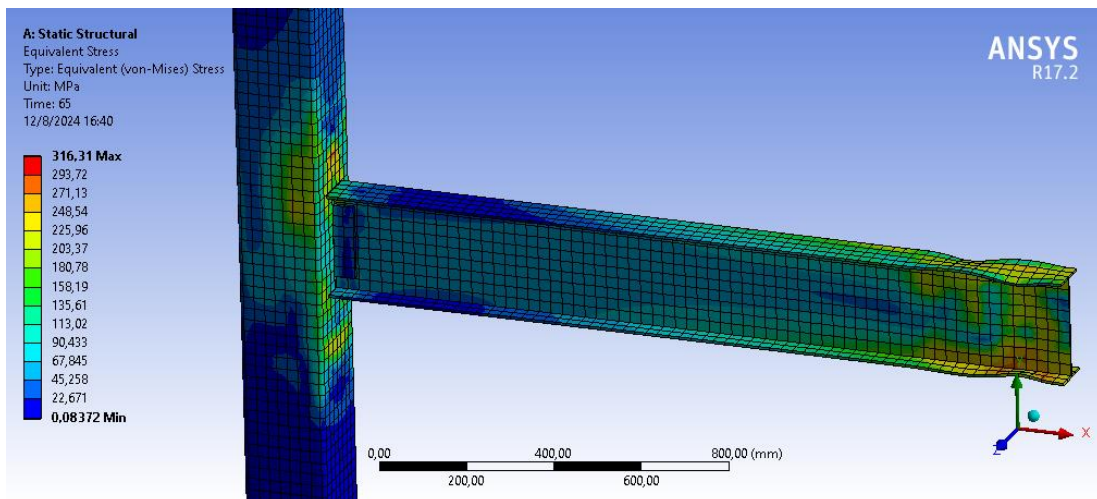


Figura 83 Esfuerzos Totales ANSYS Caso 02 último ciclo

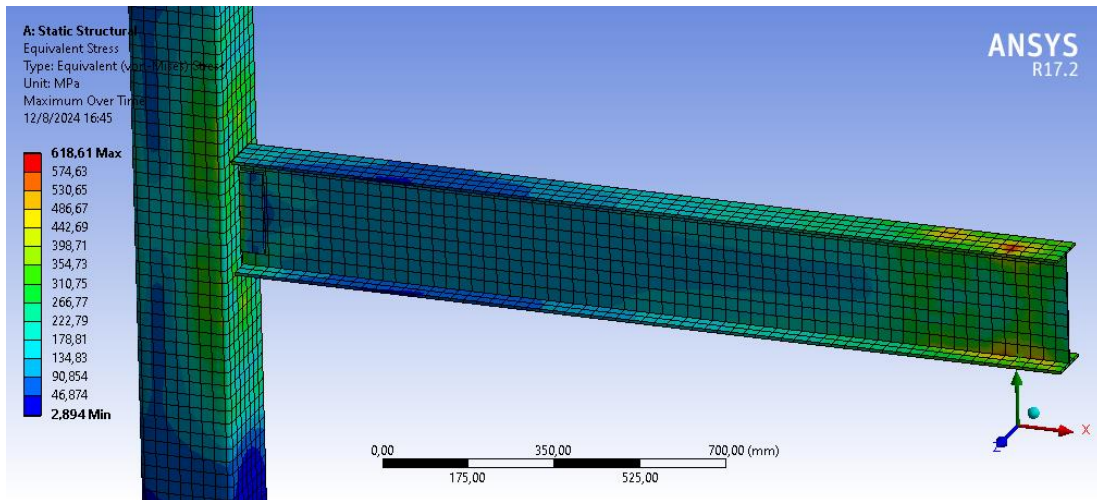


Figura 84 Esfuerzos máximos Caso 02

<input type="checkbox"/> Minimum	2,894 MPa
<input type="checkbox"/> Maximum	618,61 MPa
Minimum Occurs On	platina interna
Maximum Occurs On	PATIN

Figura 85 Esfuerzos máximos Caso 02

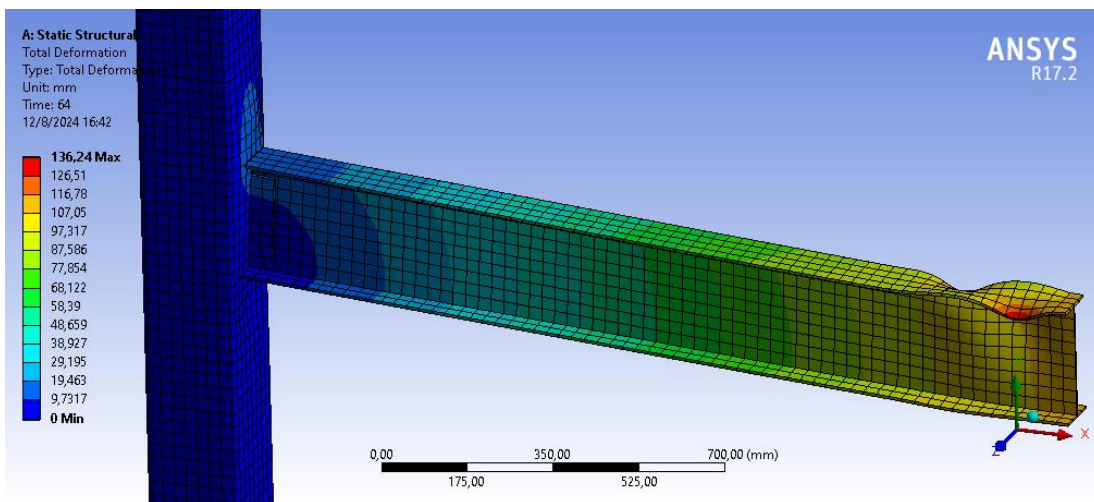


Figura 86 Deformación total Ansys Caso 02

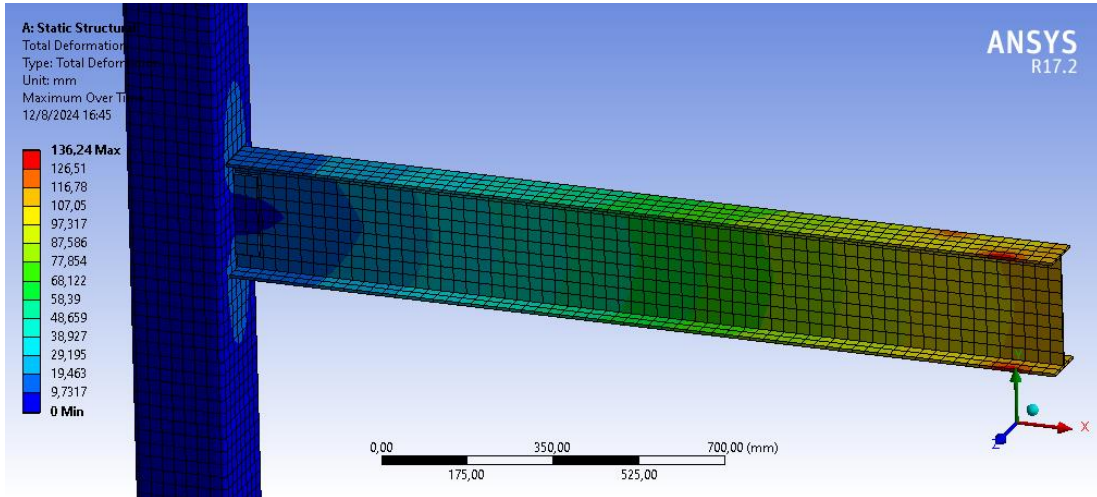


Figura 87 Deformación máxima Caso 02

Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	0, mm
<input type="checkbox"/> Maximum	136,24 mm
Minimum Occurs On	COL200X200
Maximum Occurs On	PATIN

Figura 88 Valores de deformación Caso 02

A continuación, se muestra la curva de histéresis luego de la aplicación de los ciclos solicitados en la (ANSI/AISC 341 -22, 2022) , sección 4, usando la no linealidad del material:

