



Determinación numérica de la influencia del tamaño de las placas de continuidad en la respuesta histerética de una conexión viga HEA - columna PTE para PRM

Ing. William González Piraquive
Ing. Miguel Antonio Morales Lascano

Director
Dr. Ing. Fabián Lamus Báez

Co - director
Dr. Ing. Federico Alejandro Núñez Moreno

Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Civil
Bogotá, Colombia
2018

CONTENIDO

Lista de figuras	8
Lista de Imágenes	24
Lista de tablas	25
Lista de ecuaciones.....	30
Lista de abreviaturas	31
Introducción.....	32
Objetivo General	33
Objetivos Específicos	33
Justificación.....	34
1. MARCO TEÓRICO.....	41
1.1 Diseño sismo-resistente	41
1.1.1 Antecedentes.....	41
1.1.2 Filosofía del Diseño Sismorresistente.....	42
1.2 Ductilidad	44
1.3 Columna fuerte - Viga débil	45
1.4 Diseño sísmico de conexiones	47
1.5 Sismo de Northridge y efecto en las conexiones	48
1.6 Conexiones resistentes a momentos.....	52
1.7 Capacidad de deformación.....	55
1.8 Comportamiento de conexiones soldadas.....	56
1.9 Requisitos del NSR-10 para PRM-DMO y PRM-DES.....	57
1.9.1 Pórticos resistentes a momentos con capacidad de disipación de energía moderada - PRM-DMO.....	58

1.9.2	Pórticos resistentes a momentos con capacidad de disipación de energía especial - PRM-DES.....	58
1.10	Esfuerzos.....	59
2.	DISEÑO DE CONEXIONES.....	62
2.1	Conexiones precalificadas según el ANSI/AISC 358 – 2016.....	62
2.1.1	Reduced Beam Section (RBS) Moment Connection.....	62
2.1.2	Bolted Unstiffened and Stiffened Extended End-Plate Moment Connections.	63
2.1.3	Bolted Flange Plate (BFP) Moment Connection.	63
2.1.4	Welded Unreinforced Flange-Welded Web (WUF-W) Moment Connection.	64
2.1.5	Kaiser Bolted Bracket (KBB) Moment Connection.....	64
2.1.6	Conxtech Conxl Moment Connection.	66
2.1.7	Sideplate Moment Connection.....	66
2.1.8	Simpson Strong-Tie Strong Frame Moment Connection.....	67
2.1.9	Double-Tee Moment Connections.	68
2.2	Descripción de la conexión a ensayar.....	69
3.	ANÁLISIS NÚMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CONEXIONES.....	73
3.1	Seleccionar disciplina y método de resolución del modelo.	74
3.1.1	Disciplina.....	74
3.1.2	Método de resolución.	78
3.2	Definir Geometría.....	81
3.3	Definir tipo de elemento.....	85
3.4	Definir modelo constitutivo y propiedades de material.....	86

3.4.1	Endurecimiento por deformación.....	87
3.4.2	Endurecimiento Isotrópico.....	87
3.4.3	Endurecimiento Cinemático.....	88
3.5	Discretizar y enmallar	90
3.6	Aplicar Cargas y Condiciones de contorno	93
4.	MATERIALES Y METODOLOGÍA	98
4.1	Laboratorios para ensayos	98
4.1.1	Laboratorio Universidad Nacional de Colombia.....	98
4.1.2	Laboratorio de Estructuras Pontificia Universidad Javeriana. ...	99
4.2	Materiales.....	101
4.3	Fabricación y montaje	102
4.3.1	Ensayo a tensión.....	102
4.3.2	Ensayo a flexión	103
4.3.3	Ensayo Conexión	106
4.4	Elementos de apoyo.....	108
4.5	Elementos de Carga.....	109
4.6	Protocolo de carga	111
4.6.1	Perfil HEA100	111
4.6.2	Perfil PTE.....	112
4.6.3	Conexión.....	113
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	115
5.1	Curva esfuerzo – deformación del material	115
5.2	Ensayos de Flexión	119
5.2.1	HEA100.....	119

5.2.2	PTE.....	120
5.2.3	Conexión.....	120
5.3	Modelación numérica	122
5.3.1	Validación del modelo numérico.....	122
5.3.2	Modelación numérica de veinticinco (25) configuraciones de espesor y área de las placas de continuidad.....	130
5.3.2.1	L180E8.....	131
5.3.2.2	L180E9.....	132
5.3.2.3	L180E12.7.....	133
5.3.2.4	L180E15.....	134
5.3.2.5	L180E19.....	135
5.3.2.6	L190E8.....	136
5.3.2.7	L190E9.....	137
5.3.2.8	L190E12.7.....	138
5.3.2.9	L190E15.....	139
5.3.2.10	L190E19.....	140
5.3.2.11	L200E8.....	141
5.3.2.12	L200E9.....	142
5.3.2.13	L200E12.7.....	143
5.3.2.14	L200E15.....	144
5.3.2.15	L200E19.....	145
5.3.2.16	L210E8.....	146
5.3.2.17	L210E9.....	147
5.3.2.18	L210E12.7.....	148

5.3.2.19	L210E15.....	149
5.3.2.20	L210E19.....	150
5.3.2.21	L220E8.....	151
5.3.2.22	L220E9.....	152
5.3.2.23	L220E12.7.....	153
5.3.2.24	L220E15.....	154
5.3.2.25	L220E19.....	155
5.3.2.26	Resumen de los resultados de los modelos	156
5.3.2.27	Análisis respecto a las áreas	167
5.3.2.28	Análisis respecto a los espesores.....	167
5.3.3	Modelación numérica de veinticinco (25) configuraciones de espesor y área de las placas de continuidad usando el F_y teórico.....	168
5.3.3.1	L180E8T.....	169
5.3.3.2	L180E9T.....	170
5.3.3.3	L180E12.7T.....	171
5.3.3.4	L180E15T.....	172
5.3.3.5	L180E19T.....	173
5.3.3.6	L190E8T.....	174
5.3.3.7	L190E9T.....	175
5.3.3.8	L190E12.7T.....	176
5.3.3.9	L190E15T.....	177
5.3.3.10	L190E19T.....	178
5.3.3.11	L200E8T.....	179
5.3.3.12	L200E9T.....	180

5.3.3.13	L200E12.7T.....	181
5.3.3.14	L200E15T.....	182
5.3.3.15	L200E19T.....	183
5.3.3.16	L210E8T.....	184
5.3.3.17	L210E9T.....	185
5.3.3.18	L210E12.7T.....	186
5.3.3.19	L210E15T.....	187
5.3.3.20	L210E19T.....	188
5.3.3.21	L220E8T.....	189
5.3.3.22	L220E9T.....	190
5.3.3.23	L220E12.7T.....	191
5.3.3.24	L220E15T.....	192
5.3.3.25	L220E19T.....	193
5.3.3.26	Resumen de los resultados de los modelos	194
5.3.3.27	Análisis respecto a las áreas	205
5.3.3.28	Análisis respecto a los espesores.....	205
6.	CONCLUSIONES	206
	Bibliografía	208
	ANEXO A – Planos.....	212

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismos de fluencia en vigas: (a) Mecanismo de piso; (b) mecanismo intermedio; (c) mecanismo de viga – Tomado de (Moehle, 2015)	45
Figura 2. Pandeo fuera del plano de arriostradores concéntricos – Tomado de (Miranda, 2001).....	49
Figura 3. Ciclo de histéresis de uno de los ensayos realizados a un perfil tubular de un arriostrador concéntrico ante cargas sísmicas. (Tomado de Haddad, 2014).....	49
Figura 4. Pandeo y fractura de arriostradores hechos a base de perfiles tubulares de sección cuadrada – Tomado de (Miranda, 2001).....	50
Figura 5. Fractura en la conexión de columnas con placas base. Tomado de (Miranda, 2001).....	50
Figura 6. Propagación de la fractura del patín de la columna hacia el alma de la misma. Tomado de http://degenkolb.com/practice_areas/seismic_ordinances/pre_northridge_steel_moment_frame_buildings/	51
Figura 7. Fractura en la soldadura y fractura en el patín de la columna. Tomado de (Miranda, 2001).....	51
Figura 8. Detalles de conexión a momento comúnmente empleados en California. Tomado de (Miranda, 2001).....	51
Figura 9. Fractura de placa de conexión de cortante. Tomado de (Miranda, 2001).....	52
Figura 10. Conexión a cortante – Tomado de (Segui, 2013).....	53
Figura 11. Conexión capaz de transmitir cortante y momento – Tomado de (Segui, 2013)	53
Figura 12. Curva momento rotación para tres conexiones con diferente grado de rotación relativo entre elementos conectados. Tomado de (Segui, 2013)	54

Figura 13 – Conexión con viga de sección reducida. – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16	62
Figura 14 - Configuraciones de Bolted Unstiffened and Stiffened Extended End-Plate Moment Connections: a) Cuatro pernos sin rigidizador, 4E, b) Cuatro pernos con rigidizador, 4ES, c) Ocho pernos con rigidizador, 8ES. – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16	63
Figura 15 - Bolted Flange Plate (BFP) Moment Connection. – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16	63
Figura 16 - Welded Unreinforced Flange-Welded Web (WUF-W) Moment Connection – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16	64
Figura 17 - Kaiser bolted bracket connection.(a) W-series connection; (b) B-series connection. – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16 – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16	65
Figura 18 – Configuraciones Kaiser bolted bracket W-series: (a) Seis pernos en columna, W1.0; (b) Cuatro pernos en columna, W2.0 y W2.1; and (c) Dos pernos en columna, W3.0 y W3.1. – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16.....	65
Figura 19 – Configuración Kaiser bolted bracket B-series: (a) Seis pernos en columna, B1.0, y (b) Cuatro pernos en columna, B2.1. – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16	65
Figura 20 – Ensamble de ConXL moment connection – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16	66
Figura 21 – Configuraciones de uniaxial SidePlate ensambladas: (a) construcción de viga y columna de ala ancha a una cara; (b) construcción de viga y columna con ala ancha de dos lados; (c) viga de ala ancha hacia columna construida en cajón; (d) viga HSS sin placas de cubierta hacia columna con alas anchas; (e) Viga HSS con placas de cubierta hacia columna de alas anchas; y (f) Viga HSS con placas de cubierta hacia columna construida en cajón. – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16	67
Figura 22 - Conexión a momento Simpson Strong-Tie Strong Frame – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16.....	68

Figura 23 – Conexión típica de Doble T.....	69
Figura 24 – Modelo geométrico total de la conexión ensayada	70
Figura 25 – Detalle de soldaduras (gris oscuro) sin contacto en las esquinas para el caso del PTE, las cuales se hicieron por CJP. En adición, se observa el pasador realizado para poder efectuar la soldadura de penetración completa entre la placa de continuidad y el PTE.	71
Figura 26 – Bisel a 45° realizado en todo el contorno del PTE para ser conectado con las placas de continuidad.....	71
Figura 27 – Presentación de la viga a la columna y placas de continuidad. Cordón de soldadura oculto.	72
Figura 28 – Perfil de conexión visto desde la sección transversal de la viga. Cordones de soldadura ocultos.....	72
Figura 29. Modelamiento en elementos finitos en Mechanical APDL. Elaboración propia.	73
Figura 30 – Refinamiento de la malla en la zona protegida de la conexión a) Refinamiento de la malla de una conexión particular (Díaz, Victoria, Marti, & Querin, 2011), b) Refinamiento de la malla en la conexión objeto de estudio en esta investigación.....	80
Figura 31 – a) Zona de transición enmallada con elementos Solid186, y, b) Zona protegida y zona más alejada de la conexión, la cual es enmallada con elementos Solid185 de diferente densidad.....	81
Figura 32 – Definición de la geometría en ANSYS APDL	83
Figura 33. Endurecimiento isotrópico, tomado de http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70578/fichero/Cap%C3%ADtulo+2.pdf	87
Figura 34 – Endurecimiento cinemático – Tomado de (SAP IP, Inc).....	88
Figura 35 – Selección de puntos de una de las curvas esfuerzo-deformación.....	89
Figura 36 – Definición del material en Ansys APDL.....	90

Figura 37 – Discretización de la geometría a) Discretización de una viga, b) viga antes y después de ser discretizadas, y, c) discretización de las áreas de la conexión a causa de la geometría de las secciones.	91
Figura 38 – Geometría discretizada de la conexión.....	91
Figura 39 – Modelo de conexión discretizado y enmallado.....	92
Figura 40 – Porcentaje de errores en el enmallado de la conexión.....	93
Figura 41 – Condiciones de contorno – Tomado de (Díaz, Victoria, Marti, & Querin, 2011)	94
Figura 42 – Restricciones laterales en X y Z	96
Figura 43 – Pasos de carga definidos en el programa Ansys APDL.....	97
Figura 44. Muestras obtenidas del mecanizado de los perfiles acorde con la norma ASTM E8. De arriba hacia abajo, Perfil PTE 9mm pieza 1, Perfil PTE 9mm pieza 2, Perfil HEA alma 5mm, Perfil HEA aleta 7.4mm. Imagen propia.	102
Figura 45. Muestra obtenida del mecanizado del acero dispuesto para la placa de continuidad acorde con la norma ASTM E8. Imagen propia	102
Figura 46. Representación geométrica para ensayo de flexión de perfil HEA100. Construcción propia	104
Figura 47. Plano de montaje de actuador para ensayo a flexión viga HEA – Plano de pórtico tomado de Estahl Ingeniería con modificaciones propias	105
Figura 48. Representación geométrica para ensayo de flexión en perfil PTE. Construcción propia	105
Figura 49. Plano de montaje de actuador para ensayo a flexión PTE– Plano de pórtico tomado de Estahl Ingeniería con modificaciones propias	106
Figura 50 – Imagen de aplicador de carga en viga perfil HEA100. Construcción propia	107
Figura 51 - Plano de montaje de actuador para ensayo de la conexión– Plano de pórtico tomado de Estahl Ingeniería con modificaciones propias	108
Figura 52 – Elementos de apoyo para ensayos – Fuente Planos de diseño Estahl Ingeniería	108

Figura 53. Aplicador de carga doble para simular ensayo a flexión pura. Construcción propia	110
Figura 54. Elemento de aplicación de carga sobre el perfil PTE. Construcción propia.....	111
Figura 55. Protocolo de carga para el ensayo de la conexión. Construcción propia.....	114
Figura 56. Curva Esfuerzo vs Deformación de la probeta PTE P1. Tomado de resultados ensayos en UNC.....	115
Figura 57. Curva Esfuerzo vs Deformación de la probeta PTE P2. Tomado de resultados ensayos en UNC.....	116
Figura 58. Curva Esfuerzo vs Deformación de la probeta HEA100 Aleta. Tomado de resultados ensayos en UNC.....	116
Figura 59. Curva Esfuerzo vs Deformación de la probeta HEA100 Alma. Tomado de resultados ensayos en UNC.....	117
Figura 60. Curva Esfuerzo vs Deformación de la probeta Placa de Continuidad. Tomado de resultados ensayos en UNC.	117
Figura 61. Curva Fuerza – Desplazamientos obtenidos en el punto de aplicación de carga perfil HEA100. Construcción propia	119
Figura 62. Curva Fuerza – Desplazamiento perfil PTE. Construcción propia	120
Figura 63. Gráfica Desplazamiento – Tiempo de la conexión medido en la viga a una distancia de 243mm de la cara de la columna (PTE). Construcción propia	121
Figura 64. Gráfica Desplazamiento – Tiempo de la conexión medido en la columna (PTE) a una distancia de 35.5mm de la cara del perfil HEA100. Construcción propia.	121
Figura 65. Gráfico de histéresis del ensayo experimental de la conexión. Construcción propia.	122
Figura 66. Restricciones en placas del modelo. Construcción propia.	123

Figura 67. Gráfica rotación vs tiempo de los modelos isotrópico, cinemático y experimental. Construcción propia	124
Figura 68. Gráfica fuerza vs. tiempo de los modelos isotrópico, cinemático y experimental. Construcción propia	124
Figura 69. Fuerza vs Desplazamientos implementando el modelo planteado con placas. Construcción propia	125
Figura 70. Superposición de curva modelo monotónico con cojinetes y último ciclo del ensayo experimental. Construcción propia	126
Figura 71. Cojinetes implementados en los apoyos para calibración del modelo numérico. Construcción propia	127
Figura 72. Efecto de los cojinetes en curva Fuerza – Desplazamiento. Construcción propia	128
Figura 73. Gráfica Fuerza vs Tiempo Modelo Experimental vs Modelo con Cojinetes. Construcción propia	129
Figura 74. Gráfica Fuerza- Desplazamiento del modelo implementando cojinetes. Construcción propia	129
Figura 75. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E8. Construcción propia.....	131
Figura 76. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E8. Construcción propia	131
Figura 77. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E9. Construcción propia.....	132
Figura 78. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E9. Construcción propia	132
Figura 79. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E12.7. Construcción propia.	133
Figura 80. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E12.7. Construcción propia	133
Figura 81. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E15. Construcción propia	134

Figura 82. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E15. Construcción propia	134
Figura 83. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E19. Construcción propia	135
Figura 84. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E19. Construcción propia L180E15.	135
Figura 85. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E8.L180E8. Construcción propia.	136
Figura 86. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E8. Construcción propia L180E15.	136
Figura 87. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E9. Construcción propia.....	137
Figura 88. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E9. Construcción propia	137
Figura 89. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E12.7. Construcción propia.	138
Figura 90. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E12.7. Construcción propia	138
Figura 91. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E15. Construcción propia	139
Figura 92. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E15. Construcción propia	139
Figura 93. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E19. Construcción propia.	140
Figura 94. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E19. Construcción propia	140
Figura 95. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E8. Construcción propia.....	141
Figura 96. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E8. Construcción propia	141

Figura 97. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E9. Construcción propia.....	142
Figura 98. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E9. Construcción propia	142
Figura 99. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E12.7. Construcción propia.....	143
Figura 100. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E12.7. Construcción propia	143
Figura 101. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E15. Construcción propia.....	144
Figura 102. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E15. Construcción propia	144
Figura 103. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E19. Construcción propia.....	145
Figura 104. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E19. Construcción propia	145
Figura 105. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E8. Construcción propia	146
Figura 106. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E8. Construcción propia	146
Figura 107. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E9. Construcción propia	147
Figura 108. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E9. Construcción propia	147
Figura 109. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E12.7. Construcción propia.....	148
Figura 110. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E12.7. Construcción propia	148
Figura 111. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E15. Construcción propia.....	149

Figura 112. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E15. Construcción propia	149
Figura 113. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E19. Construcción propia	150
Figura 114. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E19. Construcción propia	150
Figura 115. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E8. Construcción propia	151
Figura 116. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E8. Construcción propia	151
Figura 117. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E9. Construcción propia	152
Figura 118. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E9. Construcción propia	152
Figura 119. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E12.7. Construcción propia	153
Figura 120. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E12.7. Construcción propia	153
Figura 121. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E15. Construcción propia	154
Figura 122. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E15. Construcción propia	154
Figura 123. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E19. Construcción propia	155
Figura 124. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E19. Construcción propia	155
Figura 125. Superficie gráfica de disipación de energía según espesor y longitud de placa de continuidad. Construcción propia.....	156
Figura 126. Energía disipada a -0.04rad y 0.04rad para cada configuración de conexión. Construcción propia	157

Figura 127. Distribución de resistencia máxima obtenida por cada configuración de conexión. Construcción propia	158
Figura 128. Distribución de Momentos máximos normalizados respecto al M_p	159
Figura 129. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 180mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.	160
Figura 130. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 190mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.	160
Figura 131. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 200mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.	161
Figura 132. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 210mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.	161
Figura 133.. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 220mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.	162
Figura 134. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 8mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.	162
Figura 135. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 9mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.	163
Figura 136. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 12.7mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.	163

Figura 137. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 15mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.	164
Figura 138. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 19mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.	164
Figura 139. Rigidez rotacional inicial variando áreas. Construcción propia	165
Figura 140. Momentos máximos obtenidos variando áreas. Construcción propia.....	165
Figura 141. Rigidez rotacional inicial variando espesores. Construcción propia.....	166
Figura 142. Momentos máximos obtenidos variando espesores. Construcción propia.....	166
Figura 143. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E8T. Construcción propia.	169
Figura 144. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E8T. Construcción propia	169
Figura 145. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E9T. Construcción propia.	170
Figura 146. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E9T. Construcción propia	170
Figura 147. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E12.7T. Construcción propia.	171
Figura 148. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E12.7T. Construcción propia.....	171
Figura 149. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E15T. Construcción propia.	172
Figura 150. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E15T. Construcción propia	172

Figura 151. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E19T. Construcción propia	173
Figura 152. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E19T. Construcción propia	173
Figura 153. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E8T. Construcción propia	174
Figura 154. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E8T. Construcción propia	174
Figura 155. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E9T. Construcción propia	175
Figura 156. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E9T. Construcción propia	175
Figura 157. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E12.7T. Construcción propia	176
Figura 158. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E12.7T. Construcción propia	176
Figura 159. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E15T. Construcción propia	177
Figura 160. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E15T. Construcción propia	177
Figura 161. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E19T. Construcción propia	178
Figura 162. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E19T. Construcción propia	178
Figura 163. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E8T. Construcción propia	179
Figura 164. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E8T. Construcción propia	179
Figura 165. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E9T. Construcción propia	180

Figura 166. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E9T. Construcción propia	180
Figura 167. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E12.7T. Construcción propia	181
Figura 168. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E12.7T. Construcción propia	181
Figura 169. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E15T. Construcción propia	182
Figura 170. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E15T. Construcción propia	182
Figura 171. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E19T. Construcción propia	183
Figura 172. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E19T. Construcción propia	183
Figura 173. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E8T. Construcción propia	184
Figura 174. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E8T. Construcción propia	184
Figura 175. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E9T. Construcción propia	185
Figura 176. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E9T. Construcción propia	185
Figura 177. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E12.7T. Construcción propia	186
Figura 178. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E12.7T. Construcción propia	186
Figura 179. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E15T. Construcción propia	187
Figura 180. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E15T. Construcción propia	187

Figura 181. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E19T. Construcción propia.....	188
Figura 182. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E19T. Construcción propia.....	188
Figura 183. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E8T. Construcción propia.....	189
Figura 184. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E8T. Construcción propia.....	189
Figura 185. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E9T. Construcción propia.....	190
Figura 186. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E9T. Construcción propia.....	190
Figura 187. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E12.7T. Construcción propia.....	191
Figura 188. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E12.7T. Construcción propia.....	191
Figura 189. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E15T. Construcción propia.....	192
Figura 190. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E15T. Construcción propia.....	192
Figura 191. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E19T. Construcción propia.....	193
Figura 192. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E19T. Construcción propia.....	193
Figura 193. Superficie gráfica de disipación de energía según espesor y longitud de placa de continuidad. Construcción propia.....	194
Figura 194. Energía disipada a -0.04rad y 0.04rad para cada configuración de conexión. Construcción propia.....	195
Figura 195. Distribución de resistencia máxima obtenida por cada configuración de conexión. Construcción propia.....	196

Figura 196. Distribución de Momentos máximos normalizados respecto al M_p	197
Figura 197. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 180mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.	198
Figura 198. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 190mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.	198
Figura 199. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 200mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.	199
Figura 200. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 210mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.	199
Figura 201.. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 220mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.	200
Figura 202. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 8mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.	200
Figura 203. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 9mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.	201
Figura 204. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 12.7mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.	201
Figura 205. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 15mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.	202

Figura 206. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 19mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.	202
Figura 207. Rigidez rotacional inicial variando áreas. Construcción propia	203
Figura 208. Momentos máximos obtenidos variando áreas. Construcción propia.....	203
Figura 209. Rigidez rotacional inicial variando espesores. Construcción propia.....	204
Figura 210. Momentos máximos obtenidos variando espesores. Construcción propia.....	204

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Punto de aplicación de carga sobre la viga, rotula en el extremo del punto de apoyo del actuador	94
Imagen 2. Restricciones aplicadas en tanto en el ensayo experimental, como en el modelo	95
Imagen 3. Foto del montaje de una de las probetas en la máquina universal de ensayos. Imagen propia	98
Imagen 4. Montaje del ensayo para la viga HEA100. Imagen propia	99
Imagen 5. Montaje del ensayo para el perfil PTE. Imagen propia	100
Imagen 6. Montaje del ensayo para la conexión. Imagen propia	100
Imagen 7. Actuador hidráulico de 100kN de capacidad junto con el aplicador de carga a los tercios de la luz de la viga para simular ensayo a flexión pura. Imagen propia.....	109
Imagen 8. Actuador de 250kN dispuesto para ensayo de PTE. Imagen propia	110

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de R_y y R_t para aceros y concreto	54
Tabla 2. Materiales y propiedades para los elementos usados en los ensayos. Construcción propia	101
Tabla 3. Propiedades geométricas perfil HEA100. Construcción propia ..	101
Tabla 4. Propiedades geométricas perfil PTE 150X150X9. Construcción propia.....	101
Tabla 5. Determinación de fuerzas y deflexiones máximas esperadas en los límites elástico y UTS para el perfil HEA. Construcción propia.....	104
Tabla 6. Determinación de fuerzas y deflexiones máximas esperadas en los límites elástico y UTS para el perfil PTE. Construcción propia	104
Tabla 7. Resumen de las dimensiones obtenidas para el cordón de soldadura en diferentes uniones en el vínculo viga – columna – Construcción Propia.....	107
Tabla 8. Protocolo de carga para perfil HEA100. Construcción propia	112
Tabla 9. Protocolo de carga para perfil PTE. Construcción propia.....	113
Tabla 10.. Protocolo de carga para el ensayo de la conexión. Construcción propia.....	113
Tabla 11. Secuencia de carga para conexiones viga-columna resistentes a momento. Datos tomados de la NSR-10. Construcción propia.....	114
Tabla 12. Resultados de esfuerzos de fluencia F_y , F_u y E (módulo de elasticidad) obtenido a partir de ensayos de tensión – Construcción propia.....	118
Tabla 13. Resultado medio para los esfuerzos y módulos de elasticidad, obtenido de los ensayos experimentales. Construcción propia	118
Tabla 14. Comparativo entre valores de F_y y F_u obtenidos, vs teóricos por norma de fabricación – construcción propia	118
Tabla 15. Configuración de longitud y espesor de placa de continuidad de los modelos numéricos. Construcción propia.....	130
Tabla 16. Determinación de momentos de la viga. Construcción propia..	130

Tabla 17. Detalles de la configuración L180E8 para el modelo de la conexión. Construcción propia	131
Tabla 18. Detalles de la configuración L180E9. para el modelo de la conexión. Construcción propia	132
Tabla 19. Detalles de la configuración L180E12.7. para el modelo de la conexión. Construcción propia	133
Tabla 20. Detalles de la configuración L180E15. para el modelo de la conexión. Construcción propia	134
Tabla 21. Detalles de la configuración L180E19. para el modelo de la conexión. Construcción propia	135
Tabla 22. Detalles de la configuración L190E8. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	136
Tabla 23. Detalles de la configuración L190E9. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	137
Tabla 24. Detalles de la configuración L190E12.7. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	138
Tabla 25. Detalles de la configuración L190E15. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	139
Tabla 26. Detalles de la configuración L190E19. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	140
Tabla 27. Detalles de la configuración L200E8. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	141
Tabla 28. Detalles de la configuración L200E9. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	142
Tabla 29. Detalles de la configuración L200E12.7. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	143
Tabla 30. Detalles de la configuración L200E15. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	144
Tabla 31. Detalles de la configuración L200E19. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	145

Tabla 32. Detalles de la configuración L210E8. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	146
Tabla 33. Detalles de la configuración L210E9. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	147
Tabla 34. Detalles de la configuración L210E12.7. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	148
Tabla 35. Detalles de la configuración L210E15. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	149
Tabla 36. Detalles de la configuración L210E19. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	150
Tabla 37. Detalles de la configuración L220E8. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	151
Tabla 38. Detalles de la configuración L220E9. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	152
Tabla 39. Detalles de la configuración L220E12.7. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	153
Tabla 40. Detalles de la configuración L220E15. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	154
Tabla 41. Detalles de la configuración L220E19. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	155
Tabla 42. Áreas obtenidas al interior de las curvas de Momento – Rotación según la configuración. Construcción propia.	156
Tabla 43. Energía disipada a -0.04rad y 0.04rad para cada configuración de conexión. Construcción propia.	157
Tabla 44. Momentos máximos obtenidos para cada configuración. Unidades expresadas en MPa. Construcción propia.	158
Tabla 45. Valores de $M_{m\acute{a}x}$ normalizados respecto al M_p descrito en la Tabla 16.....	159
Tabla 46. Configuración de longitud y espesor de placa de continuidad de los modelos numéricos para F_y y F_u teóricos. Construcción propia.	168

Tabla 47. Detalles de la configuración L180E8T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	169
Tabla 48. Detalles de la configuración L180E9T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	170
Tabla 49. Detalles de la configuración L180E12.7T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	171
Tabla 50. Detalles de la configuración L180E15T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	172
Tabla 51. Detalles de la configuración L180E19T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	173
Tabla 52. Detalles de la configuración L190E8T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	174
Tabla 53. Detalles de la configuración L190E9T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	175
Tabla 54. Detalles de la configuración L190E12.7T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	176
Tabla 55. Detalles de la configuración L190E15T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	177
Tabla 56. Detalles de la configuración L190E19T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	178
Tabla 57. Detalles de la configuración L200E8T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	179
Tabla 58. Detalles de la configuración L200E9T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	180
Tabla 59. Detalles de la configuración L200E12.7T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	181
Tabla 60. Detalles de la configuración L200E15T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	182
Tabla 61. Detalles de la configuración L200E19T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	183

Tabla 62. Detalles de la configuración L210E8T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	184
Tabla 63. Detalles de la configuración L210E9T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	185
Tabla 64. Detalles de la configuración L210E12.7T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	186
Tabla 65. Detalles de la configuración L210E15T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	187
Tabla 66. Detalles de la configuración L210E19T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	188
Tabla 67. Detalles de la configuración L220E8T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	189
Tabla 68. Detalles de la configuración L220E9T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	190
Tabla 69. Detalles de la configuración L220E12.7T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	191
Tabla 70. Detalles de la configuración L220E15T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	192
Tabla 71. Detalles de la configuración L220E19T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.	193
Tabla 72. Áreas obtenidas al interior de las curvas de Momento – Rotación según la configuración. Construcción propia.	194
Tabla 73. Energía disipada a -0.04rad y 0.04rad para cada configuración de conexión. Construcción propia.	195
Tabla 74. Momentos máximos obtenidos para cada configuración. Unidades expresadas en MPa. Construcción propia.	196
Tabla 75. Valores de $M_{m\acute{a}x}$ normalizados respecto al M_p descrito en la Tabla 16.....	197

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Determinación de la elongación	44
Ecuación 2 – Relación de momentos columna - viga.....	46
Ecuación 3 – Momento en la intersección del eje de la viga y el de la columna determinada por la suma de los momentos plásticos nominales proyectados de la columna	46
Ecuación 4 - Momento en la intersección de los ejes centrales de la viga y la columna determinado por la proyección de los máximos momentos desarrollados en la viga	46
Ecuación 5 – Ecuación de movimiento	76
Ecuación 6. Momento de plastificación de una viga sometida a flexión simple	103
Ecuación 7. Momento de plastificación de una viga sometida a flexión pura	103
Ecuación 8. Esfuerzo de plastificación teórico de una viga.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Término
PRM	Pórtico Resistente a Momentos
HSS	Hollow Structural Sections
PTE	Perfil Tubular Estructural
DMI	Capacidad de disipación de energía mínima
DMO	Capacidad de disipación de energía moderada
DES	Capacidad de disipación de energía especial
LEF	Longitud de Elemento Finito
SRS	Sistema de Resistencia Sísmico
NSR-10	Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente

INTRODUCCIÓN

En países desarrollados, los eventos sísmicos, por lo general traen consigo una búsqueda del porqué ocurrieron ciertos daños en las estructuras expuestas; esto conlleva a una investigación exhaustiva desde la concepción del diseño, pasando por la construcción, hasta encontrar la causa que produjo el daño. En Estados Unidos especialmente, a partir de la ocurrencia del sismo de Northridge, se ha ido implementando la mejora en el comportamiento de las conexiones ante sollicitaciones dinámicas de origen sísmico. Es por ello que la AISC agrupa un gran número de investigaciones con el fin de producir documentos técnicos de referencia, los cuales gozan de amplia reputación y son de seguimiento por antonomasia.

No obstante, debido a que algunas de estas investigaciones son realizadas por entidades privadas, algunas conexiones están sujetas a derecho de autor y, por lo tanto, el uso de la patente en algunas conexiones genera cargos, tal y como se describirá más adelante.

El diseño de estructuras metálicas está muy restringido cuando de conexiones se trata, debido a que un enlace débil, puede ocasionar el colapso de una edificación; es por eso que esta investigación se vio orientada a la implementación de un tipo de conexión con un perfil tubular estructural como columna, unido a una viga a través de placas de continuidad con soldadura CPJ y que no está incluido en el manual *“Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, ANSI/AISC 358-10”* de la *American Institute of Steel Construction*, el cual, es el documento de referencia para establecer los requisitos obligatorios del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, en su título F. Lo anterior, con el objetivo de evaluar su comportamiento respecto a los requisitos de rotación establecidos en la NSR-10 y dejar abierta la posibilidad a futuros trabajos, en los cuales se pretenda la precalificación de este tipo de conexiones.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia del tamaño de las placas de continuidad en la respuesta estructural ante ciclos de histéresis en una conexión soldada entre una viga HEA100 de acero ASTM572 grado 50 y una columna PTE 150X150X9mm de acero A500 grado C, mediante un análisis por el método de los elementos finitos (MEF) en el rango inelástico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la influencia del espesor de las placas de continuidad en la respuesta momento-rotación de la conexión solicitada a cargas cíclicas mediante el modelamiento numérico MEF en el rango inelástico.
- Determinar la influencia del área de las placas de continuidad en la respuesta momento-rotación de la conexión solicitada a cargas cíclicas mediante el modelamiento numérico MEF en el rango inelástico.
- Validar los resultados del modelamiento numérico mediante la comparación con los resultados de ensayos físicos de la conexión con un espesor y área seleccionados.

JUSTIFICACIÓN

El estudio de los materiales y técnicas de construcción es un tema que está íntimamente ligado al desarrollo del conocimiento humano dada la necesidad de proponer nuevas alternativas que optimicen tanto los costos como los tiempos de construcción de todo tipo de obras civiles. A partir de esto, una gran variedad de investigadores se ha dado a la tarea de adelantar estudios en torno al desarrollo de nuevas alternativas de construcción que brinden soluciones eficientes a esta necesidad. Por lo tanto, es de vital importancia la investigación de materiales y/o sistemas estructurales innovadores capaces de generar reducción de costos y/o tiempos de ejecución, los cuales están entre los factores más importantes para tener en cuenta a la hora de llevar a cabo un proyecto de ingeniería cuando de optimización se trata.

El acero, por su parte, demanda gran importancia al ser uno de los materiales más usados en la construcción, y debido a que ocupa el 24% de los materiales utilizados en este campo (Salcedo et al., 2014) ha venido incrementando su importancia en las últimas décadas, no solo como refuerzo en el concreto sino como alternativa única de estructuras dadas las ventajas que ofrece por la rapidez en el montaje, buen desempeño y comportamiento estructural y en algunos casos disminución de costos con relación a otros sistemas constructivos (Clavijo , 2016).

Las secciones estructurales huecas, constituyen una porción significativa del mercado del acero, las cuales son típicamente implementadas en la construcción de miembros de columnas, elementos de refuerzo, acero estructural expuesto, soportes de revestimiento, secciones de tubo rellenas de hormigón, y miembros de viga (Fadden, 2013). Sin embargo, este tipo de perfiles ha sido subutilizado en algunas aplicaciones. Los perfiles tubulares estructurales “PTE” o Hollow Structural Sections “HSS” por sus siglas en inglés, representan aproximadamente el 30% del mercado del acero en Europa y Japón, donde es una práctica común el uso de columnas PTE con vigas de ala ancha en sistemas de pórticos resistentes a momentos. Sin embargo, en Estados Unidos su uso ha sido más limitado,

representando solo el 15% del mercado, lo cual ha reducido su beneficio potencial en aplicaciones de flexión cíclica (Fadden, 2013).

Las secciones huecas de acero cada vez son más usadas en aplicaciones estructurales, gracias a ventajas estáticas, estéticas y funcionales (D'aniello, Guneyisi, Landolfo, & Mermerdas, 2013). Tal aumento en la utilización de estos perfiles se puede atribuir a propiedades benéficas asociadas a los HSS, las cuales se pueden resumir en comportamiento altamente eficiente en lo que respecta a la resistencia a la compresión, torsión y flexión (Fadden & McCormick, 2012). Estas propiedades se generan en gran medida debido a la distribución de acero en el perímetro de la sección alrededor del eje centroidal, proporcionando una alta relación resistencia/peso (Packer, Wardenier, Zhao, Van der Vegte, & Kurobane, 2010). El peso reducido de estas secciones puede conducir a ahorros de costos, así como su alta rigidez torsional, la cual reduce la necesidad de arriostramiento lateral en miembros tipo viga (Fadden & McCormick, 2012). Respecto a las ventajas funcionales, se puede mencionar que las superficies planas de los PTE cuadrados o rectangulares, proporcionan un medio conveniente para fijar cubiertas, facilitar el almacenamiento y apilado, además de ser arquitectónicamente agradables. Tales ventajas las hacen susceptibles de ser implementadas en aplicaciones como columnas, elementos barra, elementos de refuerzo, revestimiento exterior y miembros en construcción modular (Fadden & McCormick, 2012).

Pueden mencionarse tres procesos diferentes para la producción de los PTE, conocidos como soldadura de placas o secciones de canal, laminado en caliente y formado en frío. Este último método es muy eficaz dado que el uso de placas delgadas para construir las secciones conduce a elementos de peso ligero que tienen una relación resistencia/peso elevada, reduciendo así tanto costos de transporte como de montaje (D'aniello, Guneyisi, Landolfo, & Mermerdas, 2013).

El comportamiento estructural eficiente a compresión, torsión y flexión de las secciones estructurales huecas, combinado con su alta relación resistencia/peso, brinda la oportunidad de continuar su uso en aplicaciones sísmicas y mejorar el rendimiento estructural. Sin embargo, una comprensión limitada de su

comportamiento bajo flexión cíclica ha dificultado el uso adicional de PTE en aplicaciones para sistemas de disipación de energía intermedia y especial de pórticos resistentes a momentos “PRM”, diferente a elementos de refuerzo cargados axialmente o como miembros de columnas en los que a menudo se rellenan de concreto (Fadden & McCormick, 2012)

Desde hace algunas décadas, en el país y en el mundo, ha ido en incremento la preocupación y concientización entorno al diseño y construcción de estructuras eficientes y ante todo seguras, motivado principalmente por la ocurrencia de desastres, los cuales ponen en evidencia fallas en cuanto a conceptos físicos del comportamiento de los materiales y su interacción, así como a procesos deficientes en la ingeniería. En este sentido, muchas situaciones de riesgo pueden ser ocasionadas por la falta de un análisis estructural más preciso y comprensión del comportamiento de los materiales, lo cual se podría reducir a través de modelados estructurales más detallados, los cuales incluyan la interacción entre todos los elementos estructurales y no estructurales, así como un modelado más realista de las conexiones (Del Savio, Nethercot, Vellasco, Andrade, & Martha, 2009).

Generalmente, por facilidad en los procesos de análisis y diseño estructural, las conexiones se asumen como si fuesen totalmente rígidas; sin embargo, es de conocimiento que no existe la rigidez total de la conexión, sino que por el contrario, todas estas conexiones poseen una rigidez finita, la cual se estudia a partir del análisis de la curva momento-rotación de la misma (Kartal, Basaga, Bayraktar, & Muvafik, 2010). Al considerar la rigidez finita en el análisis de las conexiones, se generan ciertas ventajas prácticas como lo son: economía tanto de los esfuerzos de diseño, como de los costos de fabricación, las vigas pueden ser más ligeras que en construcciones simples, se reduce la deflexión en la mitad del tramo de las vigas debido a la rigidez inherente de la conexión; además de proveer un comportamiento más realista y confiable de la estructura, entre otras.

Como es común, en muchos campos del conocimiento, las catástrofes motivan al progreso y desarrollo de la humanidad, especialmente en la ingeniería, pues a partir de la ocurrencia de los sismos como el de Northridge y Kobe,

particularmente en los Estados Unidos se generó un auge de investigación con el propósito de identificar cuáles fueron las fallas que ocasionaron el colapso de numerosas edificaciones, haciendo visible las falencias en el análisis y diseño de conexiones concebidas en esa época. De allí surgió la necesidad de estudiar un sinnúmero de conexiones, dentro de las cuales se seleccionaron aquellas que presentaron un comportamiento favorable para el comportamiento sísmico de pórticos en acero, específicamente en una mejora de los procedimientos de soldaduras y los diseños de conexiones. En consecuencia, se creó en EE.UU. el código AISC 358, con el fin de dar algunos lineamientos para prevenir y/o mitigar la afectación o el colapso de estructuras en acero ante eventos sísmicos, en el cual se incluyeron algunas conexiones de acero precalificadas, es decir que a través de numerosos ensayos arrojaron resultados positivos en cuanto al comportamiento estructural de la conexión ante eventos sísmicos; estos se han ido desarrollando hoy en día hasta su última actualización, el AISC 358-16. En esta se encuentra la descripción y los procesos de cálculo para algunas conexiones a momento para estructuras metálicas en sistemas DMO (capacidad de disipación de energía moderada) y DES (capacidad de disipación de energía especial). Entre las conexiones precalificadas, podemos encontrar: Reduced beam section (RBS), Bolted unstiffened extended end plate (BUEEP), Bolted stiffened extended end plate (BSEEP), Bolted Flange Plate (BFP), Welded Unreinforced Flange-Welded Web (WUF-W), Kaiser Bolted Bracket (KBB), ConXtech ConXL moment connection (ConXL), SidePlate moment connection (SidePlate), Simpson Strong-Tee Strong frame moment connection, Double-tee moment connection. Sin embargo, de acuerdo con las necesidades reales de las edificaciones, ha surgido la necesidad de conectar diferentes elementos, dentro de los cuales (dada la configuración del sistema) obliga a buscar otro tipo de conexiones no calificadas por el código AISC 358-16 (Andrade , 2015).

Por ejemplo, el AISC 358-16 considera un tipo de conexión compuesta, el cual se compone de una columna de sección hueca, rellena de concreto, una abrazadera y vigas en I, lo cual no puede considerarse como una implementación

de secciones netamente huecas, debido a que la inclusión de concreto en la sección, modifica algunas de sus propiedades a la vez que limita su uso de acuerdo a las especificaciones presentes en la norma, indicando que hace falta realizar más investigaciones para calificar y fomentar el uso de secciones tubulares.

Actualmente la investigación sobre el comportamiento de elementos PTE ha sido limitada, a pesar de ello, la mayoría de las especificaciones incluyen disposiciones para el diseño de miembros y conexiones en PTE. En el código AISC A-360-16 en su capítulo K se proporciona la guía de diseño de acero, en el cual se consideran las fuerzas concentradas en HSS, conexiones HSS-HSS y conexiones a momento HSS-HSS (Fadden & McCormick, 2012); información más limitada es obtenida en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente - NSR-10; no obstante, ninguno de estos documentos cubre el diseño bajo carga sísmica ni fatiga. Por otra parte, The International Committee for Research and Technical Support for Hollow Section Structures (CIDECT) también proporciona directrices para el diseño de estructuras tubulares, incluyendo el diseño de conexiones rectangulares de sección hueca bajo carga estática (Packer, Wardenier, Zhao, Van der Vegte, & Kurobane, 2010); sin embargo, el comportamiento de secciones estructurales huecas ante cargas cíclicas es limitado.

Para mencionar algunos estudios relevantes como por ejemplo Hudovernik, Kosel, Staupendhal, Tekkaya, & Kuzman, (2014), en el cual se realizó una investigación desde un enfoque analítico, experimental y numérico del comportamiento a flexión de perfiles de paredes delgadas hechos con aceros de alta resistencia respecto a un ángulo cambiante del plano de flexión. Chen & Ying, 2015 investigaron el comportamiento mecánico de secciones rectangulares huecas bajo cargas de compresión axial y se desarrollaron un análisis basado en el método de elementos finitos en el cual se evaluó el efecto de las diferentes geometrías en el comportamiento mecánico de las conexiones bajo compresión axial. Fadden & McCormick, 2012 realizaron un estudio del comportamiento de secciones estructurales huecas ante flexión pura y se determinaron valores límites para su uso hasta grandes niveles de rotaciones, las cuales se probaron bajo cargas de acción

cíclica, se realizó un análisis de las curvas momento rotación de las cuales se sugiere que los HSS pueden utilizarse en aplicaciones de flexión cíclica siempre que sus parámetros se seleccionen cuidadosamente para asegurar un comportamiento estable de las rótulas plásticas. Posterior a este estudio, Fadden, 2013 realizó una nueva investigación en la cual propone un programa analítico y experimental para caracterizar la habilidad de los PTE para soportar grandes deformaciones plásticas con menor degradación que la máxima capacidad a momento y realizó un estudio paramétrico en elementos finitos para comprender el comportamiento de diferentes parámetros o configuraciones de conexiones, su efecto en el comportamiento bajo cargas cíclicas y su aplicación en sistemas de pórticos a momento sísmico. En esta investigación se corroboró que las secciones estructurales huecas son capaces de sostener cargas sísmicas siempre que cumplan con los parámetros de limitación.

Otros investigadores se han dedicado a comprender el comportamiento rotacional de las conexiones como en estudios llevados por Kartal, Basaga, Bayraktar, & Muvafik, (2010) en el cual se muestra el efecto de considerar conexiones semirrígidas para obtener resultados más realistas en el comportamiento de las estructuras, mostrando las ventajas en términos de confiabilidad y economía; este estudio se desarrolló desde un programa en elementos finitos SEMIMEF, el cual permite definir conexiones semirrígidas en términos de rigidez rotacional de un resorte. Díaz, Victoria, Marti, & Querin, (2011) presentaron un modelo tridimensional en elementos finitos desarrollado en ANSYS para entender el comportamiento rotacional de conexiones de placa externa empernada, modelo el cual fue calibrado y validado con resultados experimentales de curvas momento rotación halladas en la literatura. Además, se muestra una breve explicación de cómo se obtiene la resistencia a momento de diseño, la rigidez rotacional inicial y un claro procedimiento para el modelamiento de estas.

Finalmente, dadas las características de los perfiles mencionados anteriormente, como son el buen comportamiento ante carga axial, torsión y flexión, los cuales han sido demostrados en anteriores investigaciones, se considera que

es prudente estudiar su implementación en estructuras de pórticos resistentes a momento en sistemas de disipación de energía intermedia y/o especial. De manera adicional, es necesario mencionar que las investigaciones acerca de secciones tubulares sometidas a cargas cíclicas y la interacción de los esfuerzos producidos por los elementos que hacen parte de conexiones fabricadas con este tipo de secciones, son muy limitadas. Este tipo de perfiles son susceptibles de investigación y análisis a través de la lectura del comportamiento estructural obtenido de la curva momento-rotación ante ensayos sometidos a cargas estáticas y cíclicas, con el fin de conocer su comportamiento histórico y el efecto de la acumulación de daño sobre las conexiones. Por tal razón, no debería pasarse por alto el potencial de dichas estructuras, con el fin de aprovechar su implementación en el diseño de estructuras metálicas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Diseño sismo-resistente

1.1.1 Antecedentes. Desde los años setenta, cuando se creó la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, “AIS”, esta entidad ha liderado promoción y evolución del diseño sismo resistente. A partir de la traducción y adopción de los requisitos del Structural Engineers Association of California, “SEAOC”, la AIS ha intentado evidenciar la necesidad de detallado de refuerzo más estrictos en lo que refiere a un mejor desempeño de las estructuras ante eventos sísmicos. Es así como, en el año 1981, se emitió la Norma AIS 100-81 la cual procedía de una adaptación más precisa al territorio colombiano del código ATC-3, documento que reunía el estado del arte en el área del diseño sismo resistente y emitido por una filial del SEAOC, esta norma fue de adopción voluntaria. (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010, pág. xiv).