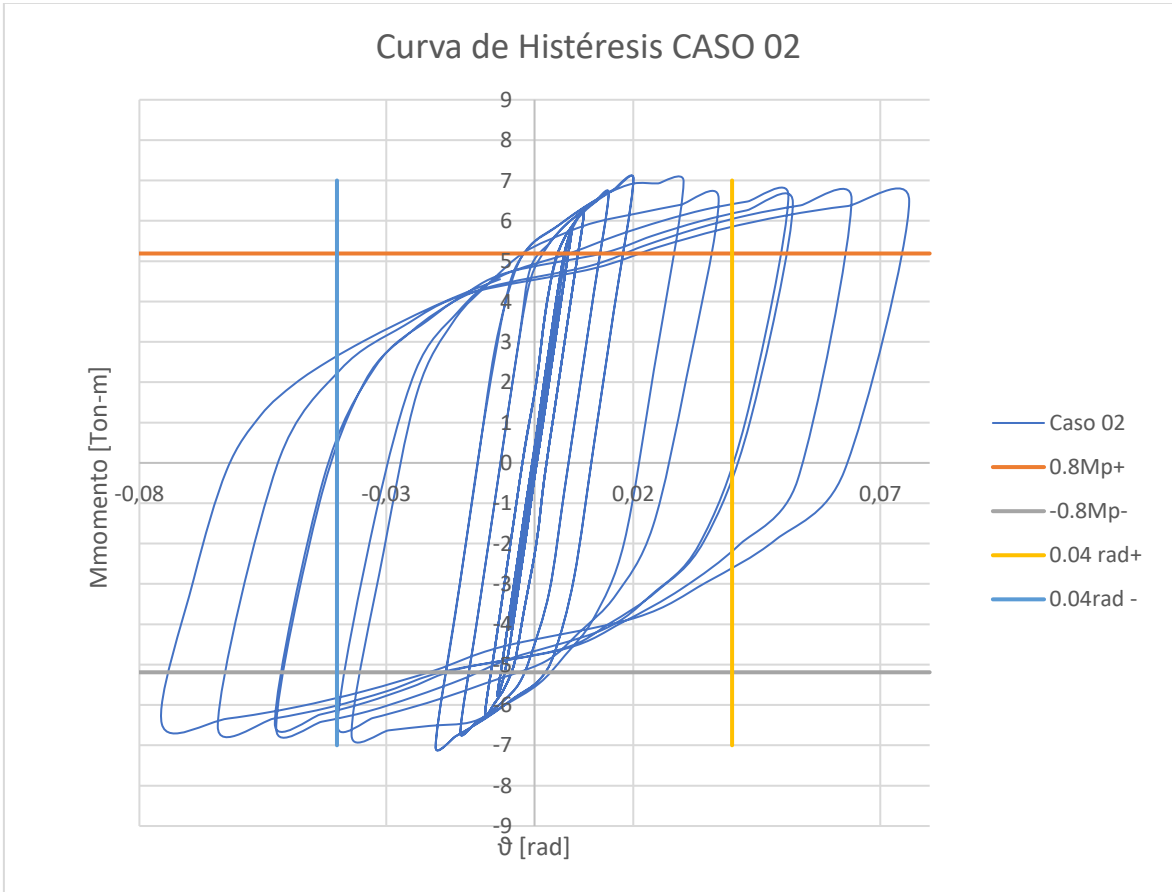


Figura 89 Curva de Histéresis Caso 02

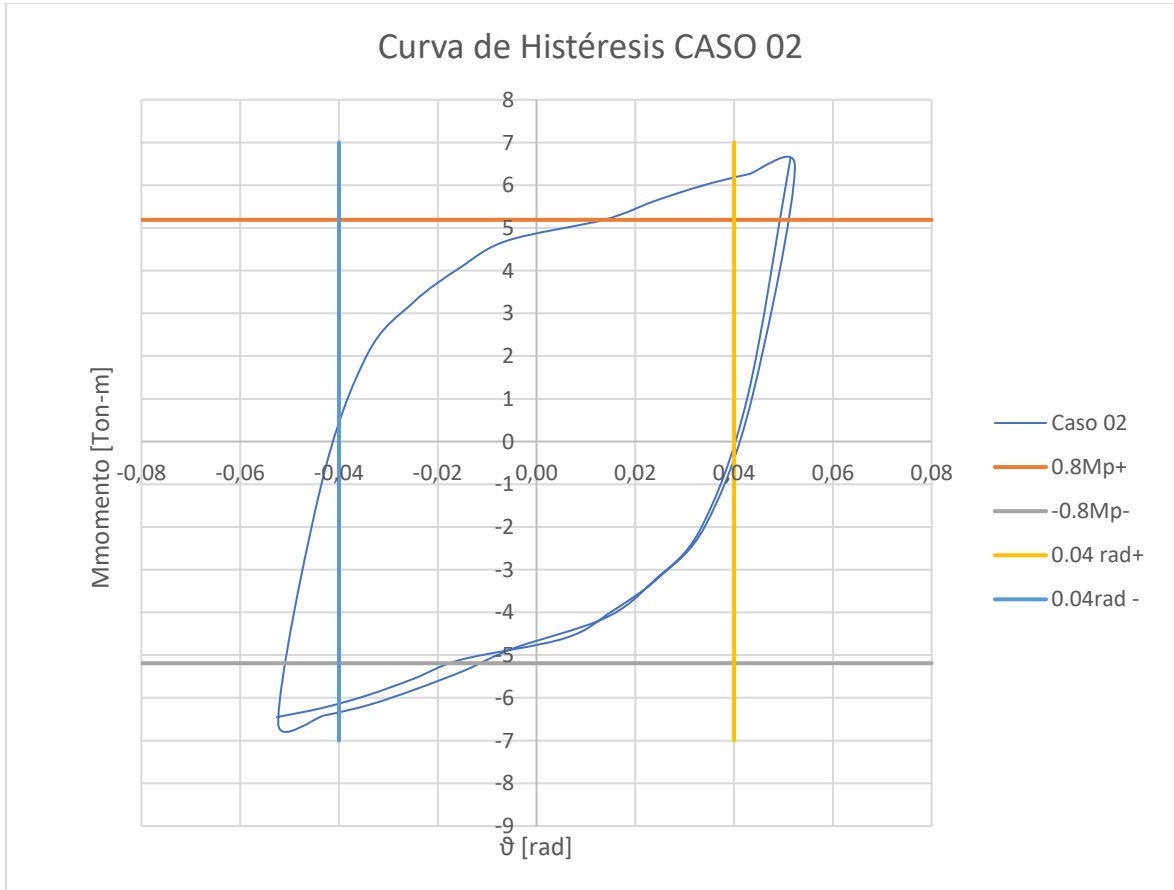


Figura 90 Curva de histéresis a 0.04 rad

5.5 PROCESO DE MODELACIÓN PARA EL CASO 03

Para la modelación en 3D se utilizó la licencia estudiantil de Inventor Profesional versión 2025, en la cual se modelo los elementos de la siguiente manera:

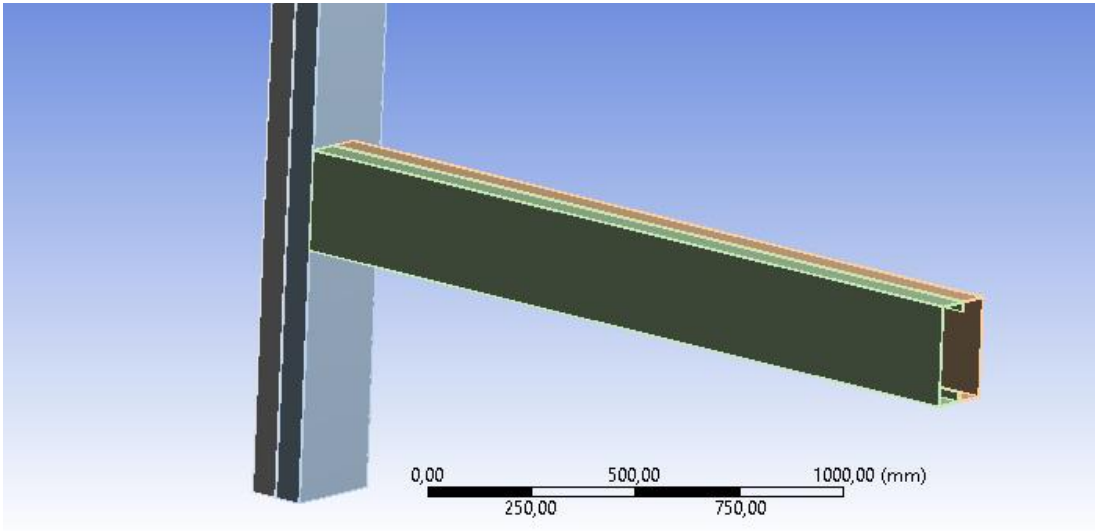


Figura 91 Caso 03 Inventor

Una vez realizado el modelo 3D se lo exportó en formato .STP para abrirlo en la interfaz de ANSYS.

5.6 PROCESO DE SIMULACIÓN

Para el proceso de simulación se realizó el siguiente proceso:

5.6.1 Definición del material

Se definió el material en función de su F_y y demás características como se muestra a continuación:

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
2	Density	7850	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
6	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
12	Bilinear Kinematic Hardening			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
13	Yield Strength	250	MPa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
14	Tangent Modulus	6666	MPa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
15	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
19	Strain-Life Parameters			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
27	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
28	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
29	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
30	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

Figura 92 Asignación de materiales ANSYS

Para el análisis no lineal se usó el módulo de Bilinear Kinematic Hardening, como se muestra a continuación:

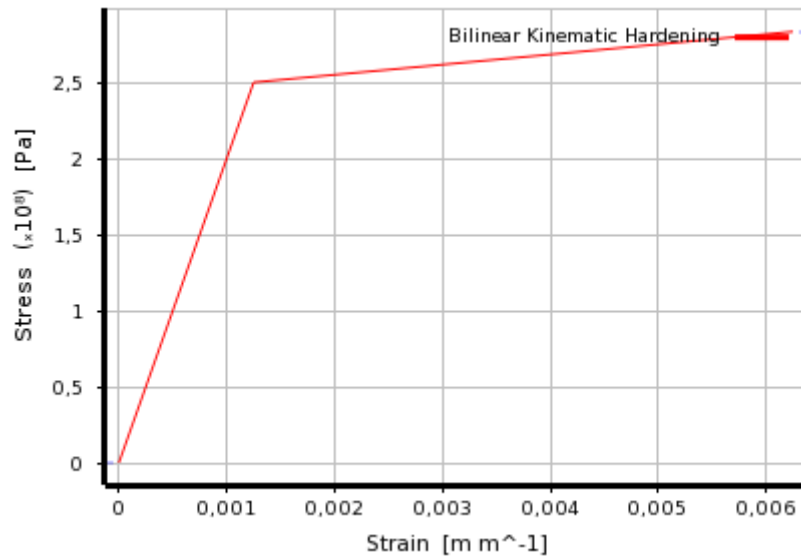


Figura 93 BKH Acero A36

5.6.2 Selección del módulo de análisis

Se selecciona el módulo de análisis estructural estático de la siguiente manera:

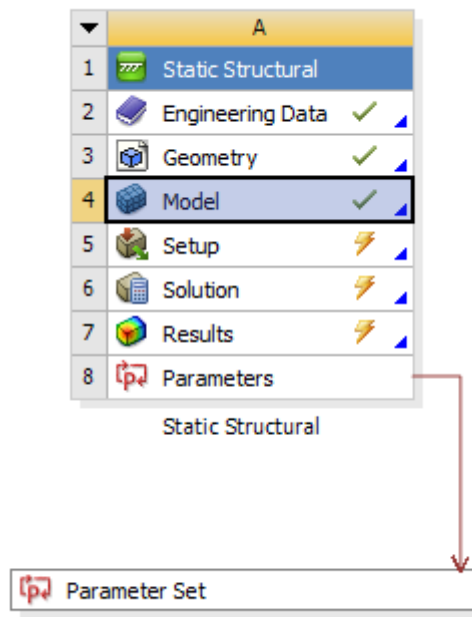


Figura 94 Definición del Caso 03 ANSYS

5.6.3 Definición de parámetros

La definición de los parámetros de simulación se realizó de la siguiente manera:

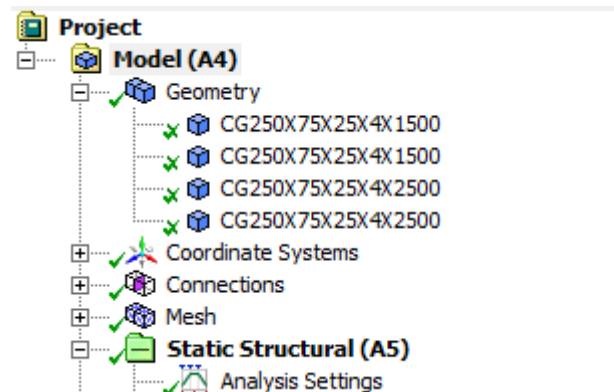


Figura 95 Parámetros generales Caso ANSYS

5.6.4 Materiales

Details of "PATIN"	
Reference Temperature	By Environment
Behavior	None
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

Figura 96 Materiales Caso 03

5.6.5 Mallado

Para el proceso de mallado se usó para las vigas y columnas, un mallado de tamaño medio con hexaedros de 27 mm de lado y se refinó las áreas de interés para obtener mejores resultados.

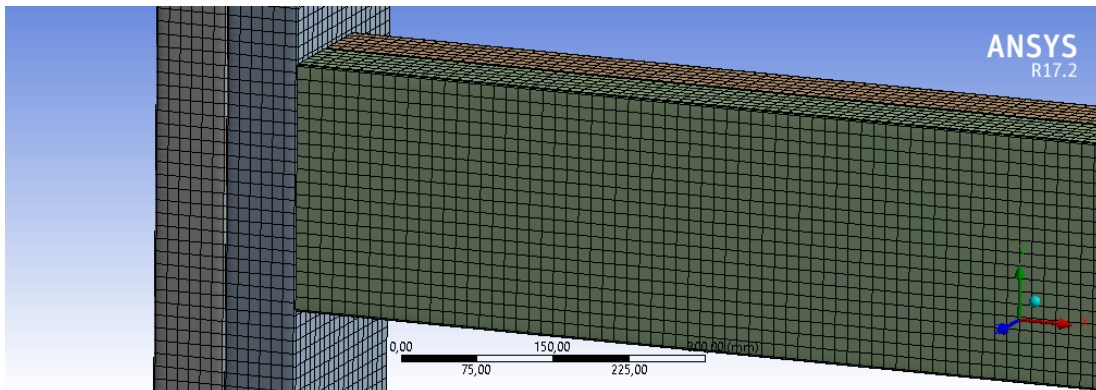


Figura 97 Mallado ANSYS Caso 03

5.6.6 Análisis Estructural

Para el análisis estructural se definieron los siguientes parámetros:

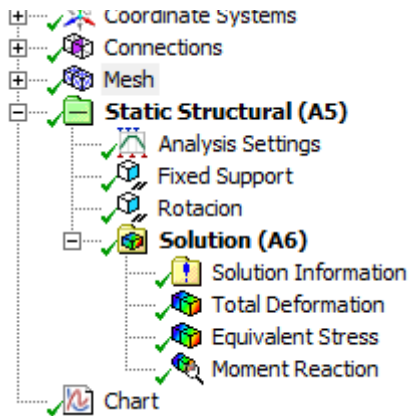


Figura 98 Ejecución ANSYS solver Caso 03

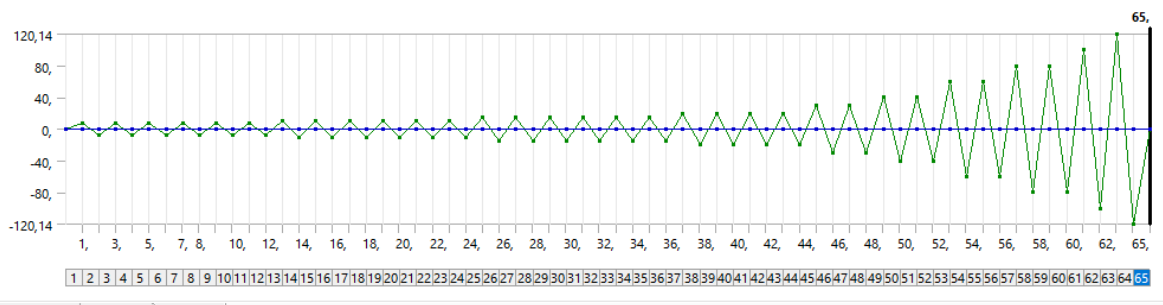


Figura 99 Ingreso de ciclos de deformación

5.6.7 Resolución y resultados para el caso 02

Utilizando el FEMA 350 y la AISC-341 22 se utilizan los siguientes valores para ingresar deformaciones en la viga y caracterizar la conexión:

Tabla 12 Deformaciones FEMA 350 (FEMA-350, 2000)

Paso	y [mm]	theta [rad]
1	7,50	0,00375
2	10,00	0,005
3	15,00	0,0075
4	20,00	0,01
5	30,00	0,015
6	40,01	0,02
7	60,02	0,03
8	80,04	0,04
9	100,08	0,05
10	120,14	0,06

A continuación, se muestra el proceso de simulación luego de ingresar los parámetros descritos anteriormente:

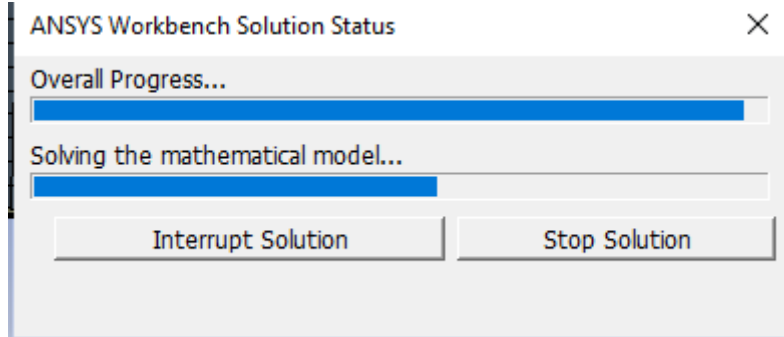


Figura 100 Solver ANSYS

Obteniendo las siguientes gráficas:

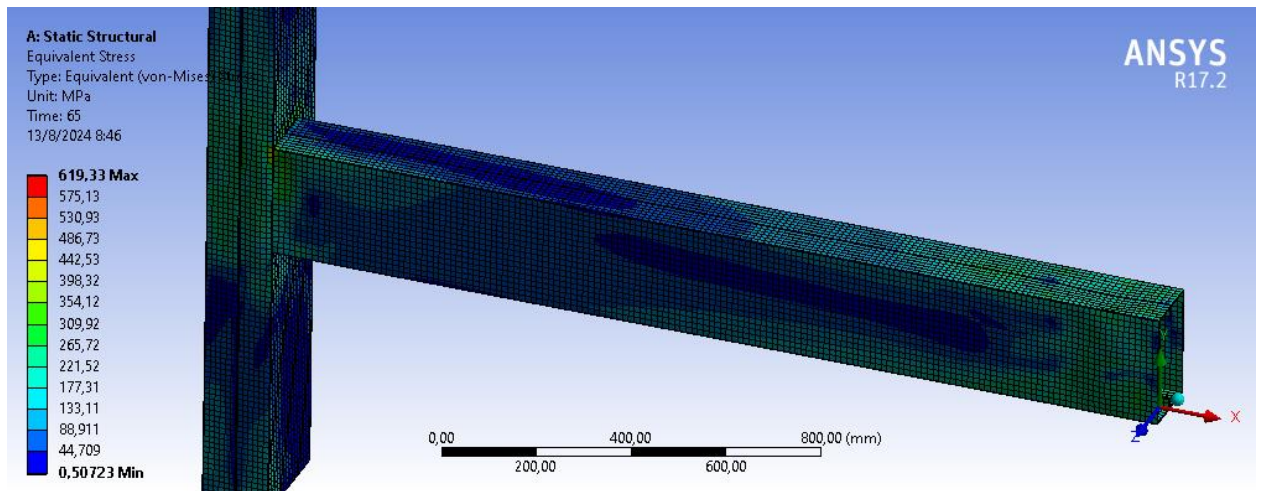


Figura 101 Esfuerzos Totales ANSYS Caso 03 último ciclo

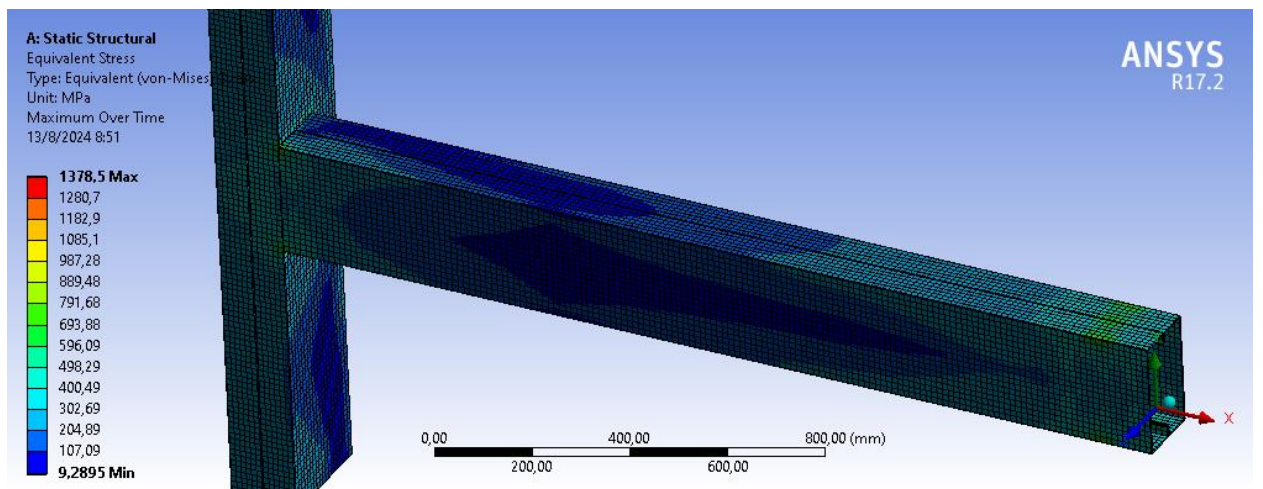


Figura 102 Esfuerzos máximos Caso 03

Results	
Minimum	9,2895 MPa
Maximum	1378,5 MPa
Minimum Occurs On	CG250X75X25X4X1500
Maximum Occurs On	CG250X75X25X4X2500