No obstante, la ocurrencia del sismo de Popayán en 1983 evidenció la necesidad de ampliar la Norma AIS 100-81, la cual requería ampliar la cobertura a edificaciones de uno y dos pisos, ya que gran parte del daño que sufrió esta ciudad fue localizado en este tipo de construcciones. De igual manera, fue necesario cubrir las construcciones con mampostería estructural, debido a la gran acogida que tuvo tal sistema durante los últimos años de esa época. De allí se desprende la Norma AIS 100-83. (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010, págs. xiv-xv)

A partir de aquí, se pretende reunir las normas que había en la época, con el fin de unificarlas y emitir un solo documento que tuviera alcance nacional. Es por ello, que la Norma AIS 100-83, ICONTEC 2000 y el Código de Estructuras Metálicas de FEDESTRUCTURAS fueron actualizados y unificados; a partir de allí la Presidencia de la Republica publicó el documento a través del decreto 1400 de junio 7 de 1984, denominado Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes.

Posteriormente, desde los años 90, se requirió de una nueva actualización del código, motivada por nuevas técnicas y por una mayor rigurosidad en cuanto a componentes de los sistemas estructurales, debido a numerosos estudios originados por eventos sísmicos ocurridos recientemente en todo el mundo; de allí se desprende el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-98 emitido el 9 de enero de 1998 y el cual tuvo vigencia hasta el 19 de marzo de 2010, cuando fue publicado el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (en adelante NSR-10) a través del decreto 926. (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010, págs. xv-xx)

La NSR – 10, de adopción obligatoria y legalizada a través de la ley 400 del 1997, tiene el siguiente objetivo:

(...) establece[r] criterios y requisitos mínimos para el diseño, construcción y supervisión técnica de edificaciones nuevas, así como de aquellas indispensables para la recuperación de la comunidad con posterioridad a la ocurrencia de un sismo, que puedan verse sometidas a fuerzas sísmicas y otras fuerzas impuestas por la naturaleza o el uso, con el fin de que sean capaces de resistirlas, incrementar su resistencia a los efectos que estas producen, reducir a un mínimo el riesgo de la pérdida de vidas humanas, y defender en lo posible el patrimonio del Estado y los ciudadanos”. (Ley 400, 1997).

1.1.2 Filosofía del Diseño Sismorresistente. La sismo resistencia, es un atributo del cual se dota una estructura a través del uso de técnicas de diseño apropiadas y generalmente definidas en los códigos de construcción. Estos atributos pueden ser: geometría, alturas, resistencias, componentes estructurales básicos y especiales, distancias mínimas y máximas, entre otros. Cuando una estructura se diseña, se procura que esta sea simple y simétrica respecto de sus ejes, de tal manera que su respuesta sea homogénea ante sollicitaciones dinámicas de base.

La ley 400 del 19 de agosto de 1997 en el parágrafo del artículo 1 define:

Una edificación diseñada siguiendo los requisitos consagrados en las normas que regulan las construcciones sismorresistentes, debe ser capaz de resistir, además de las fuerzas que le impone su uso, temblores de poca intensidad sin daño, temblores moderados sin daño

estructural, pero posiblemente con algún daño en elementos no estructurales y un temblor fuerte con daños a elementos estructurales y no estructurales, pero sin colapso. (Ley 400, 1997)

Por otra parte, Rochel, (2012) aseveraba que los profesionales alrededor del mundo y específicamente aquellos que están relacionados con países en riesgo sísmico alto, estaban de acuerdo con los siguientes criterios de diseño:

- Las estructuras deben resistir en el rango lineal elástico todos aquellos sismos de intensidad reducida que ocurran durante su vida útil.
- Las estructuras deben resistir, sin daños significativos - aunque admitiendo que se podría comportar de manera no lineal -, todos aquellos sismos de intensidad moderada que ocurren durante su vida útil. Se permiten daños menores con algún fisuramiento a flexión en el hormigón y pequeñas incursiones de fluencia del acero de vigas y losas, o fallas en los elementos no estructurales cuya reparación económica sea rápida y factible.
- Las estructuras deben resistir, en el rango no lineal, un sismo severo que ocurra una sola vez durante su vida útil. Se admiten daños significativos en los elementos estructurales, aunque no el colapso de la estructura. El nivel permitido de daños depende de la importancia de edificación: si una edificación es vital para la supervivencia de la comunidad, como lo son los hospitales, centros de salud, plantas de energía, agua, teléfonos, etc., el nivel permitido de daños debe ser mínimo, para así garantizar su funcionamiento después de la ocurrencia de sismos destructivos.

Gallego & Sarria, (2015), indicaban que, para diseñar y construir cualquier estructura y que esta sea capaz de resistir eventos sísmicos, se hace necesario establecer, conocer y ubicar un número de variables controlables tales como la masa, la rigidez, la resistencia y la capacidad dúctil de los materiales, sin embargo, definen un quinto elemento, el cual es una variable incontrolable, la cual es el peligro sísmico. Cuando estas variables no son definidas apropiadamente, se puede conducir a sistemas débiles y vulnerables.

Una vez entendido el diseño sismorresistente, se incursiona así al diseño estructural, el cual básicamente lo describe Seguí, (2013) como “la selección de una sección transversal que resista de manera segura y económica a las cargas aplicadas”, esta economía fue definida como el menor peso posible por pie (refiriéndose a perfiles de acero), aunque por factores constructivos se sabe que no siempre se pueden lograr tales objetivos, siendo aquí, cuando los criterios de ingeniería entran en juego.

1.2 Ductilidad

Seguí, (2013) decía que la ductilidad puede ser definida como la capacidad que tiene un material de ser sometido a grandes deformaciones previo a la fractura. Esta ductilidad al desplazamiento puede ser medida a través de la elongación así:

$$e = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

Ecuación 1. Determinación de la elongación

Donde:

e = Elongación

L_f = Longitud del espécimen a fracturar

L_o = Longitud original

Otras definiciones, indican que la ductilidad se conoce como “la capacidad de sostener deformaciones en el rango inelástico sin la pérdida significativa de resistencia y de una capacidad de absorber energía por comportamiento histerético.” (Anónimo).

No obstante, Gallego & Sarria, (2015), consideraban importante destacar que, sobre los sistemas estructurales vistos desde la acción sísmica, la ductilidad podía designarse a través de dos tipos de demanda: la primera sobre la capacidad dúctil al desplazamiento μ_u , medida entre el cociente de la deformación última y la

de fluencia $\mu_u = x_u/x_y'$, y la segunda sobre la ductilidad a la curvatura, la cual se asocia directamente a la capacidad de rotación de un elemento estructural sometido a la acción de un momento flector.

1.3 Columna fuerte - Viga débil

El principio de diseño de las vigas va encaminado a soportar las fuerzas de gravedad a las que este elemento se expone en dicho piso, esto es, peso propio y cargas de servicio consideradas en las placas de entrepiso; las columnas, por su parte, se encargan de soportar el peso de todo un edificio sobre esas columnas; bajo esta premisa, se considera que la falla en una columna puede tener consecuencias más graves que la falla en una viga. Moehle, (2015) decía que cuando un edificio se balancea durante un sismo, la distribución de daño depende de la distribución de derivas de entrepiso; si el edificio tiene columnas débiles, la deriva tiende a concentrarse en uno o varios pisos débiles, pudiendo llegar a exceder la capacidad máxima de deriva de la columna (Figura 1a); por otra parte, si la columna es rígida y más fuerte que las vigas, la deriva se podrá distribuir más uniformemente a lo largo de la altura del edificio tal como se muestra en la (Figura 1c).

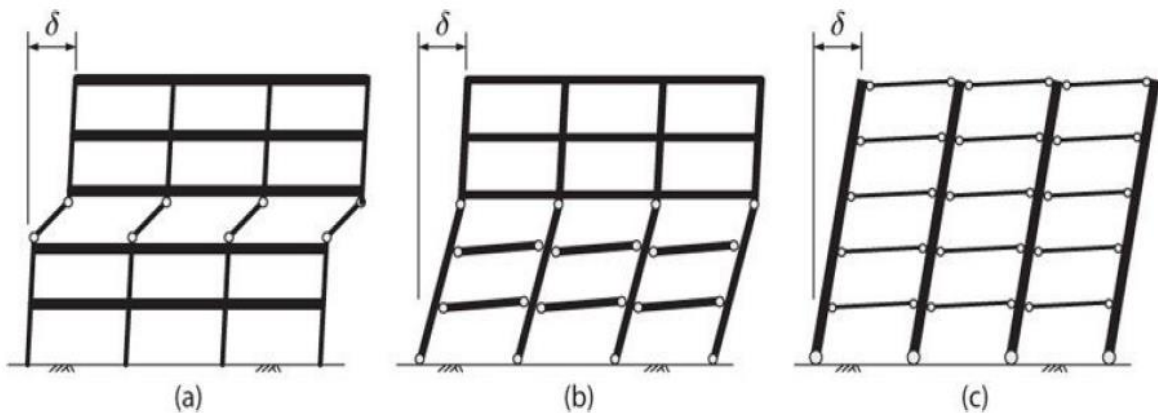


Figura 1. Mecanismos de fluencia en vigas: (a) Mecanismo de piso; (b) mecanismo intermedio; (c) mecanismo de viga – Tomado de (Moehle, 2015)

Por este motivo el ANSI/AISC 341-16 *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (en adelante AISC 341-16), al igual que la NSR-10 en su título F, especifican que se deben satisfacer las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} > 1$$

Ecuación 2 – Relación de momentos columna - viga

Donde:

M_{pc}^* = Momento en la intersección del eje de la viga y el de la columna, determinada por la suma de los momentos plásticos nominales proyectados de la columna, reducidos por el esfuerzo axial P_{uc}/A_g de la parte superior e inferior de la conexión a momento de la viga, N-mm.

M_{pb}^* = Momento en la intersección de los ejes centrales de la viga y la columna determinado por la proyección de los máximos momentos desarrollados en la viga, medidos en la cara de la columna, N-mm.

Al satisfacer esta ecuación, se está garantizando que la sumatoria de los momentos desarrollados en el nudo y provenientes de la viga, deben ser menores que aquellos momentos plásticos nominales provenientes de la columna, lo que conduce a que necesariamente la columna tenga una consideración de diseño más demandante que la viga. La sumatoria de los momentos en columna y viga se calculan de acuerdo con las Ecuación 3 y Ecuación 4 respectivamente.

$$\sum M_{pc}^* = \sum Z_c \left(F_{yc} - \frac{P_{uc}}{A_g} \right)$$

Ecuación 3 – Momento en la intersección del eje de la viga y el de la columna determinada por la suma de los momentos plásticos nominales proyectados de la columna

$$\sum M_{pb}^* = \sum 1.1 * R_y F_{yb} Z_b + M_{uv}$$

Ecuación 4 - Momento en la intersección de los ejes centrales de la viga y la columna determinado por la proyección de los máximos momentos desarrollados en la viga

Donde:

A_g = Área bruta de la sección, mm²

F_{yc} = Esfuerzo de fluencia mínimo especificado de la columna, MPa

F_{yb} = Esfuerzo de fluencia mínimo especificado de la viga, MPa

M_{UV} = Momento adicional en el eje de la columna debido a la amplificación por el cortante desde la rótula plástica hasta el eje de la columna, N-mm

P_{UC} = Resistencia a la compresión requerida (valor absoluto), N

Z_b = Módulo de sección plástico de la viga, mm³

Z_c = Módulo de sección plástico de la columna, mm³

R_y = Relación entre la resistencia a la fluencia esperada F_{ye} y la resistencia mínima especificada a la fluencia del tipo de acero que se va a utilizar F_y .

1.4 Diseño sísmico de conexiones

Crisafulli, (2014) indicaba que “el acero (...) se caracteriza por una elevada resistencia, rigidez y ductilidad (esto es capacidad de soportar deformaciones plásticas sin disminuir su capacidad resistente), por lo cual su uso es muy recomendable para construcciones sismo resistentes.” Como se mencionó anteriormente, es deseable que el mecanismo de falla se genere en las vigas mas no en las columnas, por lo tanto, se desea ductilidad al desplazamiento en estos elementos. Sin embargo, en las conexiones, la ductilidad no es deseable ya que esto puede conducir a fallas locales y progresivamente al colapso de la edificación, es decir, la conexión no se debe plastificar.

Las conexiones son quizá el punto más importante de una estructura, una inadecuada interpretación de sus variables puede conducir a un diseño erróneo y, por ende, crear enlaces débiles en las estructuras.

El diseño con especificaciones sísmicas en los códigos de construcción, ha sido desarrollado considerando la energía de disipación generada durante la respuesta inelástica. Por otra parte, el diseño de la conexión a través de estos códigos induce a que la conexión sea diseñada considerando la máxima carga que pueden resistir los miembros conectados. Para garantizar la no plastificación de la conexión y además que esta sea diseñada para la máxima carga que pueden resistir

los elementos conectados, se debe cuantificar la sobrerresistencia del acero, es decir, deben realizarse ensayos a probetas de acero y establecer con cierta confiabilidad la resistencia a la tracción F_y y última F_u . El índice que pondera la resistencia real o esperada de los componentes estructurales (elementos de acero), respecto a su resistencia nominal mínima especificada a la fluencia, se define como el factor R_y . De igual manera, para la fractura del acero, se establece con el factor R_t , el cual es una relación entre la resistencia a tracción esperada y la resistencia F_u . En la tabla A3.1 del AISC 341-16 se definen los rangos dentro de los cuales se puede encontrar el factor R_y el cual oscila entre 1.1 y 1.6 y el factor R_u el cual oscila entre 1.1 y 1.3.

1.5 Sismo de Northridge y efecto en las conexiones

El sismo de Northridge ocurrió el 17 de enero de 1994 en el Valle de San Fernando en la ciudad de Los Ángeles en California. Su magnitud fue de 6.4 y su magnitud de onda superficial M_s fue de 6.8. Como resultado, se produjo la muerte de 72 personas, alrededor de US\$25.000MM, colapso de edificaciones de apartamentos, centros hospitalarios, estacionamientos, entre otros. Miranda, (2001) decía que desde el punto de vista estructural no hubo sorpresa referente a edificaciones antiguas, en las cuales el detallado estructural y el diseño carecía de consideraciones sismorresistentes, sin embargo, aquellas edificaciones nuevas que se suponía debían resistir el embate de un sismo moderado como este, no lo hicieron. Si bien la mayor parte de las edificaciones que habían sufrido colapso y mayores daños aparentemente fueron aquellas construidas en concreto, la realidad a futuro evidenció algo diferente para las estructuras construidas en acero. La detección en los daños de las estructuras de acero fue complicada, ya que normalmente los perfiles y conexiones están recubiertos con acabados

arquitectónicos; aun así, retirando estos elementos, aún quedaba por retirar la protección contra incendios.

Varios daños fueron encontrados en las estructuras de acero, dentro de los cuales se pueden listar a continuación los principales, los cuales fueron descritos por Miranda, (2001):

- Daños en arriostradores: el daño en estos elementos se debió a dos razones, a) las placas de conexión sufrieron de pandeo local, lo cual provocó que el arriostrador se saliera de su plano (Figura 2), y b) pandeo de los arriostradores en su plano, los cuales había sido fabricados con perfiles tubulares de sección cuadrada, los cuales tienen un buen comportamiento en el rango elástico, sin embargo, en el rango inelástico al iniciar su comportamiento por pandeo, resultan ciclos histeréticos no simétricos y con baja capacidad de disipación de energía (Ver Figura 3 y Figura 4). La combinación de estos dos comportamientos puede provocar redistribución de fuerzas y, por ende, falla en las conexiones.

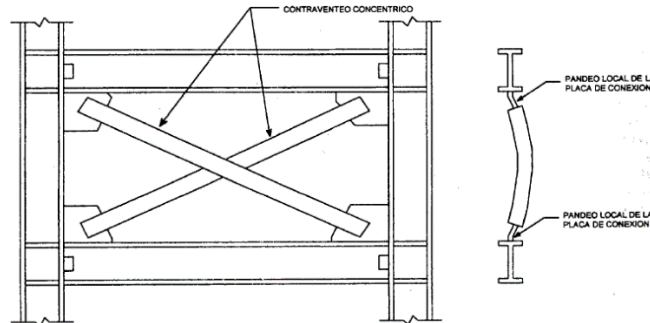


Figura 2. Pandeo fuera del plano de arriostradores concéntricos – Tomado de (Miranda, 2001)

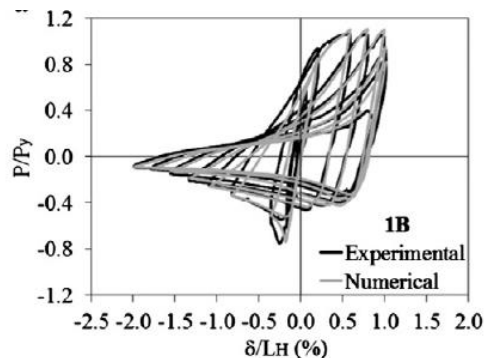


Figura 3. Ciclo de histéresis de uno de los ensayos realizados a un perfil tubular de un arriostrador concéntrico ante cargas sísmicas. (Tomado de Haddad, 2014)

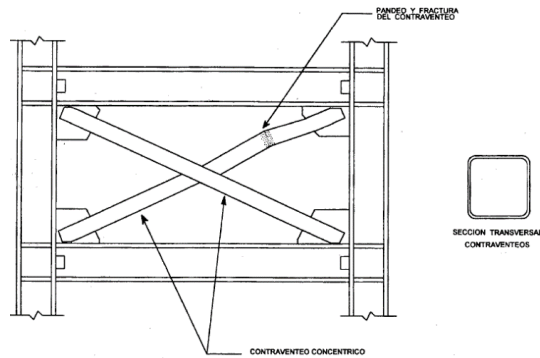


Figura 4. Pandeo y fractura de arriostradores hechos a base de perfiles tubulares de sección cuadrada – Tomado de (Miranda, 2001)

- Daño en placas base: el daño más recurrente e importante ocurrido en las estructuras de acero sucedió en las conexiones, el cual fue causado por fracturas frágiles en la soldadura o en el metal base más próximo a esta. Se reportó gran cantidad de daños en la base de la conexión cimentación-columna, la cual inició como una falla frágil en la soldadura de la unión, se propagó hasta el borde del patín de la columna y continuó hasta el borde de la placa base (Figura 5).

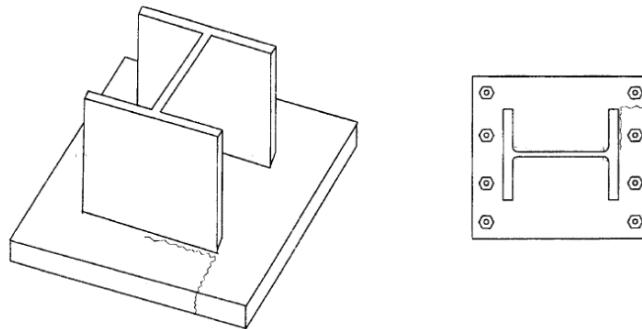


Figura 5. Fractura en la conexión de columnas con placas base. Tomado de (Miranda, 2001)

- Daño en conexiones viga-columna: este se caracterizó por la ocurrencia de un mecanismo de fractura frágil ocurrido en la raíz de la soldadura del patín inferior de la viga, esta soldadura fue realizada con *Complete Joint Penetration* “CPJ”.

En algunos casos la fractura de la soldadura llegó a separar los elementos conectados, en otros casos, la fractura se propagó por la columna, hasta dividir el patín y parte del alma de la misma (Figura 6 y Figura 7).



Figura 6. Propagación de la fractura del patín de la columna hacia el alma de la misma. Tomado de http://degenkolb.com/practice_areas/seismic_ordinances/pre_northridge_steel_moment_frame_buildings/

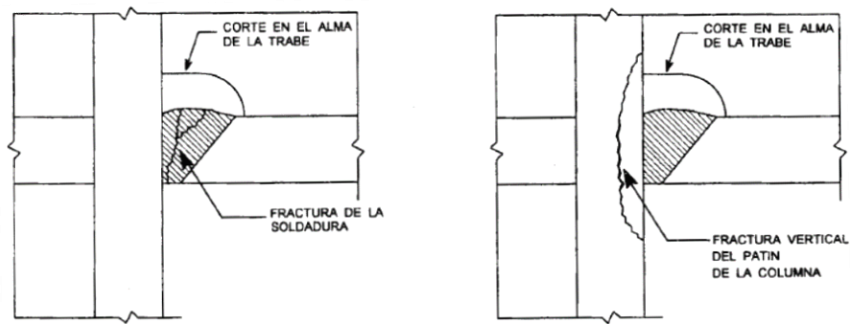


Figura 7. Fractura en la soldadura y fractura en el patín de la columna. Tomado de (Miranda, 2001)

La placa de cortante, como comúnmente fue empleada en California (Figura 8), en algunos casos reportados se determinó también que sufrió fracturas (Figura 9)

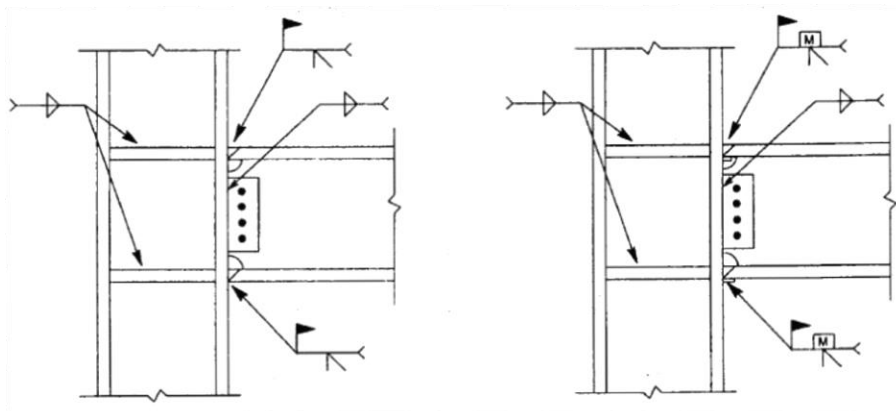


Figura 8. Detalles de conexión a momento comúnmente empleados en California. Tomado de (Miranda, 2001)

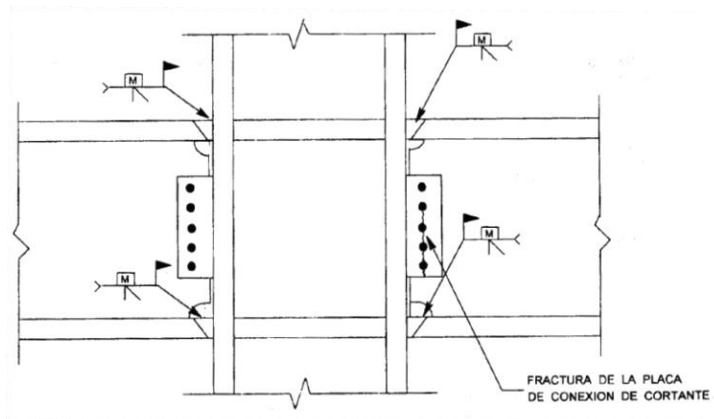


Figura 9. Fractura de placa de conexión de cortante. Tomado de (Miranda, 2001)

Se puede aseverar que, a causa del sismo de Northridge, la ingeniería estructural y el estudio de los materiales ha tenido un giro significativo. Como resultado de tales esfuerzos, importantes modificaciones y consideraciones han sido tenidas en cuenta para el diseño sísmico de estructuras de acero, principalmente en Estados Unidos y replicada a través de los códigos de construcción en otras partes del mundo. De allí podemos extraer manuales de diseño y construcción tales como el FEMA 350 al 355, el AISC 341-16, cuya primera versión se gestó en el año 2005, el *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications ANSI/AISC 358-16* (en adelante AISC 358-16) también publicado para el año 2005, cuyo principal objetivo, además de la preservación de la vida, es considerar aspectos antes ignorados en los procesos de diseño y construcción, evitando así que las estructuras sufran daños más grandes que los esperados, según la magnitud del sismo a la que hayan sido expuestos.

1.6 Conexiones resistentes a momentos

En una conexión resistente a momentos, una viga debe transmitir a la columna el giro a la que es sometida a través de las aletas inferior y superior

formando un par. Las conexiones a cortante (ver Figura 10), es decir, aquellas que pueden transmitir fuerzas cortantes, no son capaces de transmitir momento debido a que no cumplen con aquella condición de enlace entre las aletas de la viga y la columna; solo basta una pequeña rotación para que una conexión no sea considerada como resistente a momentos. De otra manera, si a la misma conexión observada en la figura 9 le fueran soldadas sus aletas a la columna, ésta ya sería capaz de transmitir momento (ver Figura 11) a través de sus aletas, mientras el cortante le es transmitido a través del alma de la viga.

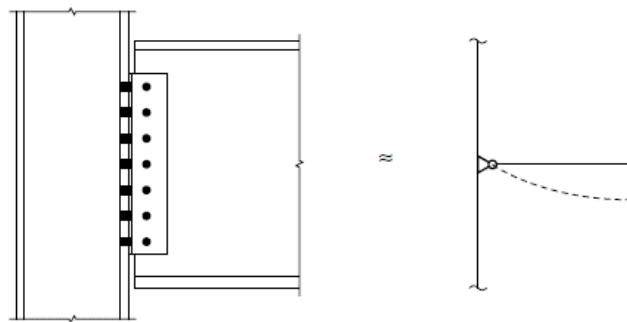


Figura 10. Conexión a cortante – Tomado de (Segui, 2013)

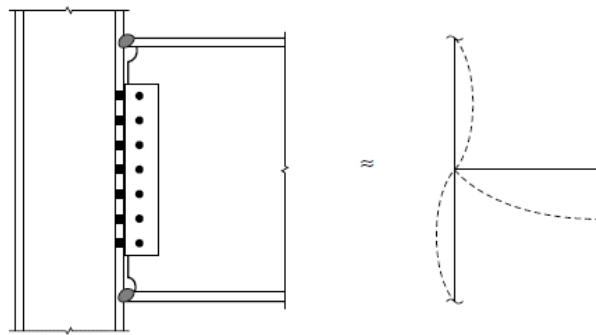


Figura 11. Conexión capaz de transmitir cortante y momento – Tomado de (Segui, 2013)

Las conexiones a momento son clasificadas como completamente restringidas, parcialmente restringidas o conexión simple a cortante (ver Figura 12); basta con medir el grado de rotación entre los miembros conectados para ser clasificada.

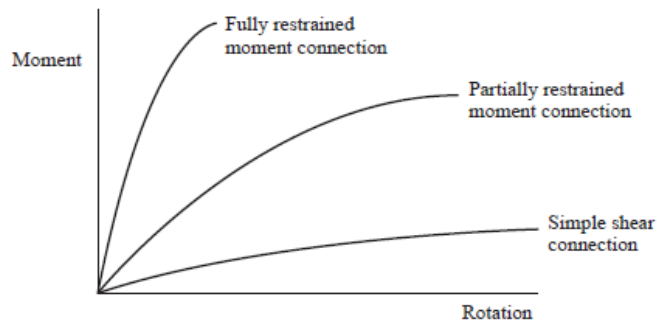


Figura 12. Curva momento rotación para tres conexiones con diferente grado de rotación relativo entre elementos conectados. Tomado de (Segui, 2013)

En cuanto a su capacidad de carga, Andrade, (2015) indicaba que la filosofía común adoptada a partir de las investigaciones de SAC-FEMA ha sido la de diseñar la conexión para que permanezca nominalmente elástica en la cara de la columna, forzando a que la deformación inelástica aparezca en la viga. Esto indica que se debe tener en cuenta la resistencia esperada del material como criterio fundamental para el diseño de conexiones, la cual se describe en la NSR-10 de acuerdo con la Tabla 1:

Aplicación	R_y	R_t
Secciones laminadas en caliente en barras:		
• ASTM A36/A36M	1.5	1.2
• ASTM A1043/A1043M Grado 36	1.3	1.1
• ASTM A572/572M Grado 50 o 55,	1.1	1.1
• ASTM A913/A913M Grado 50, 60 o 65	1.1	1.1
• ASTM A588/A588M,	1.1	1.1
ASTM A992/A992M, A1011 HSLAS Grado 55	1.1	1.1
• ASTM A1043/A1043M Grado 50	1.2	1.1
• ASTM A529 Grado 50	1.2	1.2
• ASTM A529 Grado 55	1.1	1.2
Perfiles tubulares estructurales (PTE):		
• ASTM A500 (Grado B o C), ASTM A 501	1.4	1.3
Tubería de acero:		
• ASTM A53/A53M	1.6	1.2
Placas y láminas:		
• ASTM A36/A36M	1.3	1.2
• ASTM A1043/A1043M Grado 36	1.3	1.1
• ASTM 1011 HSLA Grado 50	1.1	1.1
• ASTM A572/A572M Grado 42	1.3	1.0
• ASTM A572/A572M Grado 50 o 55,	1.1	1.2
• ASTM A588/A588M	1.1	1.2
Acero de refuerzo:		
• ASTM A615, A706	1.25	1.25
Concreto:		
• Concreto estructural	Ver ASCE/SEI 41-06	Ver ASCE/SEI 41-06

Tabla 1. Valores de R_y y R_t para aceros y concreto

1.7 Capacidad de deformación

Andrade, (2015) indicaba que para determinar la rigidez de los pórticos resistentes a momentos es necesario recurrir a las definiciones y limitaciones pertinentes a cada caso, bien sea (DMI, DMO o DES), la cual depende de la capacidad rotacional de las conexiones y de los elementos estructurales vecinos. La rotación inelástica de las conexiones está gobernada principalmente por la aparición de rotulas plásticas en la viga o en la columna, por la fluencia a cortante de la zona de panel o por la combinación de estos efectos. La deriva de piso es el factor determinante para clasificar el pórtico acorde a su capacidad de disipación de energía, la cual está muy relacionada con la rotación total de la conexión. Las deformaciones están compuestas por deformaciones elásticas y deformaciones plásticas o permanentes de los miembros del pórtico, las cuales se tienen en cuenta para determinar la rotación plástica total de la conexión, y el diseño de las conexiones se realiza de tal modo que las rotaciones inelásticas de la conexión sean limitadas o nulas. Los tres tipos de pórticos sismo resistente desarrollan tres niveles diferentes de capacidad de rotación inelástica.

El *American Institute of Steel Construction*, (2016) exige para los PRM en DES, que estos deberán desarrollar una rotación inelástica de al menos 0.03 rad, mientras para DMO exige por lo menos 0.02 rad; para DMI, 0.01 rad. Estos mínimos exigidos, garantizan comportamientos adecuados en la conexión durante demanda sísmica, así como constituyen la base de diseño de conexiones en estructura metálica.

Dylan, (2008) describía los requisitos esenciales de pórticos resistentes a momentos, según su grado de disipación de energía así:

- Disipación de energía especial DES: Para este sistema se espera que ocurran deformaciones inelásticas significativas en sus miembros y conexiones como resultado de fuerzas laterales. Requieren el uso de conexiones precalificadas

por el AISC o en su defecto conexiones que hayan sido aprobadas luego de ser sometidas a ensayos cíclicos. Por lo anterior, el American Institute of Steel Construction, (2016) exige mantener un ángulo de deriva entre pisos de hasta 0,04 radianes y es utilizado normalmente en zonas de riesgo sísmico medio y alto.

- Disipación de energía moderada DMO: Se espera que resistan deformaciones inelásticas moderadas en sus miembros y conexiones como resultado de fuerzas laterales. Requieren el uso de conexiones precalificadas por el AISC o en su defecto conexiones que hayan sido aprobadas luego de ser sometidas a ensayos cíclicos. Por lo anterior, el American Institute of Steel Construction, (2016) exige mantener un ángulo de deriva entre pisos de hasta 0,02 radianes, lo cual es utilizado normalmente en zonas de riesgo sísmico bajo y medio.

- Disipación de energía mínima DMI: Se espera que resistan moderadas deformaciones inelásticas en sus miembros y conexiones como resultado de fuerzas laterales. Normalmente se utilizan en zonas de riesgo sísmico bajo o nulo.

1.8 Comportamiento de conexiones soldadas

McCormac & Csernak, (2012) sostenían que la soldadura es un proceso práctico que ha sido usado desde hace miles de años en el cual se unen partes metálicas por medio del uso del calentamiento de sus superficies a un estado plástico o fluido, permitiendo así que sus partes fluyan y se unan, con o sin la adición de otro metal fluido. Desde su creación y pese a que ha sido usada desde mucho tiempo atrás, se tuvo desventajas acerca del uso de este proceso debido a que se pensaba que la soldadura tenía muy poca resistencia a la fatiga en comparación con las conexiones atornilladas o remachadas, también que era muy costosa. El

proceso de la soldadura a través de los años ha ganado terreno y hoy en día la podemos encontrar en la gran mayoría de los procesos que involucren metales. En la soldadura podemos encontrar diversas ventajas descritas a continuación:

- En el aspecto económico, se considera que se puede ahorrar algún dinero, dado que al usar soldadura, se requieren menos elementos que en otro tipo de conexiones, es decir, no se necesitan materiales como pernos, arandelas, tuercas, placas adicionales, etc.

- La soldadura tiene un área de aplicación mucho mayor que los remaches o los tornillos y es que incluso virtualmente se pueden apreciar menos dificultades en su uso que en otro tipo de conexiones, donde el acceso a todas sus partes es una gran limitante.

- Un aspecto muy relevante respecto a su comportamiento es que las estructuras soldadas son más rígidas, debido a que los miembros generalmente están soldados uno a uno, mientras que las conexiones que se realizan con ángulos de conexión o placas se deforman más debido a la transferencia de carga haciendo más flexible la estructura completa.

- El proceso de fusionar hace que la estructura tenga una mejor continuidad, comportándose como una sola pieza, y dado que las juntas de soldadura son tan fuertes o más que el metal base, no deberían existir limitaciones para su uso en conexiones soldadas.

- Otro detalle importante es la ventaja en su uso, dado que el proceso de soldar es muy silencioso y no es molesto para los demás.

- Se usan menos piezas, por lo tanto, se ahorra tiempo en detalles, fabricación y montaje de la obra.

1.9 Requisitos del NSR-10 para PRM-DMO y PRM-DES

La base de diseño para PRM-DMO y DES, se estable como:

1.9.1 Pórticos resistentes a momentos con capacidad de disipación de energía moderada - PRM-DMO

(...) deben ser capaces de desarrollar una capacidad de deformación inelástica limitada a partir de la fluencia por flexión de las vigas y columnas y fluencia por cortante de la zona de panel y sus placas de continuidad, deben basarse en ensayos que garanticen el desempeño requerido y demostrar su conformidad (...). (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010, págs. F-236)

Según su rotación:

“Las conexiones viga-columna del SRS deben satisfacer los siguientes requisitos:

- (1) La conexión debe ser capaz de acomodar el ángulo de deriva de piso de 0.02 radianes como mínimo.
- (2) La resistencia medida a la flexión de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser por lo menos **0.8Mp** de la viga conectada a un ángulo de deriva de piso de 0.02 radianes." (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010, págs. F-238)

1.9.2 Pórticos resistentes a momentos con capacidad de disipación de energía especial - PRM-DES

(...) deben ser capaces de desarrollar una capacidad de deformación inelástica significativa a partir de la fluencia por flexión de las vigas y una fluencia limitada por cortante de la zona de panel. Excepto que se permita otra cosa en esta sección, Las columnas deben diseñarse para ser más fuertes que las vigas en fluencia completa y con endurecimiento por deformación. Se permite la fluencia por flexión de las columnas en la base. El diseño de conexiones viga-columna, incluyendo la zona de panel y sus placas de continuidad, debe basarse en ensayos que garanticen el desempeño requerido y demostrar su conformidad (...). (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)

Según su rotación:

“Las conexiones viga-columna del SRS deben satisfacer los siguientes requisitos:

- (1) La conexión debe ser capaz de acomodar el ángulo de deriva de piso de 0.04 radianes como mínimo.
- (2) La resistencia medida a la flexión de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser por lo menos **0.8Mp** de la viga conectada a un ángulo de deriva de piso de 0.04 radianes." (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010, págs. F-242)

1.10 Esfuerzos

Una de las definiciones más aplicadas en el campo de la ingeniería es la ecuación del esfuerzo, la cual puede escribirse del siguiente modo: $\sigma = \frac{P}{A}$, donde el esfuerzo se define como la fuerza por unidad de área, o intensidad de fuerzas distribuidas sobre una sección dada, (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2015).

Sin embargo, esta ecuación es una simplificación de primer orden sobre la topografía de la superficie y es muy útil para estudiar elementos que se caractericen por ser uniformes respecto a sus características superficiales. Además, es una teoría que se puede aplicar sobre áreas pequeñas y que ignora los efectos locales del material. Dada la necesidad de determinar la respuesta a una fuerza aplicada sobre superficies de topografías más complejas, se requiere entonces una definición más refinada del esfuerzo, por lo tanto, se puede expresar el esfuerzo como:

$$S = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} = \frac{dF_n}{dA} \quad ; \quad S_s = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_t}{\Delta A} = \frac{dF_t}{dA}$$

Donde dF_n y dF_t , son las fuerzas infinitesimales normal y tangencial, respectivamente, que actúan sobre un área infinitesimal dA ; S y S_s son los esfuerzos producidos por las fuerzas dF_n y dF_t respectivamente y son conocidas comúnmente como σ para denotar esfuerzo normal y τ para esfuerzo cortante. Estas ecuaciones tienen carácter local y permiten conocer el comportamiento y la respuesta de los materiales de una forma más detallada.

Siguiendo lo anterior, se puede representar el estado de esfuerzos de un elemento mediante la aplicación de esfuerzos normales y esfuerzos tangenciales, los cuales a su vez se pueden separar en dos componentes, el primero de esfuerzos hidrostáticos (esfuerzos normales), los cuales generan cambio de volumen, y otra componente de esfuerzos desviadores (esfuerzos tangenciales), los cuales generan una distorsión angular o deformación.

Para poder realizar un buen diseño resulta en algunos casos necesario conocer un poco acerca de las teorías de falla o criterios de fluencia de los materiales, los cuales brindan valiosa información acerca de la respuesta estructural de elementos bajo ciertas condiciones de carga. A partir de los criterios de fluencia se estudia el estado crítico en el que los elementos sobrepasan el esfuerzo de fluencia de diseño.

Algunas de las teorías de falla más conocidas son las siguientes:

- Criterio de máxima distorsión de energía (Von-Mises)
- Criterio de máximo esfuerzo cortante (Hexágono de Tresca)
- Criterio de Mohr Coulomb

Las cuales se basan en la formulación de ciertas geometrías para definir la superficie de fluencia del material.

Para el estudio del comportamiento del acero es muy común encontrar el uso del criterio de Von-Mises, el cual se basa en la formulación de la superficie de fluencia como una elipse. Este criterio consiste en la determinación de la distorsión de energía en un material dado. Esta energía de deformación es el aumento de la energía acumulada en el interior de un sólido como resultado del trabajo realizado por las fuerzas que provocan la deformación (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2015).

El valor de la energía de distorsión puede calcularse a partir de los esfuerzos principales planos como se muestra a continuación:

$$u_d = \frac{1}{6G} (\sigma_a^2 - \sigma_a \sigma_b + \sigma_b^2)$$

Donde σ_a y σ_b son los esfuerzos principales y G es el módulo de rigidez.

El criterio de máxima distorsión de energía indica que el componente estructural estará a salvo del estado de fluencia siempre que $u_d < (u_d)_Y$, o se cumpla la siguiente ecuación:

$$\sigma_a^2 - \sigma_a\sigma_b + \sigma_b^2 < \sigma_Y^2 \quad , \quad \text{donde} \quad (\sigma_a)_Y = \frac{\sigma_Y^2}{6G}$$

Esta ecuación representa la región acotada dentro de una elipse en el espacio de los esfuerzos definido por los esfuerzos principales en la cual se debe encontrar nuestro elemento dadas las coordenadas σ_a y σ_b para que el mismo no empiece a fluir. (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2015)

$$\sigma_a^2 - \sigma_a\sigma_b + \sigma_b^2 = \sigma_Y^2 \quad , \quad \text{Ecuación de la elipse}$$

O para el caso en 3 dimensiones el esfuerzo equivalente de Von-Mises es:

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

Cuando el esfuerzo equivalente o esfuerzo Von-Mises exceda la resistencia uniaxial a fluencia del material, éste fluirá. (Andrade , 2015).

2. DISEÑO DE CONEXIONES

El diseño de conexiones es un factor determinante en cualquier estructura, sin distinción del material. En estructuras de acero estructural el ANSI/AISC 358-16, código en el cual se especifican criterios de diseño, detalles, fabricación y control de calidad para las conexiones que están precalificadas de acuerdo con las disposiciones sísmicas del AISC, considera nueve (9) tipos de conexiones descritas a continuación:

2.1 Conexiones precalificadas según el ANSI/AISC 358 – 2016

2.1.1 Reduced Beam Section (RBS) Moment Connection. Este tipo de conexión se caracteriza por tener porciones de las aletas de la viga recortes selectivos cerca del vínculo viga-columna. La fluencia del material y la formación de la rótula ocurre principalmente dentro de la sección reducida de la viga, ver Figura 13. (American Institute of Steel Construction, 2016)

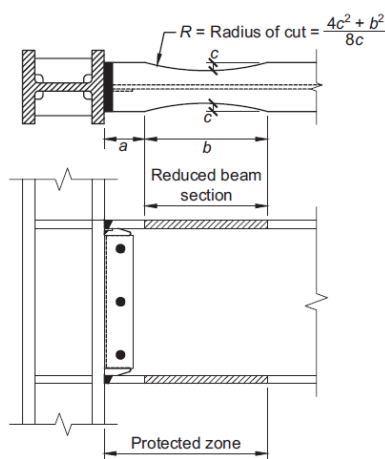


Figura 13 – Conexión con viga de sección reducida. – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16

2.1.2 Bolted Unstiffened and Stiffened Extended End-Plate Moment Connections. Esta conexión está hecha a partir de soldar la viga a la placa y posteriormente pernar la placa a la aleta de la columna (American Institute of Steel Construction, 2016). Existen tres tipos de configuraciones aprobadas por el AISC como se muestra a continuación en la Figura 14:

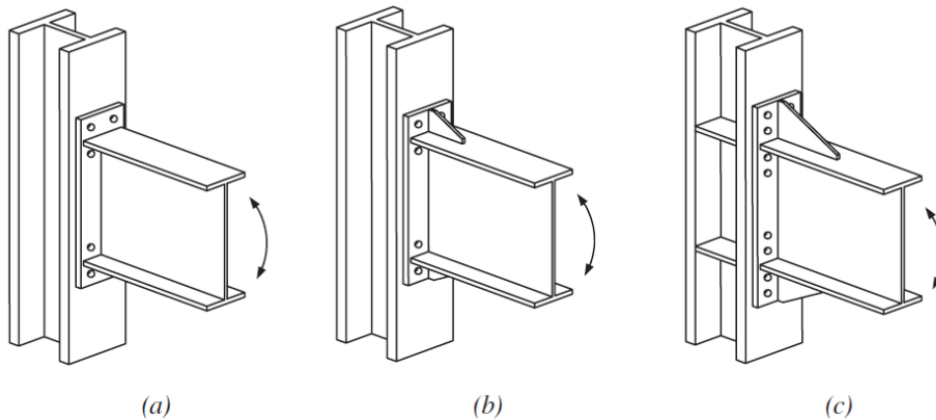


Figura 14 - Configuraciones de Bolted Unstiffened and Stiffened Extended End-Plate Moment Connections: a) Cuatro pernos sin rigidizador, 4E, b) Cuatro pernos con rigidizador, 4ES, c) Ocho pernos con rigidizador, 8ES. – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16

2.1.3 Bolted Flange Plate (BFP) Moment Connection. Este tipo de conexión (ver Figura 15) utiliza placas soldadas a las aletas de la columna y placas pernadas a las aletas de la viga. Las placas de las aletas son soldadas a la aleta de la columna usando CJP y las conexiones a las aletas son hechas con pernos de alta resistencia. El alma de la viga es conectada a la aleta de la columna usando una lámina de acero de corte con el uso de pernos. (American Institute of Steel Construction, 2016)

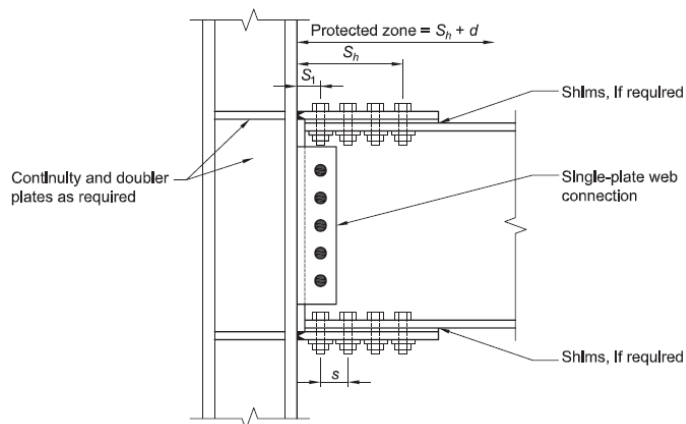


Figura 15 - Bolted Flange Plate (BFP) Moment Connection. – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16

2.1.4 Welded Unreinforced Flange-Welded Web (WUF-W) Moment Connection. En esta conexión (ver Figura 16) se genera una rotación inelástica desarrollada principalmente por la fluencia de la viga en la región adyacente a la cara de la columna. La ruptura de la conexión es controlada a través de requisitos especiales de detalle asociados con las soldaduras que unen las aletas de la viga con las aletas de la columna y la forma y acabado de los orificios de acceso para la soldadura. (American Institute of Steel Construction, 2016)

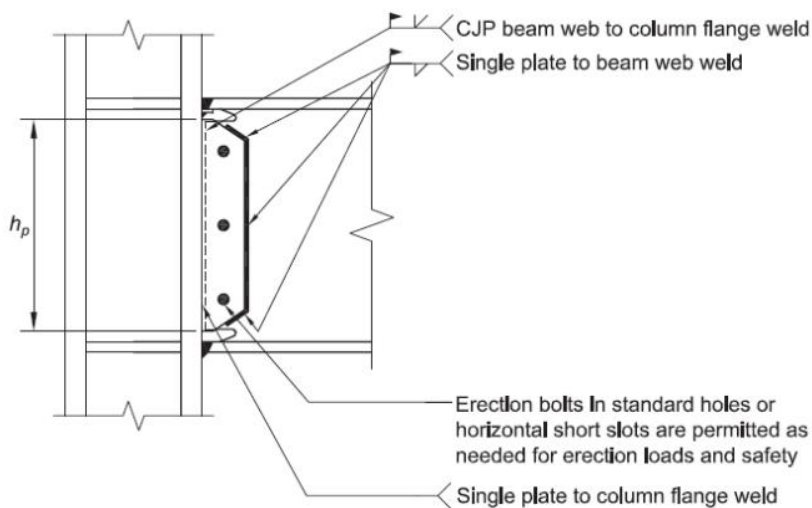


Figura 16 - Welded Unreinforced Flange-Welded Web (WUF-W) Moment Connection – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16

2.1.5 Kaiser Bolted Bracket (KBB) Moment Connection. En esta clase de conexión a momento, un soporte de acero de alta resistencia es fijado a cada aleta de la viga y se atornilla a la aleta de la columna como se muestra en la Figura 17. Se permite que la fijación del soporte a la aleta de la viga sea soldada o atornillada. Cuando se suelda a la aleta de la viga, las cinco configuraciones de la abrazadera de la serie W disponibles se muestran en la Figura 18. Cuando se atornilla a la aleta de la viga, las dos configuraciones de la abrazadera de la serie B disponibles se muestran en la Figura 19. (American Institute of Steel Construction, 2016). Esta

conexión es patentada, por lo que su uso está restringido al pago de los derechos correspondientes.