Figura 103 Esfuerzos máximos Caso 03

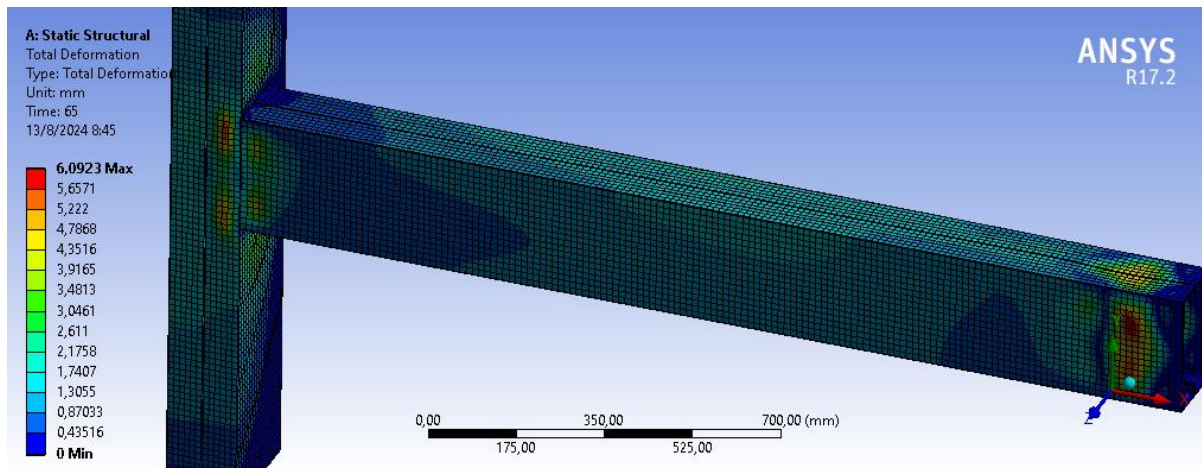


Figura 104 Deformación total ANSYS Caso 03

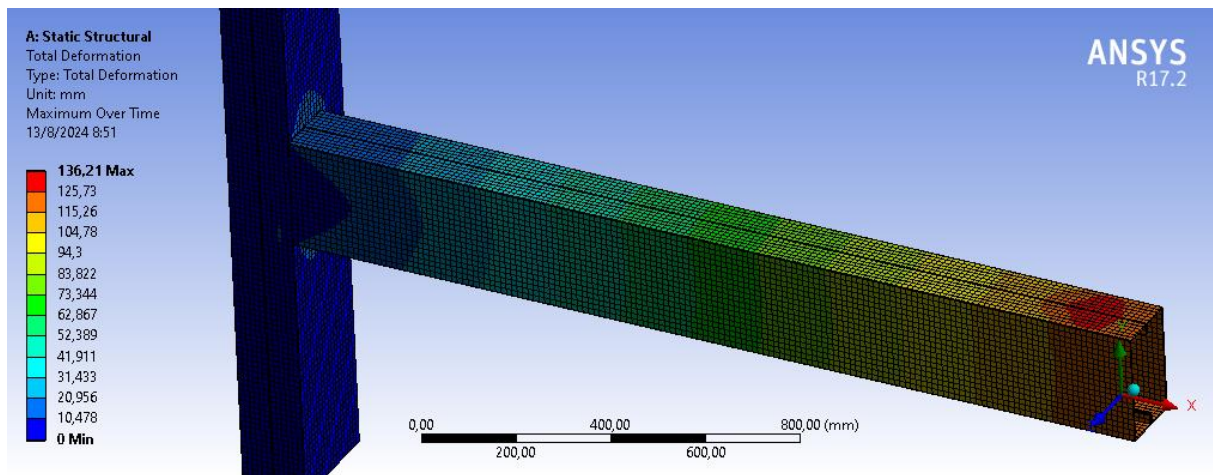


Figura 105 Deformación máxima Caso 03

Results	
Minimum	0, mm
Maximum	136,21 mm
Minimum Occurs On	CG250X75X25X4X1500
Maximum Occurs On	CG250X75X25X4X2500

Figura 106 Valores de deformación Caso 03

A continuación, se muestra la curva de histéresis luego de la aplicación de los ciclos solicitados en la (ANSI/AISC 341 -22, 2022) , sección 4, usando la no linealidad del material:

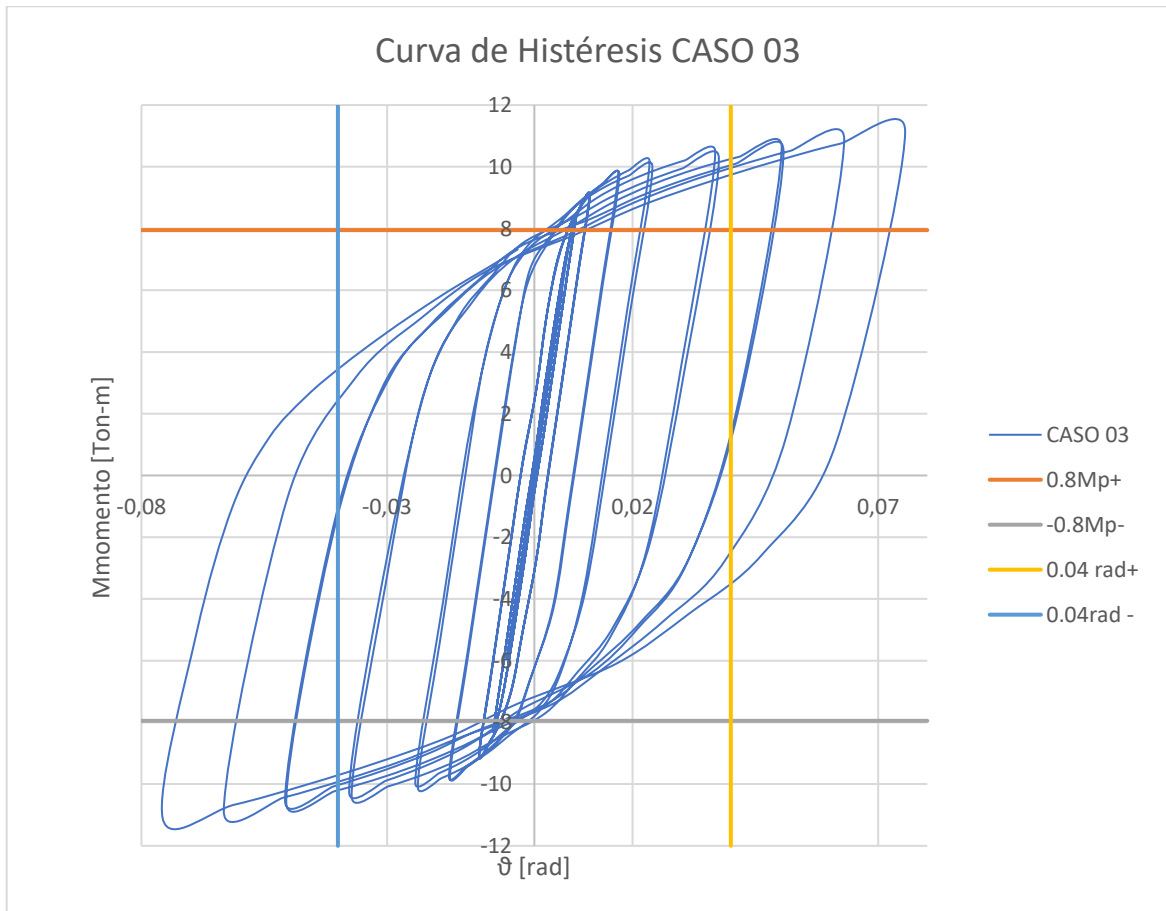


Figura 107 Curva de Histéresis Caso 03

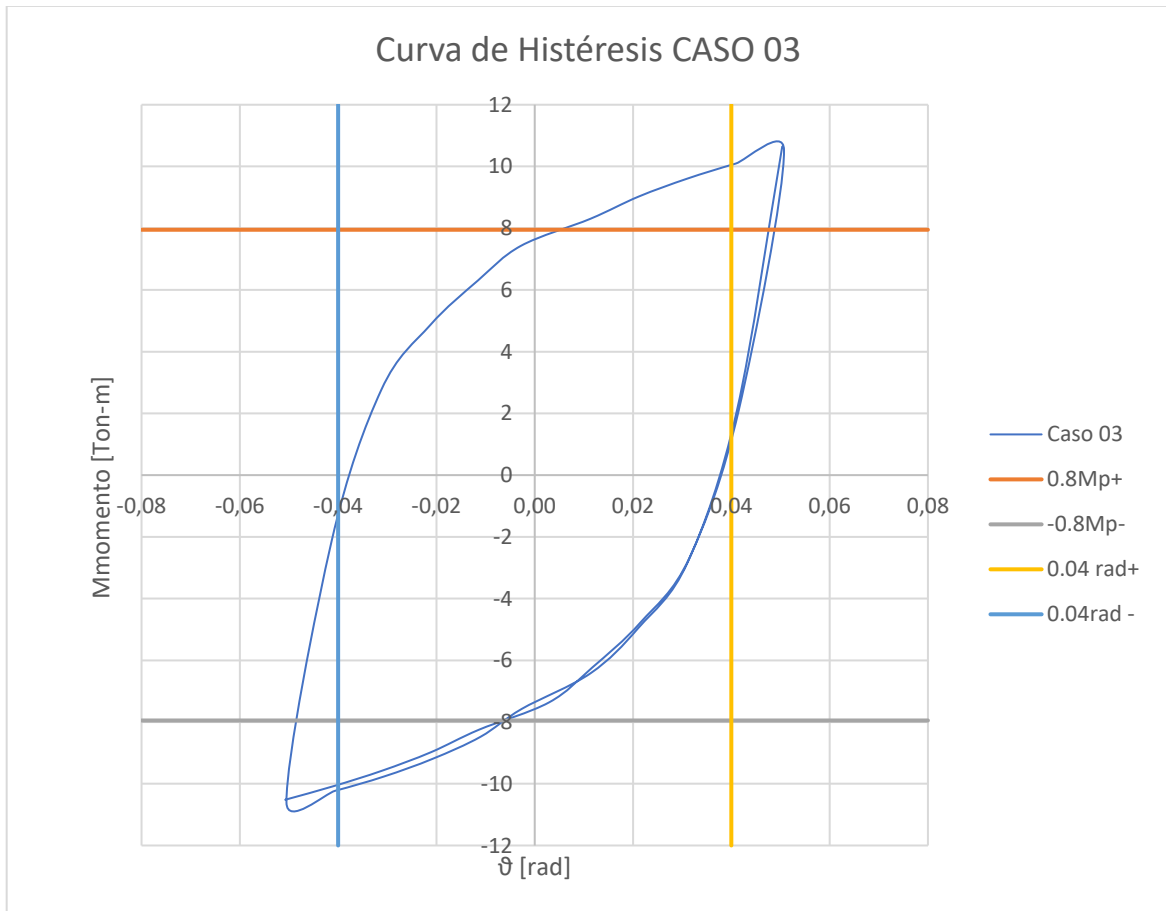


Figura 108 Curva de histéresis a 0.04 rad

6. CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se muestra una tabla de cada caso con los momentos plásticos que deben cumplir según el requerimiento de la (ANSI/AISC 341 -22, 2022) y los obtenidos con la simulación:

Tabla 13 Comparativa de resultados

Caso	Mp [Ton-m]	0.8 Mp [Ton-m]	ANSYS	% Variación
01	5.71	4.56	6.27	37.5 % ↑
02	6.48	5.19	6.26	20.61% ↑
03	9.94	7.95	10.10	27.01% ↑

De los cuales la conexión del Caso 01, es la que muestra el mejor rendimiento.