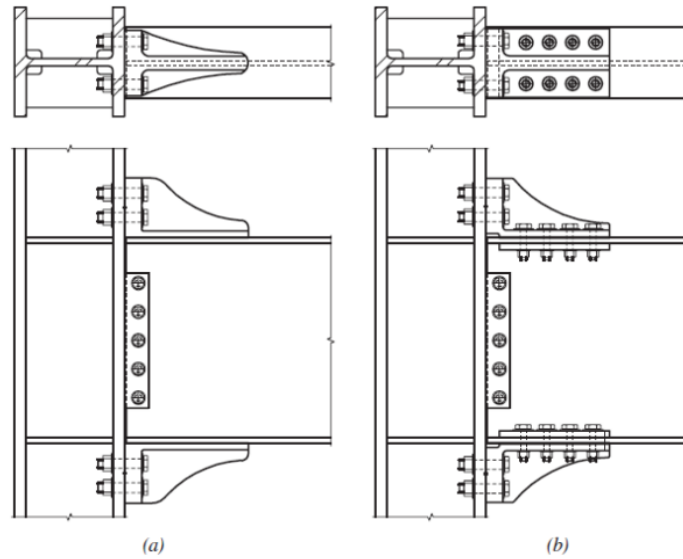


Figura 17 - Kaiser bolted bracket connection.(a) W-series connection; (b) B-series connection. – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16 – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16

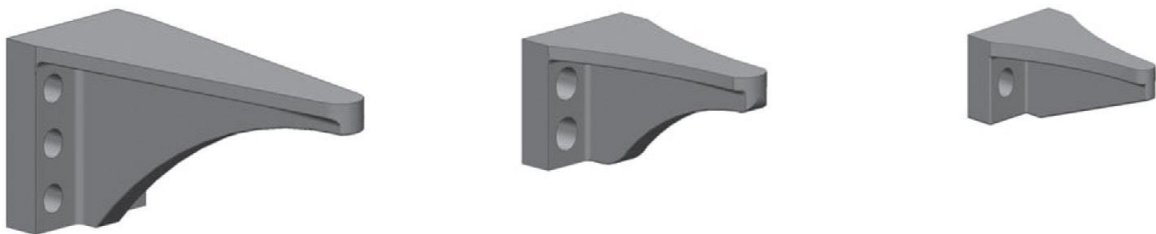


Figura 18 – Configuraciones Kaiser bolted bracket W-series: (a) Seis pernos en columna, W1.0; (b) Cuatro pernos en columna, W2.0 y W2.1; and (c) Dos pernos en columna, W3.0 y W3.1. – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16

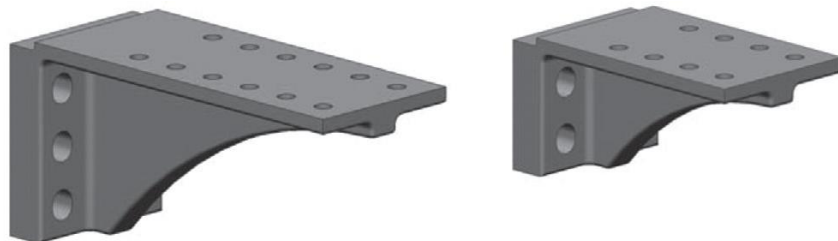


Figura 19 – Configuración Kaiser bolted bracket B-series: (a) Seis pernos en columna, B1.0, y (b) Cuatro pernos en columna, B2.1. – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16

2.1.6 Conxtech Conxl Moment Connection. La conexión de momento ConXtech® ConXL™ (ver Figura 20) permite la conexión completa y completamente resistente de vigas de ala ancha con relleno de concreto de 16 pulgadas (400 mm) en HSS construidas utilizando un ensamblaje de collar de alta resistencia atornillado en campo. Las aletas y alma de la viga son soldadas en taller y se atornillan en campo mediante accesorios (ensamblaje de esquina de collarín). Estas vigas pueden incluir vigas con sección reducida para cumplir requisitos de columna fuerte, viga débil. (American Institute of Steel Construction, 2016). Esta conexión es patentada, por lo que su uso está restringido al pago de los derechos correspondientes.

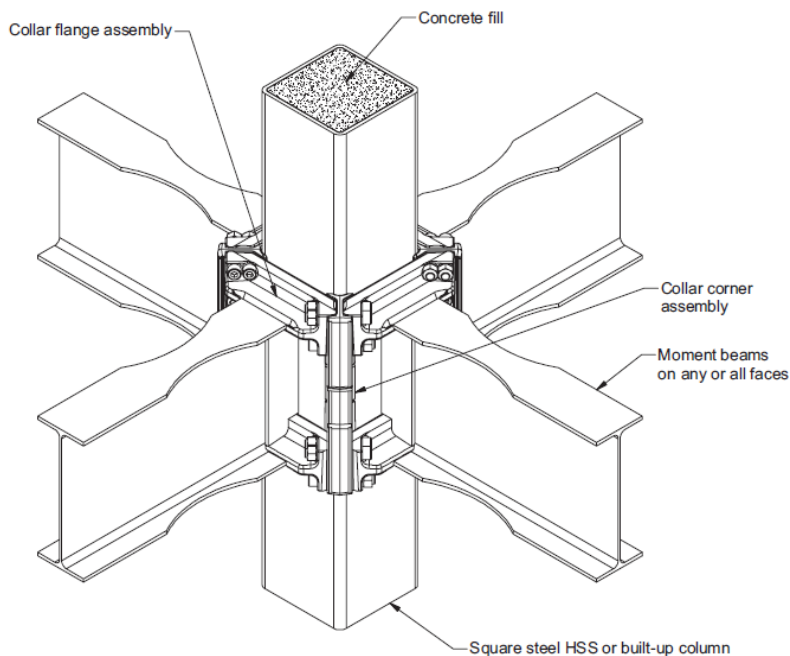


Figura 20 – Ensamble de ConXL moment connection – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16

2.1.7 Sideplate Moment Connection. La conexión a momento SidePlate® es una conexión de vigas completamente restringida (comprende secciones de ala ancha o secciones tubulares huecas) a columnas (comprende secciones de ala ancha, secciones biaxiales construidas de secciones de ala ancha y/o secciones en T, o

secciones tipo cajón) usando soldaduras de filete y placas de interconexión para conectar la viga resistente a momento con su correspondiente columna, tal y como se muestra en la Figura 21. (American Institute of Steel Construction, 2016). Esta conexión es patentada, por lo que su uso está restringido al pago de los derechos correspondientes.

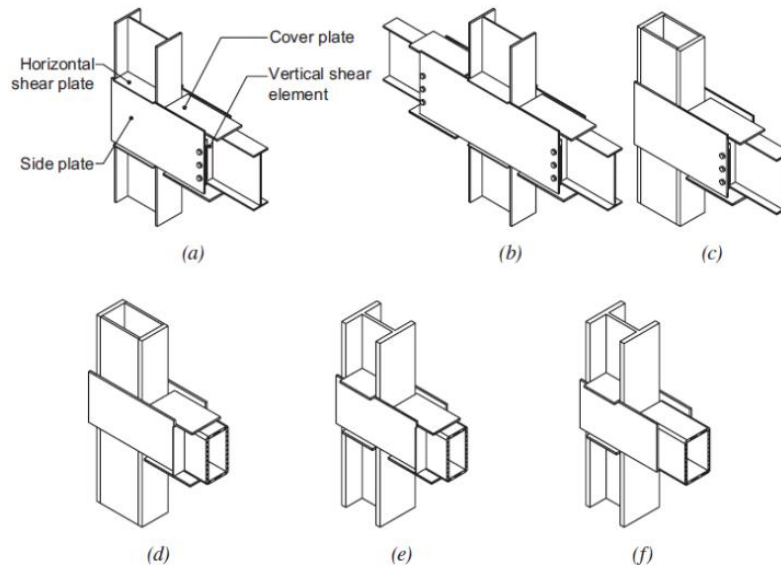


Figura 21 – Configuraciones de uniaxial SidePlate ensambladas: (a) construcción de viga y columna de ala ancha a una cara; (b) construcción de viga y columna con ala ancha de dos lados; (c) viga de ala ancha hacia columna construida en cajón; (d) viga HSS sin placas de cubierta hacia columna con alas anchas; (e) Viga HSS con placas de cubierta hacia columna de alas anchas; y (f) Viga HSS con placas de cubierta hacia columna construida en cajón. – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16

2.1.8 Simpson Strong-Tie Strong Frame Moment Connection. La conexión a momento Simpson Strong-Tie® Strong Frame® (ver Figura 22) es una conexión parcialmente restringida (tipo PR) que utiliza una conexión modificada de placa de cortante para la transferencia de corte y una conexión de T-Stub modificada (Yield-Link™ fusible estructural) para transferencia de momento, como se muestra en la Figura 21. La placa de cortante utiliza una conexión de tres pernos en la que los orificios del perno superior e inferior en la placa de cortante son ranuras horizontales y el orificio del perno central es un orificio estándar. Los agujeros correspondientes al alma de la viga son todos agujeros estándar. Esto evita la transferencia de momento a través de la conexión de placa de cortante. Mientras que todos los

pernos de la placa de cortante participan en la resistencia al corte, el perno central está diseñado para resistir también la fuerza axial en la viga en la conexión. Las conexiones T-Stub modificadas, que son peroadas tanto a la aleta de la viga como a la aleta de la columna, se configuran como enlaces de fluencia y contienen una zona de fluencia reducida en el vástago del enlace el cual impide que se doble en la compresión a través de una placa de restricción de pandeo separada. La conexión se basa en un enfoque de diseño basado en capacidad, donde la respuesta de la conexión permanece elástica bajo diferentes combinaciones de carga, y la demanda de rotación sísmica inelástica se limita predominantemente dentro de la conexión con poco o escaso comportamiento inelástico esperado en los miembros. (American Institute of Steel Construction, 2016). Esta conexión es patentada, por lo que su uso está restringido al pago de los derechos correspondientes.

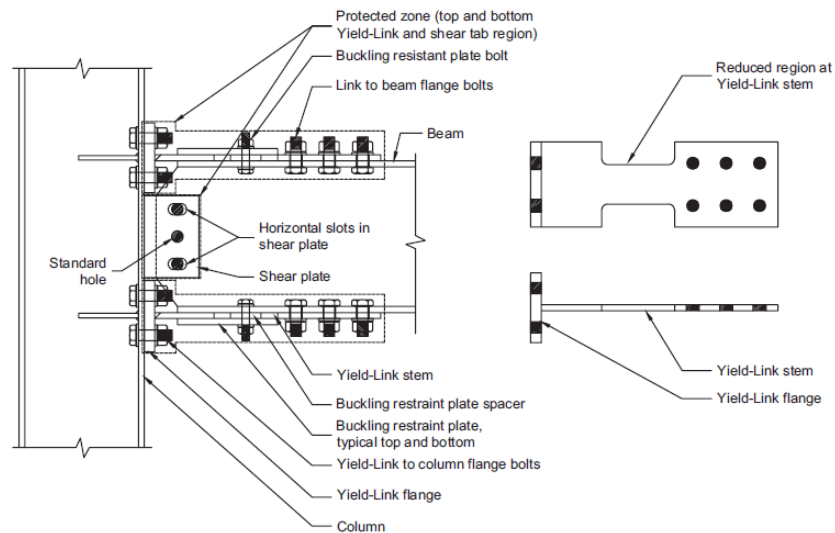


Figura 22 - Conexión a momento Simpson Strong-Tie Strong Frame – Imagen tomada del ANSI/AISC 358-16

2.1.9 Double-Tee Moment Connections. Las conexiones de doble T utilizan componentes de T-stub que están atornillados tanto a la aleta de la columna, como a las aletas de la viga usando pernos de alta resistencia. O bien cuatro pernos u ocho pernos fijan los componentes del T-stub a las aletas de la columna. Los T-Stubs superiores e inferiores deben ser idénticos. El alma de la viga está conectada

a la columna con una placa de cortante atornillada. Un detalle para esta conexión se muestra en la Figura 23. La fluencia y formación de rotulas están destinadas a realizarse deben cerca de los extremos de los vástagos en T.

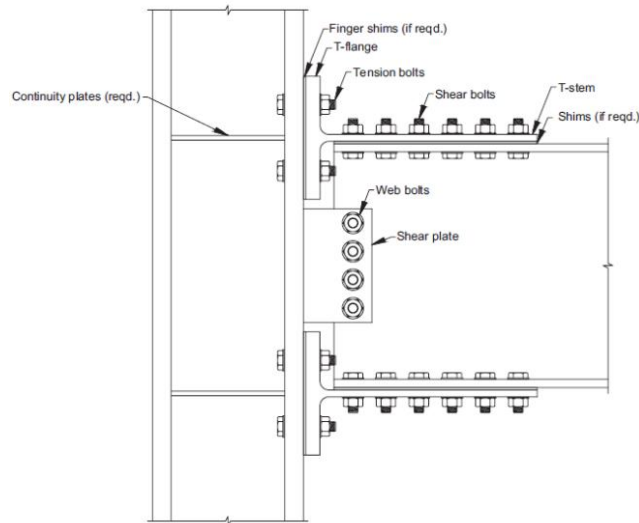


Figura 23 – Conexión típica de Doble T

2.2 Descripción de la conexión a ensayar

Se empleó un espécimen, el cual no se encuentra dentro del catálogo de conexiones precalificadas del ANSI/AISC 358-2016, motivo por el cual fue inspirada esta investigación. De las nueve (9) conexiones precalificadas descritas en el ANSI/AISC 358-2016, solo hay una (1) que contempla el uso de HSS en la interfase viga-columna, la cual se denomina *Conxtech Conxl Moment Connection*; no obstante, este HSS incluye relleno de concreto dentro de su núcleo, lo anterior, con el fin de incrementar su capacidad de carga, y la transferencia de fuerzas provenientes de los collares adosados en la conexión y que finalmente son descargados a través de la columna.

Los elementos conectados se describen a continuación:

Nombre	Columna	Viga	Tipo	Pernos	t _{CP} (mm)
WC-1	PTE 150X150X9	HEA100	W	Sin	11.92

W= Tipo de conexión soldada

t_{CP}= Espesor placa de continuidad

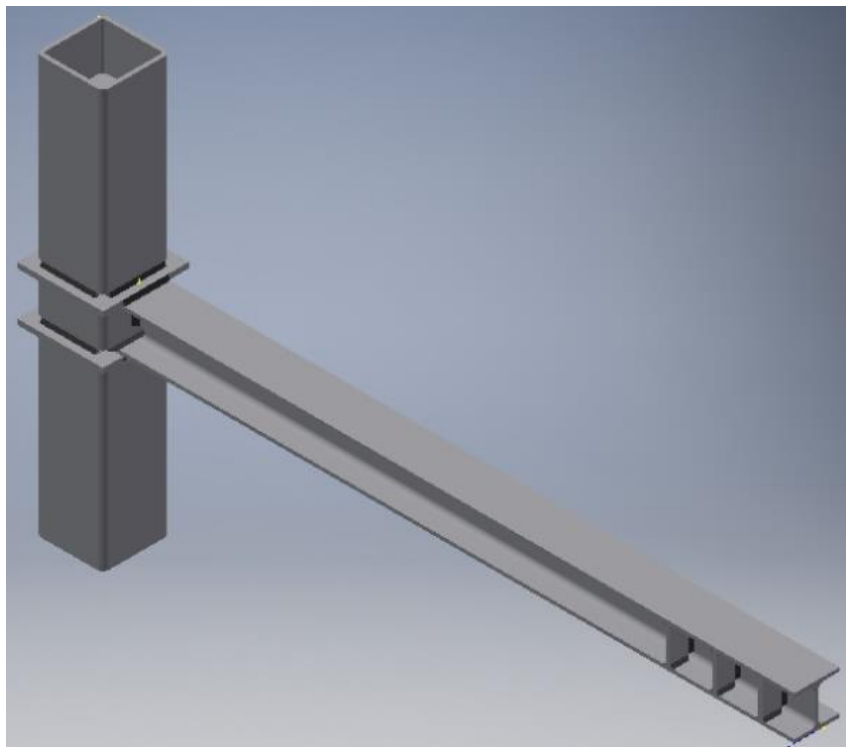


Figura 24 – Modelo geométrico total de la conexión ensayada

En la Figura 24, se puede observar el modelo ensayado experimentalmente, del cual se hablará más adelante. En el perfil HEA100 se observan tres rigidizadores que fueron colocados en ambos costados de alma para evitar un fallo local por efecto de la aplicación de la carga. Los detalles de las soldaduras, los cuales no tienen contacto entre sí, se podrán notar en la Figura 47.

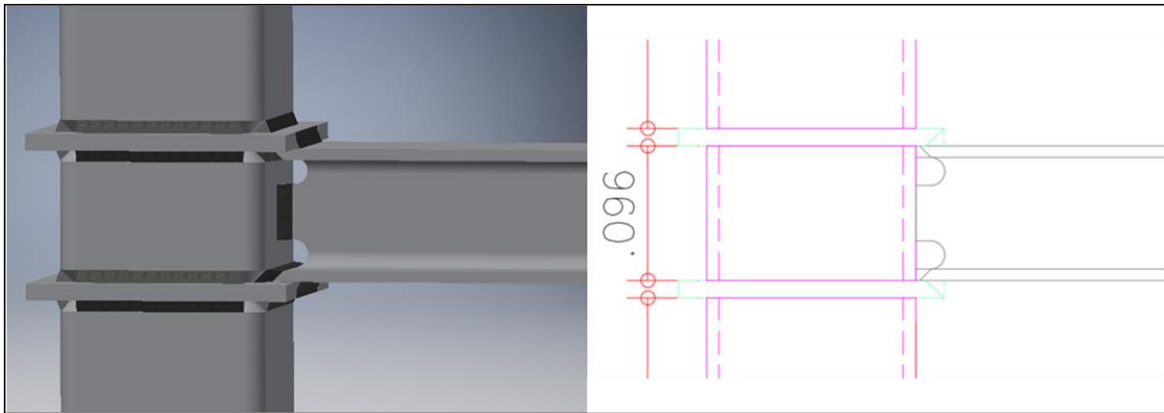


Figura 25 – Detalle de soldaduras (gris oscuro) sin contacto en las esquinas para el caso del PTE, las cuales se hicieron por CJP. En adición, se observa el pasa ratones realizado para poder efectuar la soldadura de penetración completa entre la placa de continuidad y el PTE.

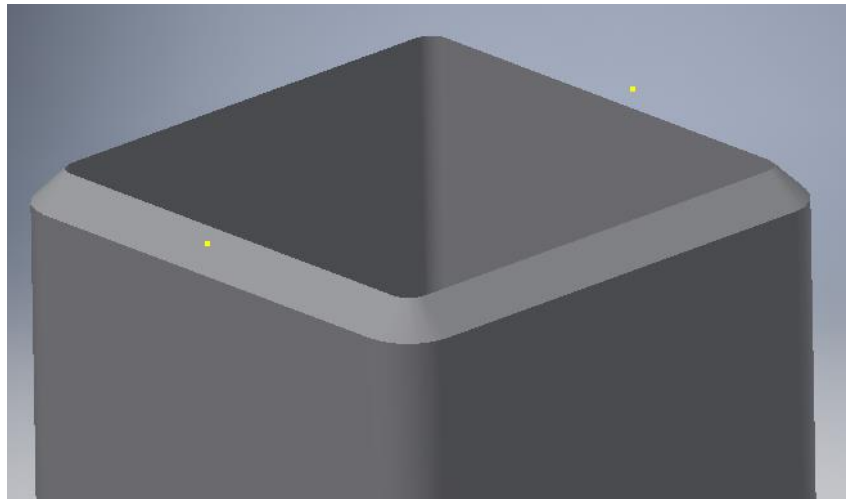


Figura 26 – Bisel a 45° realizado en todo el contorno del PTE para ser conectado con las placas de continuidad

El detalle para la presentación de la viga a la columna y placas de continuidad se hizo a través de biseles a 45° donde se realizó soldadura de penetración completa CJP (ver Figura 26). Para ello, las placas de continuidad debieron ser biseladas únicamente a lo ancho de las aletas de la viga, tal y como se aprecia en la Figura 26 y Figura 28.

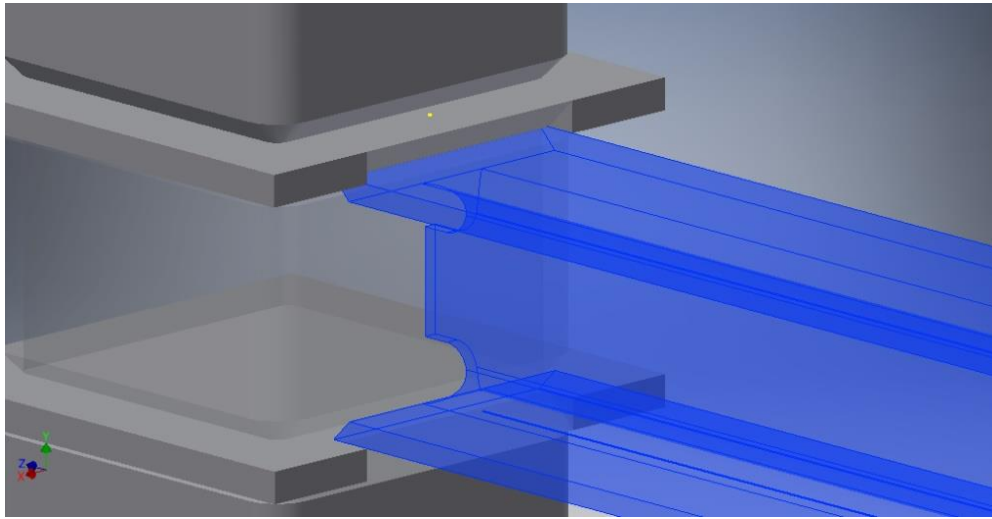


Figura 27 – Presentación de la viga a la columna y placas de continuidad. Cordón de soldadura oculto.

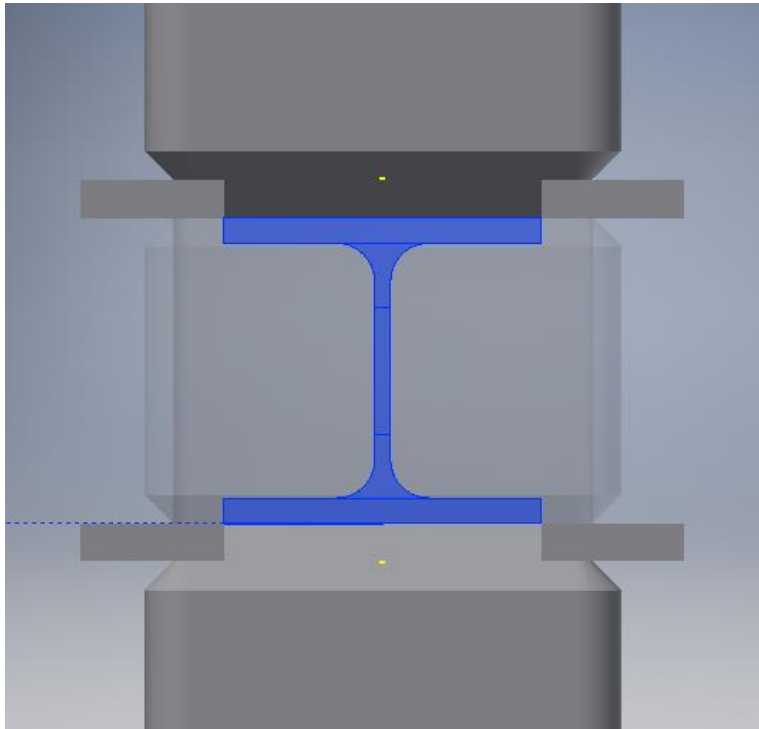


Figura 28 – Perfil de conexión visto desde la sección transversal de la viga. Cordones de soldadura ocultos

3. ANÁLISIS NÚMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CONEXIONES

En este capítulo se tratarán todos los aspectos y consideraciones tenidas en cuenta para el desarrollo de los modelos numéricos de las conexiones. Para efectos del análisis y desarrollo de este capítulo, se explicará y detallará los aspectos influyentes en los resultados de tales modelamientos, los cuales se encuentran resumidos en el mapa conceptual de la Figura 29.

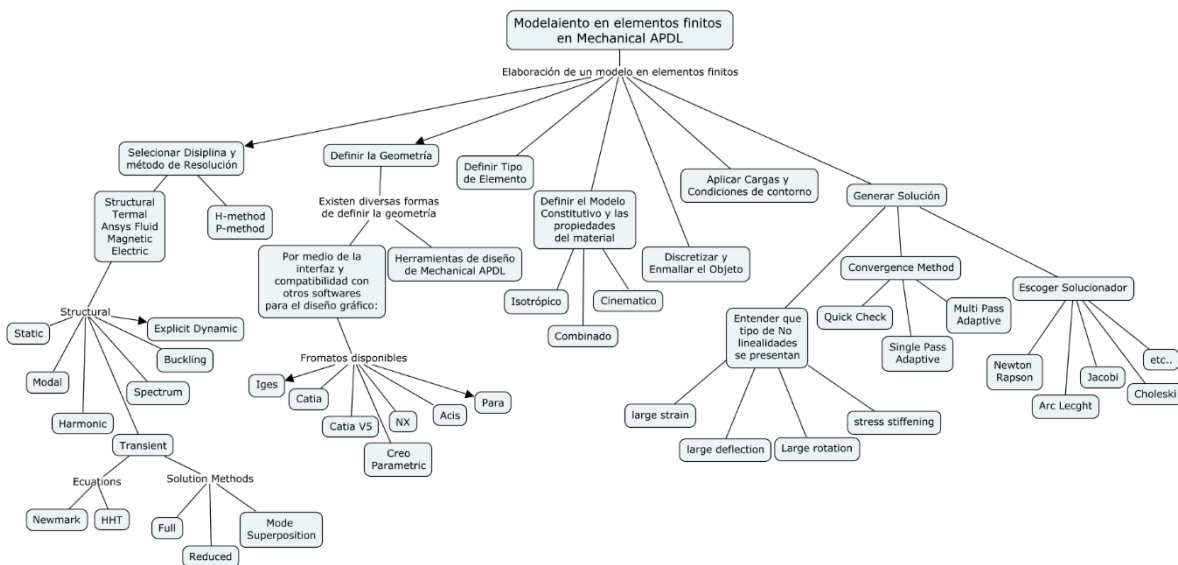


Figura 29. Modelamiento en elementos finitos en Mechanical APDL. Elaboración propia.

Para el estudio realizado sobre el comportamiento de las conexiones ante la variación del espesor y el área de las placas de continuidad, fue necesario realizar una calibración de un modelo numérico frente a los resultados obtenidos en el ensayo experimental sobre una de las conexiones. Tales modelamientos fueron realizados mediante la implementación del programa de elementos finitos ANSYS MECHANICAL APDL.

En este orden de ideas para solucionar un problema utilizando el método de elementos finitos se deben contemplar los siguientes pasos:

- a. Seleccionar disciplina y método de resolución del problema.
- b. Definir la geometría del modelo numérico.
- c. Definir tipo de elemento.
- d. Definir el Modelo constitutivo y las propiedades del material.
- e. Discretizar y Enmallar.
- f. Aplicar cargas y condiciones de frontera.
- g. Generar solución.

3.1 Seleccionar disciplina y método de resolución del modelo.

3.1.1 Disciplina. ANSYS MECHANICAL APDL en su entorno ofrece 7 disciplinas individuales para abordar el modelamiento numérico, dentro de las cuales tenemos: *Structural, Thermal, Ansys Fluid, Magnetic-Nodal, Magnetic-Edge, High Frequency and Electric* (SAP IP, Inc). Tal elección de disciplina dependerá del tipo de análisis y/o variables influyentes en el modelamiento. Dado que en el análisis se estudiará únicamente esfuerzos y desplazamientos, por lo tanto, será suficiente con elegir la opción *Structural*.

Existen además siete tipos de análisis estructurales: los cuales se explican a continuación:

“

- **Análisis estático:** Es utilizado para determinar desplazamientos y esfuerzos bajo condiciones de carga estática. Ambos análisis, estático lineal y no lineal, pueden incluir no linealidades como: plasticidad, rigidez incremental, grandes deformaciones, grandes tensiones, hiperelasticidad, superficies de contacto y Creep.
- **Análisis Modal:** Es usado para calcular las frecuencias naturales y formas modales de una estructura.
- **Análisis Armónico:** Es usado para determinar la respuesta de una estructura ante cargas que varían armónicamente en el tiempo.

- **Análisis Dinámico Transitorio:** Es usado para determinar la respuesta de una estructura ante cargas que varían arbitrariamente en el tiempo. En este tipo de análisis se pueden considerar todos los tipos de no linealidades enunciadas en el análisis estático.
- **Análisis de Espectro:** Es una extensión del análisis modal, usado para calcular tensiones y deformaciones debido a un espectro de respuesta o una entrada PSD (vibraciones aleatorias).
- **Análisis del Pandeo:** Es usado para calcular las cargas de pandeo y determinar la forma del modo de pandeo. Es posible analizar tanto el pandeo lineal (eigen value) como el no lineal.
- **Análisis Explícito Dinámico:** Es usado para calcular soluciones rápidas para la dinámica de grandes deformaciones y problemas complejos de contacto.” (SAP IP, Inc)

En esta investigación se implementarán los análisis estático y dinámico transitorio, debido a las variables a estudiar; el análisis estático se utilizará para determinar momento de fluencia M_y , deformación de fluencia, rotación de fluencia, momento máximo M_u , deformación máxima y rigidez rotacional inicial; lo anterior con el fin de caracterizar el comportamiento de la conexión ante cargas monotónicas. Posteriormente se utilizará el análisis dinámico transitorio para la calibración del modelo de la conexión ante las cargas cíclicas del protocolo de carga estipulado en la NSR-10, con el objetivo de estudiar la incidencia del área y el espesor de las placas de continuidad en el comportamiento de la conexión ante cargas dinámicas.

3.1.1.1 *Análisis Dinámico Transitorio.* El análisis transitorio dinámico (también conocido como time-history analysis) es una técnica utilizada para determinar la respuesta dinámica de una estructura sometida a la acción de cualquier carga variable en el tiempo, se puede utilizar para determinar la variación de los desplazamientos, deformaciones unitarias, esfuerzos, fuerzas, reacciones, etc., en cualquier estructura y su respuesta a cualquier combinación de cargas: estática, transitoria y armónica. (SAP IP, Inc)

La ecuación que gobierna el movimiento en el análisis dinámico transitorio es la siguiente:

$$[M].\{\ddot{U}\} + [C].\{\dot{U}\} + [K].\{U\} = \{F(t)\}(\text{Ansys Release})$$

Ecuación 5 – Ecuación de movimiento

Dónde:

M= Matriz de masa

C= Matriz de amortiguamiento

K= Matriz de rigidez

U= Vector de desplazamientos

F= Vector de fuerzas.

Este estudio tiene como soporte un análisis estático en un instante de tiempo t , al que se añaden fuerzas de inercia \ddot{U} , de amortiguamiento \dot{U} y se implementa el método de integración de Newmark o su extensión (HHT) para resolver la ecuación en cada instante de tiempo (Rubio, 2005).

En la resolución de análisis dinámicos transitorios, se disponen de dos (2) ecuaciones, el método de Newmark y el método de Hilber-Hughes-Taylor (HHT): el método de Newmark es un método para el análisis transitorio implícito paso a paso, en la cual se van calculando las soluciones a cada instante de tiempo (Rubio, 2005); el método HHT no es más que una extensión del método de Newmark, el cual permite la disipación de energía y la precisión de segundo orden (la cual no es posible con el método tradicional de Newmark).

Sin embargo, para efectos de esta investigación, el estudio estará basado en el método tradicional de Newmark, debido a que es el más estudiado y del cual se tiene mayor evidencia en la literatura.

3.1.1.1.1 *Método de Newmark.* En el entorno de Mechanical APDL, al utilizar el método de Newmark se ofrecen tres opciones para abordar el análisis: el método completo, el método reducido y el método de superposición modal.

“Método Completo: Este método utiliza el sistema completo de matrices para calcular la respuesta transitoria (sin reducción de la

matriz). Es el más poderoso de los tres métodos porque permite la inclusión de todo tipo de no linealidades (plasticidad, grandes deformaciones, etc.). Si no se requiere la consideración de no linealidades, debe considerar implementar cualquiera de los otros métodos, debido a que este es además el que requiere mayor gasto computacional de todos.

Ventajas: Es fácil de usar, porque no existe la preocupación por elegir grados de libertad maestros o formas modales; permite todo tipo de no linealidades; usa matrices completas, no hay aproximación de la matriz de masa; todos los desplazamientos y esfuerzos se calculan en un solo paso; permite todo tipo de cargas: fuerzas nodales, desplazamientos impuestos y cargas de elementos.

Desventajas: Requiere mayor gasto computacional que los otros métodos

Método Reducido: Este método condensa el tamaño del problema mediante el uso de grados de libertad maestros y matrices reducidas.

Ventajas: Es más rápido y menos costoso que el método completo.

Desventajas: La solución inicial solo calcula los desplazamientos en el grado de libertad maestro; requiere un segundo paso para calcular la solución completa de desplazamientos, esfuerzos y fuerzas; No se pueden aplicar cargas a elementos como: presiones, temperaturas, etc.; Todas las cargas deben aplicarse a grados de libertad maestros definidos por el usuario; El paso de tiempo debe permanecer constante durante todo el análisis; La única no linealidad permitida es el uso de contactos simples nodo a nodo.

Método de la Superposición Modal: Este método suma formas modales factorizadas (vectores propios) de un análisis modal para calcular la respuesta de la estructura.

Ventajas: Es más rápido y menos costoso que los métodos anteriores; Acepta amortiguamiento modal.

Desventajas: El paso de tiempo debe permanecer constante durante todo el análisis; La única no linealidad permitida es el uso de contactos simples, nodo a nodo; no acepta desplazamientos impuestos (diferentes a cero)." (SAP IP, Inc)

Para la elaboración del modelo objetivo de la conexión se utilizará el método completo debido a: 1) se necesitan considerar no linealidades, especialmente debido al tipo de ensayo (ensayo muy destructivo) y a los grandes desplazamientos a los que será inducida la conexión; 2) adicionalmente se requiere realizar el modelamiento mediante el control por desplazamientos en los nodos del extremo

libre de la viga, lo cual no es posible realizar por cualquiera de los otros dos métodos.

3.1.2 Método de resolución. Al momento de elaborar un modelo en elementos finitos es de gran importancia revisar la convergencia del problema, tales verificaciones dependerán del método de resolución seleccionado. Con el fin de verificar tal convergencia se requiere más de una solución del mismo problema, de modo que, si la solución obtenida es muy diferente a la original, se dice que el problema no ha convergido, mientras que si la diferencia es insignificante se podría decir que ha convergido.

Para demostrar la convergencia de la solución se conocen dos métodos: el método H y el método P, estos métodos consisten en agregar de diferentes formas grados de libertad al problema.

3.1.2.1 Método P. Este método funciona definiendo para un elemento una malla determinada, utilizando para su solución, un polinomio de grado p determinado y aumentando el grado en cada iteración. De este modo cuanto mayor es el grado del polinomio utilizado mayor es la aproximación a la solución (Martín R., 2010).

Es común que al utilizar esta metodología los elementos tienden a ser más grandes, compensando con funciones de forma más complejas. Para aumentar la precisión de la solución, se necesita aumentar el orden del polinomio, lo cual aumenta directamente la complejidad de las funciones de forma.

3.1.2.2 Método H. El método H ya no usa una malla constante si no una adaptativa, lo cual refiere a la necesidad de afinar el tamaño de la misma con el fin de conseguir mayor precisión en los resultados y verificar la convergencia de la solución (Martín R., 2010).

El método H mejora los resultados mediante el uso de una malla más fina del mismo tipo de elementos, de modo que para verificar la precisión del modelo

numérico es necesario comparar varios modelos reduciendo la longitud de los elementos finitos hasta encontrar el punto óptimo (cantidad de elementos) en el que la solución no genere cambios considerables. (Martín R., 2010).

La diferencia entre los dos métodos radica en que el método h utiliza muchos elementos con funciones de forma sencillas, mientras que el método p utiliza pocos elementos con funciones de forma más complejas.

Para efectos de esta investigación, el modelamiento utilizará el método H, el cual es el más implementado y desarrollado por la herramienta ANSYS MECHANICAL APDL, en este caso se calibrará el modelo numérico variando el tamaño de los elementos finitos, generando variaciones y refinamientos de la malla en las zonas que requieran mayor detalle debido a la acumulación de esfuerzos y deformaciones en el mismo. Este recurso permite obtener resultados más exactos en las zonas que se requiere mayor claridad, además de reducir el costo computacional, debido a la reducción del número de elementos en el modelo.

Para lograr una definición más exacta de las zonas con mayor y menor densidad de elementos, se efectuó un análisis mediante la aplicación de una carga P incremental en el extremo libre de la viga (perfil HEA100), la cual se aplicó usando la filosofía de un ensayo controlado por desplazamiento, llevándolo así mediante un incremento de 20 mm hasta una deflexión de 110 mm, el cual es un desplazamiento superior al que será sometida la conexión en el ensayo cíclico. De este modelo se obtuvieron incursiones del material al rango inelástico hasta los 28cm desde el eje de la columna. Sin embargo, debido a la diferencia en el tipo de carga, se definió una distancia que resulta conservadora, 50cm. De esta forma se obtendrá dos regiones en el modelo: una zona en la que es necesario un mayor detalle del enmallado (menor longitud de elementos finitos), y una zona con menor detalle de la malla (mayor longitud de elementos finitos), las cuales se denominarán zona protegida y zona elástica, respectivamente. Este detalle se muestra claramente el esquema de la Figura 30a y en la imagen del modelo de la conexión ensayada en la Figura 30b.

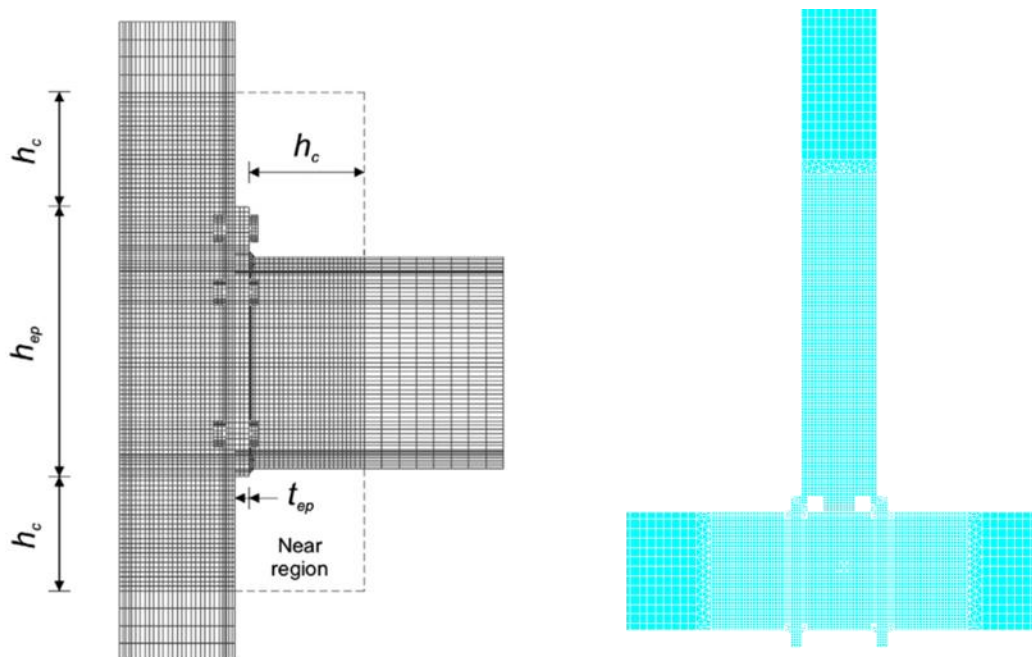


Figura 30 – Refinamiento de la malla en la zona protegida de la conexión a) Refinamiento de la malla de una conexión particular (Díaz, Victoria, Martí, & Querín, 2011), b) Refinamiento de la malla en la conexión objeto de estudio en esta investigación

Con el fin de reducir al máximo el costo computacional, se definirán dos tipos de materiales para cada elemento, de esta forma se obtendrá un material lineal elástico, y un material multilineal elástico para la viga, así como para la columna; esto debido a que, como se mencionó anteriormente, se tendrán zonas con y sin incursiones en el rango inelástico, por lo cual es innecesario definir la misma longitud de elemento finito y el mismo tipo de material (multilineal) a lo largo de elementos como la viga y la columna.

Para llevar a cabo este tipo de malla y conservar buenas relaciones de aspecto, se generó una delgada zona de transición en la cual se utilizará un elemento más avanzado denominado *Solid186*, el cual es un elemento 3D con 20 nodos de orden superior, el cual arroja ventajas a la hora de modelar diferentes tipo de mallas irregulares debido a su estabilidad numérica respecto a las diferentes geometrías que puede asumir: hexaedro, tetraedro, pirámide y prisma, a diferencia del *Solid185*, el cual no es recomendable usar bajo formas piramidales ni tetraedrales.

La Figura 31, ilustra esquemáticamente el proceso para definir la zona protegida, la zona de transición y la zona elástica de un elemento cualquiera. La zona izquierda mostrada en *b* representa la zona protegida, la cual contiene una mayor densidad de elementos finitos y se define a partir de un material multilineal elástico modelado a través del uso del elemento *Solid185* y se enmallará con formas hexaedrales. La zona derecha mostrada en *b*, representa la zona más alejada de la conexión, para enmallar esta región se utilizará igualmente el elemento *Solid185* con una longitud para los elementos superior a la de la zona protegida, adicionalmente se definirá a partir de un material lineal elástico; finalmente la zona de transición mostrada en *a*, será enmallada con el elemento *Solid186*, y sus elementos poseerán formas tetraedrales y piramidales con lo cual aseguramos unir ambas zonas (zona protegida y zona elástica) sin generar elementos alargados o que violen relaciones de aspecto en alguna de las regiones.

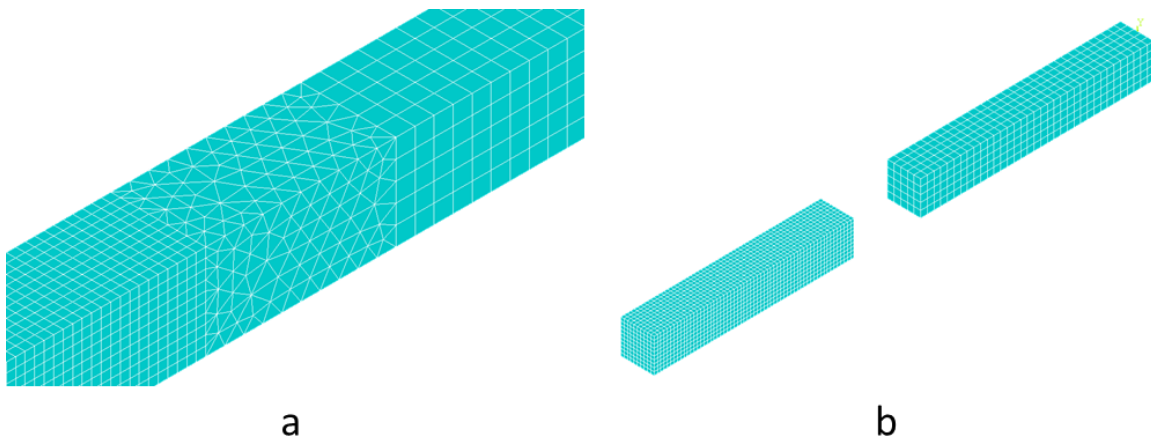


Figura 31 – a) Zona de transición enmallada con elementos *Solid186*, y, b) Zona protegida y zona más alejada de la conexión, la cual es enmallada con elementos *Solid185* de diferente densidad.

3.2 Definir Geometría

El programa ANSYS requiere de un modelo discretizado para resolver al análisis deseado. Tal modelo discretizado se elabora a partir de una geometría bien sea en una, dos o tres dimensiones y se puede generar a partir de 3 opciones:

“

- a. Construir la geometría y enmallar con ANSYS.
- b. Construir la geometría en un programa CAD, exportarla a ANSYS y enmallar en ANSYS.
- c. Construir geometría y enmallado en programa CAD e importar el modelo a ANSYS.” (Roa & Garzón, 2002)

Ansys Mechanical APDL ofrece la opción de importar archivos en los siguientes formatos: Iges, Catia, Catia V5, Creo Parametric, NX, Acis, Parasolid, además de la compatibilidad con otros programas del paquete de Ansys como Workbench.

En esta investigación se implementó la opción *a - Construir geometría y enmallar con ANSYS*, para lo cual se utilizó comandos y códigos que se pueden generar para sacar el máximo provecho de la programación en un estudio paramétrico, siendo esta una de las fortalezas de MECHANICAL APDL.

Para la elaboración de un modelo sólido se debe tener en cuenta que existen cuatro (4) entidades básicas: puntos, líneas, áreas y volúmenes a partir del cual se generan todas las geometrías (Roa & Garzón, 2002).

“Existen además dos enfoques para el modelamiento: Top down y Bottom up.

- Top down: En este enfoque la geometría se crea a partir de elementos primitivos, los cuales son volúmenes (cubos, esferas, cilindros), áreas (rectángulos, triángulos, círculos, trapecios) o líneas bien definidas, de esta forma, el programa crea automáticamente entidades de orden inferior asociada a cada una de las geometrías definidas. En este sentido si definimos un cubo, el programa automáticamente definirá 6 áreas, 12 líneas y 8 puntos asociados.
- Bottom up: Como su nombre lo indica el modelo se construye desde las entidades de orden menor hacia las de mayor orden. Es decir, primero se definen los puntos, luego a partir de estos se crean las líneas uniéndolos los mismos, luego de las líneas se crean las áreas mediante unión de líneas y finalmente los volúmenes de la unión de áreas. Este fue el enfoque utilizado

en el modelo presentado en esta investigación.” (Roa & Garzón, 2002)

A continuación, se muestran los pasos y un ejemplo de uso de los comandos para la definición de la geometría de la viga en la conexión:

- Definir puntos, para lo cual se requiere de doce (12) en la sección transversal de la viga como se muestra en la Figura 32, con el comando K, N° del keypoint, Coordenada en X, Coordenada en Y, Coordenada en Z.
- Se definen las líneas con el comando LSTR, Keypoint inicial, Keypoint final
- Creando las líneas a partir de los nodos indicados en el comando. Luego se define el área a partir de la unión de las líneas con el comando AL, Línea N° 1, Línea N° 2, ... hasta generar el área.
- Finalmente, para crear el volumen utilizamos el comando VDRAG,N° área,,,,,línea de extrusión, El cual realiza la extrusión de un área determinada a lo largo de una línea específica, razón por la cual se definió un tercer punto y una tercera línea en la lista de comandos, la cual representa el eje de extrusión del área.

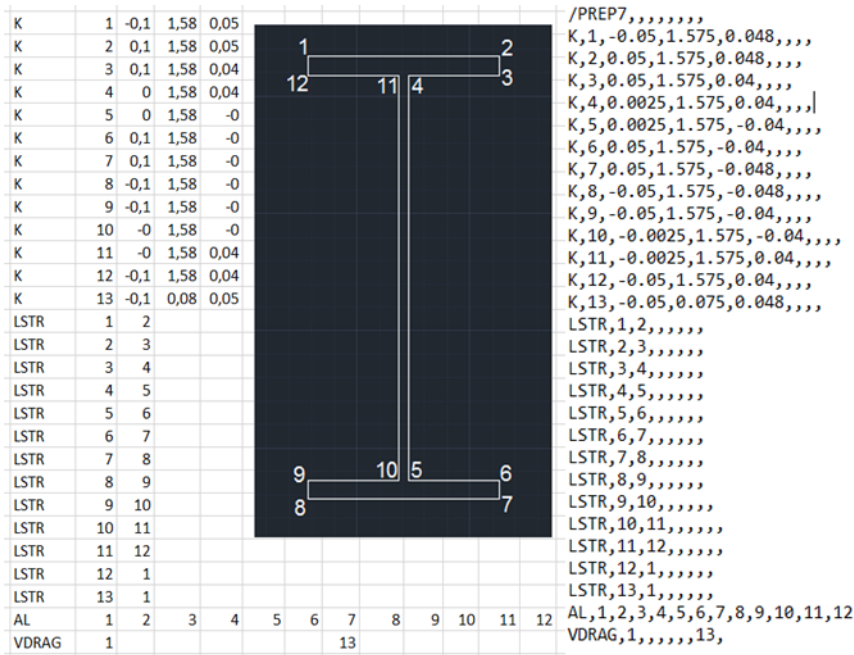


Figura 32 – Definición de la geometría en ANSYS APDL

Para facilitar el proceso de la creación de la geometría se elaboró una hoja de cálculo y posteriormente se creó un archivo de texto .CSV delimitado con comas para definir la totalidad de la geometría con la lista de comandos como se muestra en la Figura 32, una vez se ingresa el código en el Comand Prompt de Mechanical APDL se obtiene un sólido como el mostrado.

De esta forma al igual que la geometría de la viga se crearon los demás componentes del modelo de la conexión tales como: columna (PTE), placas de continuidad, rigidizadores de la viga, de la columna, apoyos, pasa-ratones en la viga, soldaduras y discretizaciones del modelo.

Además de implementar el código de programación, resulto útil la implementación de algunos operadores booleanos. Estos operadores nos permiten combinar entidades mediante operadores lógicos como adición (*Add*), sustracción (*Subtract*), división (*Divide*), pegar (*glue*), etc, estos comandos se describen a continuación.

“Adición (Add): Genera una nueva entidad compuesta por todas las partes de las entidades originales. La entidad resultante no presenta divisiones internas.

Sustracción (Subtract): Este operador se utiliza para sustraer un volumen de otro, un ejemplo de su aplicación es crear una placa y un cilindro que se intercepte con esta para generar el agujero de un perno, eliminando el volumen del cilindro y lo que se encuentre interceptado con el mismo. En este trabajo la herramienta “*Subtract*” se utilizó para extraer de la viga el volumen generado por los pasa-ratones en la misma.

Pegado (glue): Este operador es utilizado para generar uniones perfectas entre dos o más elementos, las entidades mantienen su individualidad, pero se conectan en su intersección. Es decir que estos elementos pueden tener o no el mismo tipo de material.

División (Divide): Fracciona un elemento en entidades de su misma jerarquía, al dividirla con entidades de un grado menor de jerarquía, por ejemplo, para dividir volúmenes se deben utilizar áreas y para dividir áreas se deben usar líneas o incluso el plano de trabajo.” (Roa & Garzón, 2002)

3.3 Definir tipo de elemento

Para el estudio del comportamiento de conexiones semirrígidas es común encontrar modelamientos con elementos tipo sólido, elementos de contacto y elementos para aplicación de pretensado de pernos (en el caso de conexiones pernadas).

Bruno Eizo Higaki reporta los elementos más implementados para el modelamiento de conexiones semirrígidas en su trabajo de investigación “CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS DE AÇO COM ÊNFASE NAS LIGAÇÕES SEMI-RÍGIDAS” como requisito de grado para doctorado en ciencias presentado en el año 2014. En el cual se encuentran elementos sólidos como *Solid 185*, *Solid 65*, *Beam23*, *Beam189*, elementos de contacto: *Targe170* y *Conta173* y finalmente *Prets179* para la aplicación de pretensado en pernos. Estos elementos se explican a continuación.

“Solid 185: El tipo de elemento implementado para todas nuestras secciones fue el elemento volumétrico Solid 185. Este elemento posee 8 nodos y 3 grados de libertad en cada uno; traslaciones en las direcciones X, Y y Z. Este elemento nos permite considerar la plasticidad por medio de un diagrama esfuerzo deformación multilíneo. Es importante si se desea minimizar el efecto denominado “Shear Locking” activar la opción del elemento que añade grados de libertad ficticios para minimizar el efecto de rigidez de ese elemento.

Solid 65: Este elemento es ampliamente utilizado para simular el comportamiento del concreto. Este elemento posee 8 nodos y 3 grados de libertad en cada uno, permite traslaciones en direcciones X, Y y Z. Permite además la simulación de fisuras cuando se somete a la tracción y al aplastamiento del hormigón cuando es comprimido. Se encuentra evidencia de su uso en losas de concreto y en conexiones mixtas de acero y concreto.

Beam23: El elemento BEAM23 se utilizó para la discretización de las armaduras longitudinales. Este elemento uniaxial está formado por dos nodos con tres grados de libertad en cada nodo (dos traslaciones y una rotación).

Beam189: Para el modelado de los conectores de cortante se utilizó el elemento de barra BEAM189. Este elemento tiene tres nudos y seis grados de libertad por nodo (tres traslaciones y tres rotaciones). Este

elemento permite consideración de la no linealidad del material y la forma de la sección transversal.

Targe170 y Conta173: La simulación de los contactos entre elementos es generalmente abordada con los elementos TARGE170 y CONTA173. Tales elementos representan la simulación del contacto tipo superficie-superficie. El elemento Targe170 se define como la superficie objetivo o la más rígida, mientras que el elemento Conta173 se le asigna a la superficie de contacto más flexible. Estos son ampliamente usados en modelos de conexiones pernadas para simular el contacto generado por los pernos entre otros. En esta investigación se utilizó este tipo de contacto entre las placas de apoyo de la conexión y la columna, con el fin de evitar la generación de esfuerzos ficticios que podrían generarse a partir de la simulación de los apoyos en la conexión.

Prets179: Este elemento es usado para simular el pretensado de los pernos. Tiene 3 nodos y 1 grado de libertad de traslación. La utilización de este elemento permite la aplicación de la fuerza directamente en la malla del perno. Debido a que la conexión objeto de este estudio es soldada, no se requiere del uso de pernos, lo cual descarta la implementación de elementos de pretensado, por lo cual únicamente se modelarán elementos sólidos, siendo el más utilizado para modelar estructuras metálicas el elemento *Solid185* y adicionalmente el *Solid186* en la zona de transición como fue explicado anteriormente.” (Higaki, 2014)

3.4 Definir modelo constitutivo y propiedades de material

Actualmente existe una gran variedad de modelos constitutivos utilizados para definir las características y el comportamiento de los materiales. La cantidad de opciones obedece a la complejidad del comportamiento de los materiales, en este sentido entre más complicado sea el modelo constitutivo seleccionado, más acertado será el comportamiento de la simulación. Sin embargo, la complejidad del modelo constitutivo también será proporcional a la complejidad o inelasticidad del comportamiento del material utilizado.

En el caso del modelamiento de estructuras en acero para garantizar que el modelamiento de estas sea más cercano a la realidad, es necesario considerar que

este es un material elasto-plástico, lo cual significa que su comportamiento estará definido por una región elástica y una región plástica, dando la posibilidad a la generación de deformaciones reversibles e irreversibles (Andrade , 2015).

En la realización de ensayos unidimensionales encontramos que, al someter una muestra ante solicitudes superiores al esfuerzo de fluencia generará en el material un comportamiento no lineal, lo cual implica un comportamiento plástico conocido como endurecimiento o ablandamiento por deformación. Para abordar este comportamiento, el programa ANSYS cuenta con varias opciones para definir este fenómeno, las cuales se encuentran explicadas a continuación.

3.4.1 Endurecimiento por deformación. Las reglas de endurecimiento por deformación permiten describir la evolución de la superficie de fluencia una vez se supere el esfuerzo de fluencia y se generen deformaciones plásticas. Tales reglas definen dos comportamientos básicos: el crecimiento y el desplazamiento de la superficie de fluencia y se atribuyen al endurecimiento isotrópico y al endurecimiento cinemático respectivamente.

3.4.2 Endurecimiento Isotrópico. Esta regla de endurecimiento representa la evolución de la superficie de fluencia como un crecimiento uniforme en todas las direcciones con flujo plástico. Este endurecimiento es asociado al comportamiento típico de metales, según el cual la región elástica crece con la deformación plástica. La representación gráfica de esta situación se muestra en la Figura 33.

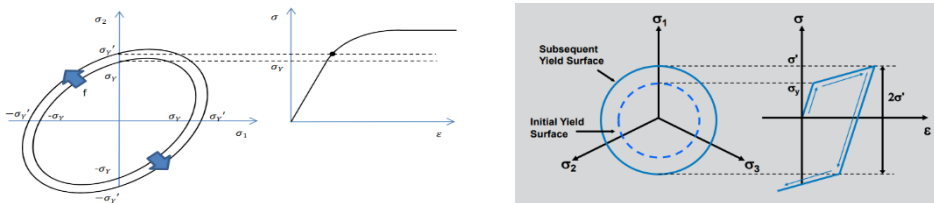


Figura 33. Endurecimiento isotrópico, tomado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70578/fichero/Cap%C3%ADtulo+2.pdf>

3.4.3 Endurecimiento Cinemático. En la regla de endurecimiento, la superficie de fluencia permanece constante y se traslada en la dirección de la fluencia. Al comprobar el comportamiento en estructuras metálicas sometidas a cargas cíclicas es común encontrar que al descargar y seguir cargando en la dirección opuesta se nota una variación en el límite elástico, siendo menor en sentido contrario, lo cual se debe al desplazamiento de la superficie y se conoce como efecto Bauschinger. La representación gráfica de este comportamiento se muestra en la Figura 34.

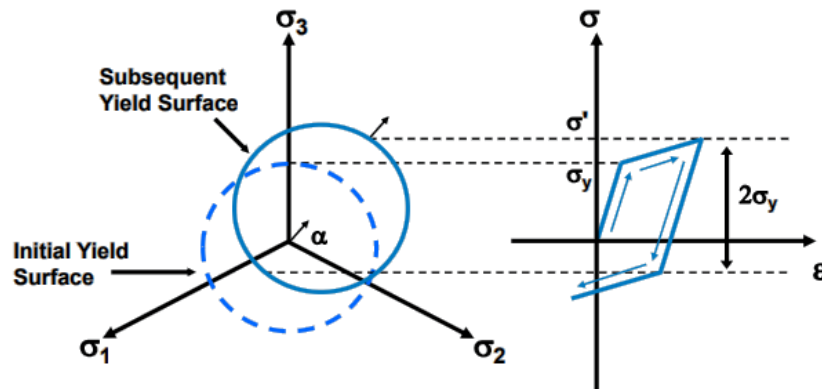


Figura 34 – Endurecimiento cinemático – Tomado de (SAP IP, Inc)

En esta investigación se implementaron ambos tipos de endurecimiento, con el fin de observar cual se acercaba mejor al comportamiento real de la conexión en el caso de estudio.

Para la definición de estas normas de endurecimiento, el programa ANSYS ofrece la posibilidad de crear curvas características del material (Esfuerzo Deformación) definidas a partir de dos o más tramos, para lo cual tenemos las opciones bilineal o multilínea elástica. Cabe anotar que, para definir la plasticidad del acero, se deben definir inicialmente la región elástica del mismo, para lo cual se debe ingresar el módulo de *Young* y el módulo de *Poisson*. Una vez definidas estas dos variables, se alimenta la tabla con cuantos puntos o tramos sean necesarios para detallar en lo posible la región inelástica.

Para la definición de las curvas de los materiales, se realizan dos (2) ensayos a tensión sobre el perfil HEA100, dos (2) ensayos sobre el perfil PTE y un (1) ensayo

sobre las placas de continuidad, como se describe en la Figura 15. De esta forma para el perfil HEA100 se extrajeron dos (2) especímenes, uno del alma y otro de la aleta de la viga, de modo que para elaborar la curva teórica (para el modelo) de este material, se promediaron los valores de cuatro (4) puntos seleccionados de las dos (2) curvas obtenidas en el ensayo a tracción, el primer punto se tomó en la zona que finaliza el comportamiento no lineal del material, el segundo en la intersección de la curva del material con la línea tangente a 0.2% de la deformación, el tercer punto se tomó en la zona donde finaliza la meseta de fluencia de la curva y el cuarto se tomó en el UTS, que es donde finaliza el endurecimiento por deformación del material. Este último punto se tomó de los datos reportados del ensayo en un archivo de Excel. La Figura 35 ilustra la selección de puntos de una de las curvas obtenidas del ensayo a tensión.

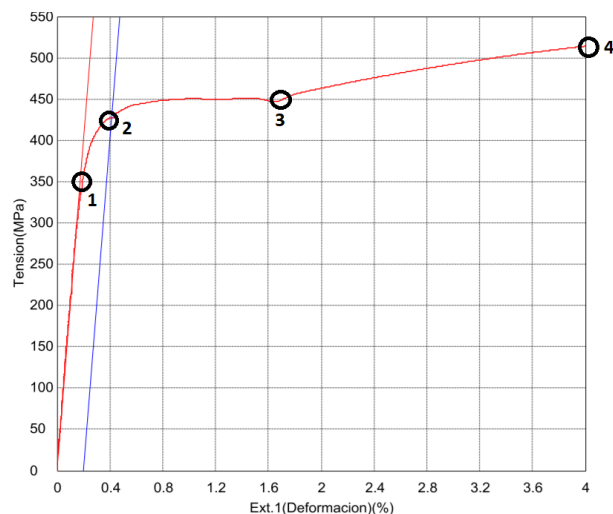


Figura 35 – Selección de puntos de una de las curvas esfuerzo-deformación

En la Figura 36 se observa la definición de un material en Ansys APDL con endurecimiento isotrópico, compuesta por 4 tramos, la columna izquierda representa las deformaciones y la derecha presenta los esfuerzos. Al momento de definir las curvas se deben tener en cuenta 3 consideraciones: 1) el programa no acepta tramos con pendiente igual o menor a cero; 2) el esfuerzo de fluencia y la deformación de fluencia deben coincidir con el módulo de Young ingresado; 3)

finalmente, ninguna pendiente de la curva puede ser mayor o igual a la pendiente inicial (Modulo de Young).

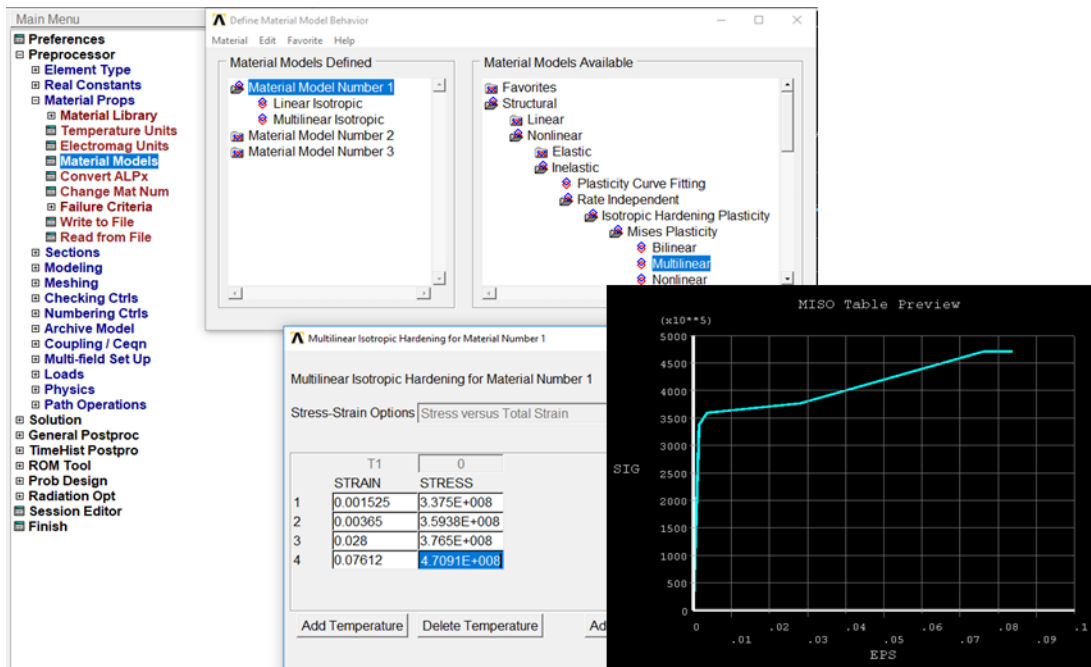


Figura 36 – Definición del material en Ansys APDL

3.5 Discretizar y enmallar

Con el fin de realizar un modelamiento adecuado, es aconsejable efectuar una discretización muy detallada, de tal manera que la malla genere elementos perfectamente alineados entre sí. Para lograr este cometido, el modelo se fraccionó utilizando la herramienta división (*divide*), con la cual, se genera que todas las áreas que se hallan en contacto entre elementos diferentes compartieran las mismas dimensiones. Para conseguirlo se crean áreas o planos que atraviesan todo el modelo alrededor de cada uno de los bordes de los elementos presentes en el modelo.

En la Figura 37a se muestra un ejemplo de las discretizaciones que se deben hacer al modelo a causa de la geometría de la viga, en la cual se generan cuatro

(4) áreas que atraviesen cualquier geometría en su trayecto, en la Figura 37b, se muestra la geometría de la viga antes y después de ser discretizadas; y en la Figura 37c se muestran las geometrías de todo el modelo discretizado únicamente con las áreas a causa de la geometría de las secciones.

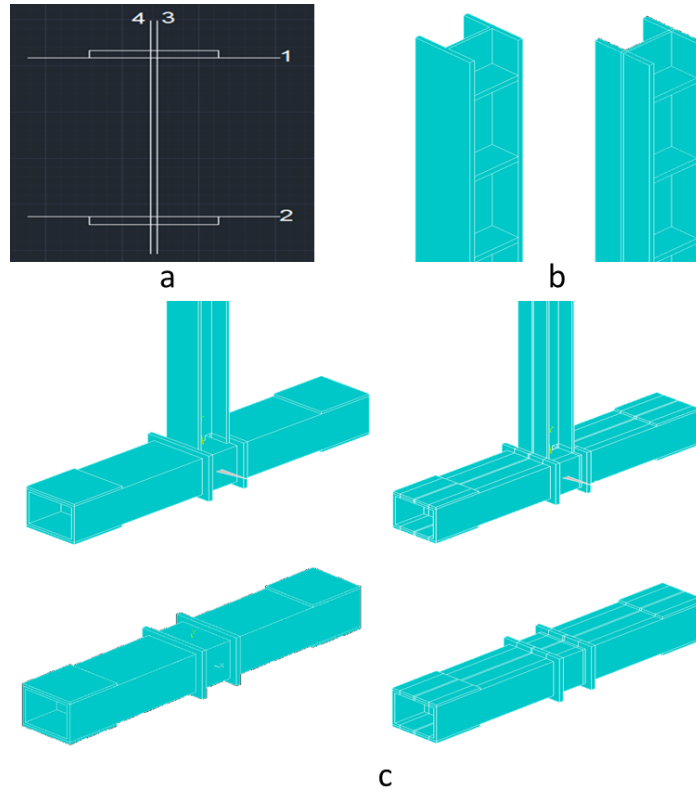


Figura 37 – Discretización de la geometría a) Discretización de una viga, b) viga antes y después de ser discretizadas, y, c) discretización de las áreas de la conexión a causa de la geometría de las secciones.

En la Figura 38 se muestra la geometría completa del modelo de la conexión discretizado.

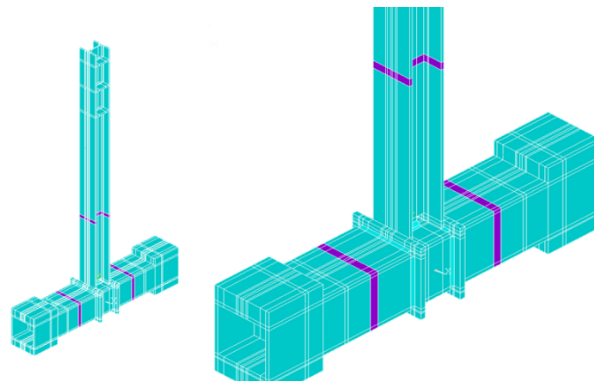


Figura 38 – Geometría discretizada de la conexión

Luego de este proceso de discretización, se deben generar grupos para cada geometría (viga, columna, placas de continuidad, apoyos, rigidizadores y soldaduras) y utilizar la herramienta pegado *glue* para que cada grupo se comporte como un elemento independiente. Posteriormente se asigna el material a cada grupo o elemento y finalmente se define el tamaño del elemento finito y se procede a enmallar automáticamente con la herramienta *mesh tool*. En la Figura 39, se muestra la geometría del modelo enmallado. La herramienta de pegado *glue*, también se utilizó entre las superficies de la soldadura y las geometrías adyacentes a las mismas.

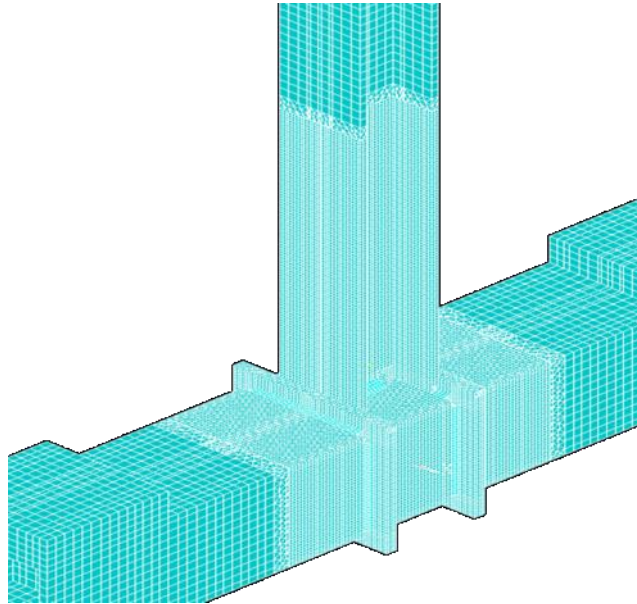


Figura 39 – Modelo de conexión discretizado y enmallado

En la zona protegida se utilizó una longitud de elementos finitos de 0.004 (4 mm) y en la zona elástica se usó 0.012 (12 mm).

Para verificar la calidad del enmallado se utilizaron herramientas del ANSYS APDL para evidenciar los parámetros más influyentes en la calidad de la malla, lo cual nos mostró que solo un total de 0.03% de elementos incumplen algunas relaciones de aspecto, como se muestra en la Figura 40.

SUMMARIZE SHAPE TESTING FOR ALL SELECTED ELEMENTS

SHAPE TESTING SUMMARY FOR ALL SELECTED ELEMENTS				
Element count	90844 SOLID185			
	8198 SOLID186			
Total	99042			
Test	Number tested	Warning count	Error count	Warn+Err %
Aspect Ratio	99042	0	0	0.00 %
Parallel Deviation	92404	28	0	0.03 %
Maximum Angle	99042	0	0	0.00 %
Jacobian Ratio	99042	0	0	0.00 %
Warping Factor	92404	0	0	0.00 %
Any	99042	28	0	0.03 %

Figura 40 – Porcentaje de errores en el enmallado de la conexión

3.6 Aplicar Cargas y Condiciones de contorno

Con el fin de simular de la manera más acertada la aplicación de la carga sobre el extremo de la viga se utilizó la herramienta “*Coupling/Ceqn → Couple Dofs*”, la cual genera un acoplamiento nodal, que obliga a un grupo de nodos a asumir el mismo desplazamiento en uno o más sentidos, generando así el mismo desplazamiento en dirección X, Y o Z del grupo de nodos especificados. En el caso de estudio, se asociaron todos los grados de libertad de los nodos en el eje Z en la zona de aplicación de la carga, de modo que todos los modelamientos eran desarrollados a partir de la aplicación de desplazamientos controlados.

Como se muestra en los planos de medidas de la Imagen 1, la placa usada para el acoplamiento del actuador dinámico tiene unas dimensiones de 40x20cm, sin embargo, la MTS presenta una rótula en su extremo de aplicación de carga, la cual era imposible por cuestiones técnicas restringir en ambos sentidos, razón por la cual el acoplamiento nodal no se aplicó sobre la longitud total de la placa, sino únicamente en una región que comprendía el mismo espesor de la placa de continuidad o rigidizador en la viga (3/8 in o 9.56mm), el cual estaba justo en el centro de aplicación de carga del actuador dinámico, garantizando así una mejor

simulación del desplazamiento del extremo de la viga respecto al presentado en el ensayo experimental, como se muestra en la Imagen 1.

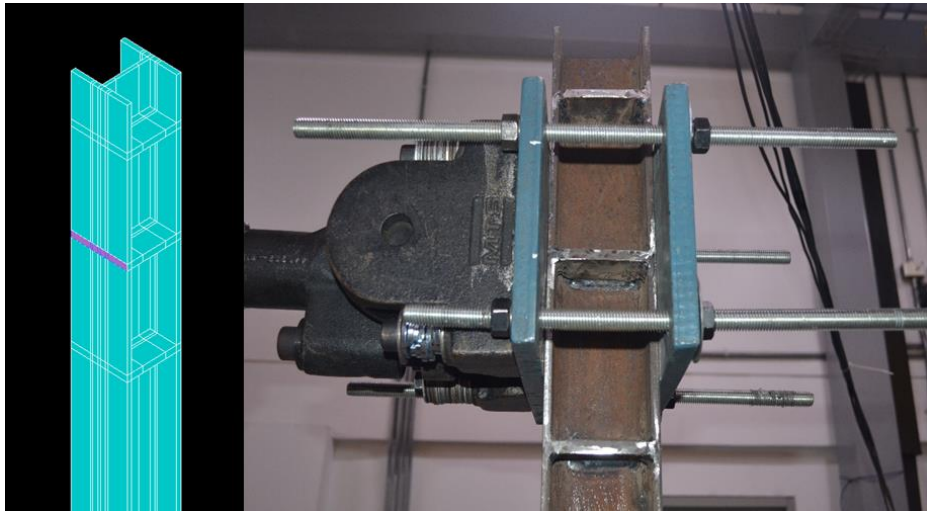


Imagen 1. Punto de aplicación de carga sobre la viga, rotula en el extremo del punto de apoyo del actuador

La aplicación de las condiciones de contorno se hizo teniendo en cuenta el esquema mostrado en la Figura 41.

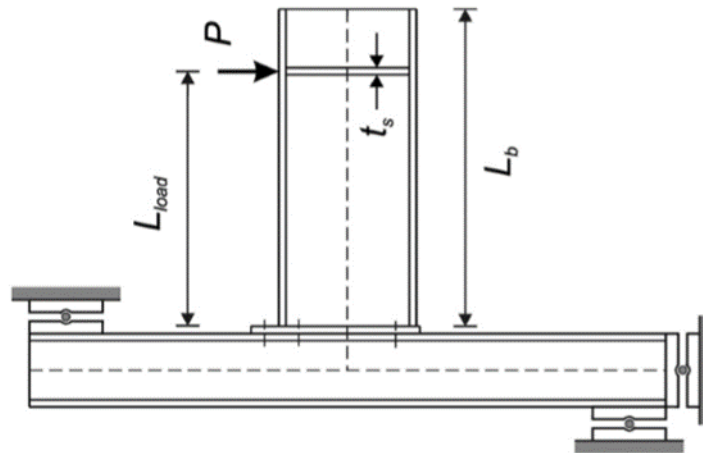


Figura 41 – Condiciones de contorno – Tomado de (Díaz, Victoria, Marti, & Querin, 2011)

Con el fin de reproducir las condiciones de contorno del ensayo, se añadieron cuatro (4) placas de espesor igual a 4 cm cada una en la parte superior e inferior de cada extremo de la columna, con el fin de simular el apoyo que se utilizó en el ensayo experimental, tales placas de continuidad se caracterizaron como un material de rigidez muy alta con el fin de garantizar que no se generen

deformaciones considerables es las mismas que puedan llegar a afectar el resultado del modelo experimental.

Adicionalmente se agregaron restricciones laterales en las áreas a cada extremo de la columna de la siguiente forma: en ambas áreas se aplicaron restricciones en el eje X, de modo que no se generen efectos torsionales sobre el perfil, también se agregó una restricción en el eje Z a las áreas de un solo extremo de la columna con el fin de que no se generen desplazamientos de la conexión en el sentido de la aplicación de la carga, tal como se indica en el apoyo derecho del esquema de la Imagen 2.

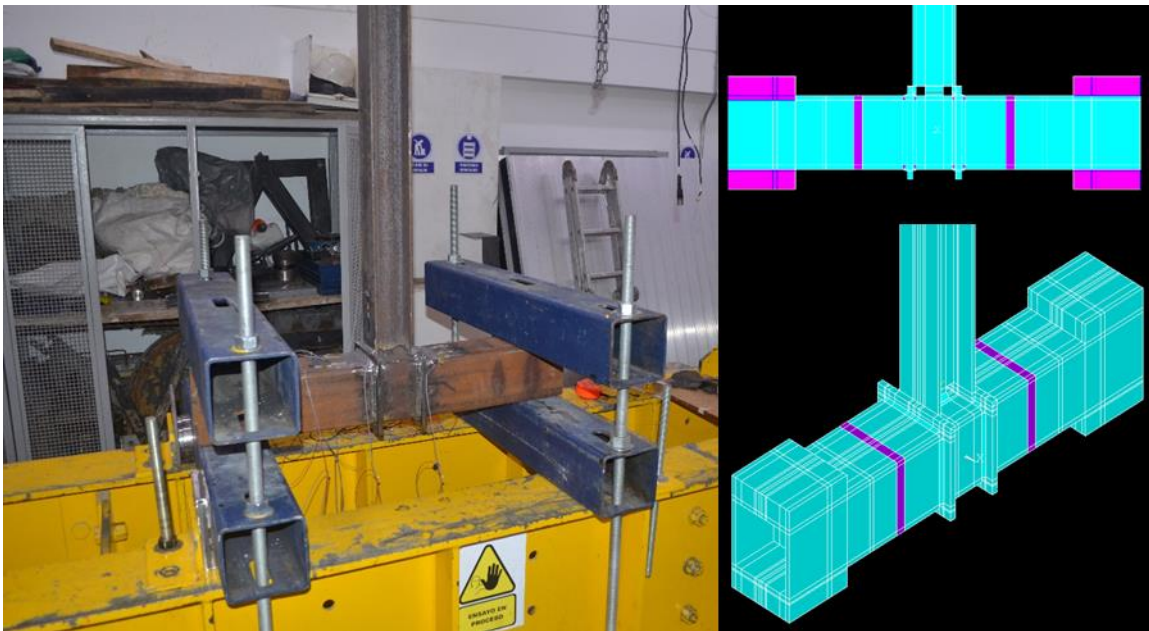


Imagen 2. Restricciones aplicadas en tanto en el ensayo experimental, como en el modelo

La Imagen 2 muestra las condiciones de contorno sobre la conexión real (izquierda) y en el modelamiento numérico (derecha), en la cual se observa seleccionado en color fucsia los apoyos utilizados para simular el efecto de la restricción en el eje Y, generada por los perfiles tubulares azules en los apoyos (izquierda).

La Figura 42 muestra las áreas seleccionadas en los extremos de la columna a los cuales se le aplicaron restricciones en el eje X y Z indicadas anteriormente.

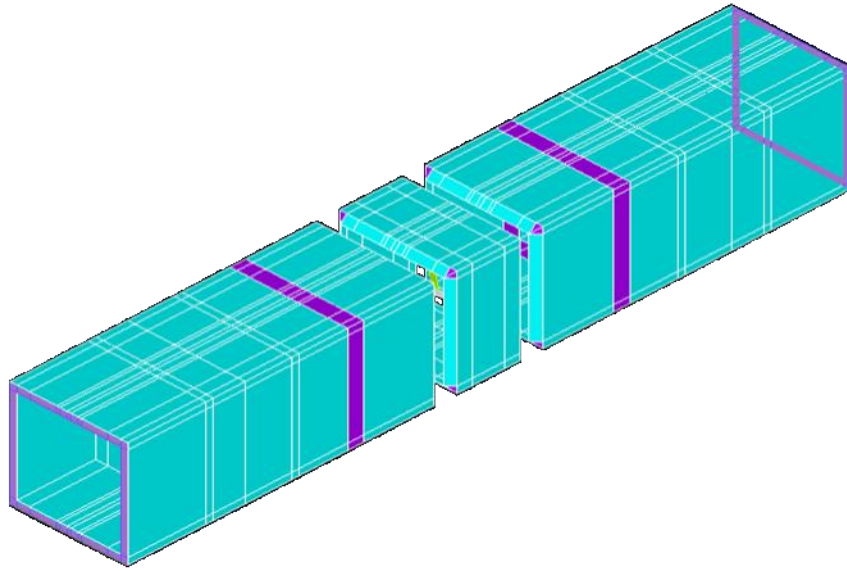


Figura 42 – Restricciones laterales en X y Z

Para la aplicación de la carga se utilizó el entorno de análisis dinámico transitorio en el cual se definió el protocolo de carga descrito en la sección 4.6, a partir de la unión de varias funciones sinusoidales. De esta forma se definieron doce (12) pasos de carga, un (1) paso o función para cada amplitud indicada en la norma, hasta llegar a los 380 segundos, siendo este el tiempo máximo al que se llegó en el ensayo.

Cada paso de carga es una función que depende del tiempo, la cual a su vez requiere la definición de ciertos parámetros: periodo (T), duración de cada paso de carga (t) y amplitud máxima de cada paso (A).

Para la selección del periodo T se tuvo en cuenta las pruebas realizadas por Carolina Andrade García en su tesis de Maestría titulada: “Calificación de conexiones de perfiles I de acero - viga conectada al eje débil de la columna”, en la cual se usó un periodo muy cercano a los 10 segundos.

$$w = 2 * \pi / T$$

$$F(t) = A * \sin(w * t)$$

$$F(t) = [L_B * \tan(\theta)] * \sin\left(\frac{1}{T} * t\right)$$

Donde:

A: Amplitud máxima da cada paso de carga.

L_B : Longitud desde el eje de la columna hasta el punto de aplicación de carga.

t: Tiempo

T: Periodo.

w: Frecuencia.

θ : Rotación de cada paso de carga indicada en el protocolo del NSR-10.

Se definieron en el programa doce (12) funciones de carga como se muestra a continuación:

```
Load_1-->(5.044/1000)*seno((2*pi()/10)*Tiempo)
Load_2-->(6.725/1000)*seno((2*pi()/10)*Tiempo)
Load_3-->(10.088/1000)*seno((2*pi()/10)*Tiempo)
Load_4-->(13.450/1000)*seno((2*pi()/10)*Tiempo)
Load_5-->(20.177/1000)*seno((2*pi()/10)*Tiempo)
Load_6-->(26.904/1000)*seno((2*pi()/10)*Tiempo)
Load_7-->(40.362/1000)*seno((2*pi()/10)*Tiempo)
Load_8-->(53.829/1000)*seno((2*pi()/10)*Tiempo)
Load_9-->(67.306/1000)*seno((2*pi()/10)*Tiempo)
Load_10-->(80.797/1000)*seno((2*pi()/10)*Tiempo)
Load_11-->(94.304/1000)*seno((2*pi()/10)*Tiempo)
Load_12-->(107.830/1000)*seno((2*pi()/10)*Tiempo)
```

Figura 43 – Pasos de carga definidos en el programa Ansys APDL

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1 Laboratorios para ensayos

4.1.1 Laboratorio Universidad Nacional de Colombia. Las mediciones para los ensayos de tensión fueron realizadas en el laboratorio de ensayos mecánicos y deformación plástica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

El equipo utilizado fue la máquina Universal de ensayos marca Shimadzu modelo UHI-500kN serial I21054500170 con certificado de calibración 17-6269 del 5 de mayo de 2017 emitido por la empresa ICCLAB trazable al INM – Colombia (ver Imagen 3).



Imagen 3. Foto del montaje de una de las probetas en la máquina universal de ensayos. Imagen propia

4.1.2 Laboratorio de Estructuras Pontificia Universidad Javeriana. Las pruebas de flexión en perfiles y ensayos pseudoestáticos fueron realizados en el laboratorio de pruebas y ensayos del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana.

El ensayo se realizó sobre un pórtico metálico de acero en el cual está sujetado un actuador hidráulico de capacidad 100kN y otro de capacidad 250kN. La posición del actuador para los ensayos a flexión fue vertical (ver Imagen 4 e Imagen 5), mientras para el ensayo pseudoestático fue horizontal tal cual se muestra en la Imagen 6.



Imagen 4. Montaje del ensayo para la viga HEA100. Imagen propia



Imagen 5. Montaje del ensayo para el perfil PTE. Imagen propia



Imagen 6. Montaje del ensayo para la conexión. Imagen propia

4.2 Materiales

Los materiales usados para los experimentos describen la Tabla 2:

	Perfil HEA100	Perfil PTE	Soldadura E7010
Norma	ASTM 572	ASTM A500	AWS
Grado	50	C	70
F _y teórico	345MPa	425MPa	482MPa
Presentación	X 6m de longitud	X 6m de longitud	---

Tabla 2. Materiales y propiedades para los elementos usados en los ensayos. Construcción propia

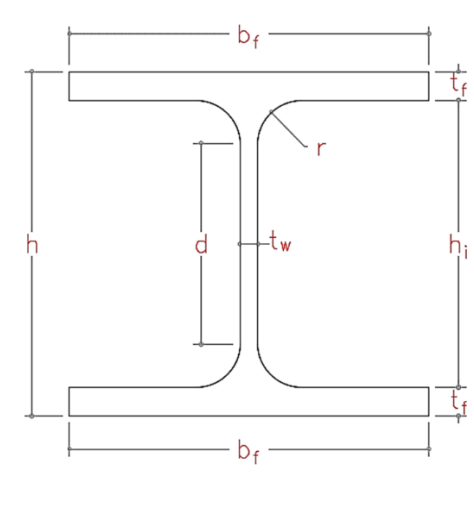
PERFIL HEA 100				
	h (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)
	96	100	8	5
	h₁ (mm)	r (mm)	d (mm)	u (mm)
	80	12	56	561
	A (cm²)	S_x (cm³)	I_x (cm⁴)	Z_x (cm³)
	21.2	72.8	349	83
	h= Altura b _f = Ancho aleta t _f = Espesor aleta t _w = Espesor alma h ₁ = Altura alma r= Radio de giro		d= Altura plana alma u= Perímetro sección A= Área S _x = Módulo elástico xx I _x = Momento de inercia xx Z _x =Módulo plástico xx	

Tabla 3. Propiedades geométricas perfil HEA100. Construcción propia

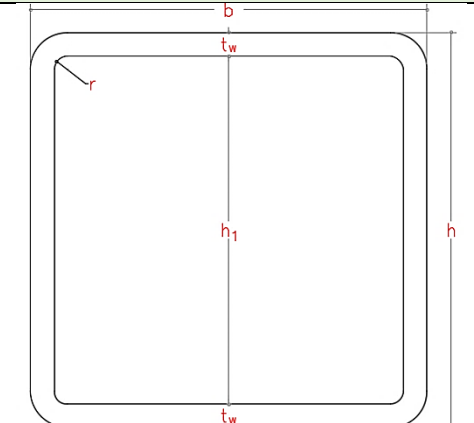
PERFIL PTE 150X150X9				
	h (mm)	b (mm)	t_w (mm)	h₁ (mm)
	150	150	9	132
	A (cm²)	I_x (cm³)		
	49	1540		
	h= Altura perfil b= Ancho perfil t _w = Espesor perfil h ₁ = Altura interior		r= Radio de giro A= Área I _x = Momento de inercia xx	

Tabla 4. Propiedades geométricas perfil PTE 150X150X9. Construcción propia

4.3 Fabricación y montaje

4.3.1 Ensayo a tensión. El ensayo a tensión fue realizado siguiendo los parámetros del *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials - E8/E8M - 16a* del *American Society for Testing and Materials*. Las probetas sometidas a este análisis se muestran a continuación en la Figura 44 y Figura 45.



Figura 44. Muestras obtenidas del mecanizado de los perfiles acorde con la norma ASTM E8. De arriba hacia abajo, Perfil PTE 9mm pieza 1, Perfil PTE 9mm pieza 2, Perfil HEA alma 5mm, Perfil HEA aleta 7.4mm. Imagen propia.



Figura 45. Muestra obtenida del mecanizado del acero dispuesto para la placa de continuidad acorde con la norma ASTM E8. Imagen propia

Los ensayos fueron controlados por desplazamiento, con una velocidad aplicada de 5mm/min. Al instante de los ensayos, la humedad relativa fue de 36% y la temperatura media de 22.2°C.

4.3.2 Ensayo a flexión

4.3.2.1 *Determinación de capacidad de los perfiles.* La capacidad elástica de los perfiles se definió a través del uso de las ecuaciones que brinda la mecánica de materiales así:

$$M_P = \frac{P_P L}{4}$$

Ecuación 6. Momento de plastificación de una viga sometida a flexión simple

$$M_P = \frac{P_P L}{6}$$

Ecuación 7. Momento de plastificación de una viga sometida a flexión pura

$$\sigma_P = \frac{M_P c}{I_{xx}}$$

Ecuación 8. Esfuerzo de plastificación teórico de una viga

Donde:

M_P = Momento de plastificación del perfil.

P_P = Carga de plastificación del perfil.

L = Longitud del perfil ensayado.

C = Distancia al eje neutro

I_{xx} = Inercia del perfil respecto al eje x.

Tomando como referencia las ecuaciones anteriores, se determinó el esfuerzo de fluencia de los perfiles y esfuerzo último teórico así:

4.3.2.1.1 Perfil HEA 100

	Límite de plastificación F_y	Resistencia a la tracción- UTS
Esfuerzo σ	359 [MPa]*	471[MPa]*
Carga P	43.55 [kN]	85.27[kN]
Deflexión	27.98 [mm]	-

Tabla 5. Determinación de fuerzas y deflexiones máximas esperadas en los límites elástico y UTS para el perfil HEA. Construcción propia

*Obtenido de los ensayos a la tracción descritos en la sección 4 de este documento

4.3.2.1.2 Perfil PTE

	Límite de plastificación F_y	Resistencia a la tracción- UTS
Esfuerzo σ	442 [MPa]*	580[MPa]*
Carga P	101.02 [kN]	132.3 [kN]
Deflexión	49.9[mm]	-

Tabla 6. Determinación de fuerzas y deflexiones máximas esperadas en los límites elástico y UTS para el perfil PTE. Construcción propia

*Obtenido de los ensayos a la tracción descritos en la sección 3 de este documento

4.3.2.2 Montaje perfil HEA100. El ensayo a flexión para el perfil HEA100 se realizó bajo el siguiente montaje:

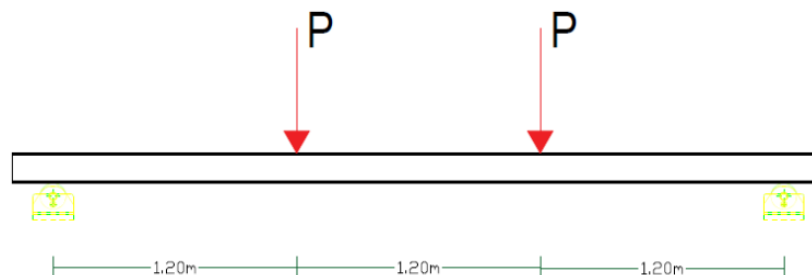


Figura 46. Representación geométrica para ensayo de flexión de perfil HEA100. Construcción propia

Para aplicar la carga al tercio y dos tercios de los perfiles, se requirió del uso de un aparejo metálico, cuya distancia de aplicación de carga es de 1.20m (Ver Imagen 7 y Figura 53. Aplicador de carga doble para simular ensayo a flexión pura. Construcción propia). Una vez realizado el montaje se procedió a la aplicación de las cargas según el protocolo de carga definido para este ensayo. El actuador requerido según el protocolo de carga establecido fue el de capacidad máxima de 100kN

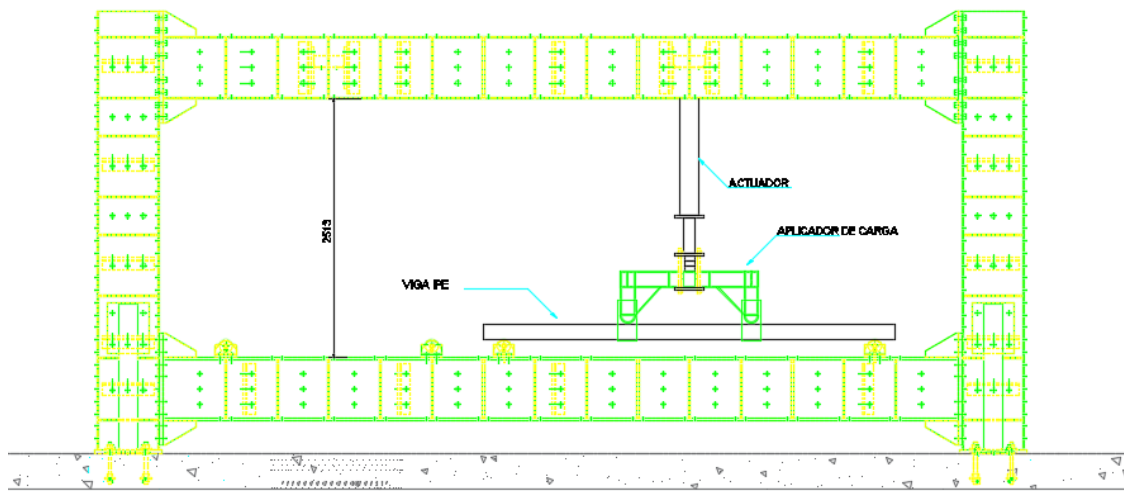


Figura 47. Plano de montaje de actuador para ensayo a flexión viga HEA – Plano de pórtico tomado de Estahl Ingeniería con modificaciones propias

4.3.2.3 Montaje perfil PTE. El ensayo a flexión para el perfil PTE se realizó bajo el montaje mostrado en la Figura 48:

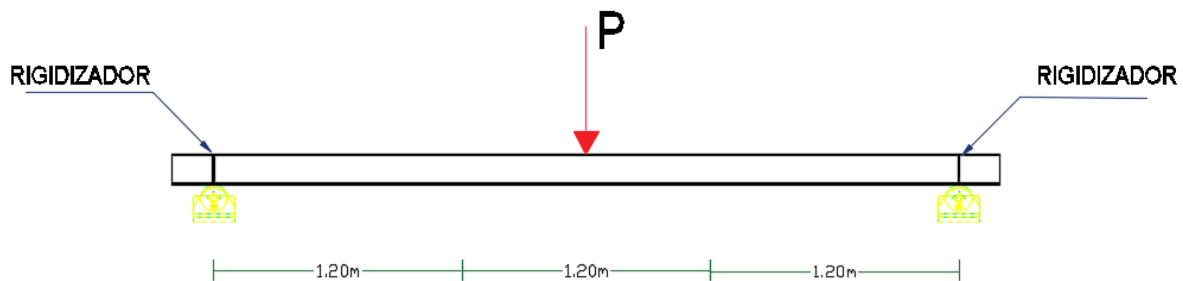


Figura 48. Representación geométrica para ensayo de flexión en perfil PTE. Construcción propia

Para aplicar la carga al centro de la luz, se requirió de un apoyo adherido al actuador (Ver Imagen 8 y Figura 54). Una vez realizado el montaje se procedió a la aplicación de las cargas según el protocolo de carga definido para este ensayo. El actuador requerido según el protocolo de carga establecido fue el de capacidad máxima de 250kN.