En todos los cordones de soldadura se presentan porosidades que dentro de la (AWS D1.1, 2020) no son aceptadas, tal como se muestra en la siguiente figura:



Figura 109 Defectos de soldadura – porosidades

En la siguiente figura se muestra que la soldadura no está realizada de forma adecuada, por lo cual no es apta para solicitaciones cíclicas.



Figura 110 Discontinuidad del cordón



Figura 111 Poros en la soldadura longitudinal de viga tipo cajón

6.1 RESULTADOS CASO 01

Los esfuerzos en la cara de la columna en ciertas regiones sobrepasan la capacidad del material a la rotura, por lo cual es probable que en esas zonas se haya roto o fisurado la conexión, tal como se muestra en la figura:

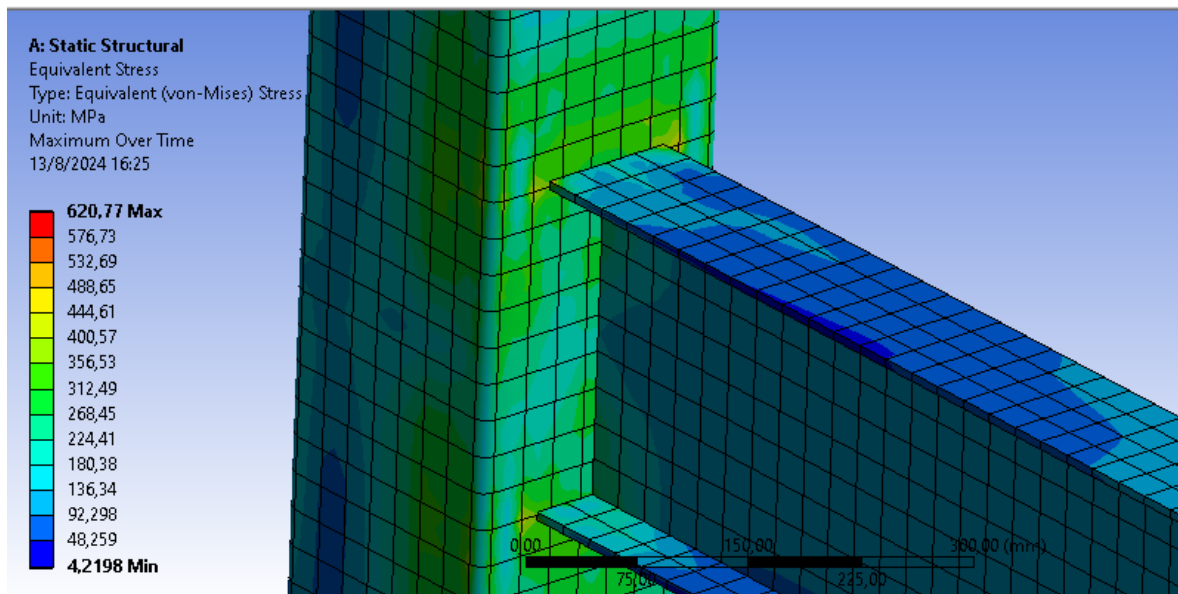


Figura 112 Esfuerzos máximos en la cara de la columna Caso 01

El máximo esfuerzo se registra en la zona de la deformación, tal como se muestra en la figura adjunta, por lo tanto, también existe fisuras en la zona de aplicación de la carga.

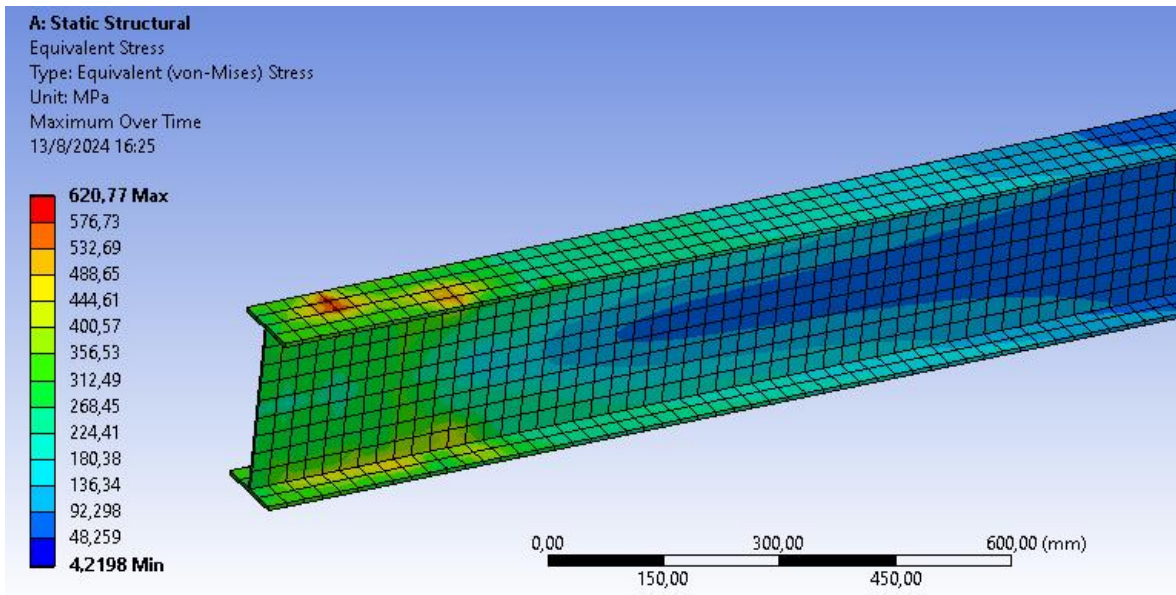


Figura 113 Máximo esfuerzo Caso 01

La máxima deformación en la cara de la columna tiene un valor promedio de 10 mm tal como se observa en la figura mostrada a continuación:

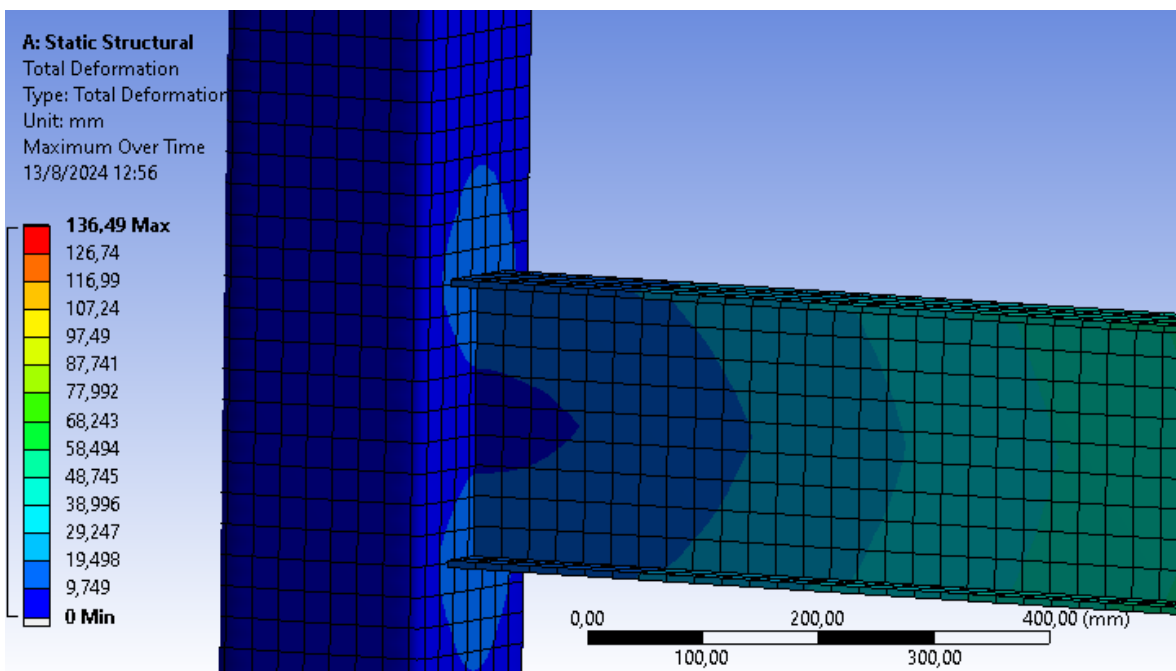


Figura 114 Deformación en la cara de la columna Caso 01

6.2 RESULTADOS CASO 02

Se observa que los esfuerzos en la cara de la columna corresponden a la zona plástica del material y se puede observar que hay fisuras en la conexión de la platina de respaldo con la columna con un esfuerzo en el orden de los 530 MPa.