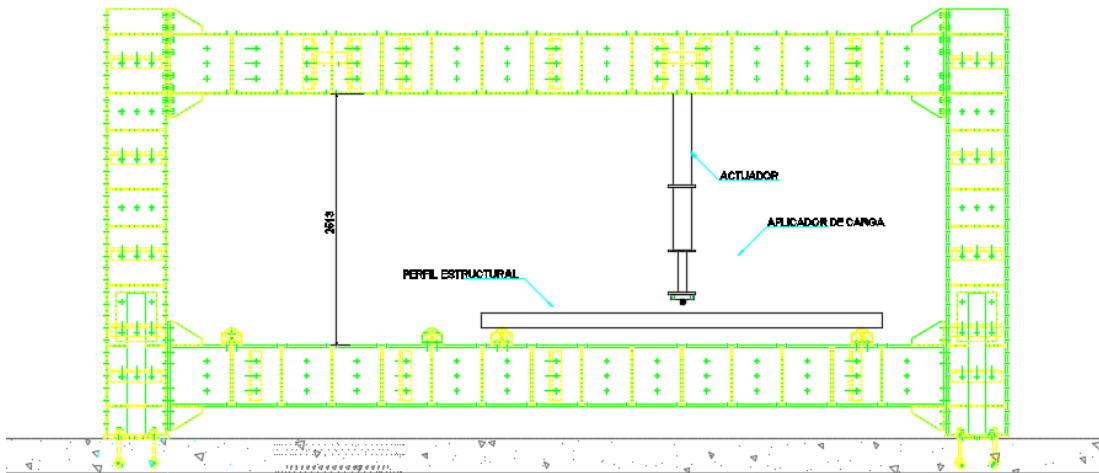


Figura 49. Plano de montaje de actuador para ensayo a flexión PTE– Plano de pórtico tomado de Estahl Ingeniería con modificaciones propias

4.3.3 Ensayo Conexión

4.3.3.1 *Diseño soldadura.* Para el diseño de la soldadura se tuvieron en cuenta las solicitaciones de rotación, desplazamiento, carga y momento provenientes del protocolo de carga, descrito en la sección 4.6 de este documento, además de la teoría de cálculo y requerimientos para soldaduras estructurales según el American Welding Society – AWS, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 341-16, Specifications for Structural Steel Buildings ANSI-AISC 360-16 y Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. A continuación, en la Tabla 7, se describen las dimensiones obtenidas para los cordones de soldadura.

Resumen Dimensiones de las Soldaduras		
Soldadura 1 (Placa-Columna)		
w	0,9525	cm
L(soldadura)	12,46	cm
θ (biselado)	45	Grados
Soldadura 2 (Placa-Parte externa aletas Viga)		
w	1,11125	cm
L(soldadura)	10	cm
θ (biselado)	45	Grados
Soldadura 3 (Columna-Parte Interna aletas Viga)		
w	0,635	cm
L(soldadura)	4,75	cm
θ (biselado)	-----	Grados
Soldadura 4 (Alma viga-Columna)		
w	0,4	cm
L(Soldadura)	6,73	cm
θ (biselado)	-----	Grados

Tabla 7. Resumen de las dimensiones obtenidas para el cordón de soldadura en diferentes uniones en el vínculo viga – columna – Construcción Propia

Para planos y detalles de soldadura en la conexión, referirse al anexo A.

4.3.3.2 Montaje. Para este montaje, se requirió de dos placas a cada extremo de la viga para poder aplicar las cargas cíclicas durante todo el ensayo.

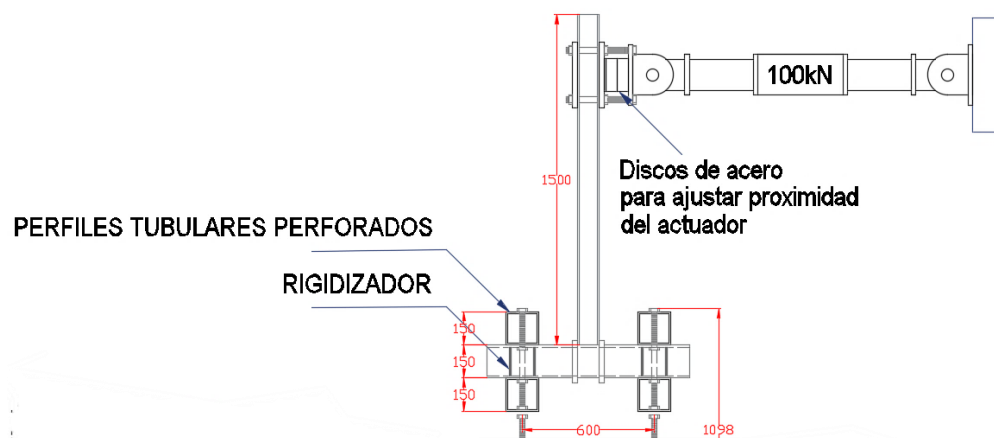


Figura 50 – Imagen de aplicador de carga en viga perfil HEA100. Construcción propia

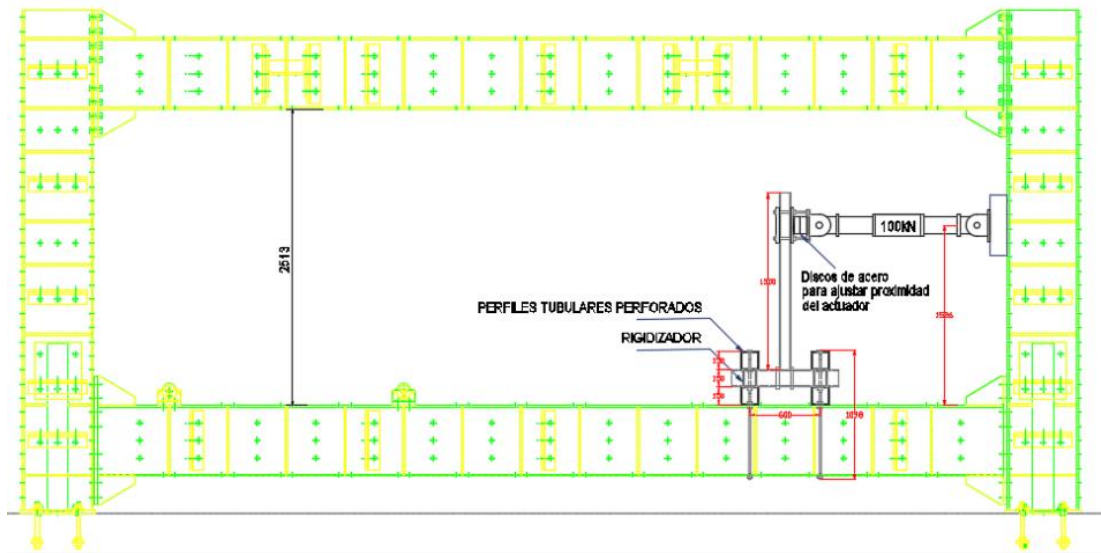


Figura 51 - Plano de montaje de actuador para ensayo de la conexión– Plano de pórtico tomado de Estahl Ingeniería con modificaciones propias

4.4 Elementos de apoyo

Los elementos de apoyo en acero, usados para los perfiles se muestran a continuación:

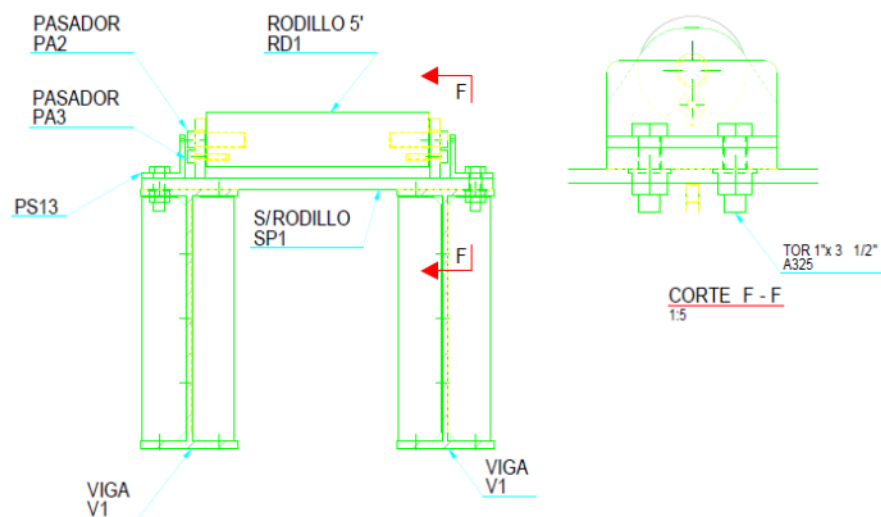


Figura 52 – Elementos de apoyo para ensayos – Fuente Planos de diseño Estahl Ingeniería

4.5 Elementos de Carga

Los elementos de carga usados para los ensayos fueron dos actuadores con capacidades distintas según el elemento a ensayar.

Como elemento de carga para el perfil HEA se requirió de un actuador hidráulico de 100kN de capacidad, con el cual se aplicó cargas a los tercios a través de un aparejo metálico (Imagen 7 y Figura 53), con el fin de simular un ensayo a flexión pura. Este aparejo debió ser sujetado de una extensión fabricada en acero de 1.5" de espesor, para garantizar que la deflexión obtenida producto de la máxima carga aplicada según el protocolo de carga no superara la extensión máxima del brazo hidráulico del actuador.

Por su parte, para el perfil PTE se requirió de un actuador hidráulico de 250kN de capacidad con el cual se simuló un ensayo a flexión simple. El punto de aplicación de la carga contenía una placa de 2" de espesor soldada a un tubo macizo, el cual aplicó una carga puntual sobre el elemento. Para evitar daños locales en el perfil, se colocó en el punto de aplicación, una placa de 1" de espesor, la cual fue incluida en la modelación (ver Imagen 8 y Figura 54).



Imagen 7. Actuador hidráulico de 100kN de capacidad junto con el aplicador de carga a los tercios de la luz de la viga para simular ensayo a flexión pura. Imagen propia

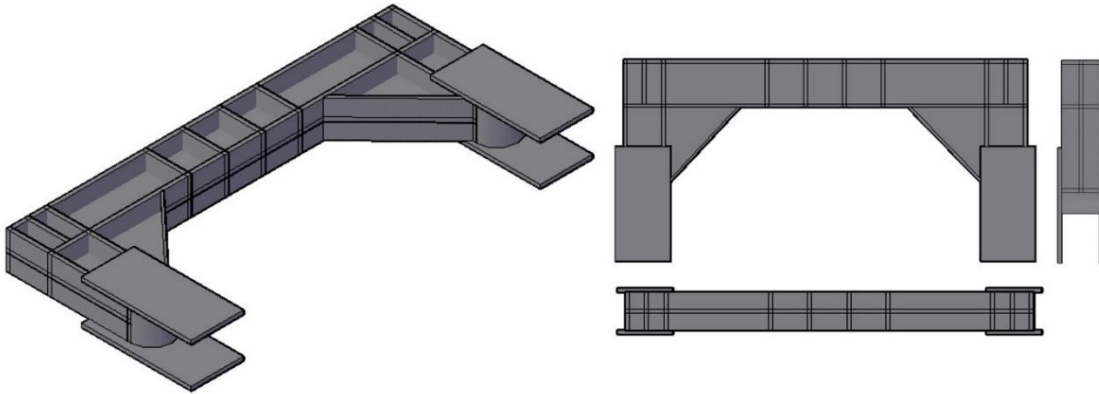


Figura 53. Aplicador de carga doble para simular ensayo a flexión pura. Construcción propia



Imagen 8. Actuador de 250kN dispuesto para ensayo de PTE. Imagen propia

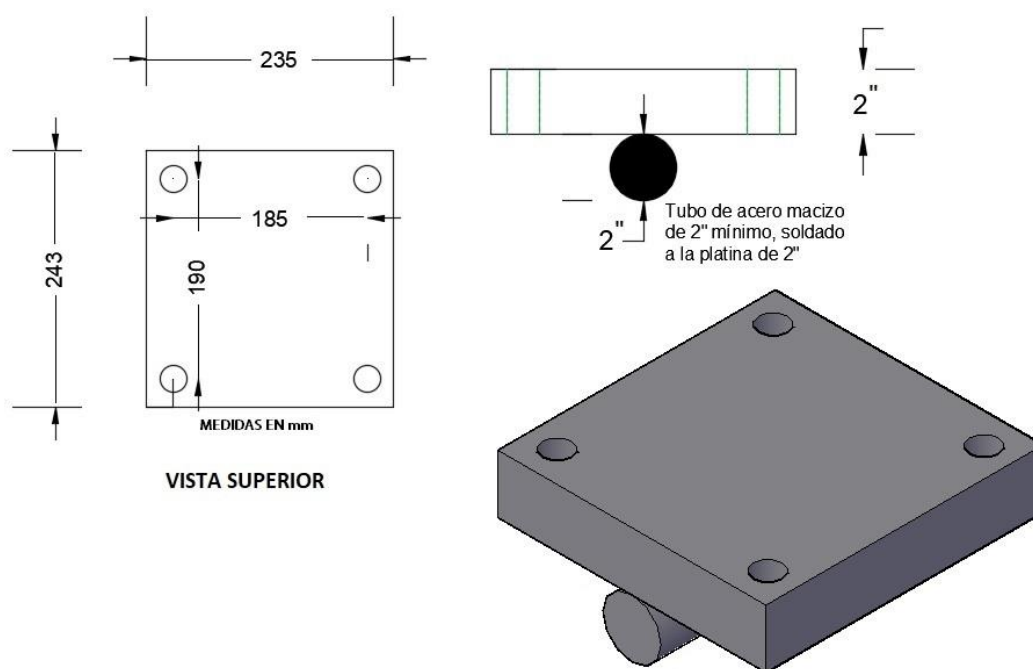


Figura 54. Elemento de aplicación de carga sobre el perfil PTE. Construcción propia

4.6 Protocolo de carga

Los protocolos se definieron para ser controlados por carga y deformación en diferentes ciclos.

4.6.1 Perfil HEA100

CICLO 1			CICLO 2		
Controlar por Carga - $0,85F_y$			Controlar por deformación (en carga) $1,5\Delta y$		
Tasa Carga	20	kN/min	Y0	0	mm
P0	0	kN	Y1 ($1,5*\Delta y$)	60,8805	mm
P1	36,63	kN	Tasa deformacion	10	mm/min
Tiempo	1,8316	minutos	Tiempo	6,08805	minutos
Descarga	1	kN	Descarga	1	kN

CICLO 3			CICLO 4		
Controlar por deformación (en carga) $2\Delta y$			Controlar por deformación (en carga) - $3\Delta y$		
Y0 (Def-Pastica)		mm	Y0 (Def-Pastica)		mm
Y2 ($3*\Delta y$)	81,174	mm	Y2 ($3*\Delta y$)	121,761	mm
Tiempo	8,1174	minutos	Tiempo	12,1761	minutos
Descarga	1	kN	Descarga	1	kN
CICLO 5			CICLO 6		
Controlar por Carga - $0,5F_y$			Controlar por Carga - 52kN		
P0	0	kN	P0	0	kN
P1 ($0.5*P_y$)	21,548205	kN	P1 (Max-Cap-MTS)	52	kN
Tasa Carga	20	kN/min	Tasa de Carga	20	kN/min
Tiempo	1,07741025	minutos	Tiempo	2,6	minutos
Descarga	1	kN	Descarga	1	kN

Tabla 8. Protocolo de carga para perfil HEA100. Construcción propia

4.6.2 Perfil PTE

CICLO 1			CICLO 2		
Controlar por Carga - $0,4F_y$			Controlar por Carga - $0,65F_y$		
Tasa Carga	20	kN/min	Tasa Carga	20	kN/min
P0	0	kN	P0	0	kN
P1	40,329	kN	P1	65,535	kN
Tiempo	2,0165	minutos	Tiempo	3,2768	minutos
Descarga	1	kN	Descarga	1	kN
CICLO 3			CICLO 4		
Controlar por Carga $0,85F_y$			Controlar por deformación (en carga) $1,5\Delta y$		
Tasa Carga	20	kN/min	Y0	0	mm
P0	0	kN	Y1 ($1.5*\Delta y$)	47,024346	mm
P1	85,700	kN	Tasa deformación	10	mm/min
Tiempo	4,2850	minutos	Tiempo	4,7024346	minutos
Descarga	1	kN	Descarga	1	kN
CICLO 5			CICLO 6		
Controlar por deformación (en carga) - $2\Delta y$			Controlar por deformación (en carga) - $3\Delta y$		
Y0 (Def-Pastica)		mm	Y0 (Def-Pastica)		mm
Y2 ($2*\Delta y$)	62,699128	mm	Y2 ($3*\Delta y$)	94,0486921	mm
Tiempo	6,2699128	minutos	Tiempo	9,40486921	minutos
Descarga	1	kN	Descarga	1	kN

CICLO 7			CICLO 8		
Controlar por Carga - 0,5Fy			Controlar por deformación (en carga) - 4Δy		
Tasa Carga	20	kN/min	Y0 (Def-Pastica)		mm
P0	0	kN	Y2 (4*Δy)	125,398256	mm
P1	50,41	kN			
Tiempo	2,5206	minutos	Tiempo	12,5398256	minutos
Descarga	1	kN	Descarga	1	kN
CICLO 9			CICLO 10		
Controlar por Carga - 5Δy			Controlar por Carga - 0,5Fy		
Y0 (Def-Pastica)		mm	Tasa Carga	20	kN/min
Y2 (5*Δy)	156,74782	mm	P0	0	kN
			P1	50,41	kN
Tiempo	15,674782	minutos	Tiempo	2,5206	minutos
Descarga	1	kN	Descarga	1	kN

Tabla 9. Protocolo de carga para perfil PTE. Construcción propia

4.6.3 Conexión

N° Ciclos	Rotación (rad)	Desplazamiento (mm)	Tiempo/ciclo (seg)	Tiempo Acumulado (seg)
6	0,00375	5,0	60	60
6	0,005	6,7	60	120
6	0,0075	10,1	60	180
4	0,01	13,5	40	220
2	0,015	20,2	20	240
2	0,02	26,9	20	260
2	0,03	40,4	20	280
2	0,04	53,8	20	300
2	0,05	67,3	20	320
2	0,06	80,8	20	340
2	0,07	94,3	20	360

Tabla 10.. Protocolo de carga para el ensayo de la conexión. Construcción propia

Protocolo de Carga

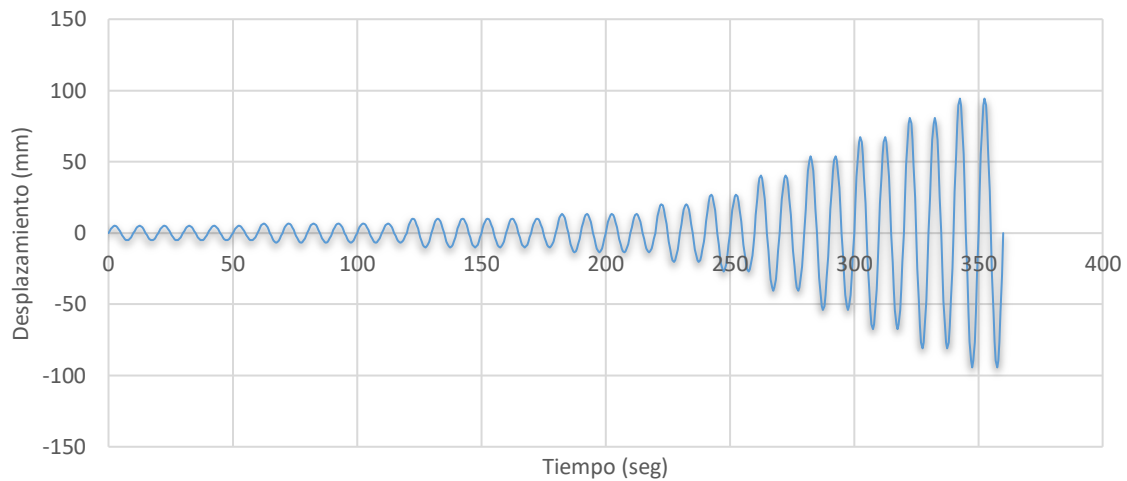


Figura 55. Protocolo de carga para el ensayo de la conexión. Construcción propia

El protocolo de carga descrito en la Figura 55, sigue los lineamientos del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR -10, capítulo F.3.11.2.5.2, el cual establece la secuencia de carga para conexiones viga-columna resistentes a momento, la cual se lleva a cabo a través del control del ángulo de deriva θ , de acuerdo con la descripción de la Tabla 11.

- (1) 6 ciclos a $\theta = 0.00375$ rad
- (2) 6 ciclos a $\theta = 0.005$ rad
- (3) 6 ciclos a $\theta = 0.0075$ rad
- (4) 4 ciclos a $\theta = 0.01$ rad
- (5) 2 ciclos a $\theta = 0.015$ rad
- (6) 2 ciclos a $\theta = 0.02$ rad
- (7) 2 ciclos a $\theta = 0.03$ rad
- (8) 2 ciclos a $\theta = 0.04$ rad

Continuar cargando a incrementos de $\theta = 0.01$ rad, con dos ciclos de carga en cada paso

Tabla 11. Secuencia de carga para conexiones viga-columna resistentes a momento. Datos tomados de la NSR-10. Construcción propia

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Curva esfuerzo – deformación del material

Para obtener las propiedades de los perfiles HEA100, PTE y placa de continuidad, se realizaron pruebas de tracción sobre probetas de extraídas tanto del alma como del patín para la HEA; en el caso del PTE, se extrajeron dos muestras de dos paredes diferentes y la placa de continuidad, una muestra de la plancha. La norma de referencia para el mecanizado de las probetas y la prueba de tensión es el ASTM E8E8M denominado *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.

A continuación, en la Figura 56, Figura 57, Figura 58, Figura 59 y Figura 59, se exponen las curvas Esfuerzo vs Deformación, de los ensayos realizados sobre las probetas extraídas de los perfiles ensayados:

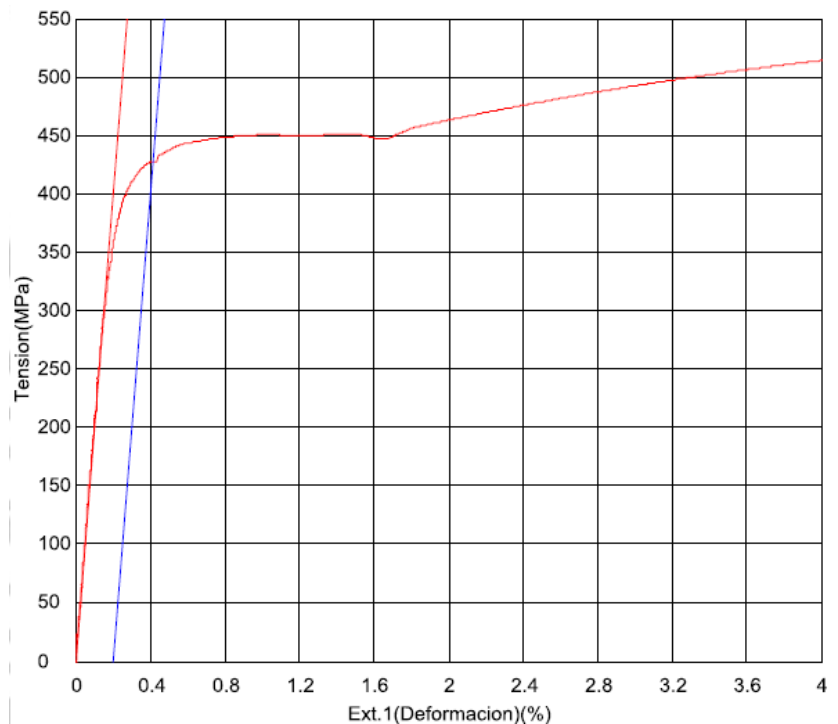


Figura 56. Curva Esfuerzo vs Deformación de la probeta PTE P1. Tomado de resultados ensayos en UNC

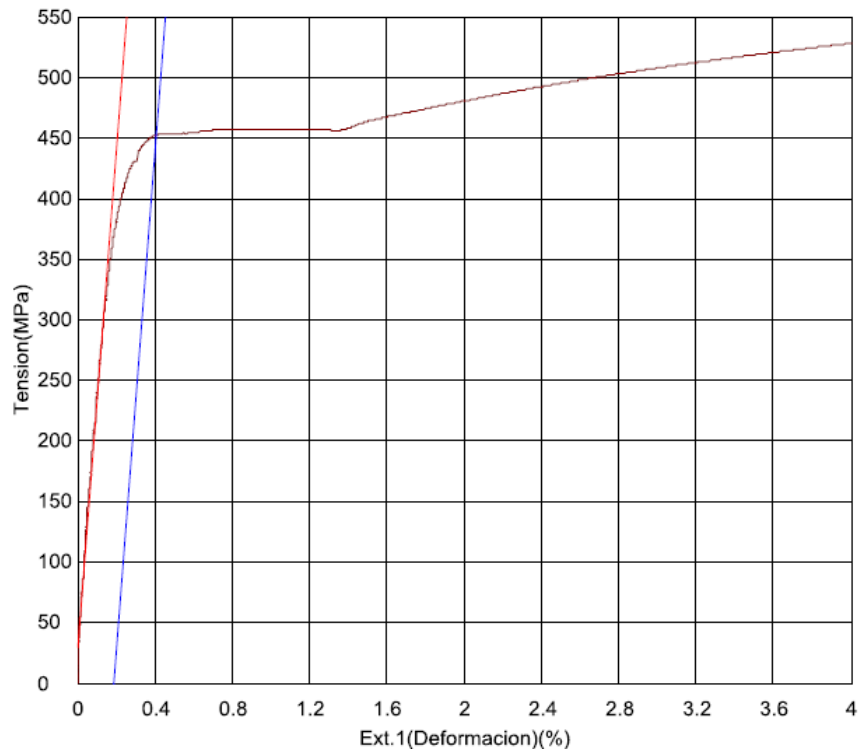


Figura 57. Curva Esfuerzo vs Deformación de la probeta PTE P2. Tomado de resultados ensayos en UNC

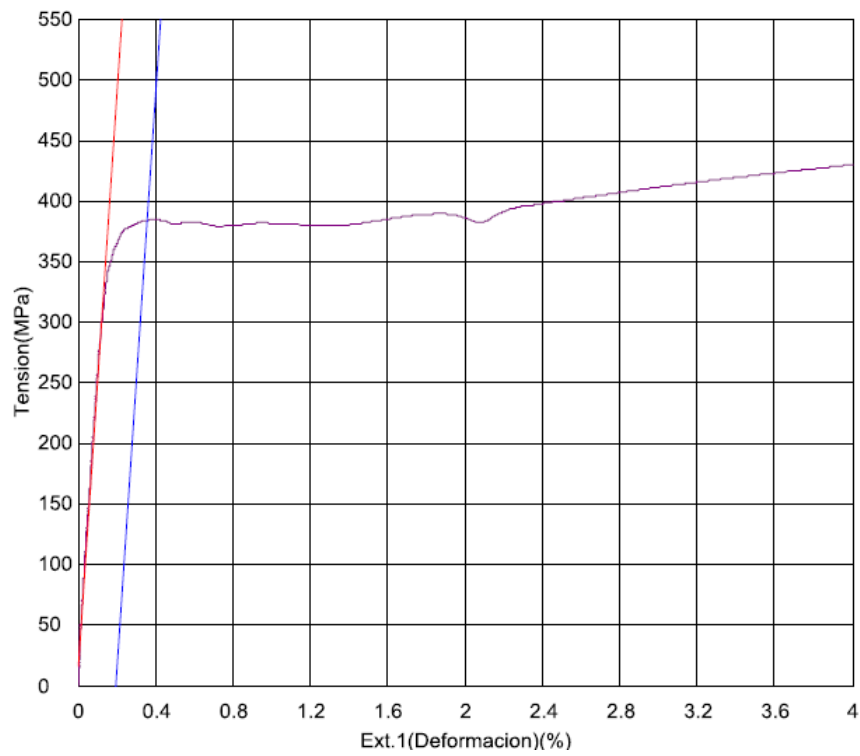


Figura 58. Curva Esfuerzo vs Deformación de la probeta HEA100 Aleta. Tomado de resultados ensayos en UNC.

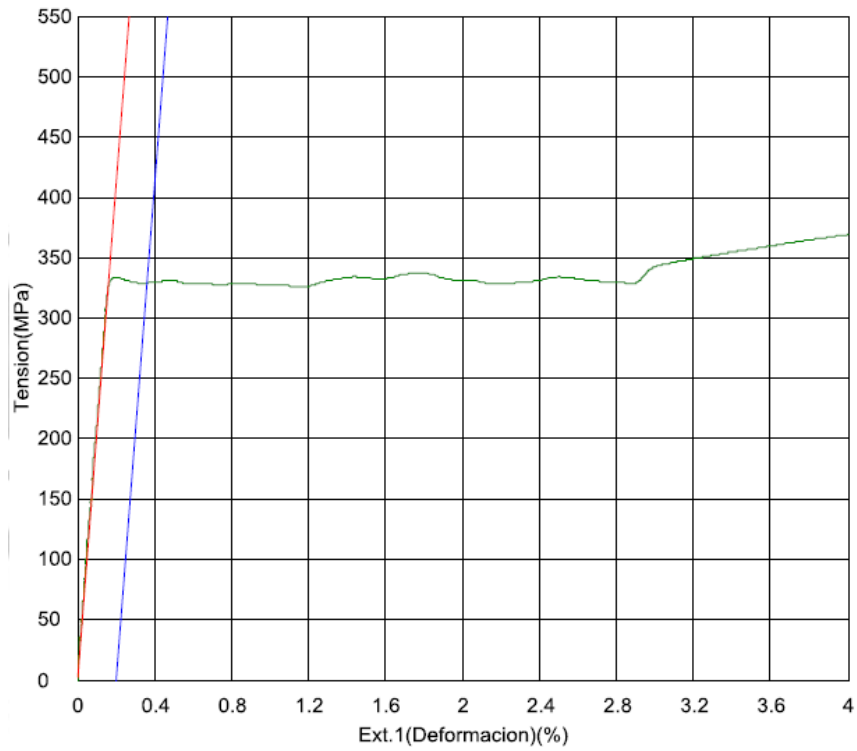


Figura 59. Curva Esfuerzo vs Deformación de la probeta HEA100 Alma. Tomado de resultados ensayos en UNC.

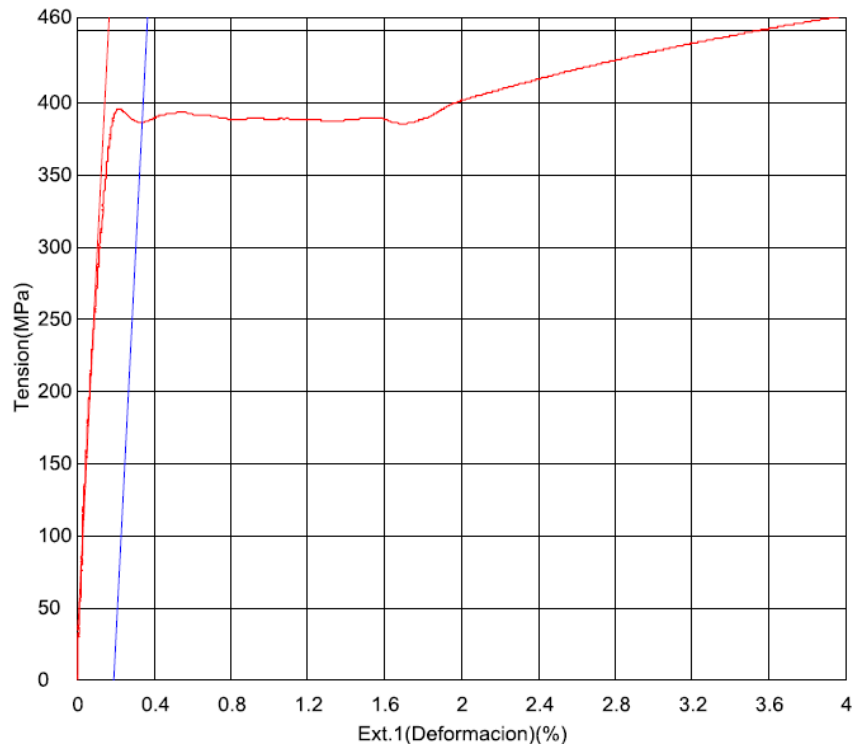


Figura 60. Curva Esfuerzo vs Deformación de la probeta Placa de Continuidad. Tomado de resultados ensayos en UNC.

El resumen de los resultados obtenidos se muestra en la Tabla 12:

Muestra	Esfuerzo de Fluencia F_y [MPa]	Esfuerzo Máximo F_u [MPa]	Módulo de Elasticidad [MPa]
Probeta PTE 9mm P1	429.5	576.76	199935
Probeta PTE 9mm P1	454.34	583.52	206045
Probeta HEA100 Aleta	386.77	480.7	200000
Probeta HEA100 Alma	331.99	461.11	200000
Probeta Placa de continuidad	387.75	533.96	200000

Tabla 12. Resultados de esfuerzos de fluencia F_y , F_u y E (módulo de elasticidad) obtenido a partir de ensayos de tensión – Construcción propia

De esta manera se puede establecer que los esfuerzos de fluencia que se van a considerar para los modelamientos numéricos de calibración son como se describen a continuación:

Perfil	Esfuerzo de Fluencia \bar{F}_y [MPa]	Esfuerzo Máximo \bar{F}_u [MPa]	Módulo de Elasticidad \bar{E}
Perfil Tubular Estructural	442	580	202990
Perfil HEA100	359	471	200000
Placa de continuidad	388	534	200000

Tabla 13. Resultado medio para los esfuerzos y módulos de elasticidad, obtenido de los ensayos experimentales. Construcción propia

Para determinar el rango de los valores obtenidos, respecto de la norma de fabricación y ser comparados con el factor R_y y R_u se determinó lo siguiente:

Perfil	Norma de Fabricación	F_y teórico [MPa]	F_y real [MPa]	F_u teórico [MPa]	F_u real [MPa]
Perfil Tubular Estructural	ASTM A500	345	442	425	580
Perfil HEA100	ASTM A572	345	359	450	471
Placa de continuidad	ASTM A572	345	388	450	534

Tabla 14. Comparativo entre valores de F_y y F_u obtenidos, vs teóricos por norma de fabricación – construcción propia

De esta manera se puede concluir que la sobrerresistencia del acero para:

- Perfil estructural PTE fabricado bajo norma ASTM A500 es $R_y=1.28$ (rango determinado por A341-16, 1.3) y $R_t=1.36$ (rango determinado por A341-16, 1.2)
- Perfil HEA100 fabricado bajo norma ASTM A572 es $R_y=1.04$ (rango determinado por A341-16, 1.1) y $R_t=1.05$ (rango determinado por A341-16, 1.2)

5.2 Ensayos de Flexión

5.2.1 HEA100

El perfil HEA100, sometido a un ensayo de flexión pura, es decir a dos puntos de aplicación de carga, a cada 1/3 de longitud de la viga, tal y como se mostró en la sección 4.3.2.2, el cual arrojó el siguiente comportamiento visto en la curva fuerza – desplazamiento, para desplazamientos medidos en el punto de aplicación de carga (ver Figura 61):

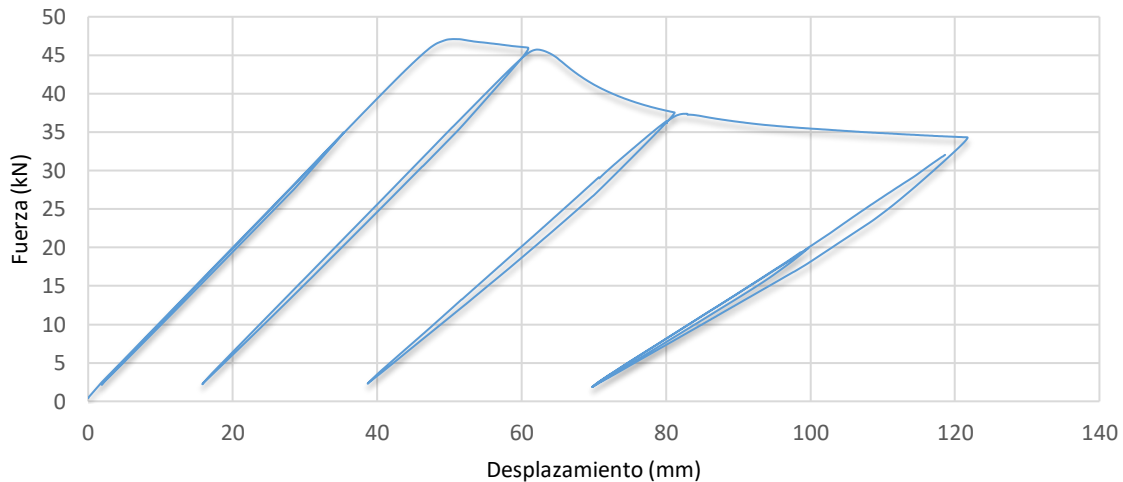


Figura 61. Curva Fuerza – Desplazamientos obtenidos en el punto de aplicación de carga perfil HEA100. Construcción propia

5.2.2 PTE

El perfil PTE, sometido a un ensayo de flexión simple, es decir un único punto de aplicación de carga, al centro de la longitud de la viga, tal y como se mostró en la sección 4.3.2.3, el cual arrojó el siguiente comportamiento visto en la curva fuerza – desplazamiento, para desplazamientos medidos en el punto de aplicación de carga (ver Figura 62):

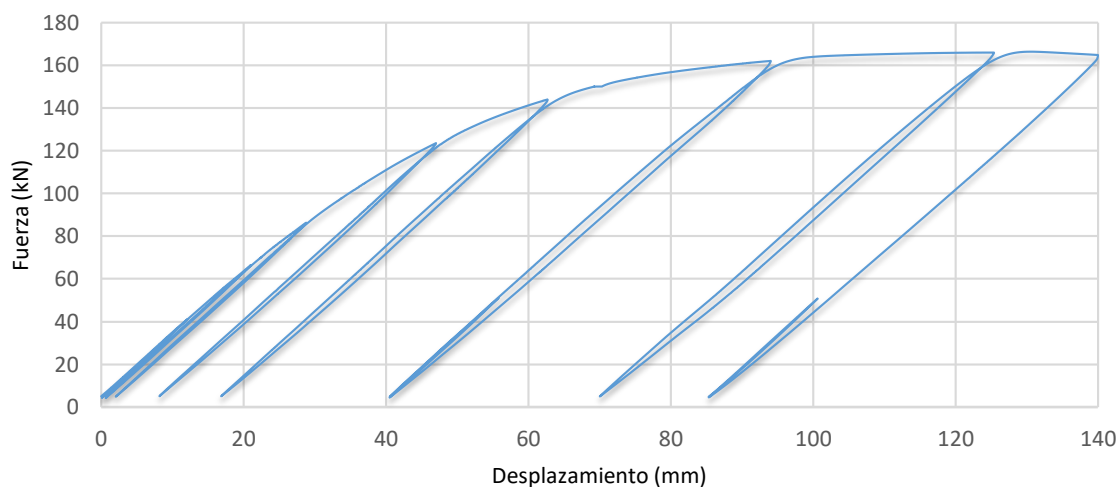


Figura 62. Curva Fuerza – Desplazamiento perfil PTE. Construcción propia

5.2.3 Conexión

La conexión fue sometida al protocolo de carga descrito en la sección 4.6.3 y según el montaje mostrado en la sección 4.3.3.2.

La Figura 63 muestra el desplazamiento vs tiempo de la conexión, tomado a una distancia de 243mm, punto en cual se instaló un LVDT para medir el desplazamiento de la viga. Por su parte, la Figura 64, muestra el desplazamiento vs

tiempo, de la conexión medido en la columna (PTE) a una distancia de 35.5mm de la cara del perfil HEA100.

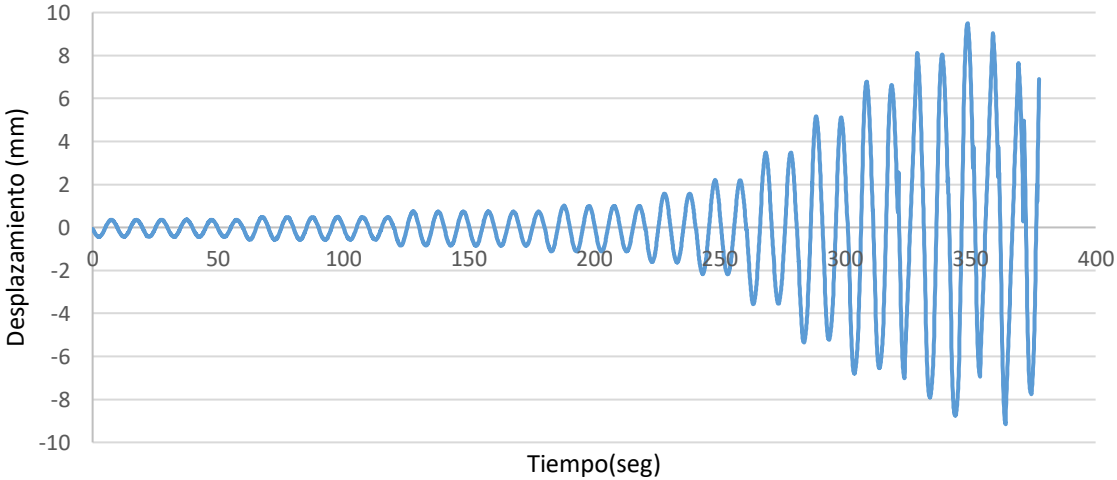


Figura 63. Gráfica Desplazamiento – Tiempo de la conexión medido en la viga a una distancia de 243mm de la cara de la columna (PTE). Construcción propia

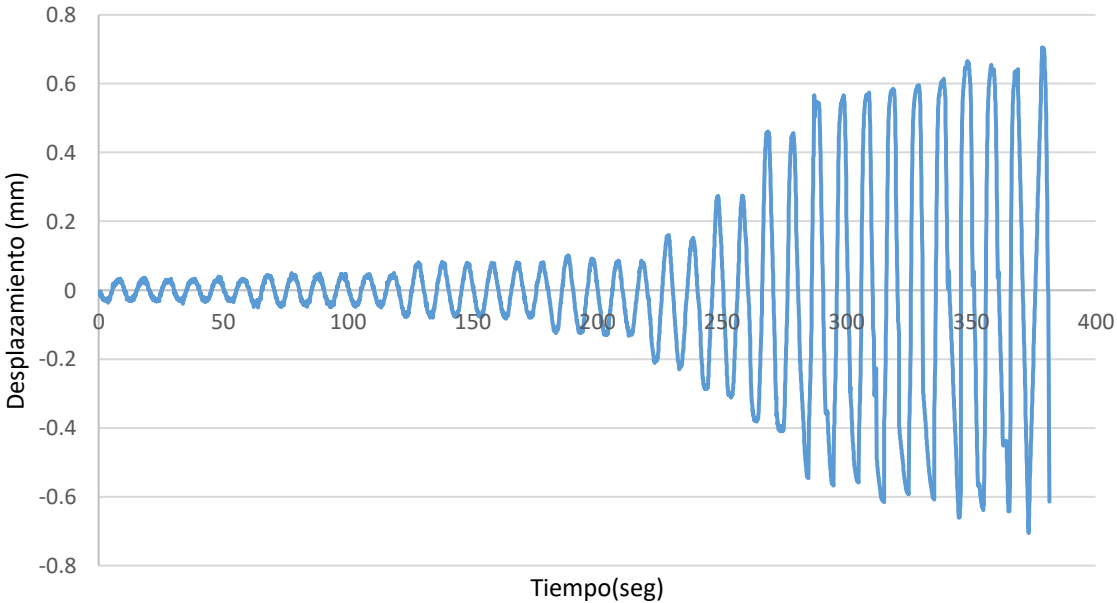


Figura 64. Gráfica Desplazamiento – Tiempo de la conexión medido en la columna (PTE) a una distancia de 35.5mm de la cara del perfil HEA100. Construcción propia.

En la Figura 65 se observan los ciclos de histéresis; allí se representa la fuerza vs desplazamiento de los ciclos de carga completos según el protocolo de carga definido para este ensayo. Es importante resaltar que la carga máxima

obtenida en el sentido de aplicación de fuerza fue de 36.85kN, mientras en el sentido de descarga y aplicación de fuerza contraria, se obtuvo un máximo de 34.40kN.

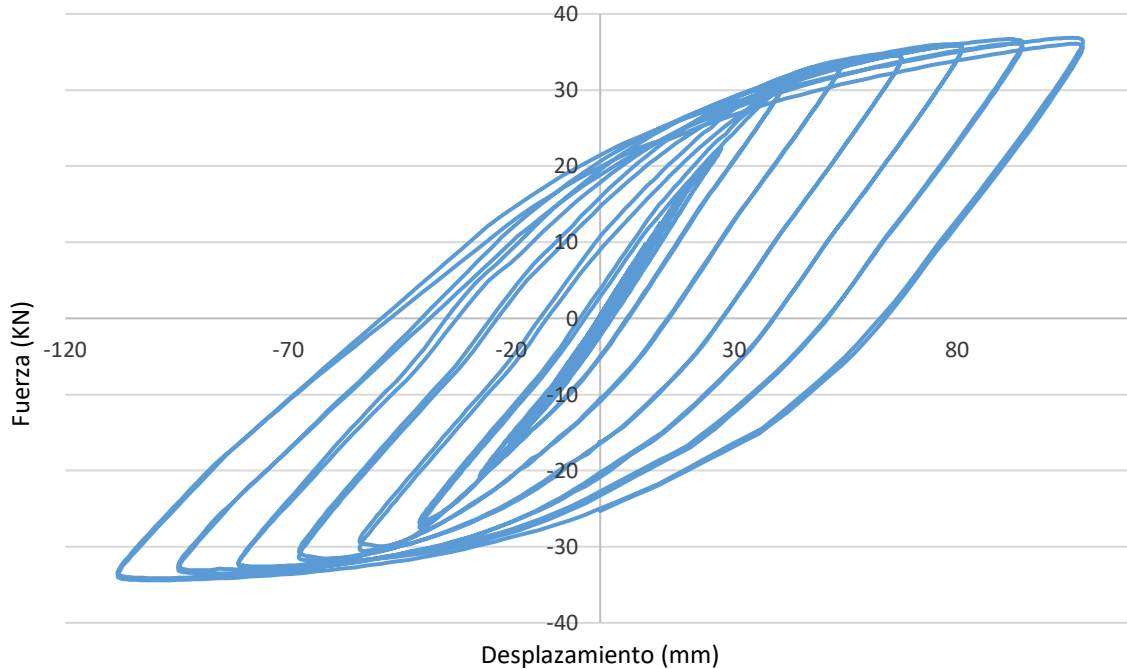


Figura 65. Gráfico de histéresis del ensayo experimental de la conexión. Construcción propia.

5.3 Modelación numérica

5.3.1 Validación del modelo numérico

Fue evaluado el efecto de la variación de algunos parámetros y cómo éstos podrían afectar o mejorar la simulación en el sentido de optimizar la similitud entre el modelo numérico y los resultados experimentales. Tal correlación se evaluó a partir de la comparación entre las curvas obtenidas de Rotación vs Tiempo, Fuerza vs Tiempo y finalmente Momento vs Rotación.

Inicialmente, se elaboró un modelo con un par de placas en cada uno de los extremos de la columna a la cual se le aplicó un contacto *surface to surface* con el

fin de simular una aproximación de las condiciones de contorno bajo las cuales se desarrolló el ensayo en el laboratorio. Adicionalmente, se aplicaron restricciones en todos los sentidos, en cada cara libre de las placas, de modo que estas no presentaran ningún desplazamiento o deslizamiento (ver Figura 66). Sin embargo, el contacto entre las placas y la columna si podía simular tal deslizamiento.