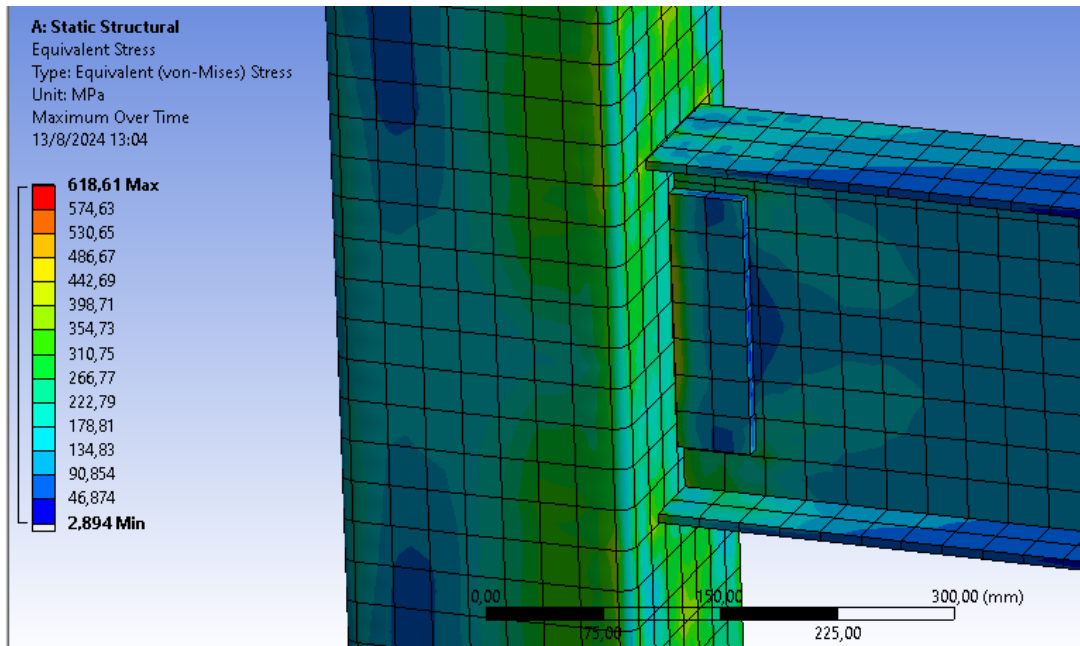


Figura 115 Esfuerzo en la cara de la columna Caso 02

El máximo esfuerzo aparece en la zona de aplicación de las deformaciones tal como se muestra en la figura, en el orden de los 600 MPa, probablemente exista rotura en esa zona de la viga.

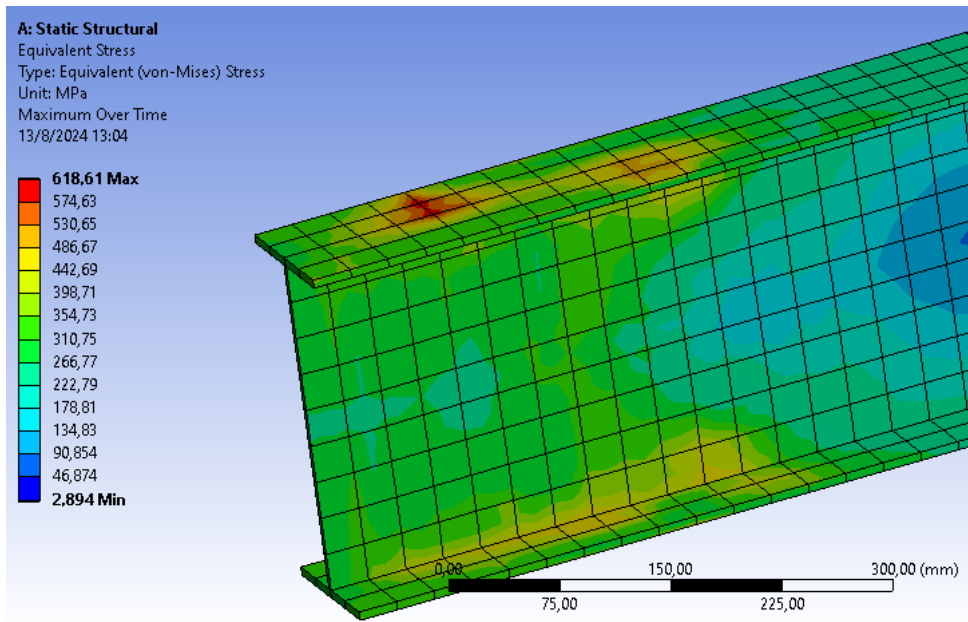


Figura 116 Zona de falla Caso 02

Se observa que existe una deformación en la cara de la columna en el orden de los 10 mm como se observa en la figura:

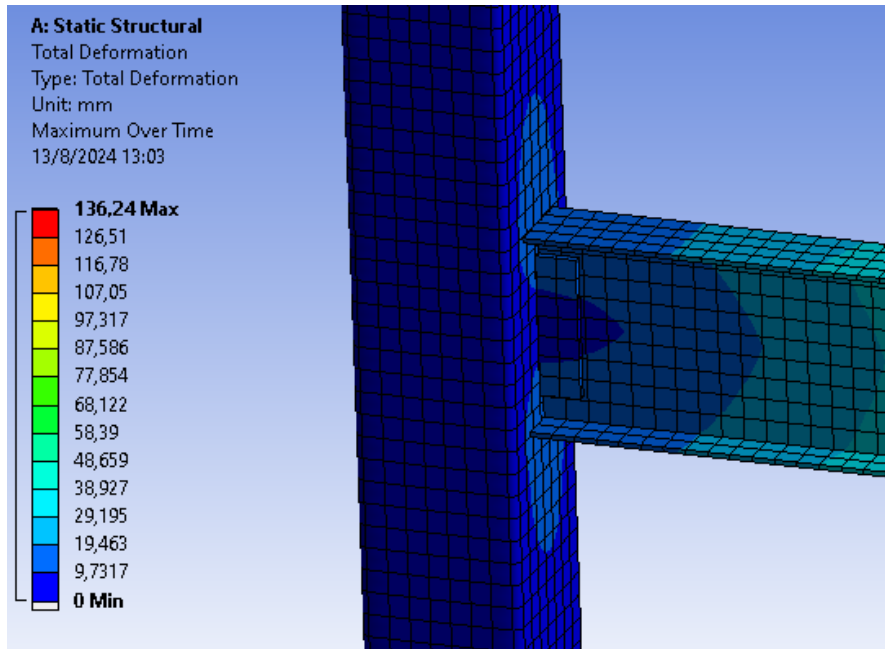


Figura 117 Deformación Caso 02 en la cara de la columna

6.3 RESULTADOS CASO 03

El esfuerzo máximo que puede soportar teóricamente el acero ASTM-A36 es aproximadamente de 450 MPa y la soldadura tiene una resistencia de 483 MPa y en los resultados de la simulación de la figura que se muestra a continuación se observa que muchos puntos sobrepasaron esta condición de esfuerzos por ende la conexión se rompió en dichas zonas.

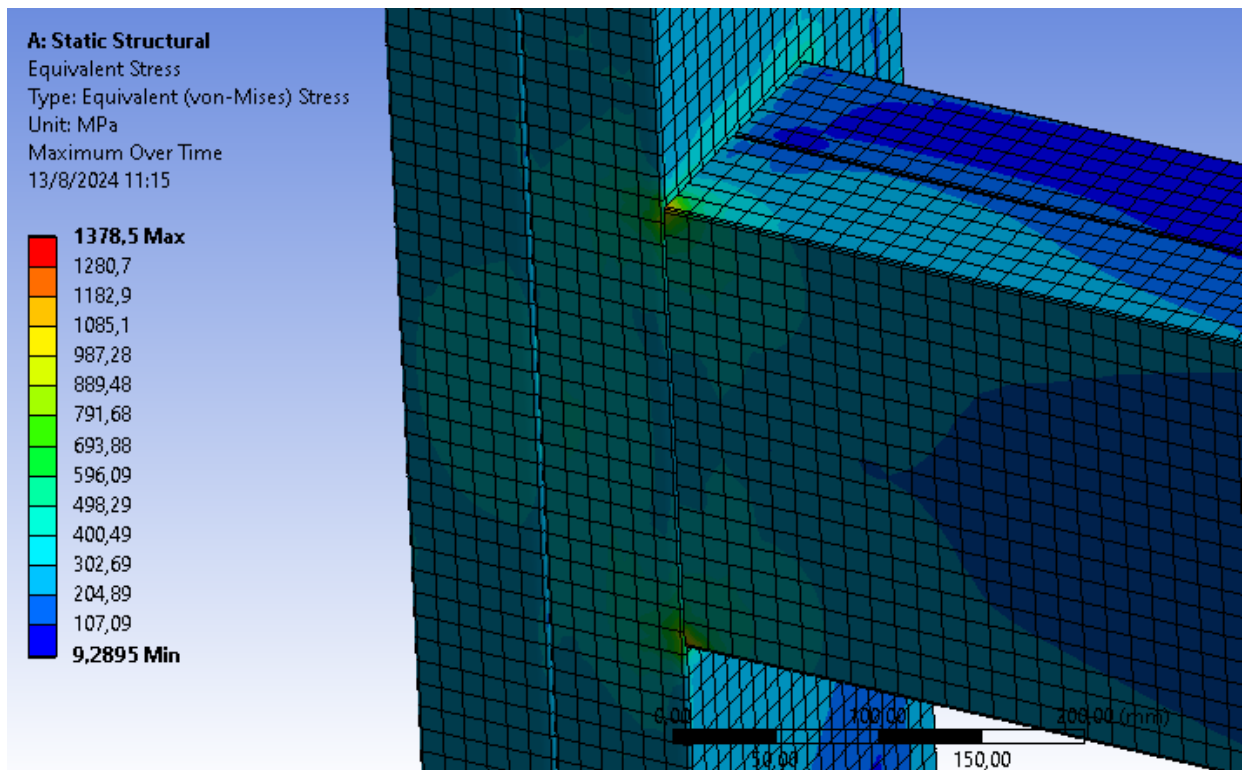


Figura 118 Fallo conexión Caso 03

Estos esfuerzos con valores elevados se deben a la configuración de la conexión, ya que tiene una inercia elevada con respecto a las uniones con vigas tipo I.