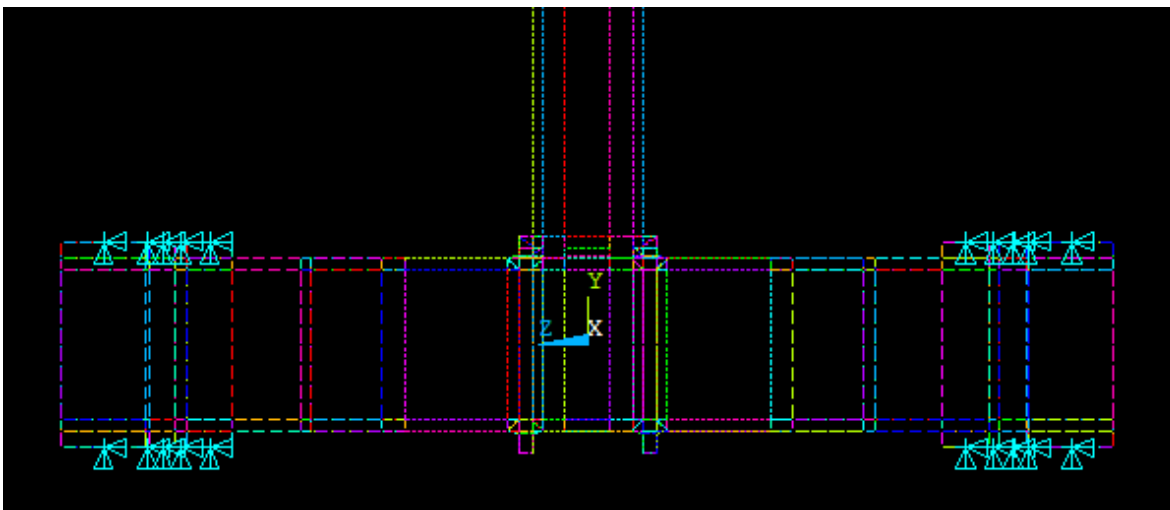


Figura 66. Restricciones en placas del modelo. Construcción propia.

El modelo computacional, se realizó siguiendo el modelo de endurecimiento cinemático y el modelo de endurecimiento Isotrópico.

En la Figura 67 y Figura 68, se muestran los resultados obtenidos del modelamiento y los resultados experimentales, de los cuales se logra observar una adecuada similitud entre las líneas de tendencia, con desviaciones menores al 4% en la zona inelástica. Sin embargo, en la Figura 68, se puede apreciar que las cargas son mayores tanto en el modelo cinemático como en el isotrópico respecto a la curva experimental, especialmente en los últimos ciclos, en los cuales la inelasticidad está presente.

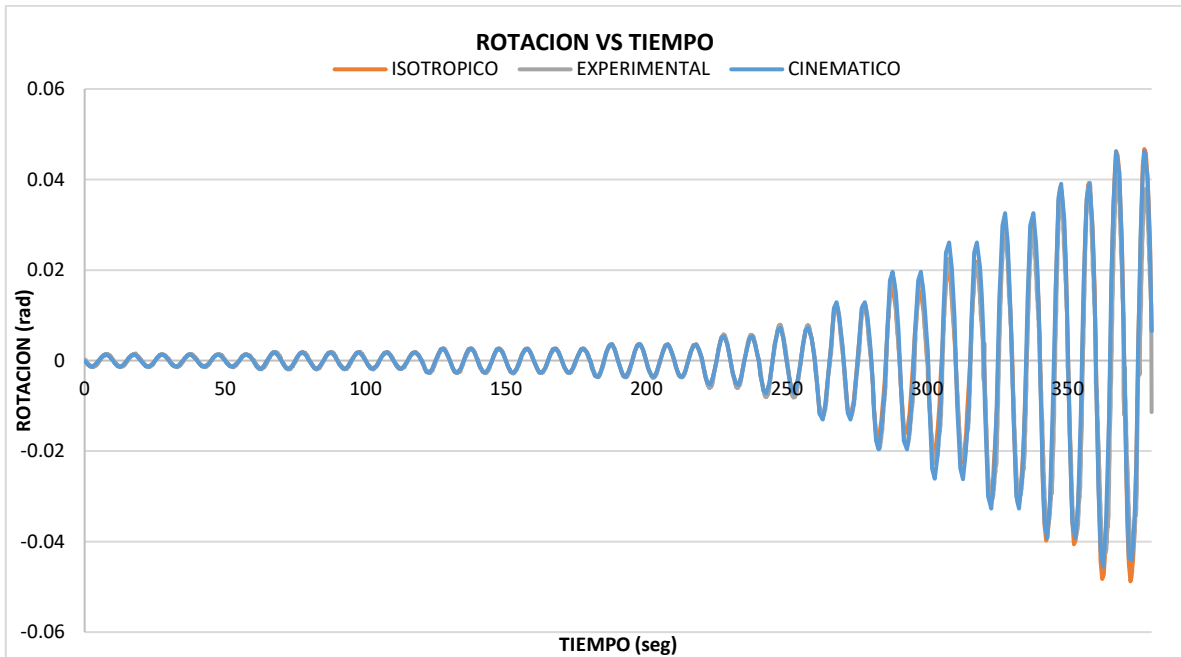


Figura 67. Gráfica rotación vs tiempo de los modelos isotrópico, cinemático y experimental. Construcción propia

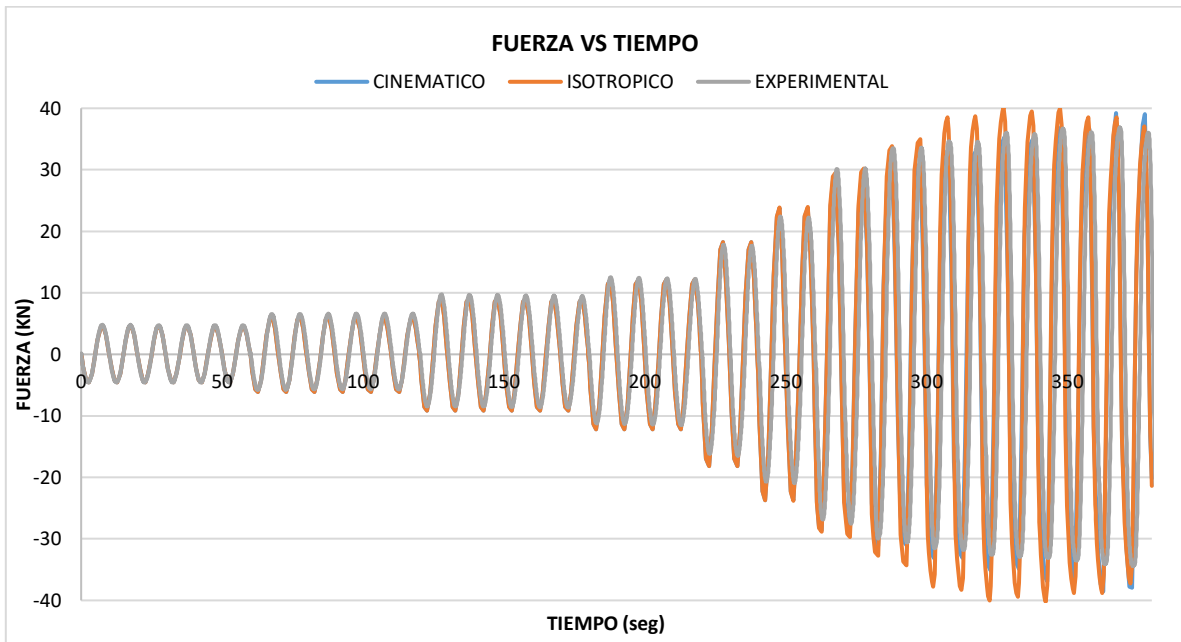


Figura 68. Gráfica fuerza vs. tiempo de los modelos isotrópico, cinemático y experimental. Construcción propia

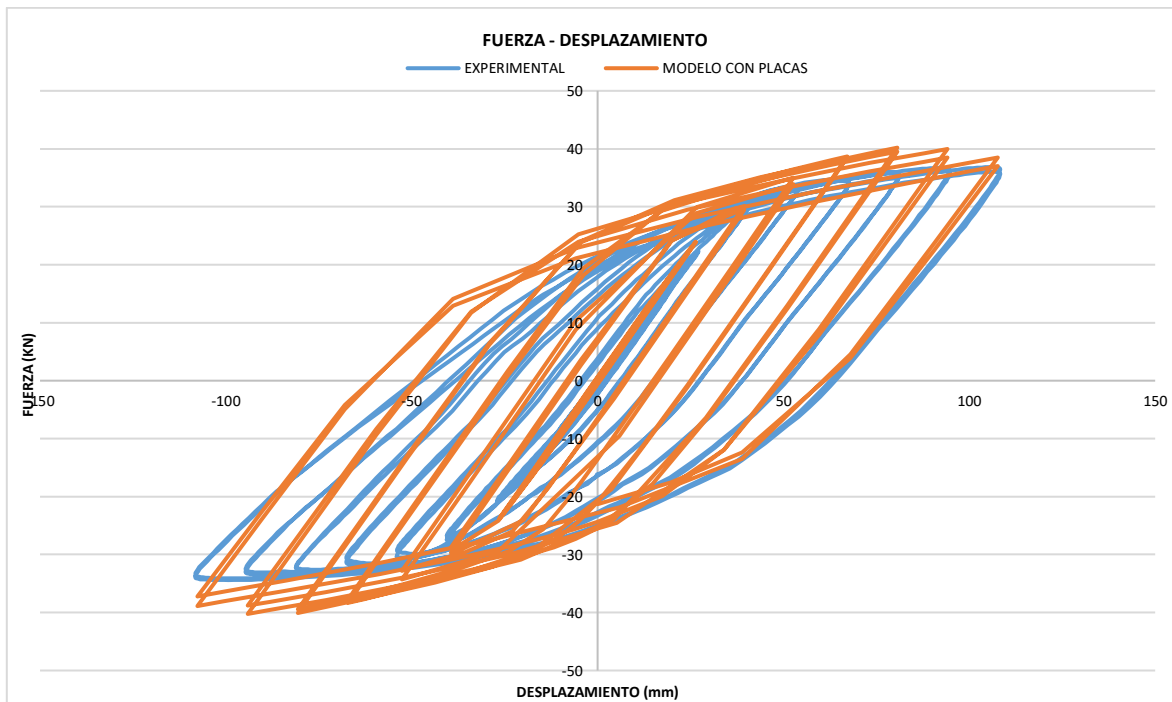


Figura 69. Fuerza vs Desplazamientos implementando el modelo planteado con placas. Construcción propia

Debido a las diferencias encontradas en las magnitudes de las fuerzas, se nota que el modelo no estaba reproduciendo satisfactoriamente el ensayo de la conexión, por lo que se procedió a buscar una explicación de la disminución en las reacciones o cargas a las que estaba sometida la conexión en los resultados experimentales. Una vez analizado el ensayo realizado en el laboratorio, con base en videos tomados durante la práctica, se encontraron evidencias de la ocurrencia de pequeños deslizamientos y rotaciones en los apoyos, los cuales se traducen a desplazamientos en los ejes X y Y. Tales movimientos se validaron mediante la implementación de cojinetes usados como apoyos a cada extremo de la columna, los cuales simulan resortes con una rigidez rotacional determinada en el sentido que ocurrieron los desplazamientos y/o rotaciones.

Estos apoyos se diseñaron de modo que generaran una alteración (reducción) en las reacciones del modelo a causa del aumento en los desplazamientos en el punto de carga. Tal efecto se lograría determinando la carga a la cual se requería que empezara dicha variación en las reacciones. Para ello se requirió de un modelo ante una carga estática, el cual fue sometido a la máxima

rotación requerida (107.38 rad) según la NSR-10 y graficando su comportamiento frente al comportamiento en el último ciclo del mismo modelo.

En la Figura 70, se puede observar claramente que las curvas divergen aproximadamente a partir de los 30KN.

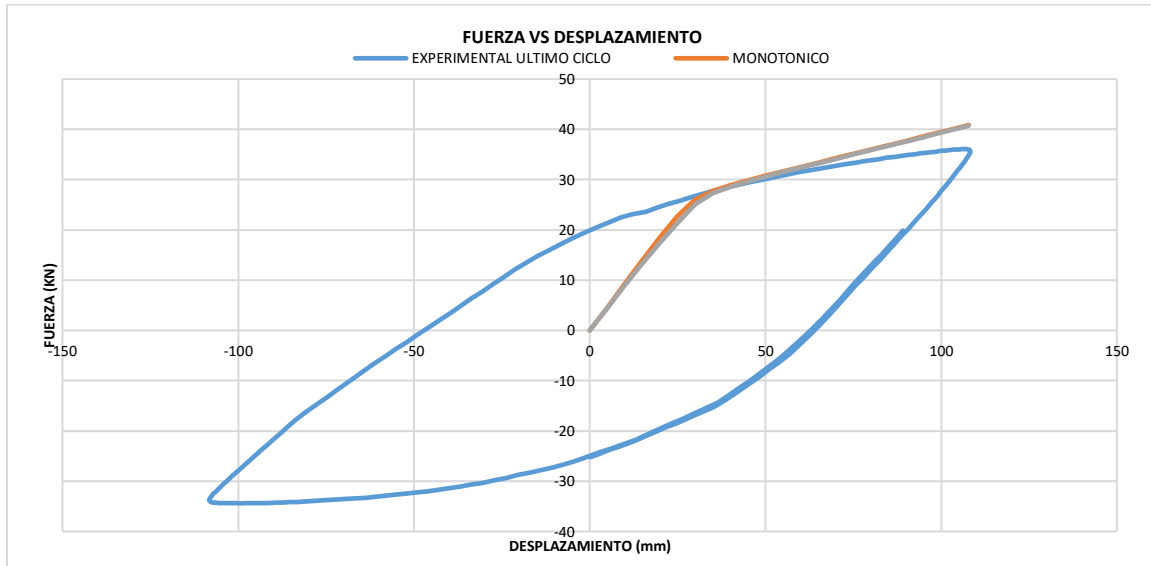


Figura 70. Superposición de curva modelo monótonico con cojinetes y último ciclo del ensayo experimental. Construcción propia

A continuación, en la Figura 71, se muestra la geometría y la ubicación de los cojinetes en el modelo de la conexión. Se tiene entonces una carga de diseño igual a 30KN, la cual se estableció como límite de fluencia para los cuatro (4) apoyos, los cuales generarán una reducción en las reacciones a partir de un aumento en los desplazamientos de estos.

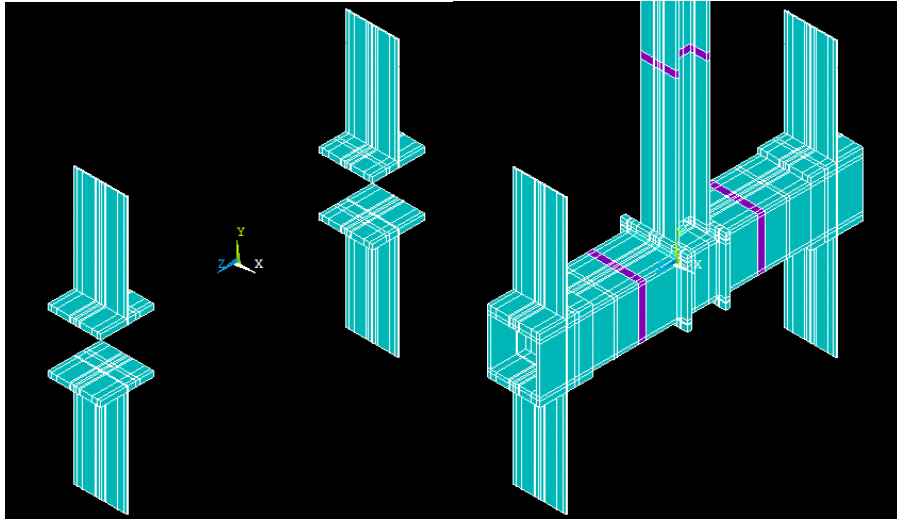


Figura 71. Cojinetes implementados en los apoyos para calibración del modelo numérico.
Construcción propia

Diseño de los cojinetes: El diseño de los cojinetes, se implementó a través del uso de la siguiente ecuación:

$$P_y = \frac{P}{4} = \frac{30KN}{4} = 7.5KN$$

$$\sigma_y = \frac{M_y * c}{I} = \frac{M_y * t/2}{B * t^3/12} = \frac{6 * M_y}{B * t^2} = \frac{6 * P * L}{4 * B * t^2} = \frac{3 * P * L}{2 * B * t^2}$$

Se asumieron las siguientes dimensiones para la placa (cojinete)

$$B = 0.15m, \quad t = 0.003m, \quad L = 0.3m$$

Dónde:

B: Ancho de la pletina de acero (Cojinete).

t= Espesor de la pletina de acero (Cojinete).

L= Altura de la pletina de acero (Cojinete).

Finalmente tenemos un Esfuerzo de Fluencia para este material igual a:

$$\sigma_y = \frac{3 * P * L}{2 * B * t^2} = \frac{3 * 30KN * 0.3m}{2 * 0.15m * (0.003m)^2} = 10.000MPa$$

Tales apoyos tratan de simular la rotación y el desplazamiento generado durante el ensayo, de modo que se pueda obtener una reducción de las cargas, y así obtener mayor cercanía con los resultados experimentales.

Una vez implementados estos apoyos se encuentra el siguiente comportamiento:

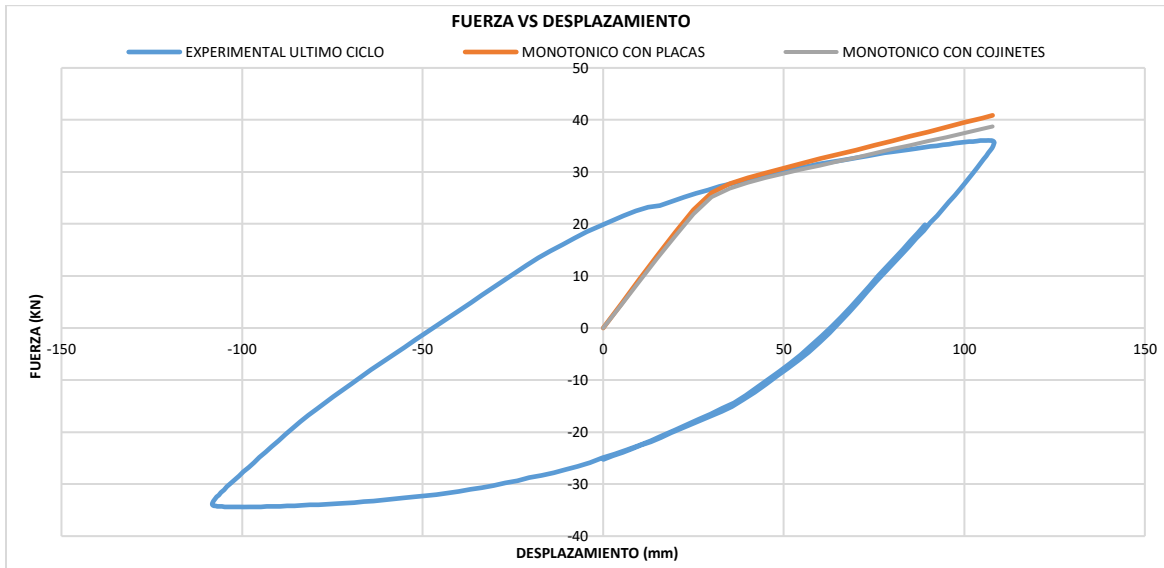


Figura 72. Efecto de los cojinetes en curva Fuerza – Desplazamiento. Construcción propia

En la gráfica anterior, se puede observar el efecto deseado sobre las reacciones en el punto de carga, puesto que la línea del *monotónico con cojinetes*, representa el comportamiento del modelo, al implementar los cojinetes en los apoyos. Es notable la reducción de las reacciones.

A continuación, en la Figura 73, se muestran los resultados obtenidos para cada una de las gráficas al aplicar el protocolo de carga completo, Fuerza vs Tiempo, Rotación vs Tiempo y Momento vs Rotación sobre el ensayo con la implementación de los cojinetes.

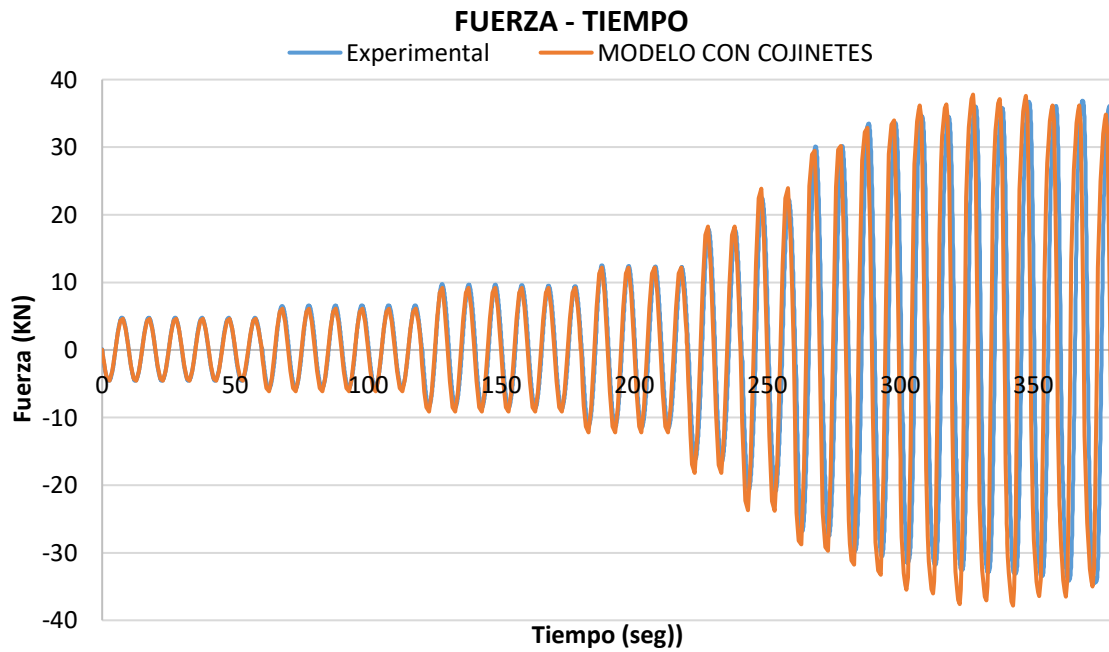


Figura 73. Gráfica Fuerza vs Tiempo Modelo Experimental vs Modelo con Cojinetes. Construcción propia

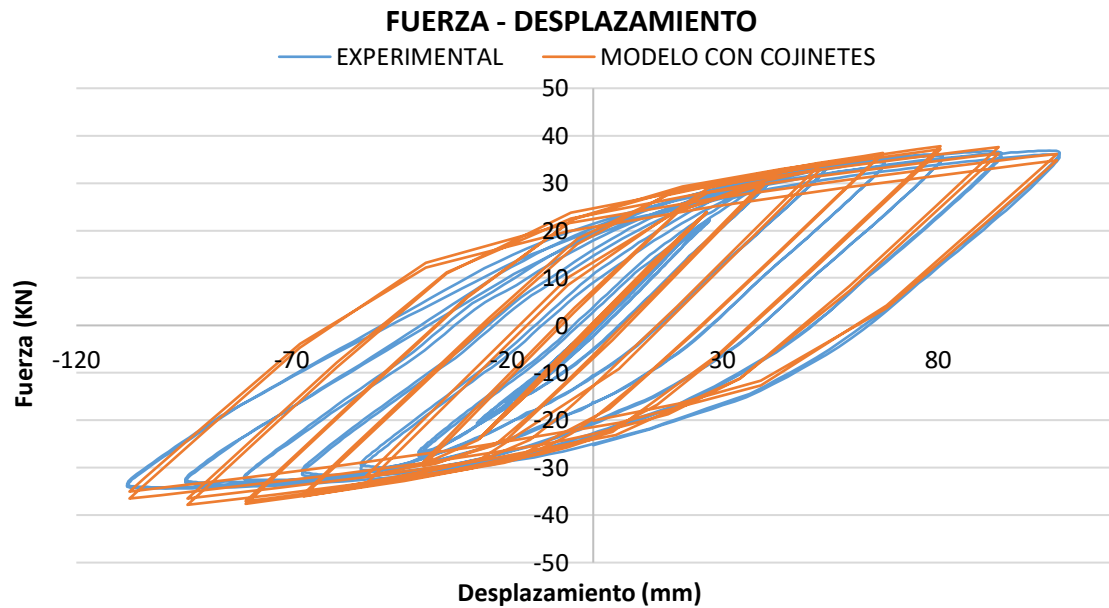


Figura 74. Gráfica Fuerza- Desplazamiento del modelo implementando cojinetes. Construcción propia

Una vez se implementó esta herramienta de los cojinetes se observó una considerable mejora en la simulación del ensayo experimental. Con lo cual, se dio

por concluida la etapa de validación del modelo numérico y se procedió con la corrida de los modelos con las configuraciones establecidas en la Tabla 15.

5.3.2 Modelación numérica de veinticinco (25) configuraciones de espesor y área de las placas de continuidad. Los ensayos experimentales descritos en las secciones anteriores se realizaron con el fin de calibrar un (1) modelo numérico que se usaría de base para reproducir modelos de veinticinco (25) conexiones usando ANSYS APDL, en los cuales se varió la longitud (l) y el espesor de las placas de continuidad bajo las configuraciones descritas en la Tabla 15:

VARIACIÓN DE LA GEOMETRÍA						
		ESPESOR				
		8 mm	9 mm	13 mm	15 mm	19 mm
LONGITUD (l)	180 mm	L180E8	L180E9	L180E12	L180E15	L180E19
	190 mm	L190E8	L190E9	L190E12	L190E15	L190E19
	200 mm	L200E8	L200E9	L200E12	L200E15	L200E19
	210 mm	L210E8	L210E9	L210E12	L210E15	L210E19
	220 mm	L220E8	L220E9	L220E12	L220E15	L220E19

Tabla 15. Configuración de longitud y espesor de placa de continuidad de los modelos numéricos. Construcción propia

Según lo descrito en la sección 1.9 Requisitos del NSR-10 para PRM-DMO y PRM-DES, se determinó el Momento Elástico M_y , Momento Plástico M_p , y $0.8M_p$ (ver Tabla 16) con el fin de verificar los requisitos de ángulo de deriva de piso. Tales momentos se observan graficados en todos los ciclos de histéresis mostrados a continuación.

PERFIL	Momento Elástico M_y [kN*m]	Momento Plástico M_p [kN*m]	$0.8 M_p$ [kN*m]
HEA-100	26.13	29.80	23.84

Tabla 16. Determinación de momentos de la viga. Construcción propia

5.3.2.1 L180E8. A continuación, en la Tabla 17 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	180mm	M_{max} [kN-m]	57.99	-
Área de Placa	32.400mm ²	$M_{0.02}$ [kN-m]	55.20	1.05Mp
Espesor	8mm	$M_{0.04}$ [kN-m]	55.71	0.96Mp

Tabla 17. Detalles de la configuración L180E8 para el modelo de la conexión. Construcción propia

La Figura 75 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L180E8.

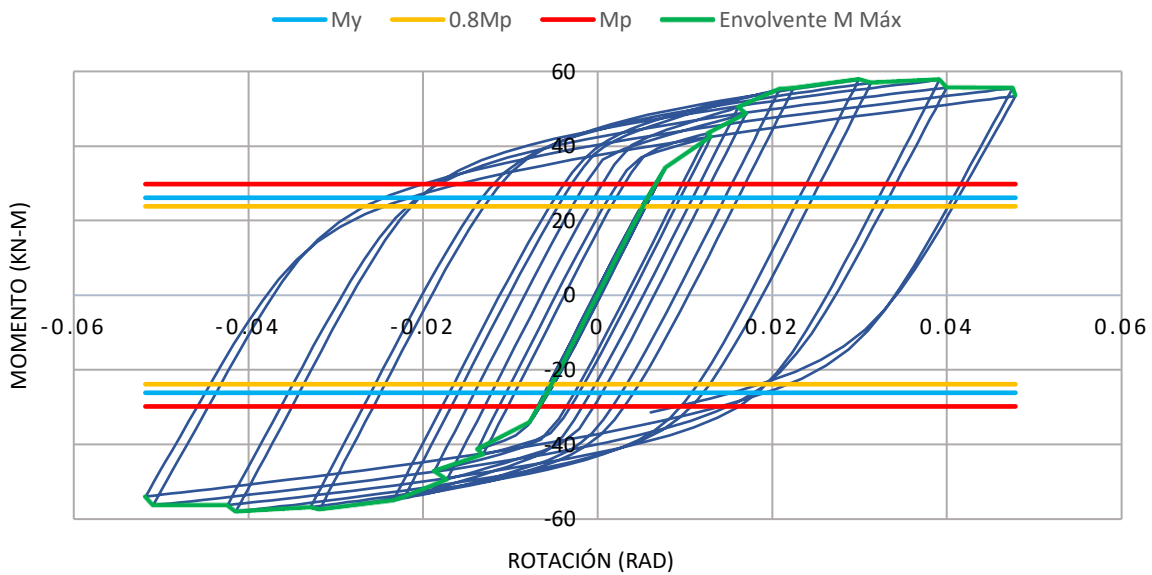


Figura 75. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E8. Construcción propia

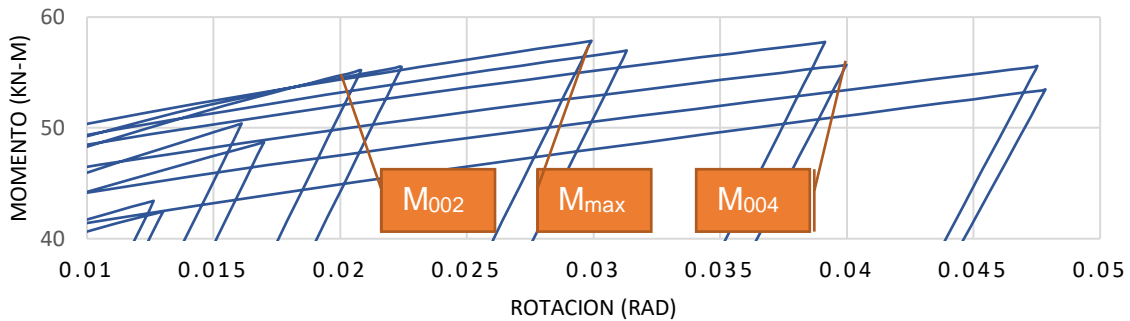


Figura 76. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E8. Construcción propia

5.3.2.2 L180E9. A continuación, en la Tabla 18 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	180mm	M_{max} [kN-m]	57.82	-
Área de Placa	32.400mm ²	$M_{0.02}$ [kN-m]	54.30	1.06Mp
Espesor	9mm	$M_{0.04}$ [kN-m]	55.50	0.96Mp

Tabla 18. Detalles de la configuración L180E9. para el modelo de la conexión. Construcción propia

La Figura 77 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L180E9.

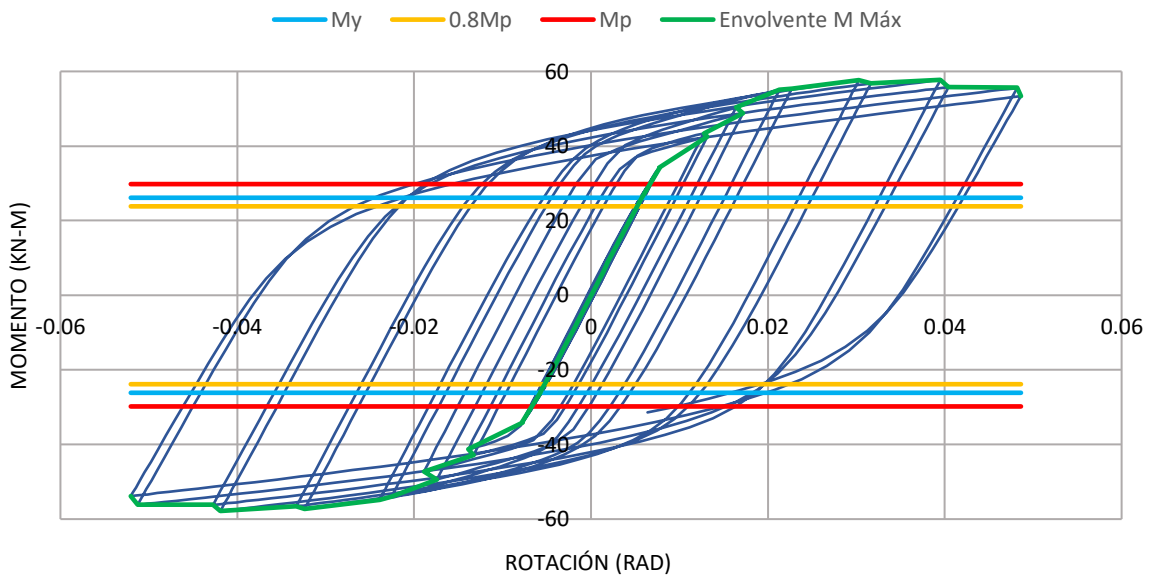


Figura 77. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E9. Construcción propia

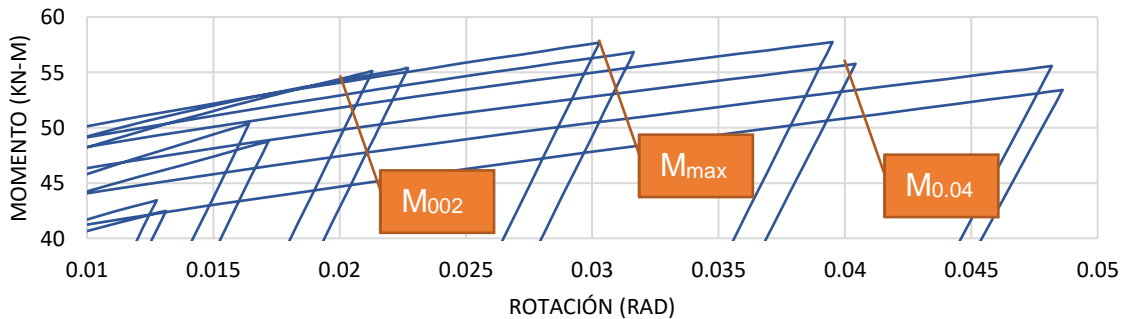


Figura 78. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E9. Construcción propia

5.3.2.3 L180E12.7. A continuación, en la Tabla 19 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	180mm	M_{max} [kN-m]	57.75	-
Área de Placa	32.400mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	54.50	1.06Mp
Espesor	12.7mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	55.36	0.96Mp

Tabla 19. Detalles de la configuración L180E12.7. para el modelo de la conexión. Construcción propia

La Figura 79 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L180E12.7.

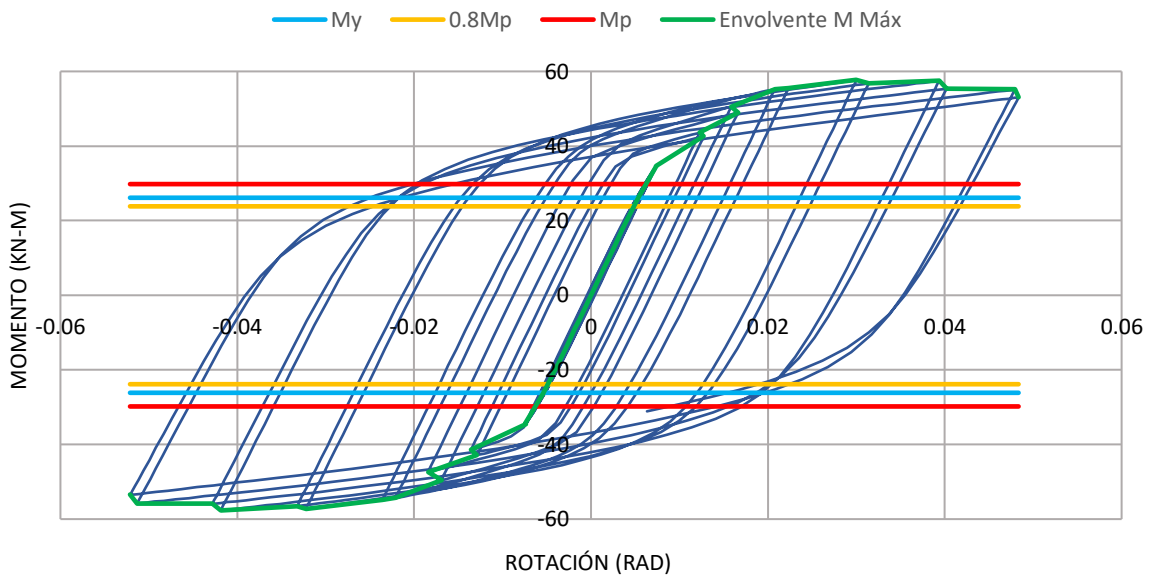


Figura 79. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E12.7. Construcción propia.

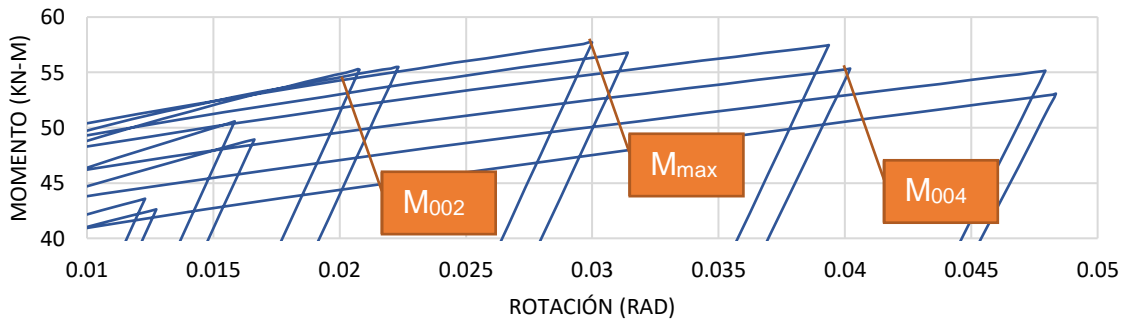


Figura 80. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E12.7. Construcción propia

5.3.2.4 L180E15. A continuación, en la Tabla 20 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	180mm	M_{max} [kN-m]	57.66	
Área de Placa	32.400mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	54.18	1.06Mp
Espesor	15mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	54.98	0.95Mp

Tabla 20. Detalles de la configuración L180E15. para el modelo de la conexión. Construcción propia

La Figura 81 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L180E15.

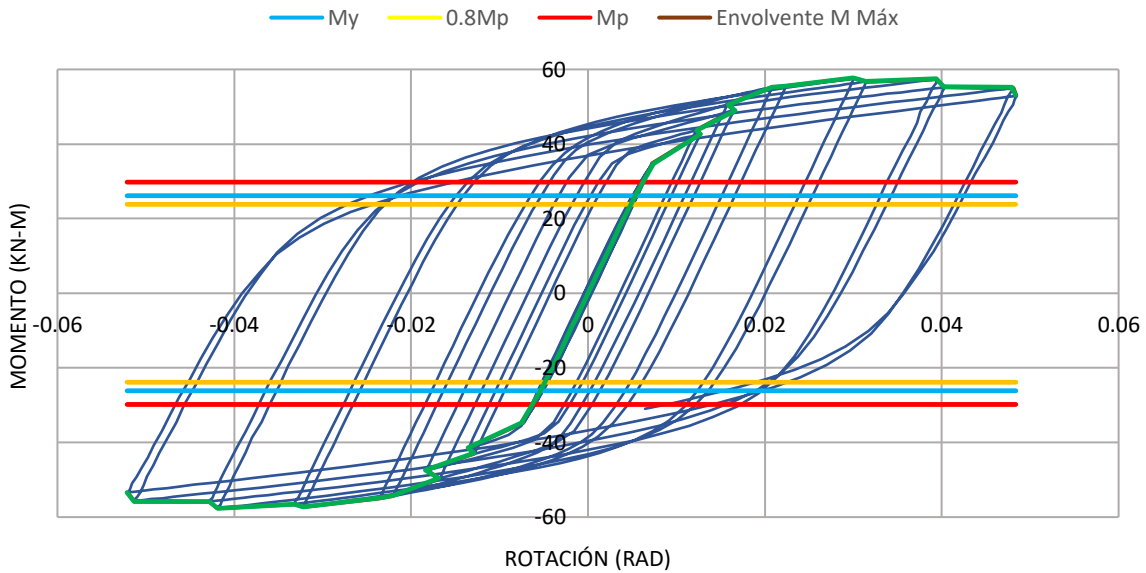


Figura 81. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E15. Construcción propia

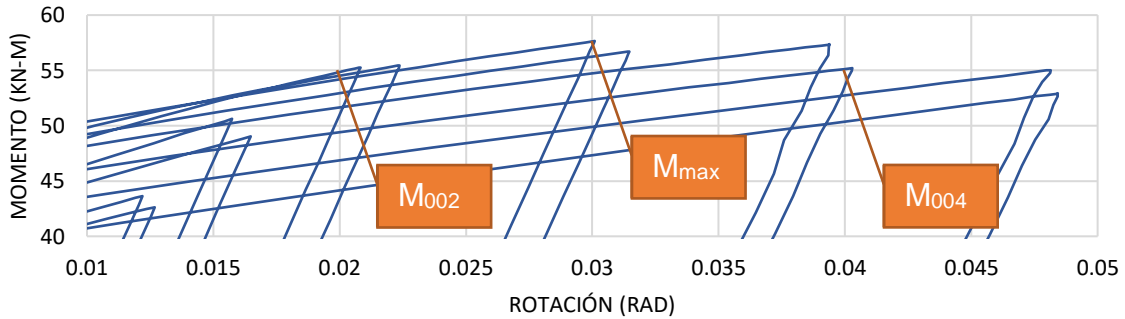


Figura 82. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E15. Construcción propia

5.3.2.5 L180E19. A continuación, en la Tabla 21 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	180mm	M_{max} [kN-m]	57.74	-
Área de Placa	32.400mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	54.54	1.06Mp
Espesor	19mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	57.10	0.99Mp

Tabla 21. Detalles de la configuración L180E19. para el modelo de la conexión. Construcción propia

La Figura 83 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L180E19.

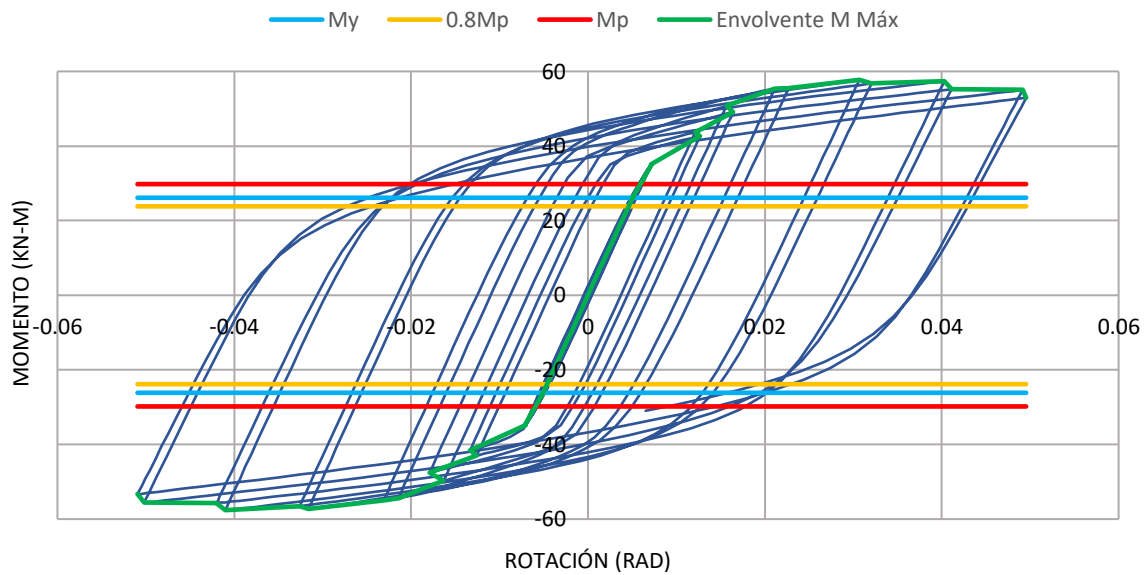


Figura 83. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E19. Construcción propia

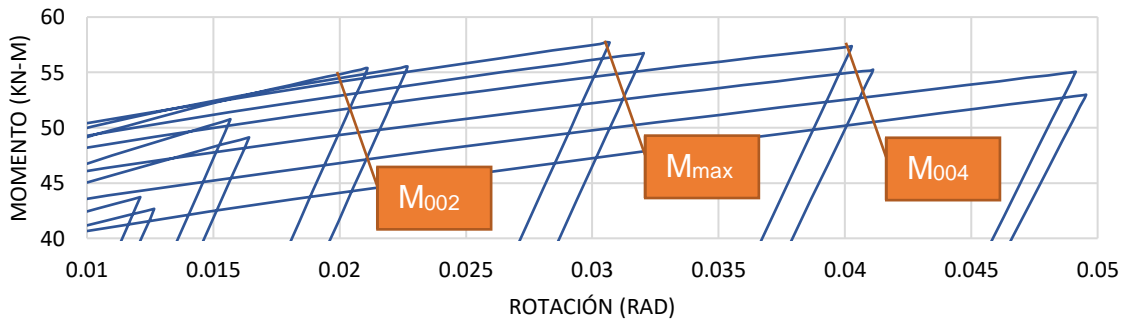


Figura 84. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E19. Construcción propia L180E15.

5.3.2.6 L190E8. A continuación, en la Tabla 22 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	190mm	M_{max} [kN-m]	59.13	-
Área de Placa	36.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	55.72	1.06Mp
Espesor	8mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	55.55	0.94Mp

Tabla 22. Detalles de la configuración L190E8. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 85 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L190E8.

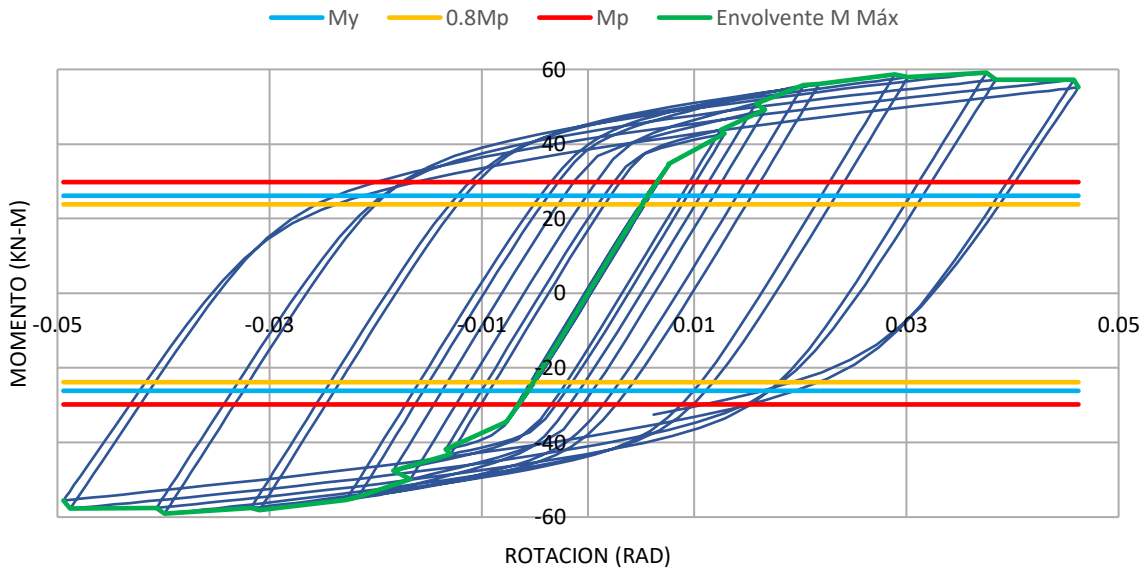


Figura 85. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E8.L180E8. Construcción propia.

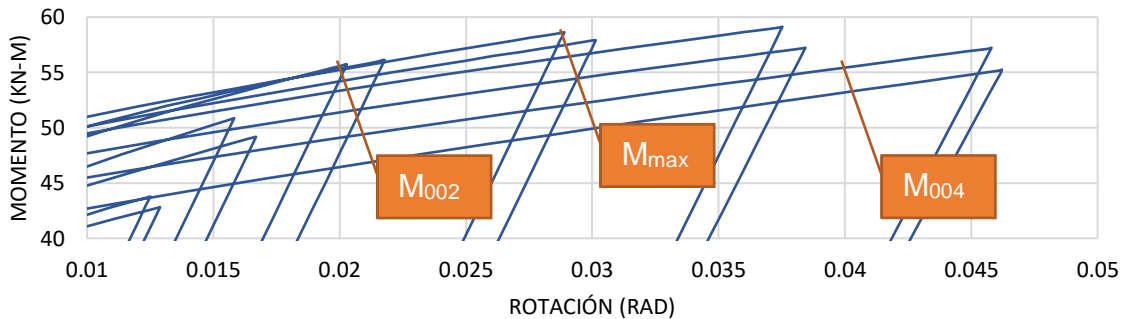


Figura 86. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E8. Construcción propia L180E15.

5.3.2.7 L190E9. A continuación, en la Tabla 23 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	190mm	M_{max} [kN-m]	59.05	-
Área de Placa	36.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	55.54	1.06Mp
Espesor	9mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	55.51	0.94Mp

Tabla 23. Detalles de la configuración L190E9. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 87 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L190E9.

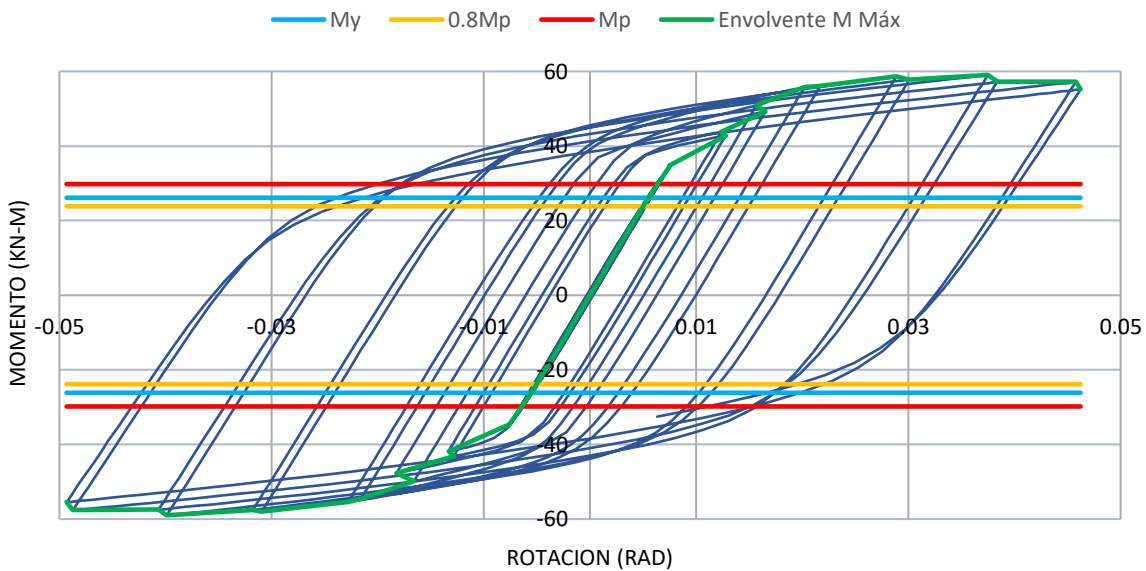


Figura 87. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E9. Construcción propia.

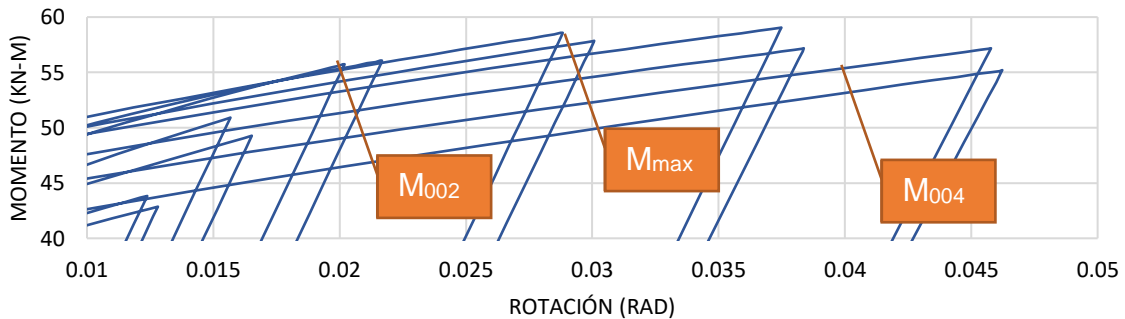


Figura 88. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E9. Construcción propia

5.3.2.8 L190E12.7. A continuación, en la Tabla 24 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	190mm	M_{max} [kN-m]	59.05	-
Área de Placa	36.100mm ²	$M_{0.02}$ [kN-m]	55.71	1.06Mp
Espesor	12.7mm	$M_{0.04}$ [kN-m]	55.37	0.94Mp

Tabla 24. Detalles de la configuración L190E12.7. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 89 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L190E12.7.

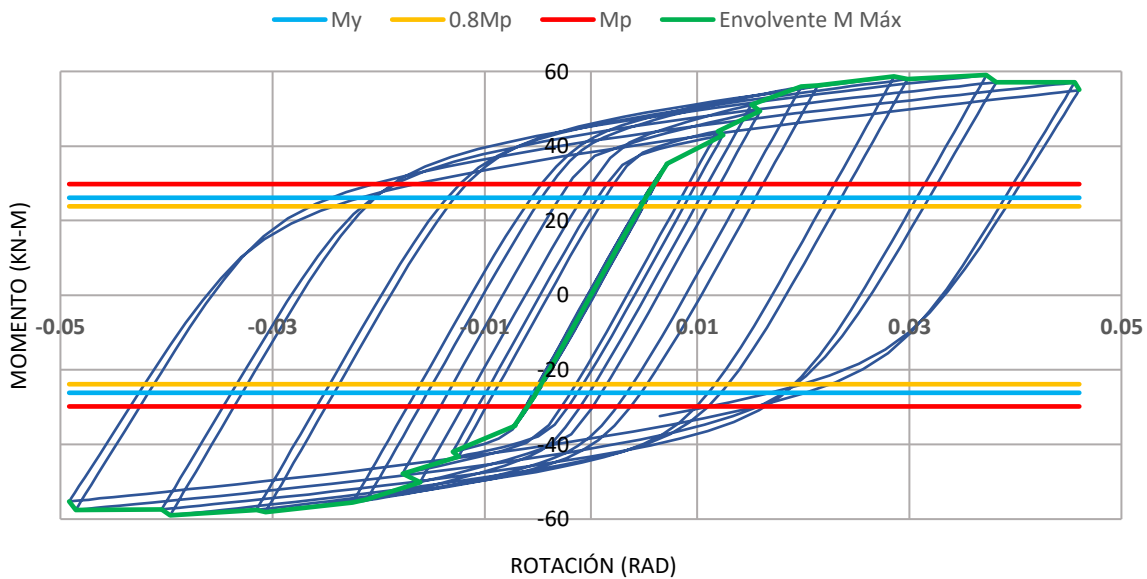


Figura 89. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E12.7. Construcción propia.

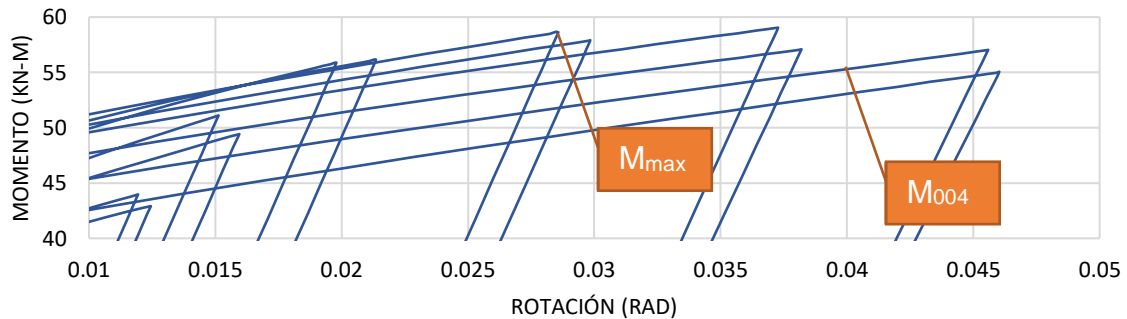


Figura 90. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E12.7. Construcción propia

5.3.2.9 L190E15. A continuación, en la Tabla 25 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	190mm	M_{max} [kN-m]	59.00	-
Área de Placa	36.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	55.70	1.06Mp
Espesor	15mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	55.27	0.94Mp

Tabla 25. Detalles de la configuración L190E15. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 91 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L190E15.

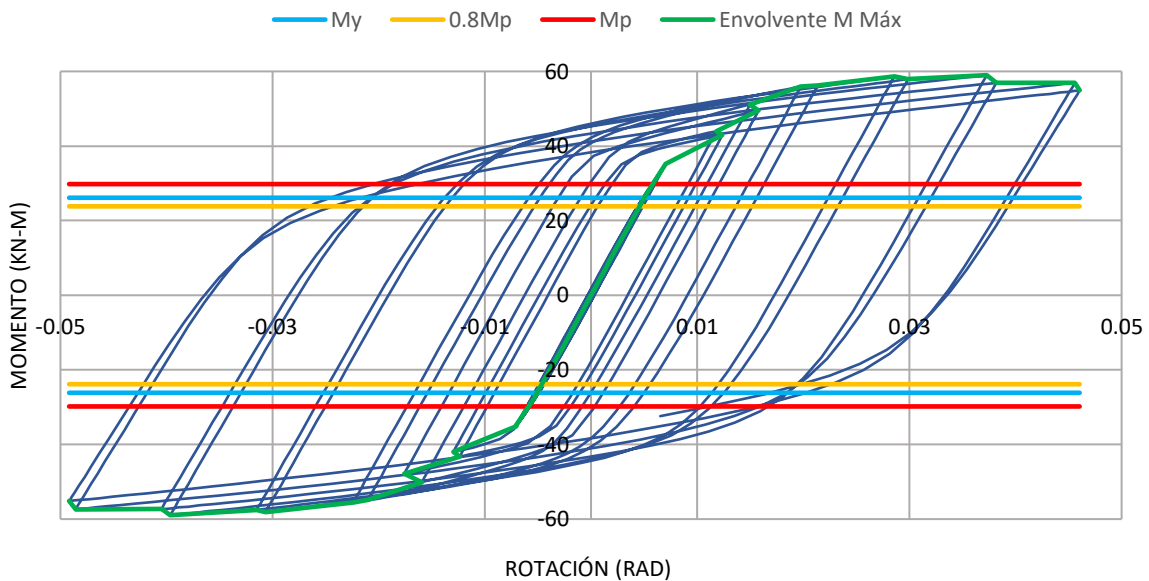


Figura 91. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E15. Construcción propia

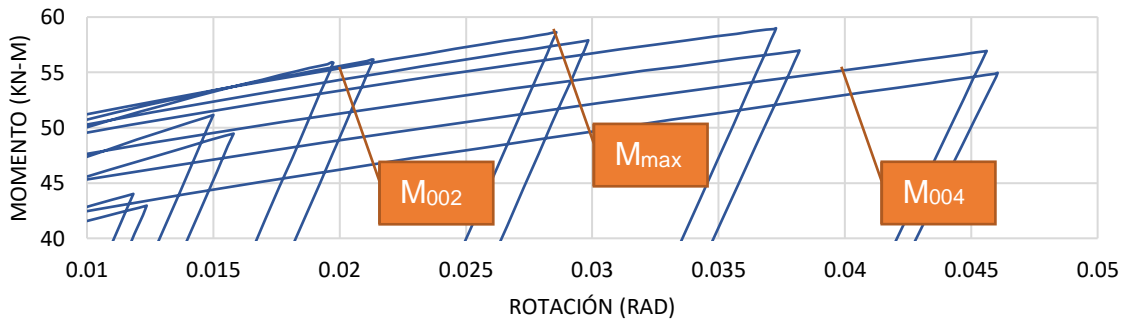


Figura 92. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E15. Construcción propia

5.3.2.10 L190E19. A continuación, en la Tabla 26 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	190mm	M_{max} [kN-m]	59.00	-
Área de Placa	36.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	57.71	1.02Mp
Espesor	19mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	55.28	0.94Mp

Tabla 26. Detalles de la configuración L190E19. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 93 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L190E19.

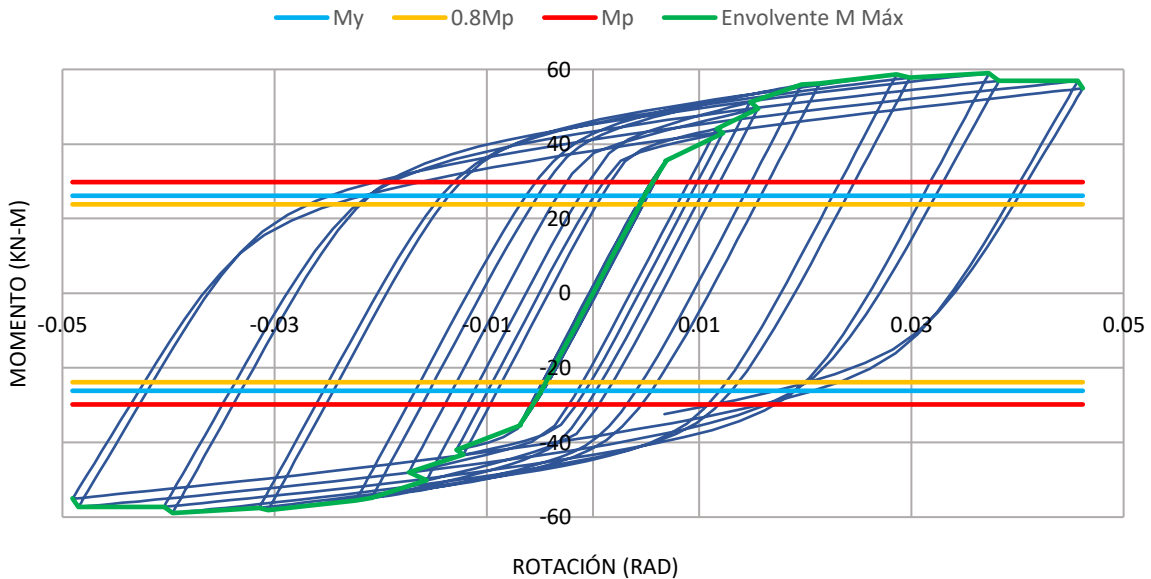


Figura 93. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E19. Construcción propia.

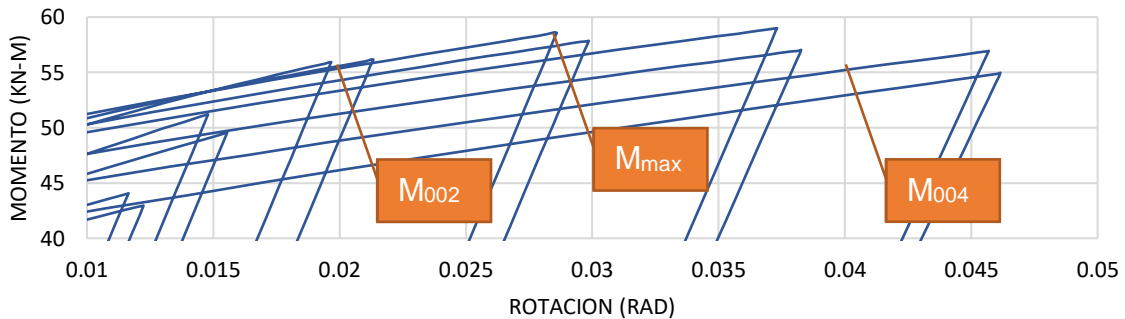


Figura 94. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E19. Construcción propia

5.3.2.11 L200E8. A continuación, en la Tabla 27 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	200mm	M_{max} [kN-m]	59.80	-
Área de Placa	40.000mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	56.15	1.07Mp
Espesor	8mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	56.51	0.94Mp

Tabla 27. Detalles de la configuración L200E8. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 95 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L200E8.

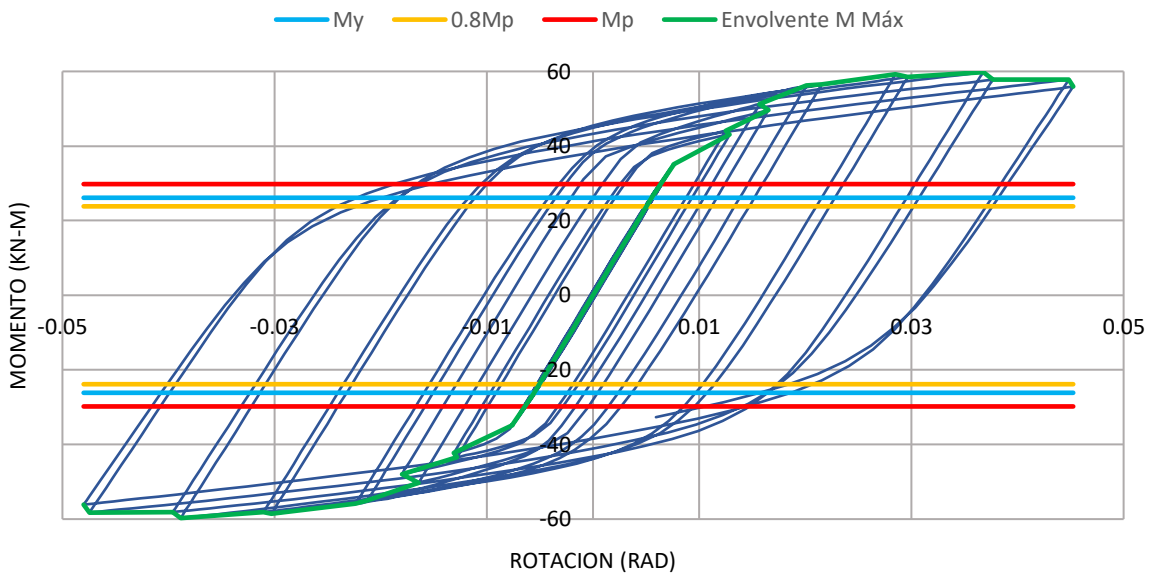


Figura 95. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E8. Construcción propia.

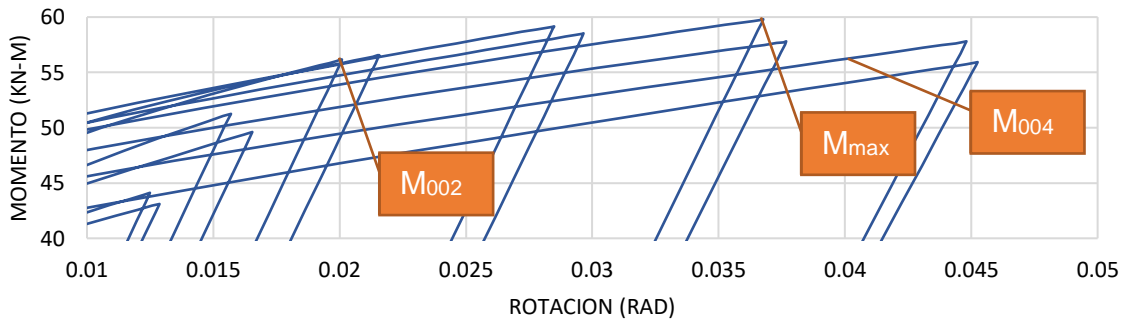


Figura 96. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E8. Construcción propia

5.3.2.12 L200E9. A continuación, en la Tabla 28 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	200mm	M_{max} [kN-m]	59.79	-
Área de Placa	40.000mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	56.00	1.07Mp
Espesor	9mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	56.49	0.94Mp

Tabla 28. Detalles de la configuración L200E9. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 97 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L200E9.

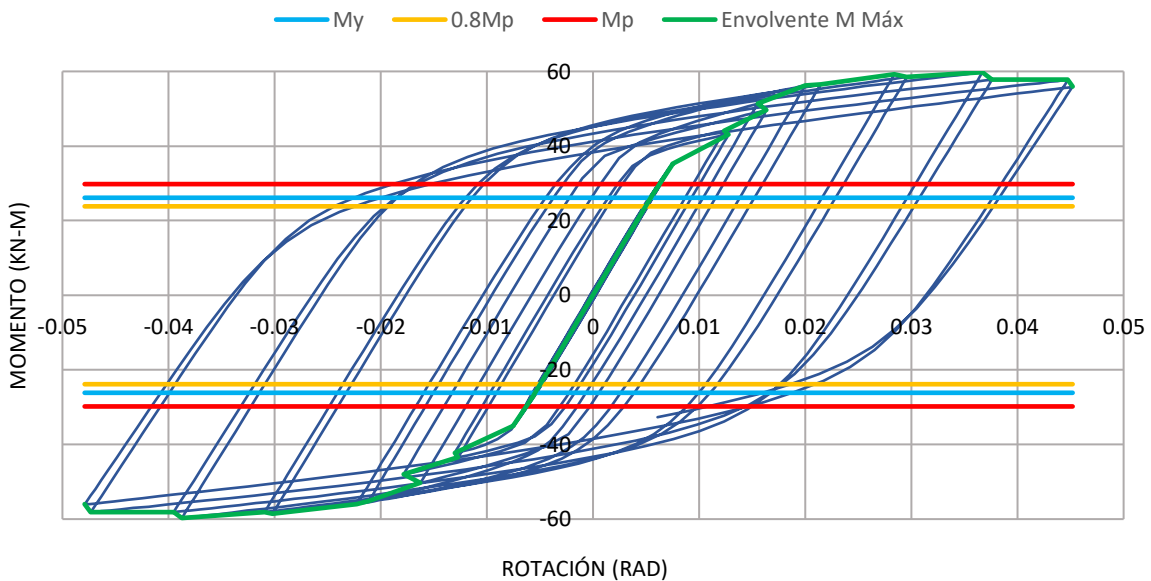


Figura 97. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E9. Construcción propia.

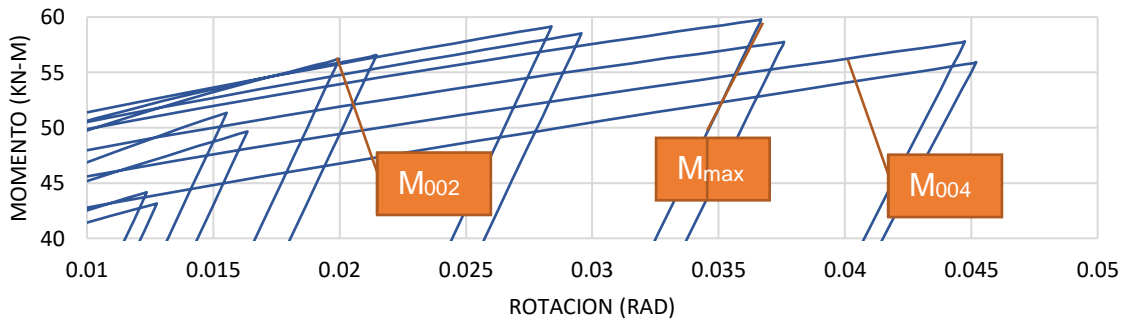


Figura 98. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E9. Construcción propia

5.3.2.13 L200E12.7. A continuación, en la Tabla 29 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	200mm	M_{max} [kN-m]	59.81	-
Área de Placa	40.000mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	56.12	1.07Mp
Espesor	12.7mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	56.40	0.94Mp

Tabla 29. Detalles de la configuración L200E12.7. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 99 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L200E12.7.

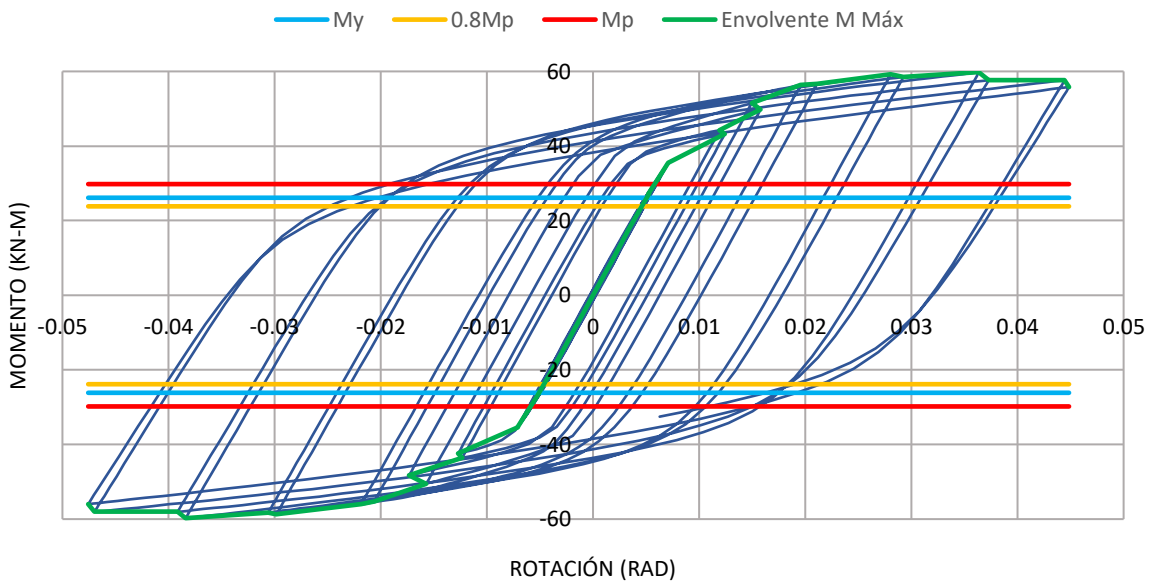


Figura 99. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E12.7. Construcción propia.

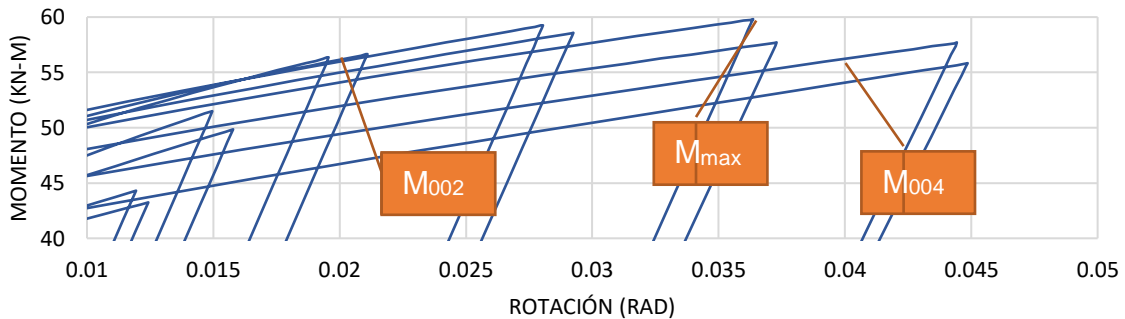


Figura 100. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E12.7. Construcción propia

5.3.2.14 L200E15. A continuación, en la Tabla 30 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	200mm	M_{max} [kN-m]	59.83	-
Área de Placa	40.000mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	56.18	1.06Mp
Espesor	15mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	56.43	0.94Mp

Tabla 30. Detalles de la configuración L200E15. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 101 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L200E15.

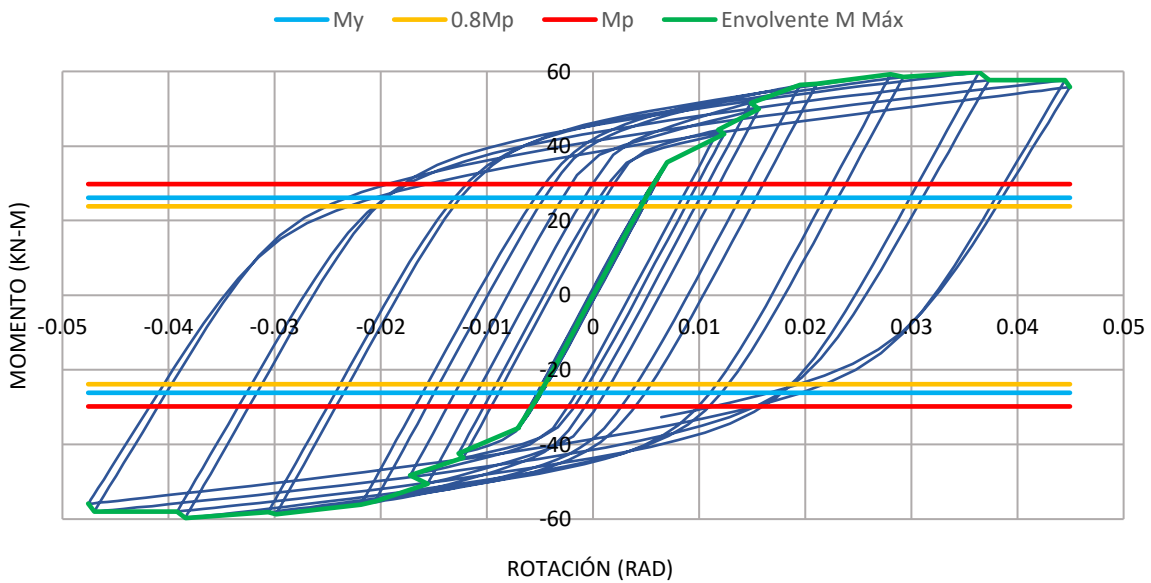


Figura 101. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E15. Construcción propia.

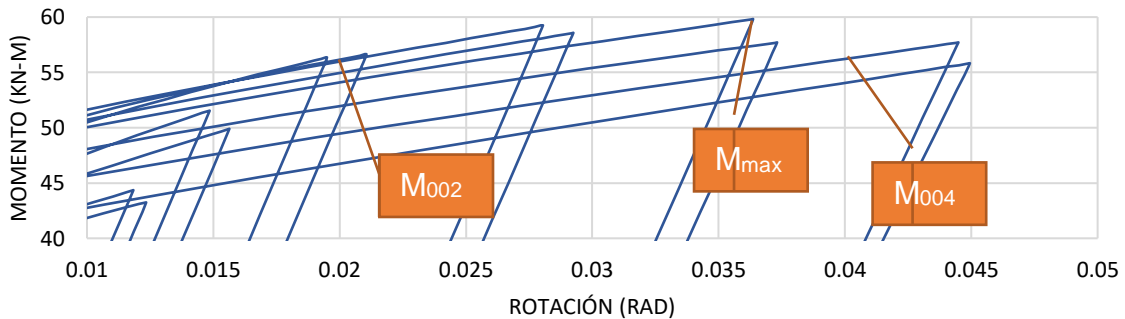


Figura 102. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E15. Construcción propia

5.3.2.15 L200E19. A continuación, en la Tabla 31 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	200mm	M_{max} [kN-m]	59.83	-
Área de Placa	40.000mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	56.15	1.07Mp
Espesor	19mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	56.35	0.94Mp

Tabla 31. Detalles de la configuración L200E19. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 103 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L200E19.

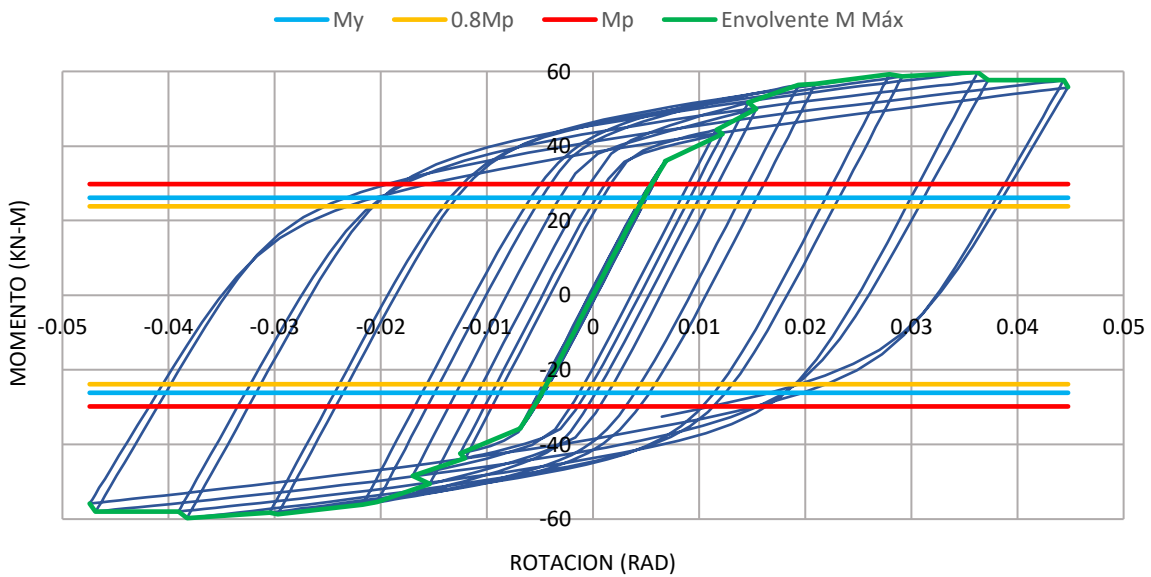


Figura 103. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E19. Construcción propia.

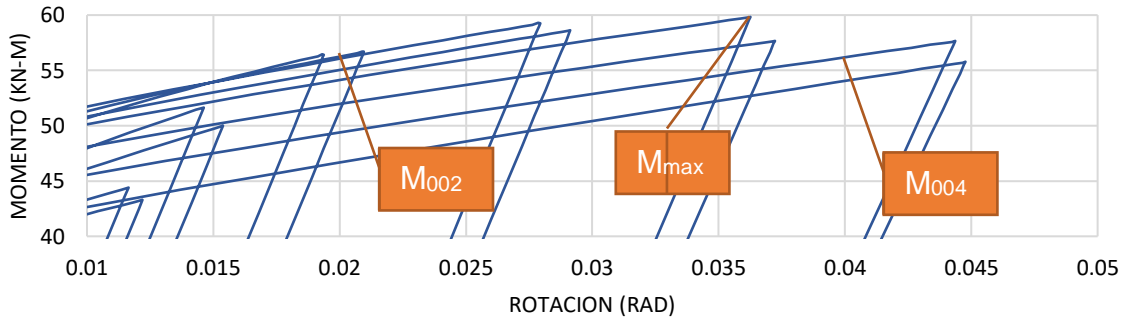


Figura 104. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E19. Construcción propia

5.3.2.16 L210E8. A continuación, en la Tabla 32 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	210mm	M_{max} [kN-m]	60.26	-
Área de Placa	44.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	56.44	1.07Mp
Espesor	8mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	56.88	0.94Mp

Tabla 32. Detalles de la configuración L210E8. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 105 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L210E8.

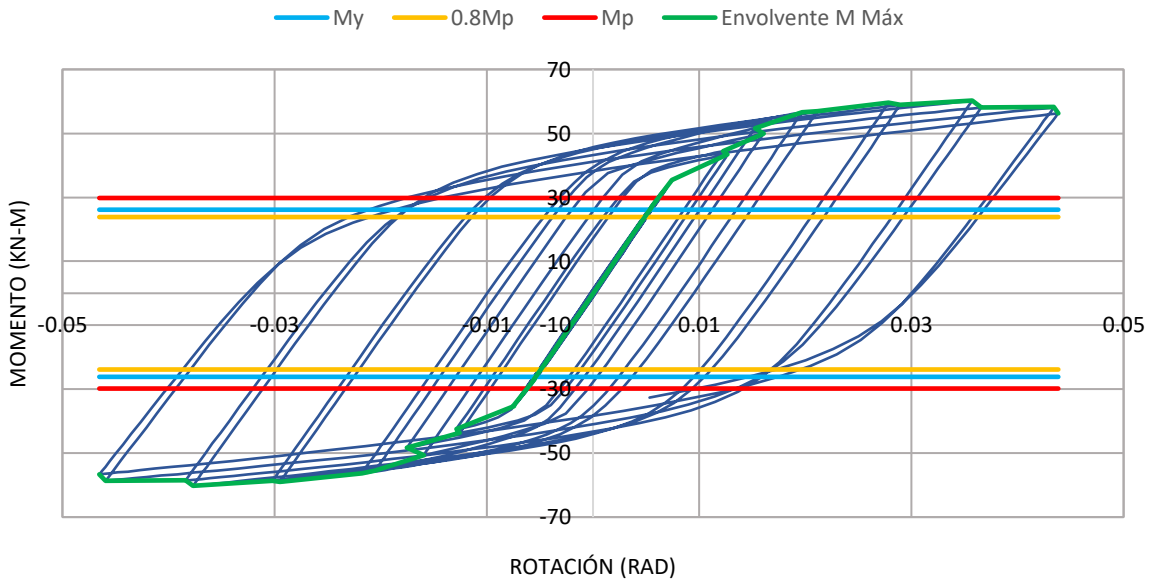


Figura 105. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E8. Construcción propia

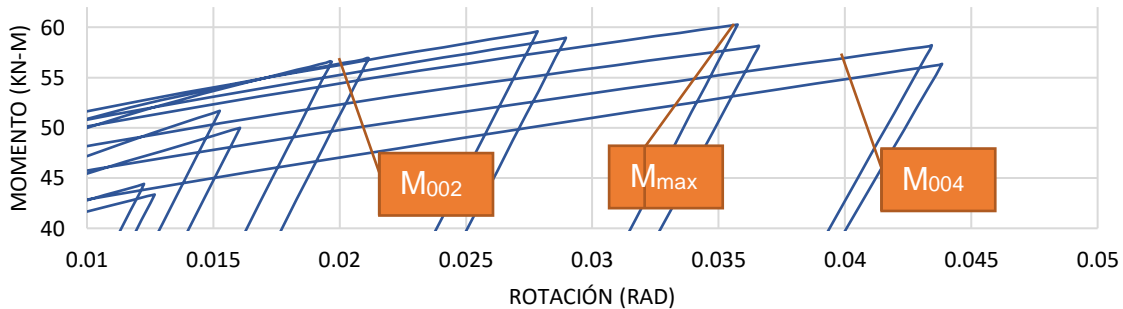


Figura 106. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E8. Construcción propia

5.3.2.17 L210E9. A continuación, en la Tabla 33 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	210mm	M_{max} [kN-m]	60.27	-
Área de Placa	44.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	56.46	1.07Mp
Espesor	9mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	56.86	0.94Mp

Tabla 33. Detalles de la configuración L210E9. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 107 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L210E9.

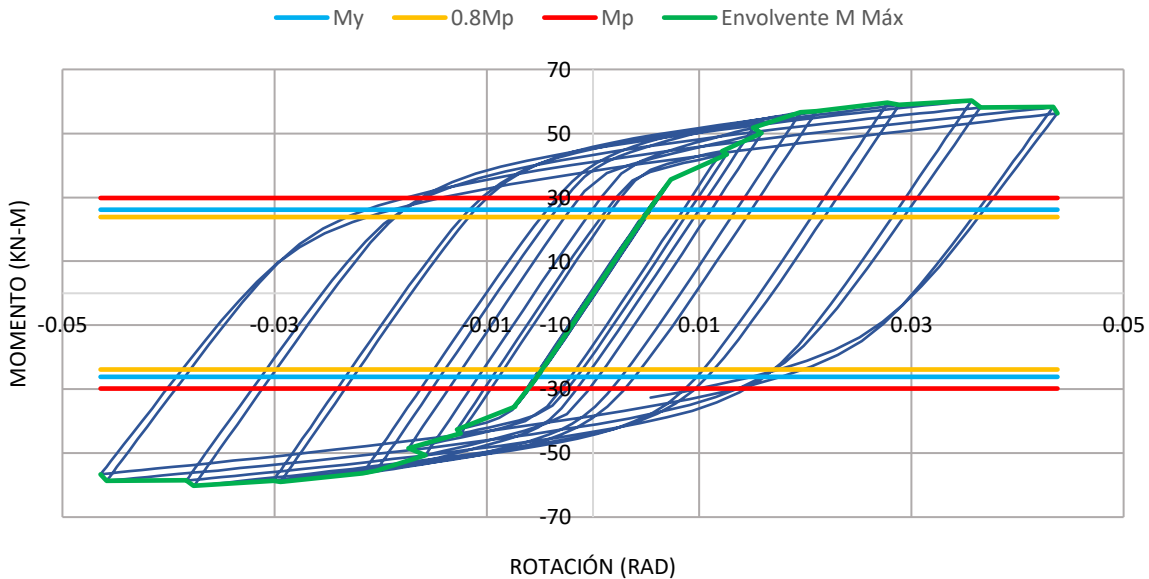


Figura 107. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E9. Construcción propia

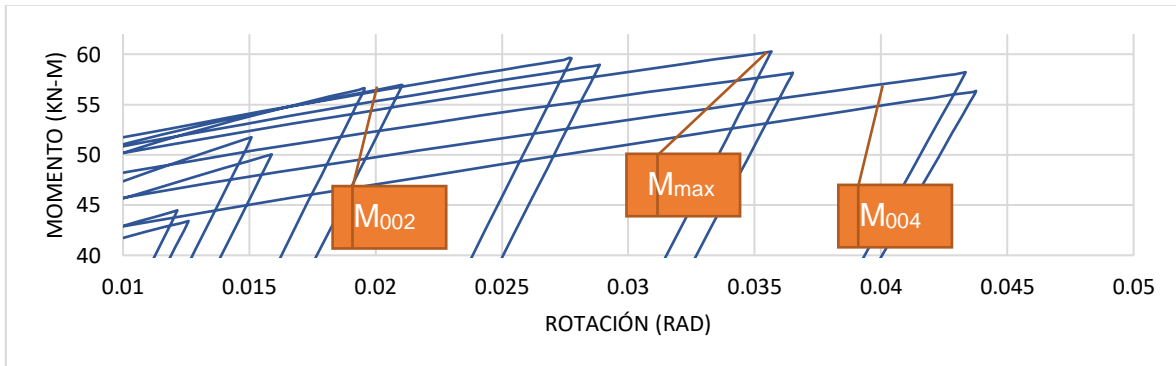


Figura 108. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E9. Construcción propia

5.3.2.18 L210E12.7. A continuación, en la Tabla 34 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	210mm	M_{max} [kN-m]	60.23	-
Área de Placa	44.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	56.42	1.07Mp
Espesor	12.7mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	57.20	0.95Mp

Tabla 34. Detalles de la configuración L210E12.7. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 109 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L210E12.7.

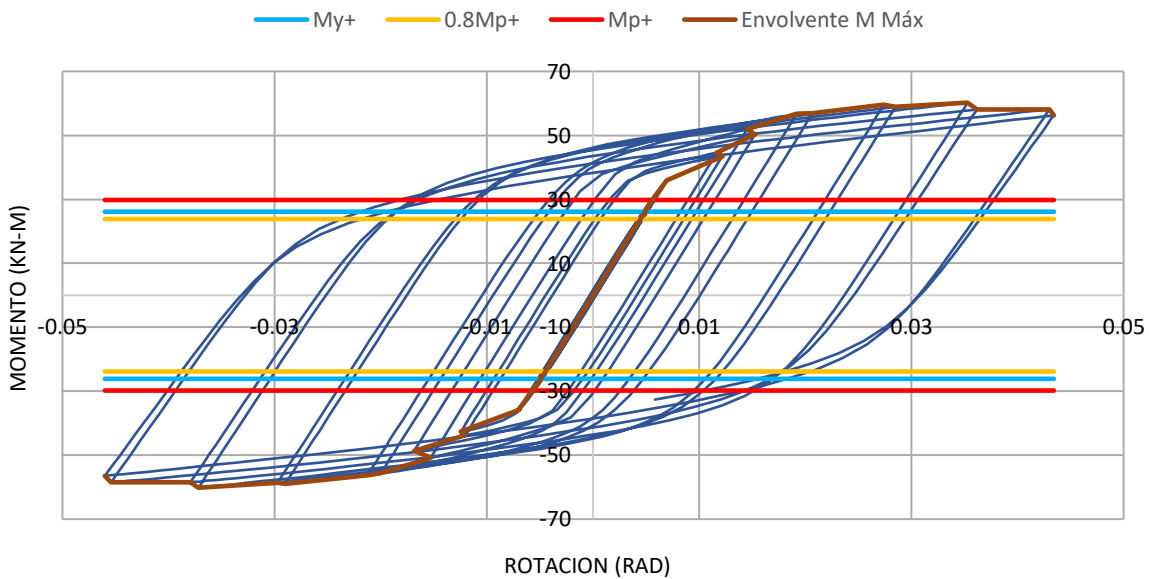


Figura 109. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E12.7. Construcción propia.

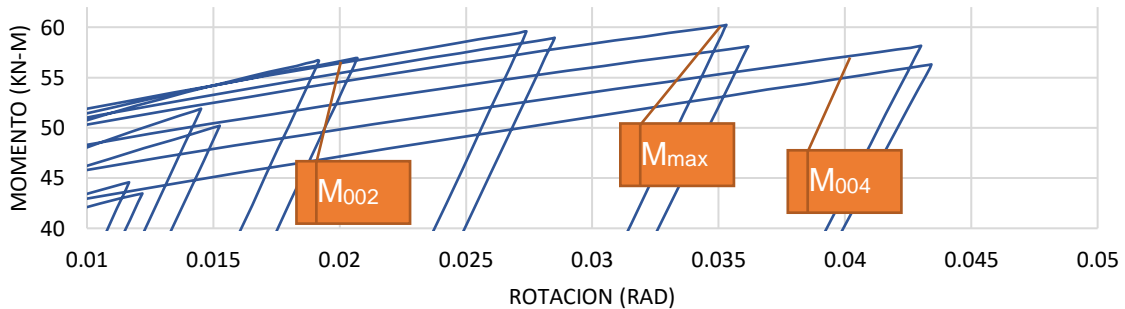


Figura 110. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E12.7. Construcción propia

5.3.2.19 L210E15. A continuación, en la Tabla 35 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	210mm	M_{max} [kN-m]	60.31	-
Área de Placa	44.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	56.77	1.06Mp
Espesor	15mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	57.25	0.95Mp

Tabla 35. Detalles de la configuración L210E15. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 111 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L210E15.

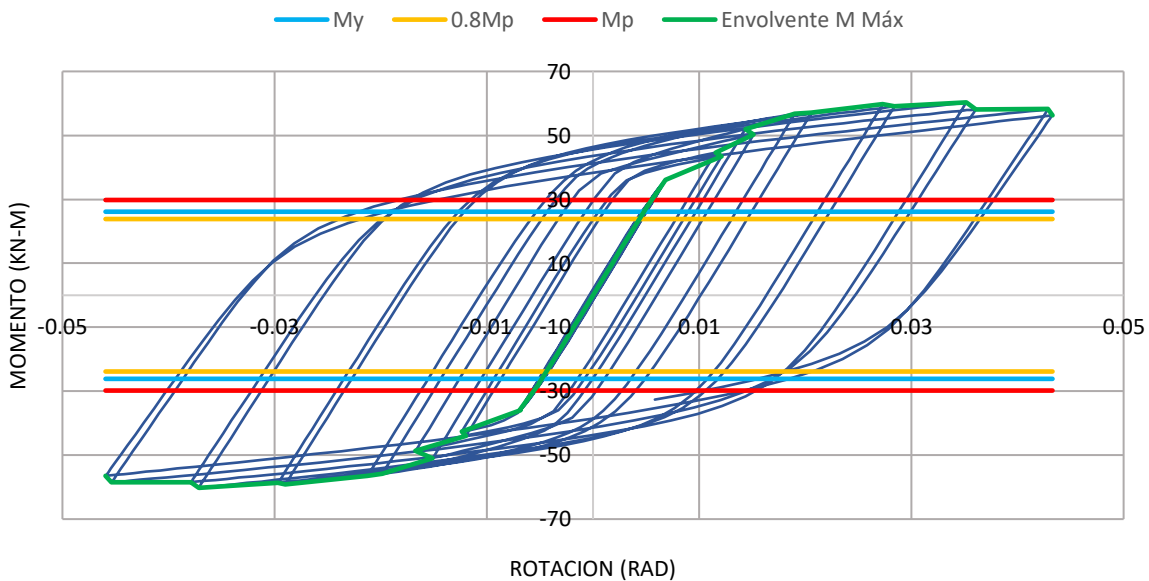


Figura 111. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E15. Construcción propia.