La máxima deformación en la cara de la columna es de 11 mm en promedio tal como se observa en la figura adjunta:

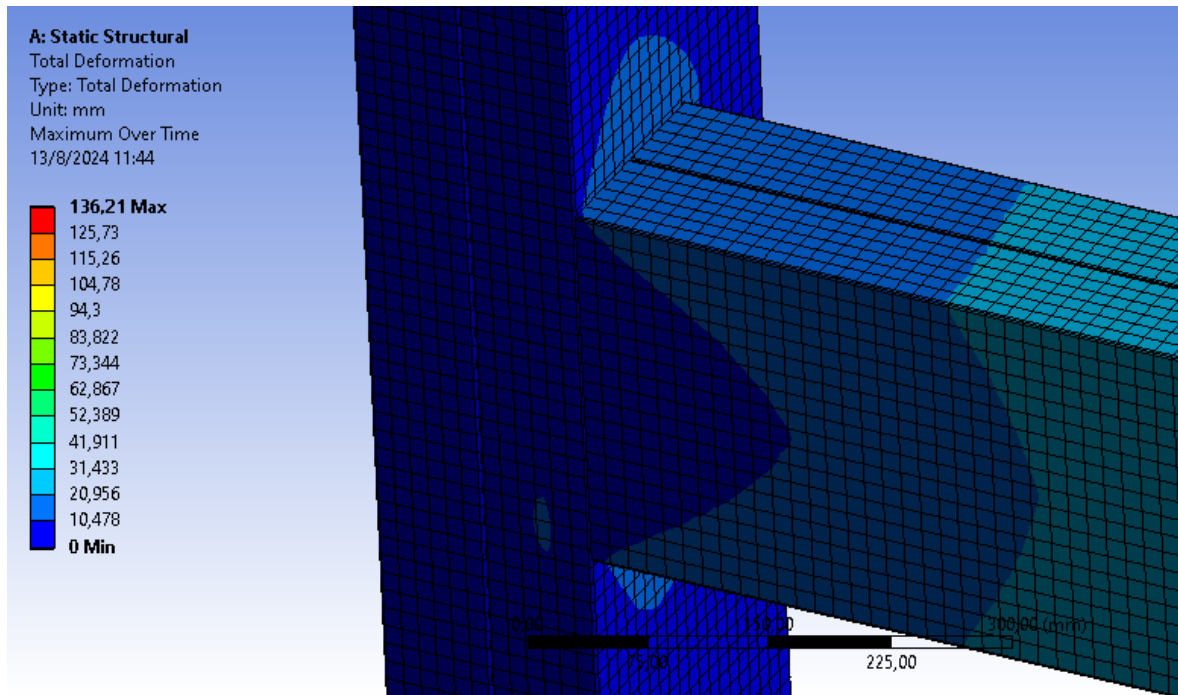


Figura 119 Deformación máxima en la cara de la columna

En el punto de aplicación de las cargas se observa regiones puntuales con altos esfuerzos, lo que significa que hay fractura en esas zonas como se muestra en la siguiente figura:

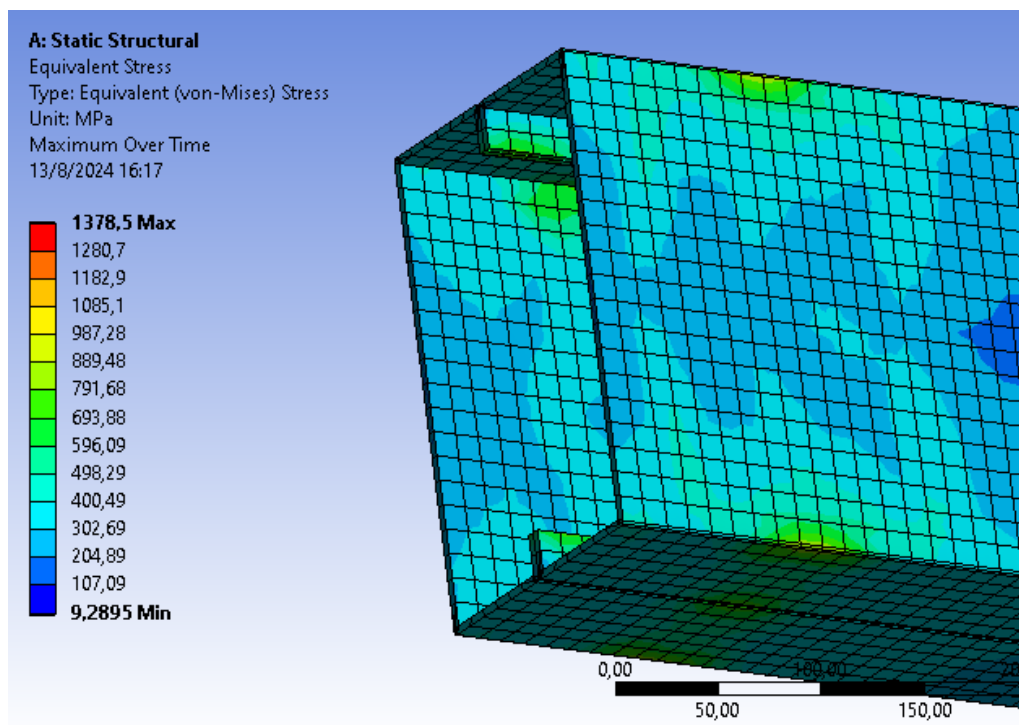


Figura 120 Caso 03 esfuerzos en los puntos de aplicación de carga

7. CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Se observa que las conexiones en estructuras metálicas más comunes en la ciudad de Quito, y en general que se replican a nivel nacional, son juntas soldadas alrededor de todo el perfil tipo I, cajón, etc.
- Se observa que los 3 casos de conexiones analizadas pasan la prueba establecida por la (ANSI/AISC 341 -22, 2022) y el (FEMA-350, 2000), teniendo el mejor desempeño la conexión del caso 01, caracterizada por tener vigas tipo I soldadas directamente a la columna.
- En las simulaciones realizadas, no se incluyen los defectos de soldadura, por lo cual los sistemas no fallan por concentradores de esfuerzos y otros tipos de defectos, sin embargo, en el montaje se observa que las juntas soldadas no cumplen lo establecido en la (AWS D1.1, 2020), lo cual, en los ensayos de laboratorio y en la vida real, probablemente no cumplan lo simulado en el software, fallando al ser sometidas a cargas cíclicas como las producidas en los sismos.
- Las propiedades del acero ingresado en el programa son los mínimos establecidos por las normas ASTM para el material, sin embargo, los materiales en ensayos reales tienen puntos de fluencia mayores a los mínimos, lo cual genera un factor de seguridad extra en los cálculos, mismos que en ensayos reales, con la soldadura adecuada, mostrarían curvas de histéresis mayores a las calculadas en el software.
- Al usar el módulo de endurecimiento cinemático en ANSYS, se puede obtener la pendiente de degradación de la resistencia del material, tal como indica la (ANSI/AISC 341 -22, 2022) en los anexos.

7.2 RECOMENDACIONES

- Es importante cumplir lo establecido en la (AWS D1.1, 2020), empleando personal calificado, inspectores calificados y ensayos que permitan asegurar la calidad de las uniones.
- Es importante definir de forma correcta el material en ANSYS, ya que el material tiene diferentes comportamientos según el patrón de carga establecido, cuando es cíclico o estándar.
- Para realizar ensayos reales de una determinada conexión, es indispensable hacer ensayos de tracción al material usado, ya que, para determinar el módulo tangente, como se observó en las ecuaciones, se necesita tener datos reales de deformación y resistencia.
- Tal como menciona (Uribe Vallejo & Valencia Clement, 2009), en caso de no tener datos reales del material, el módulo tangente no debe ser menor que 30 veces el módulo elástico del material.
- Para mejorar el desempeño de la conexión, dice (Jaramillo, 2024) y reducir las deformaciones en la cara de la columna, es recomendable realizar la siguiente configuración a la conexión

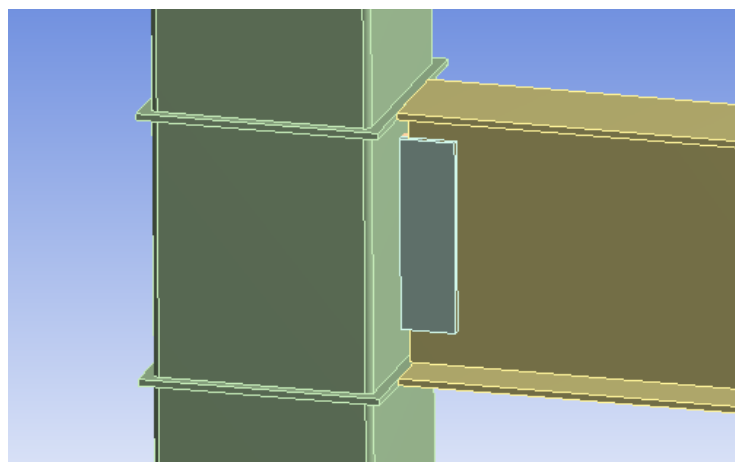


Figura 121 Geometría de conexión mejorada (Jaramillo, 2024)

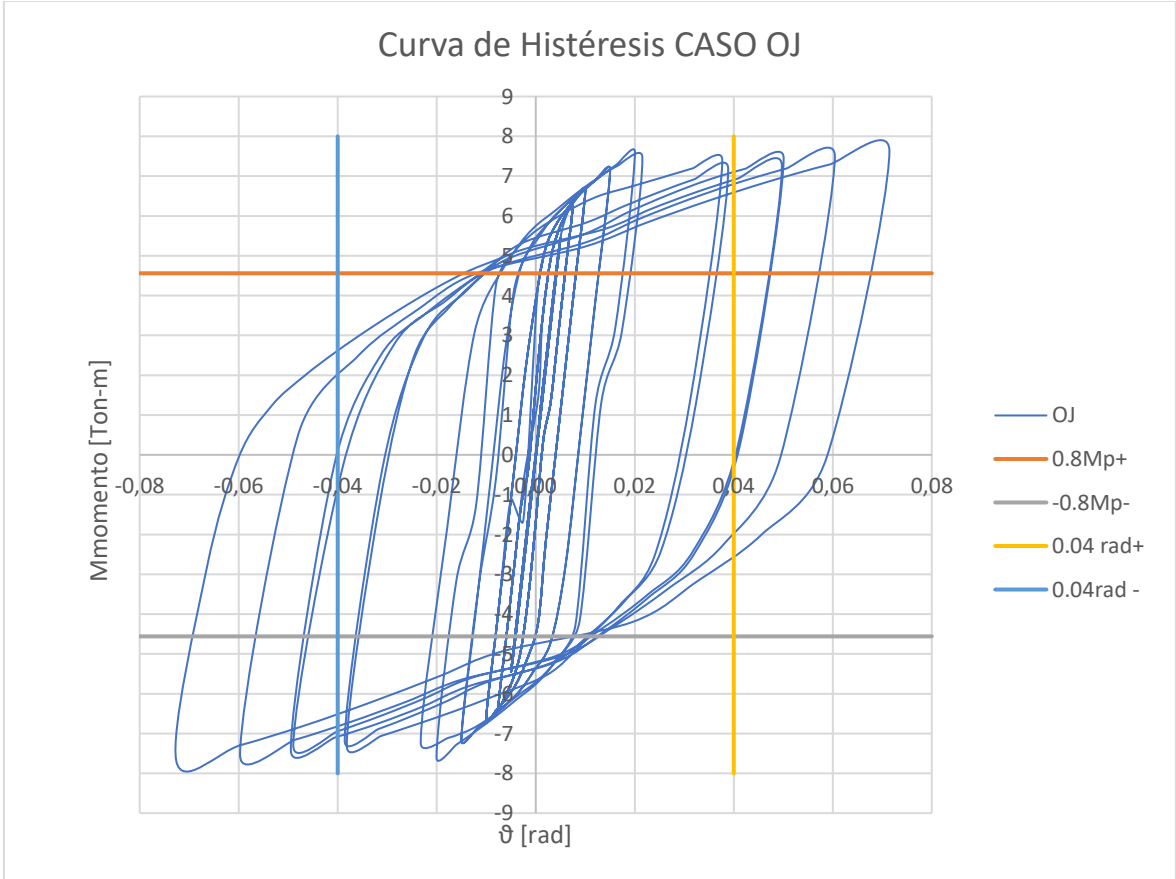


Figura 122 Curva histéresis conexión OJ (Jaramillo, 2024)

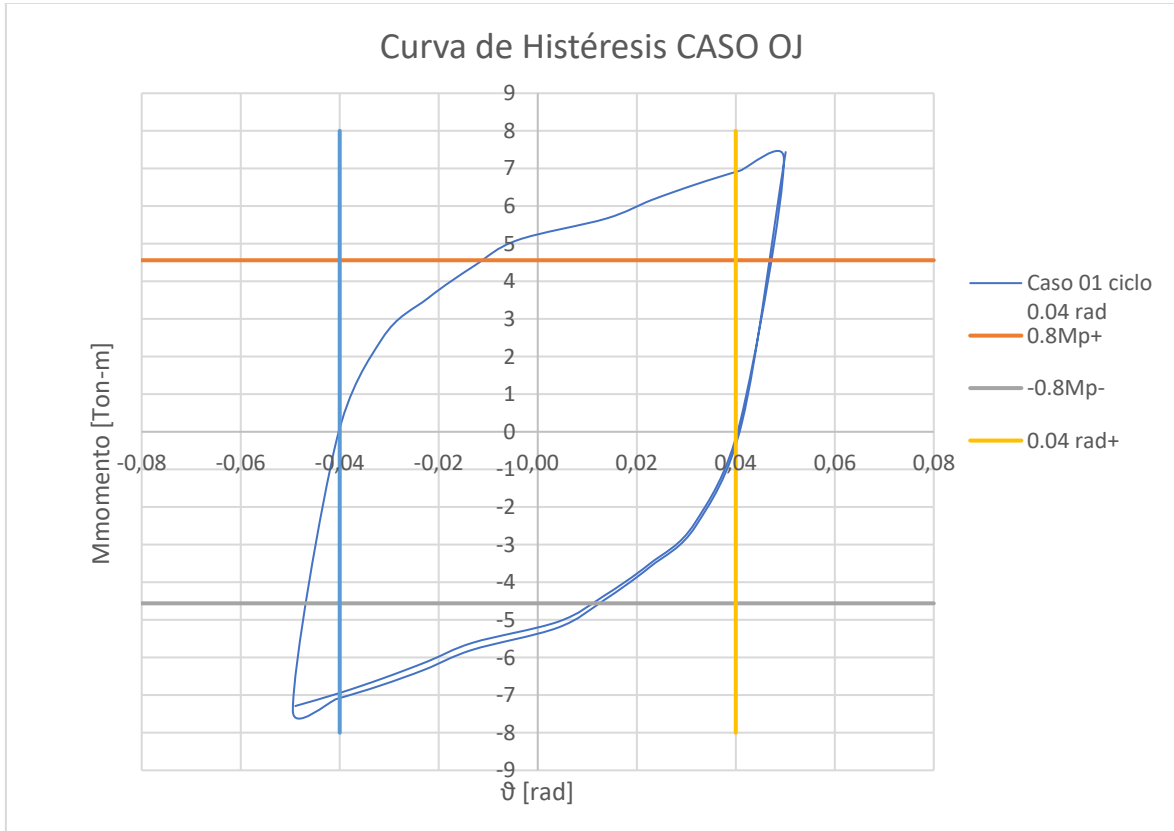


Figura 123 Curva de histéresis - Conexión OJ (Jaramillo, 2024)

Teniendo una mejora del 12% del caso 01 analizado bajo las mismas condiciones de carga y diseño.

- Al utilizar atizadores perimetrales alrededor de la conexión se puede minimizar las deformaciones en la cara de la columna como se muestra a continuación:

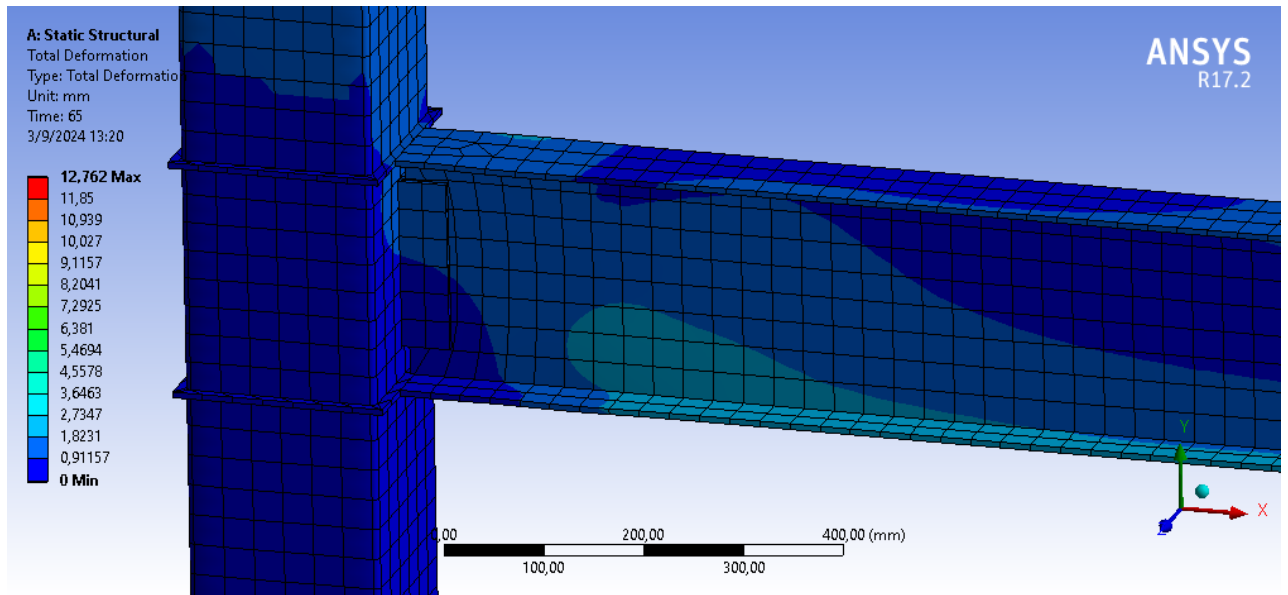


Figura 124 Deformación OJ (Jaramillo, 2024)

8. BIBLIOGRAFÍA

Aceros Torices. (2024). Obtenido de <https://acerostorices.com.mx/blog/que-son-las-estructuras-metalicas/>

ANSI/AISC 341 -22. (2022). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings.*

ANSI/AISC 358 -22. (2022). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications.*

ANSI/AISC 360 -22. (2022). *Specification for Structural Steel Buildings.*

ANSYS. (07 de 08 de 2024). Obtenido de <https://www.ansys.com/>

Autodesk. (2024). *Autodesk.* Obtenido de <https://www.autodesk.com/es/solutions/finite-element-analysis>

AWS D1.1. (2020). *Structural Welding Code Steel.*

- Cañizares, F. (2018). *Diseño básico de Estructuras de Acero*. Quito.
- Chazaro, C. (2019). *Diseño de conexiones*. México: GERDAU CORSA.
- Crisafulli, F. (2018). *Diseño Sismorresistente de construcciones de acero*. Mendoza: Alacero.
- ESSS. (2024). *Análisis por FEM*. Obtenido de <https://www.esss.com/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>
- FEMA-350. (2000). *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*. California.
- FERREPRO. (2024). *Metalmecánica MX*. Obtenido de <https://ferrepro.mx/>
- Gere, J., & Goodno, B. (2009). *Mecánica de Materiales*. México: Cengage Learning.
- Grupo Acura. (2024). *Diseño, fabricación, equipamiento e instalación de tanques industriales*. Obtenido de <https://grupoacura.com/es/>
- Jaramillo, O. (2024). *Conexión precalificada*. Quito.
- LEADRP. (2024). *LEADRP*. Obtenido de <https://leadrp.net/es/about-leadrp/>
- McCormac, J., & Csernak, S. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero*. México: Alfaomega.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). En CAMICON, *Estructuras de Acero*.
- Prosoldes. (2024). *Soluciones Ignífugas, Soldadura y Corte CNC*. Obtenido de <https://prosoldes.com/que-es-la-soldadura-gtaw/>
- Uribe Vallejo, M., & Valencia Clement, G. (2009). Evaluating a steel beam's rigid connection to a concrete filled tubular column when submitted to dynamic load . *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, 24-34.

Venture-FEMA, S. J. (2000). *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*.