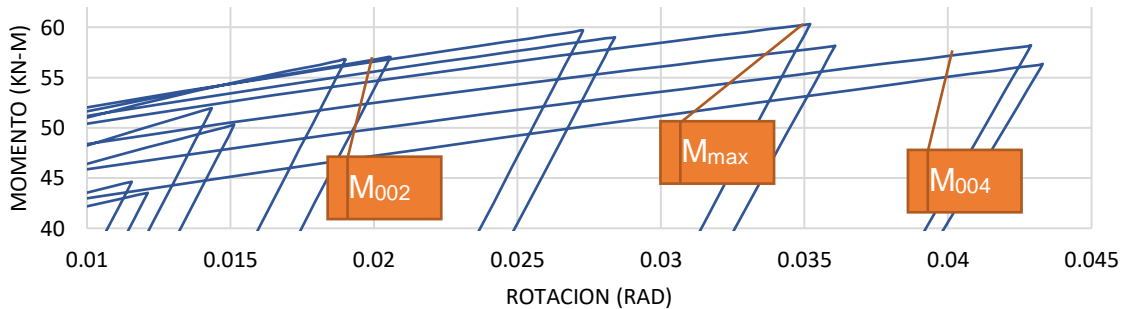


Figura 112. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E15. Construcción propia

5.3.2.20 L210E19. A continuación, en la Tabla 36 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	210mm	M_{max} [kN-m]	60.33	-
Área de Placa	44.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	56.93	1.06Mp
Espesor	19mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	57.25	0.95Mp

Tabla 36. Detalles de la configuración L210E19. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 113 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L210E19.

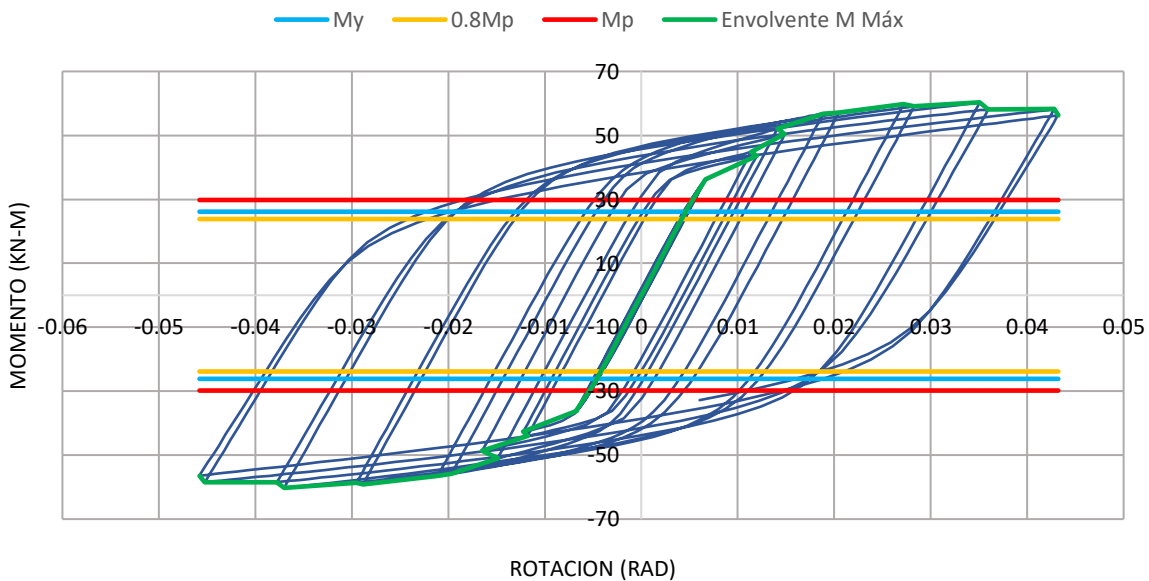


Figura 113. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E19. Construcción propia.

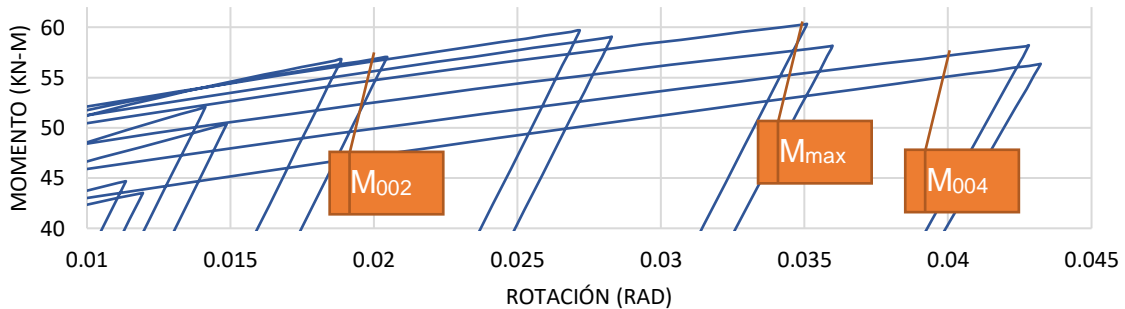


Figura 114. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E19. Construcción propia

5.3.2.21 L220E8. A continuación, en la Tabla 37 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	220mm	M_{max} [kN-m]	60.58	-
Área de Placa	48.400mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	56.73	1.07Mp
Espesor	8mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	57.46	0.95Mp

Tabla 37. Detalles de la configuración L220E8, para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 115 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L220E8.

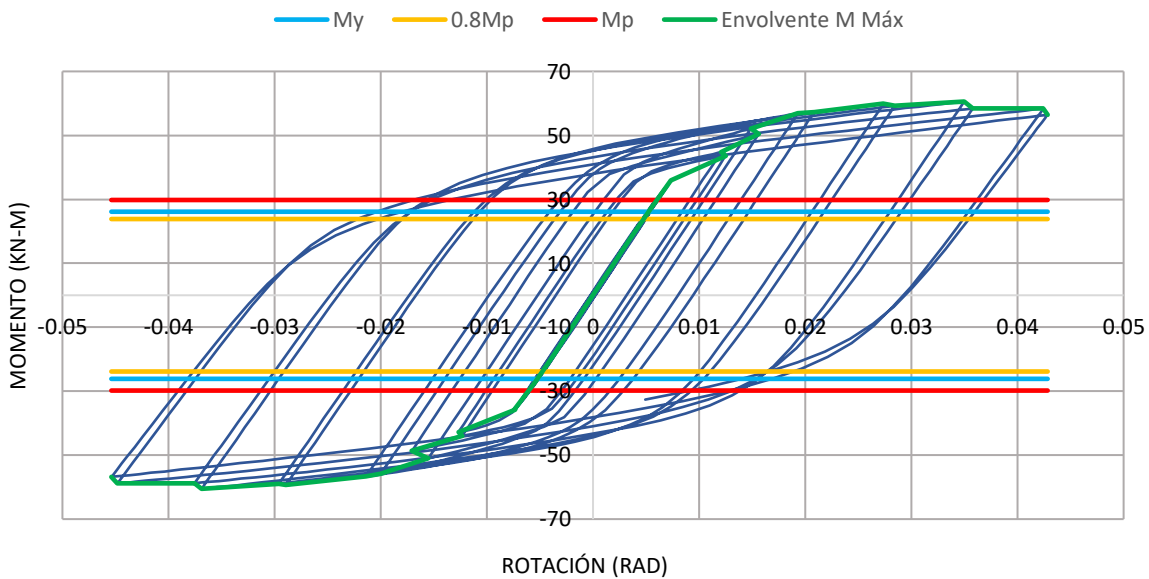


Figura 115. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E8. Construcción propia.

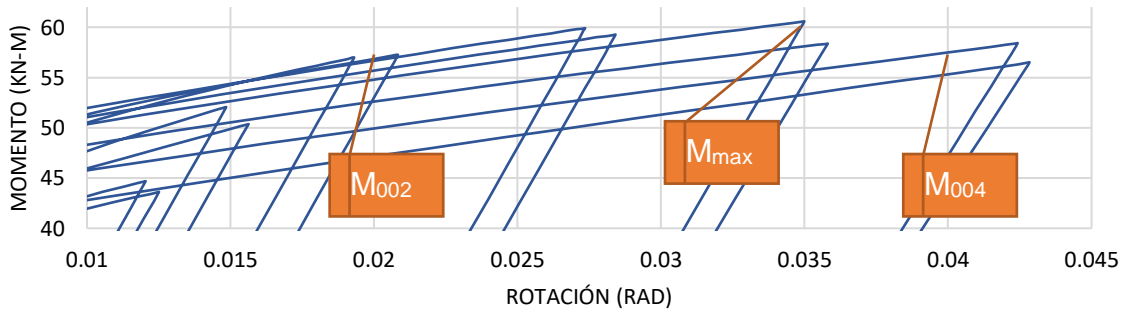


Figura 116. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E8. Construcción propia

5.3.2.22 L220E9. A continuación, en la Tabla 38 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	220mm	M_{max} [kN-m]	60.57	-
Área de Placa	48.400mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	56.74	1.07 M_{max}
Espesor	9mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	57.47	0.95 M_{max}

Tabla 38. Detalles de la configuración L220E9, para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 117 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L220E9.

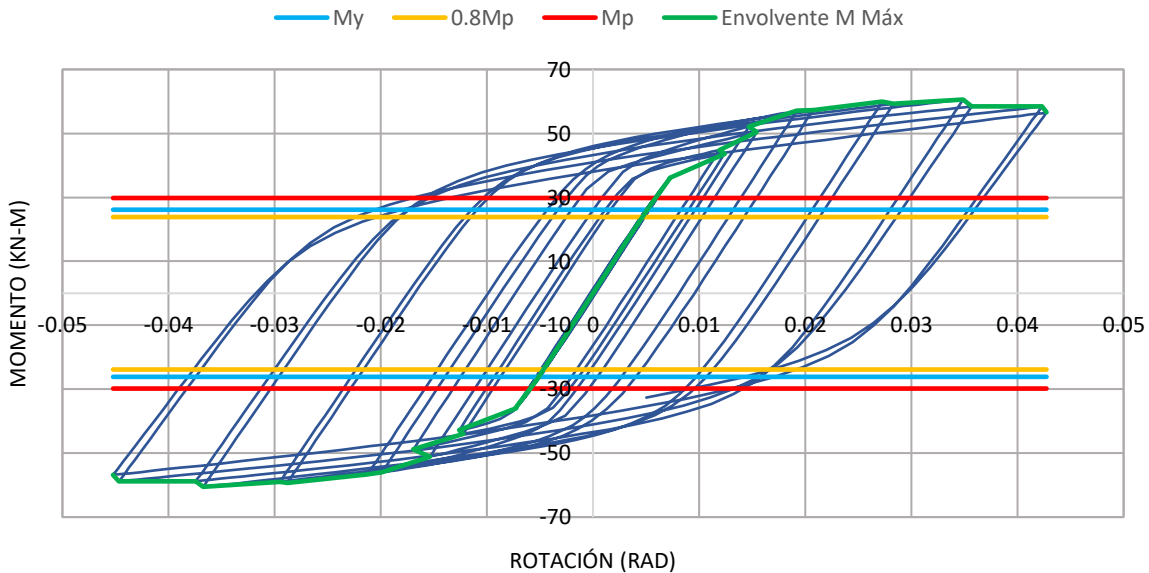


Figura 117. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E9. Construcción propia.

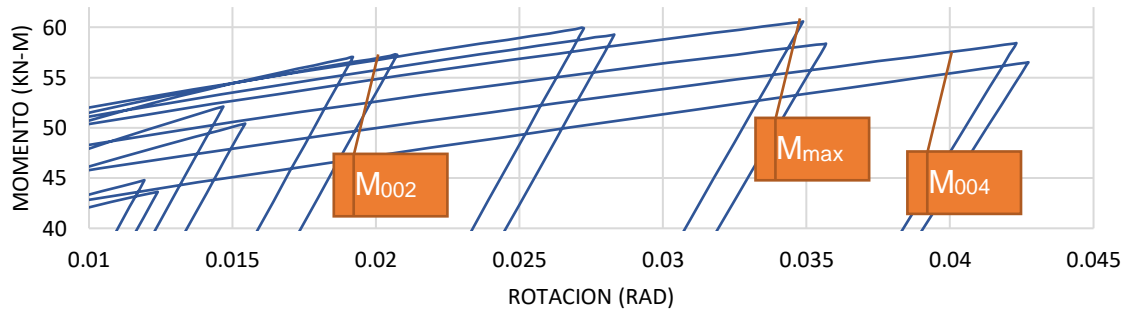


Figura 118. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E9. Construcción propia

5.3.2.23 L220E12.7. A continuación, en la Tabla 39 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	220mm	M_{max} [kN-m]	60.59	-
Área de Placa	48.400mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	57.20	1.06 M_{max}
Espesor	12.7mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	57.81	0.95 M_{max}

Tabla 39. Detalles de la configuración L220E12.7. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 119 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L220E12.7.

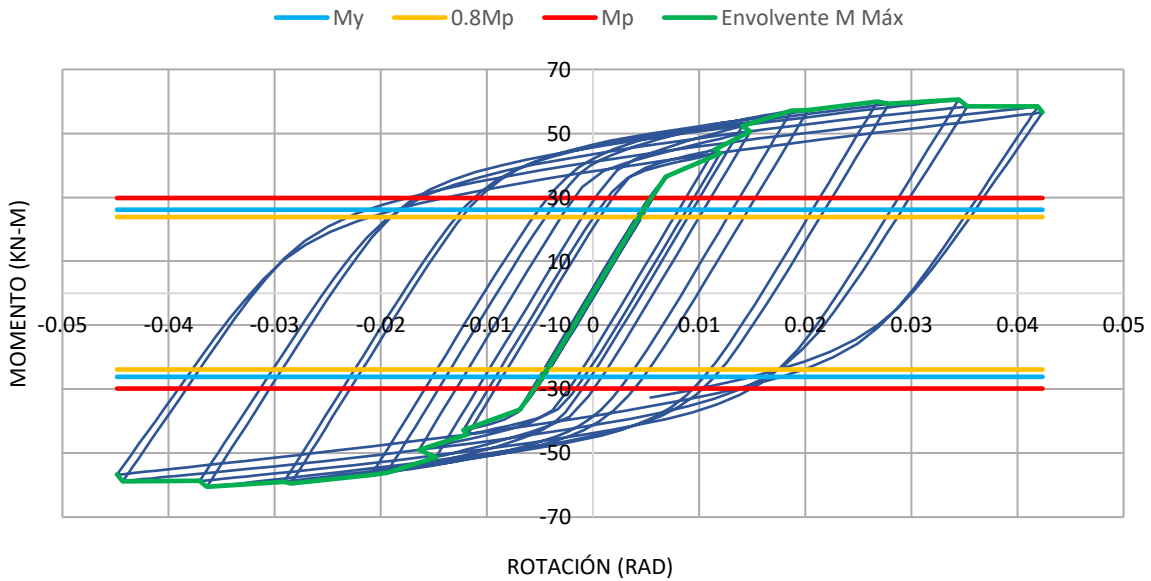


Figura 119. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E12.7. Construcción propia.

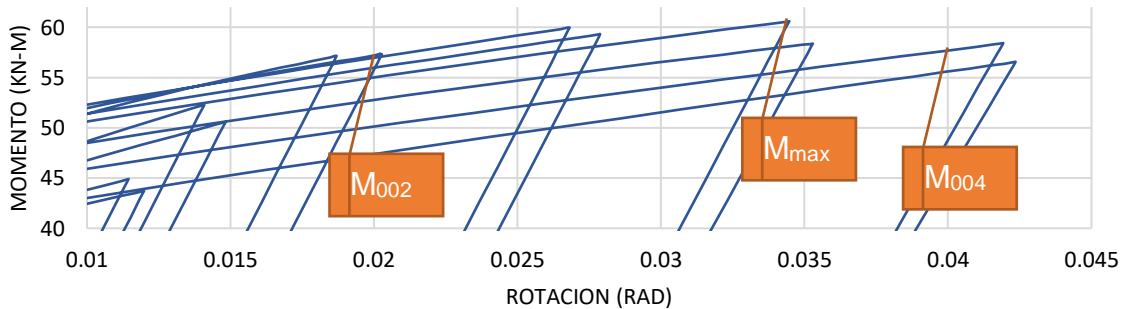


Figura 120. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E12.7. Construcción propia

5.3.2.24 L220E15. A continuación, en la Tabla 40 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	220mm	M_{max} [kN-m]	60.59	-
Área de Placa	48.400mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	57.36	1.06 M_{max}
Espesor	15mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	57.79	0.95 M_{max}

Tabla 40. Detalles de la configuración L220E15. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 121 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L220E15.

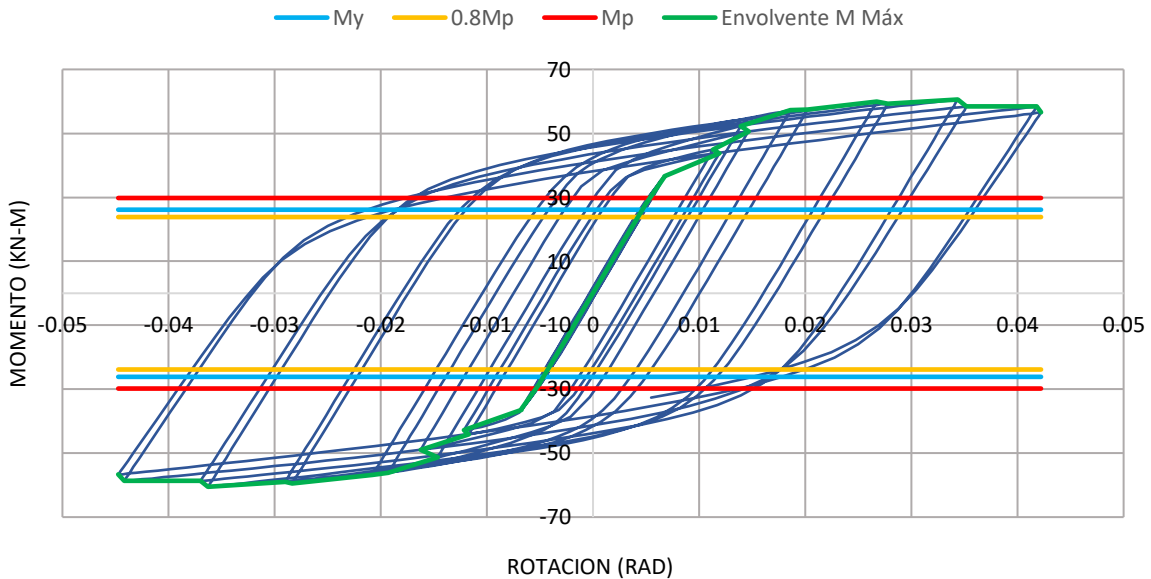


Figura 121. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E15. Construcción propia.

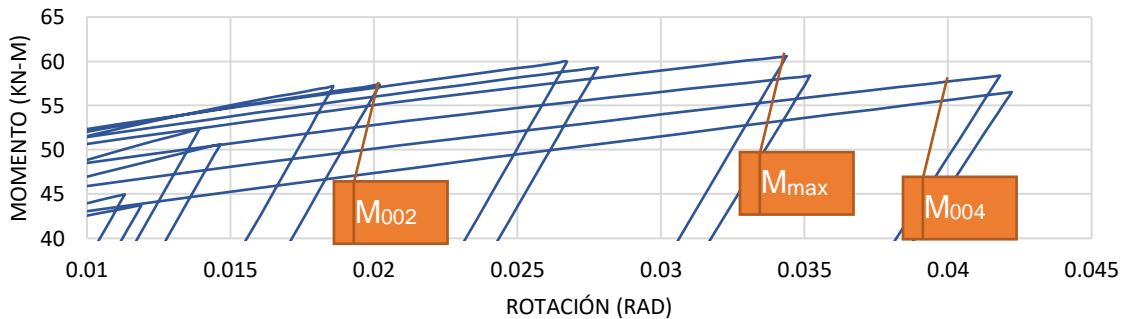


Figura 122. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E15. Construcción propia

5.3.2.25 L220E19. A continuación, en la Tabla 41 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	220mm	M_{max} [kN-m]	60.63	-
Área de Placa	48.400mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	57.38	1.06 M_{max}
Espesor	19mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	57.81	0.95 M_{max}

Tabla 41. Detalles de la configuración L220E19. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 123 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L220E19.

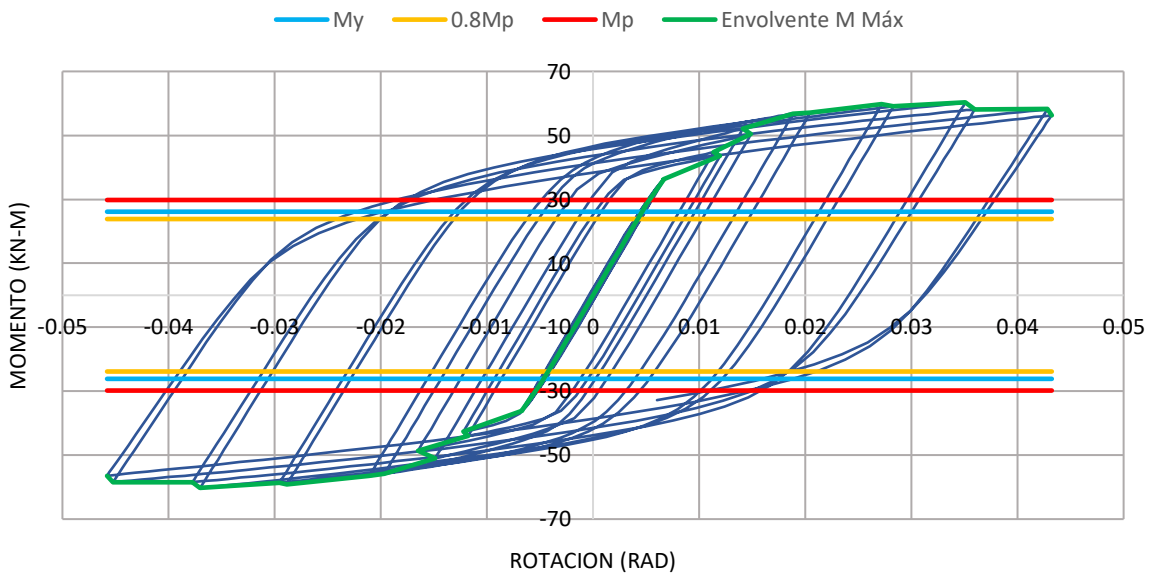


Figura 123. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E19. Construcción propia.

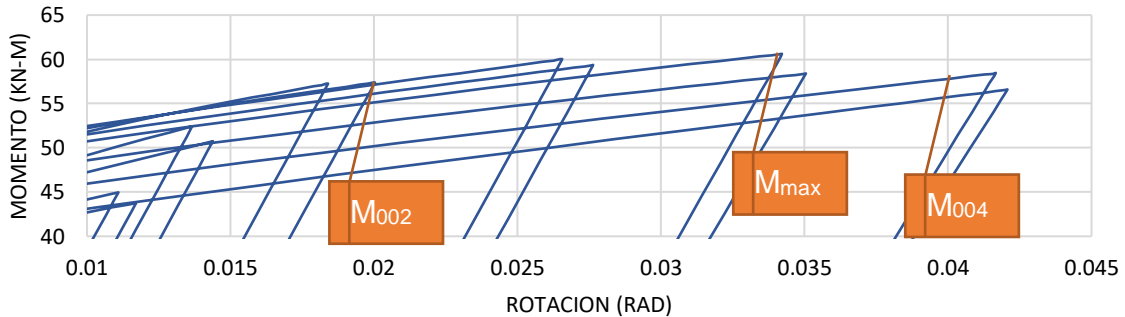


Figura 124. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E19. Construcción propia

5.3.2.26 Resumen de los resultados de los modelos.

Energía disipada. A continuación, se presenta el resumen de las áreas incluidas en las curvas Momento-Rotación (ver Tabla 42), las cuales son proporcionales a la energía disipada por cada conexión.

		ESPESOR				
		8 mm	9 mm	13 mm	15 mm	19 mm
LONGITUD (l)	180 mm	6.60	6.68	6.86	6.91	6.99
	190 mm	6.39	6.44	6.58	6.63	6.73
	200 mm	6.22	6.26	6.38	6.45	6.51
	210 mm	6.03	6.07	6.20	6.24	6.32
	220 mm	5.91	5.94	6.07	6.11	6.19

Tabla 42. Áreas obtenidas al interior de las curvas de Momento – Rotación según la configuración. Construcción propia.

En la Figura 125 se puede observar la distribución en superficie de la Tabla 42, en la cual se relaciona la distribución de disipación de energía según el espesor y longitud de la placa de continuidad evaluada.

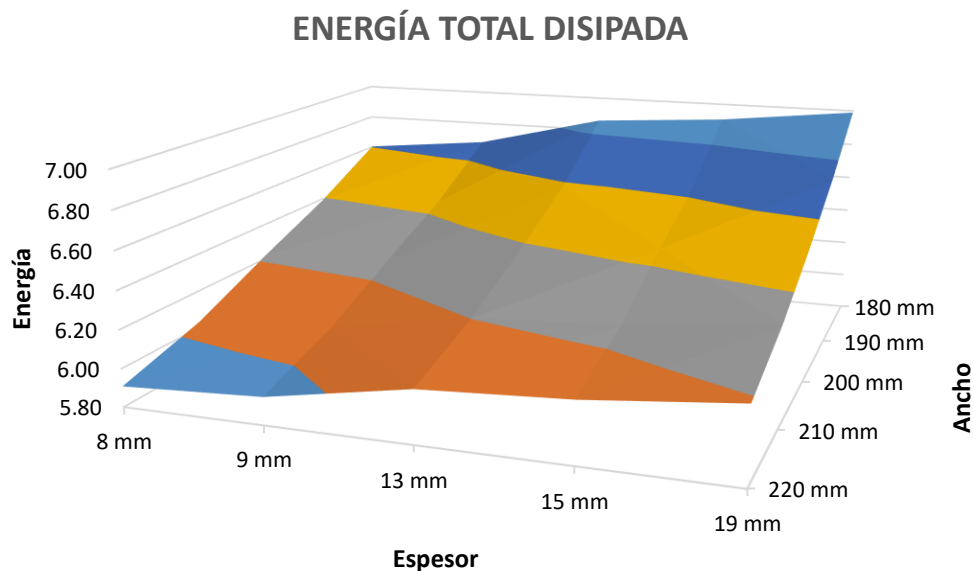


Figura 125. Superficie gráfica de disipación de energía según espesor y longitud de placa de continuidad. Construcción propia

Se observa que la configuración que más energía disipa es aquella que tiene menor dimensión en la placa de continuidad, pero mayor espesor de pletina. Para el caso expuesto, la configuración L220E8 es aquella que menos energía disipa, comparada con las demás configuraciones.

Según la resistencia requerida medida a la flexión de cada conexión, determinada en la cara de la columna, se evaluó la energía disipada a -0.04rad y 0.04rad de cada ciclo de histéresis, el cual es el requisito del ángulo de deriva de piso para DES al 0.8Mp (ver Tabla 43 y Figura 126)

		ESPESOR				
		8 mm	9 mm	13 mm	15 mm	19 mm
LONGITUD (l)	180 mm	6.173	6.205	6.270	6.343	6.404
	190 mm	5.946	5.994	6.124	6.169	6.260
	200 mm	5.786	5.825	5.938	6.001	6.059
	210 mm	5.612	5.652	5.770	5.810	5.884
	220 mm	5.497	5.531	5.651	5.689	5.758

Tabla 43. Energía disipada a -0.04rad y 0.04rad para cada configuración de conexión. Construcción propia

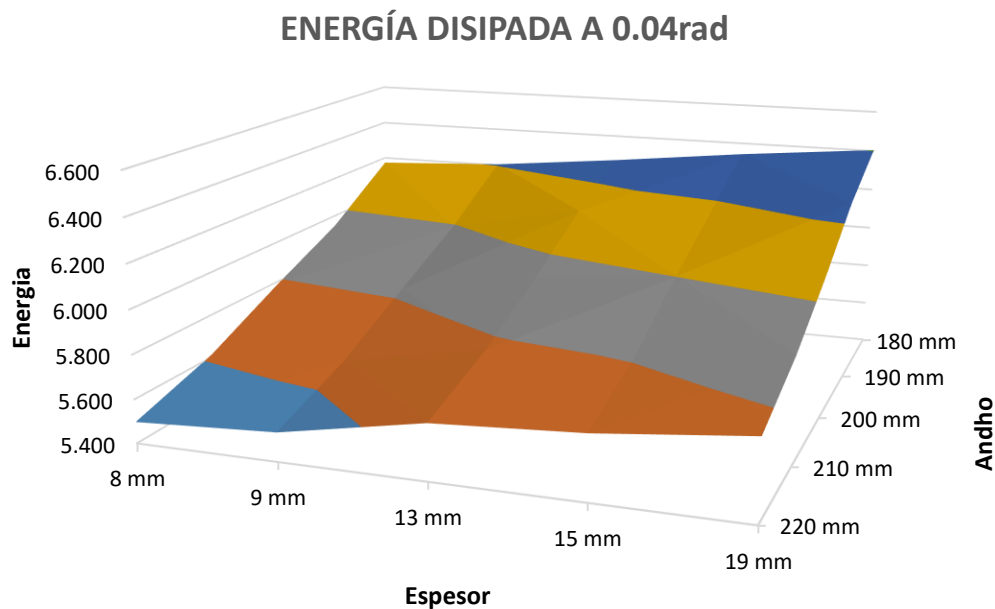


Figura 126. Energía disipada a -0.04rad y 0.04rad para cada configuración de conexión. Construcción propia

Momentos máximos por configuración. Al realizar la revisión del M_{MAX} obtenido durante los ciclos de histéresis para todas las configuraciones dentro de la gráfica Momento – Rotación (ver Tabla 44), se puede observar que, a mayor dimensión de la placa de continuidad, el M_{MAX} es más elevado, sin embargo, el M_{MAX} no varía en gran proporción como se observa en la Figura 127.

		ESPESOR				
		8 mm	9 mm	13 mm	15 mm	19 mm
LONGITUD (l)	180 mm	57.99	57.82	57.75	57.66	57.74
	190 mm	59.13	59.05	59.05	59.00	59.00
	200 mm	59.80	59.79	59.81	59.83	59.83
	210 mm	60.26	60.27	60.23	60.31	60.33
	220 mm	60.58	60.57	60.59	60.59	60.63

Tabla 44. Momentos máximos obtenidos para cada configuración. Unidades expresadas en MPa. Construcción propia.

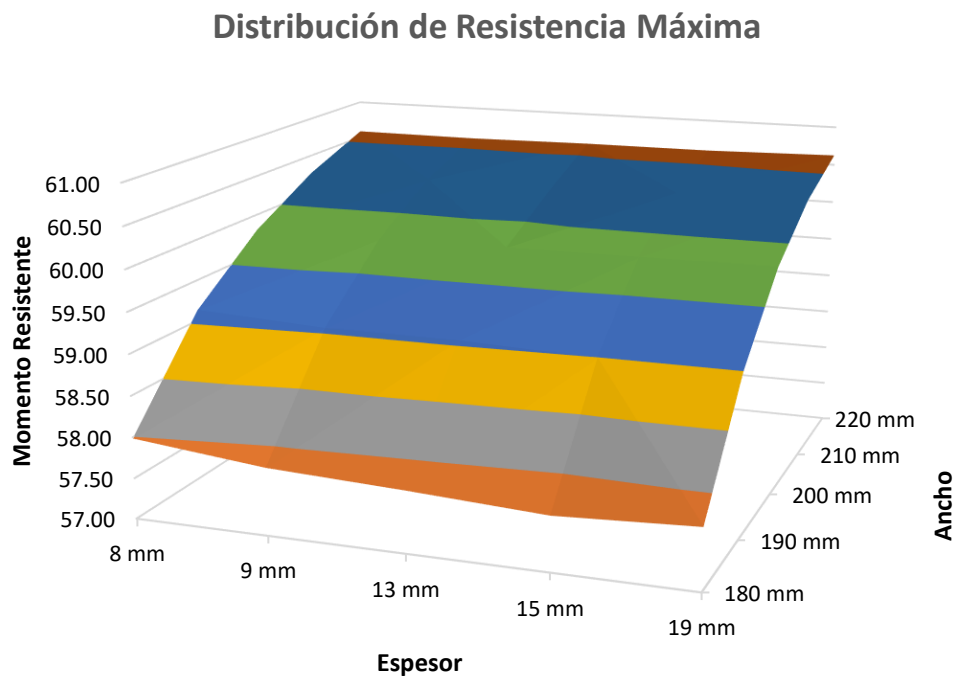


Figura 127. Distribución de resistencia máxima obtenida por cada configuración de conexión. Construcción propia

En la Tabla 45 se observan los momentos máximos obtenidos para cada configuración, normalizados respecto al M_p de la viga, el cual fue calculado en la Tabla 16.

		ESPESOR				
		8 mm	9 mm	13 mm	15 mm	19 mm
LONGITUD (l)	180 mm	1,95	1,94	1,94	1,93	1,94
	190 mm	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
	200 mm	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01
	210 mm	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02
	220 mm	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03

Tabla 45. Valores de $M_{m\acute{a}x}$ normalizados respecto al M_p descrito en la Tabla 16

Distribución de Resistencia Máxima normalizada respecto a M_p

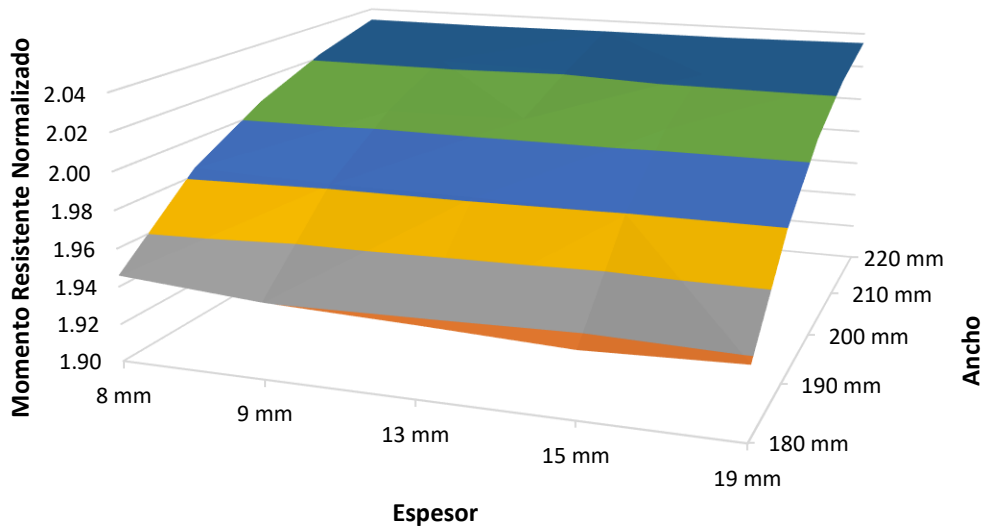


Figura 128. Distribución de Momentos máximos normalizados respecto al M_p

La envolvente de momentos máximos obtenidos de la curva momento - rotación por cada ciclo se detalla a continuación.

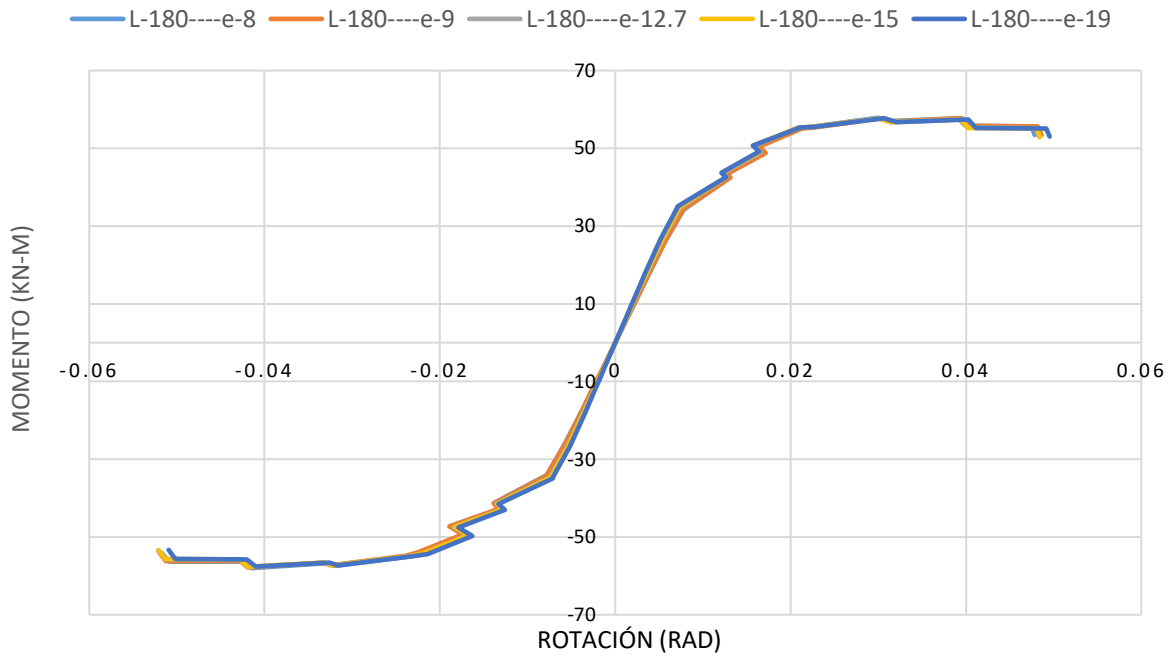


Figura 129. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 180mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.

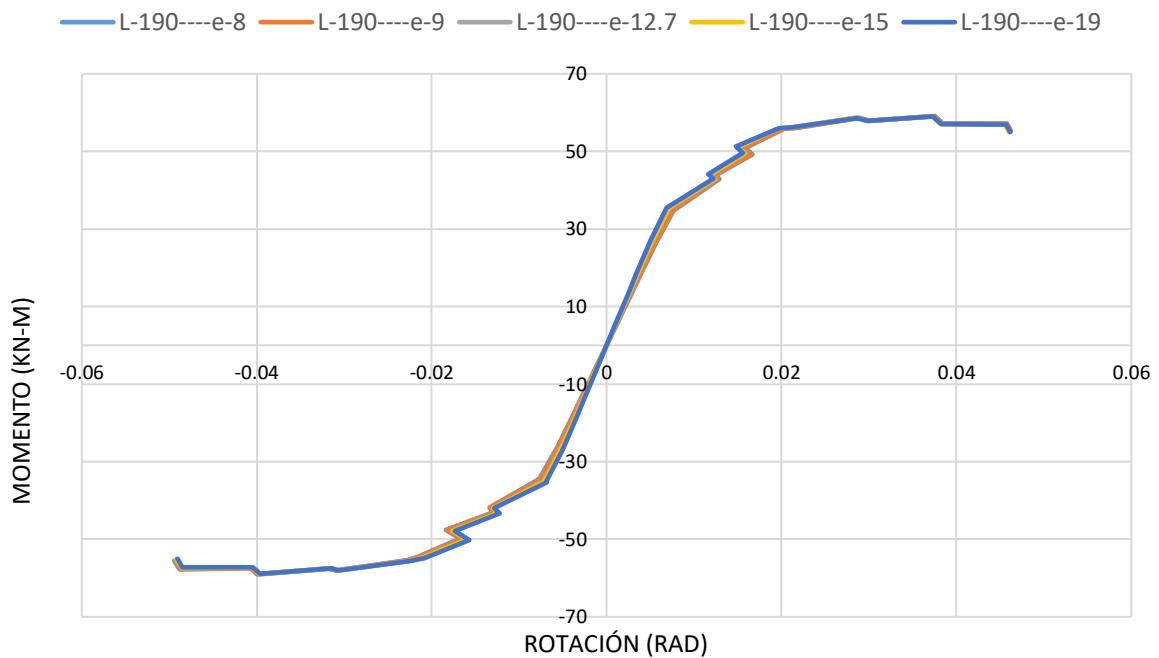


Figura 130. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 190mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.

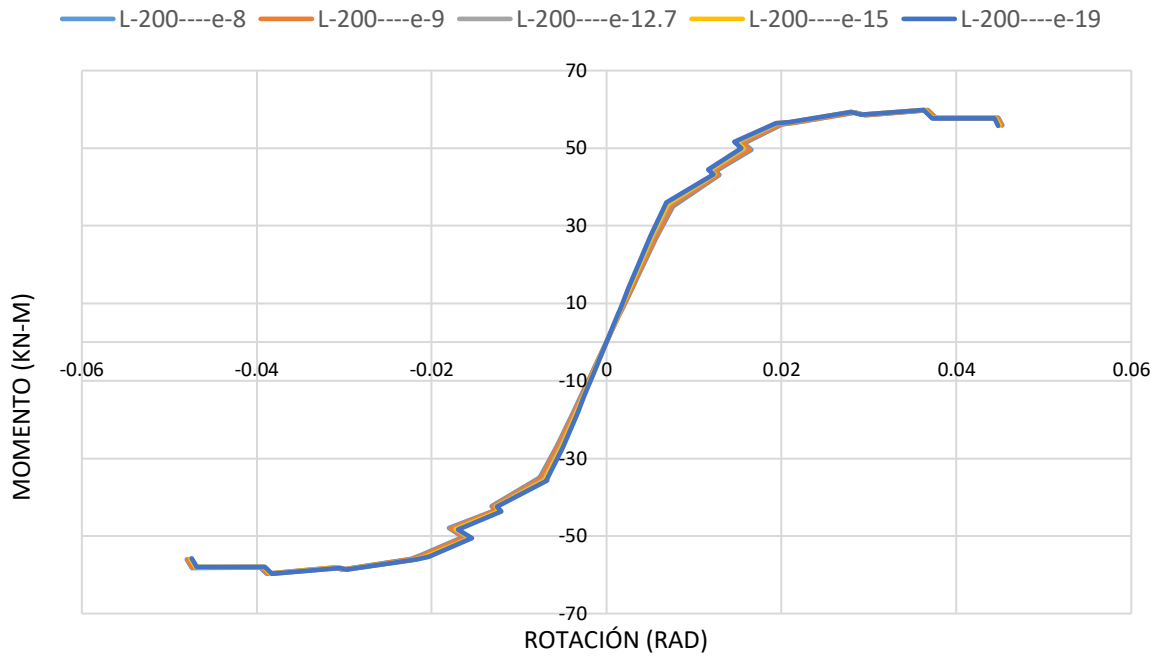


Figura 131. Envoltura de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 200mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.

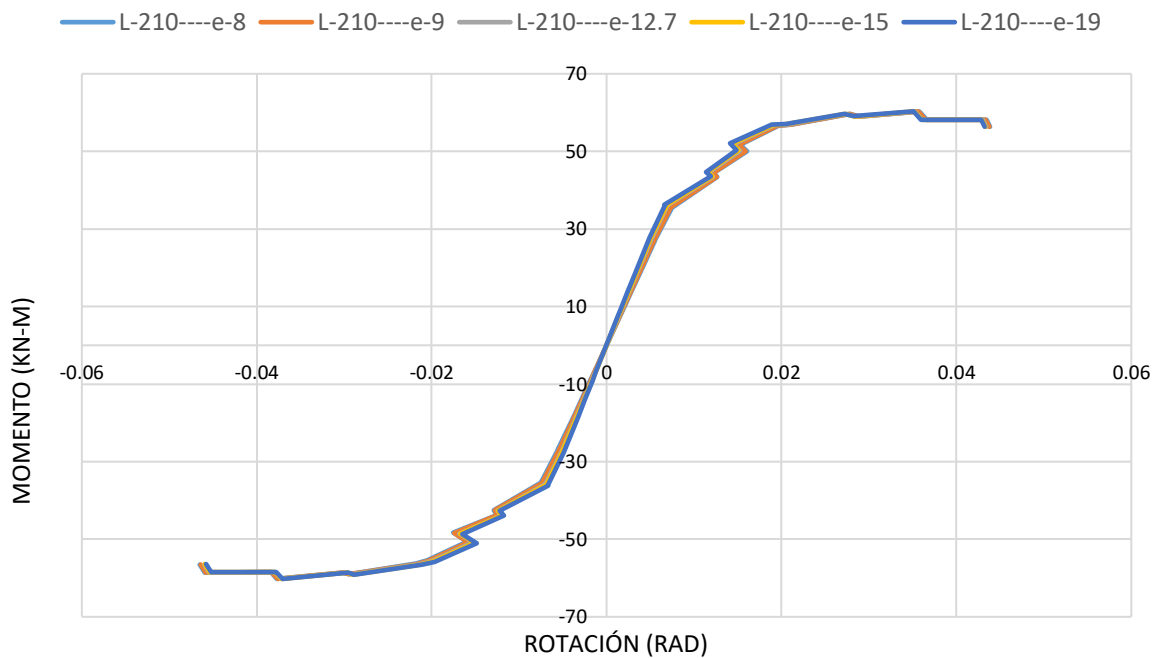


Figura 132. Envoltura de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 210mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.

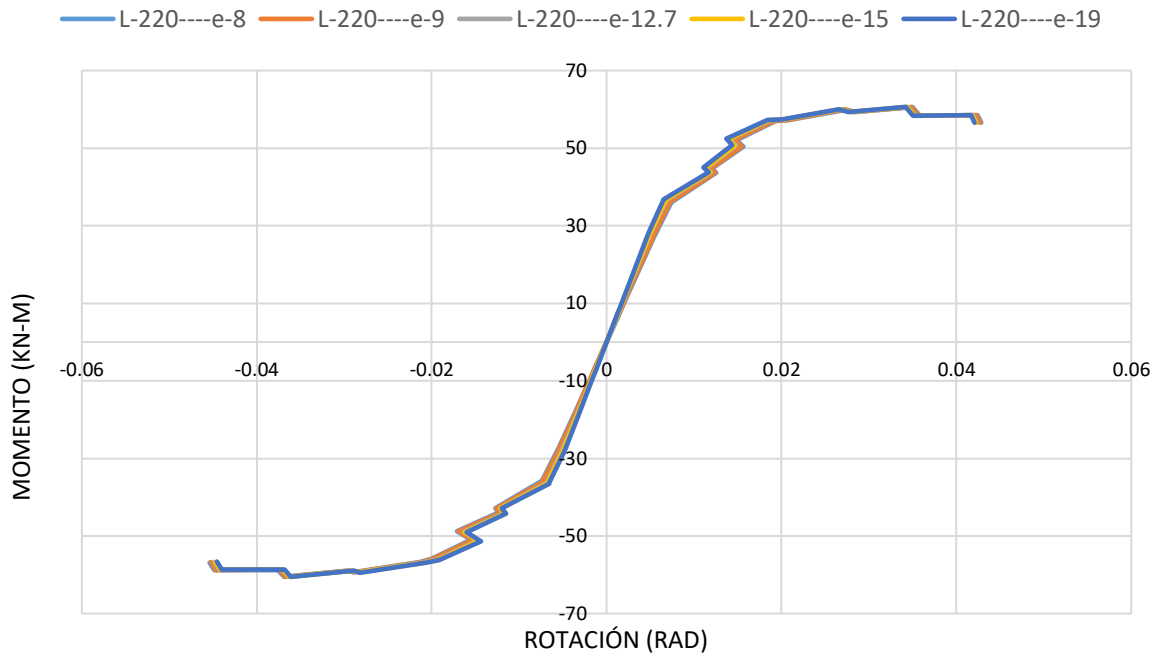


Figura 133.. Envoltura de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 220mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.

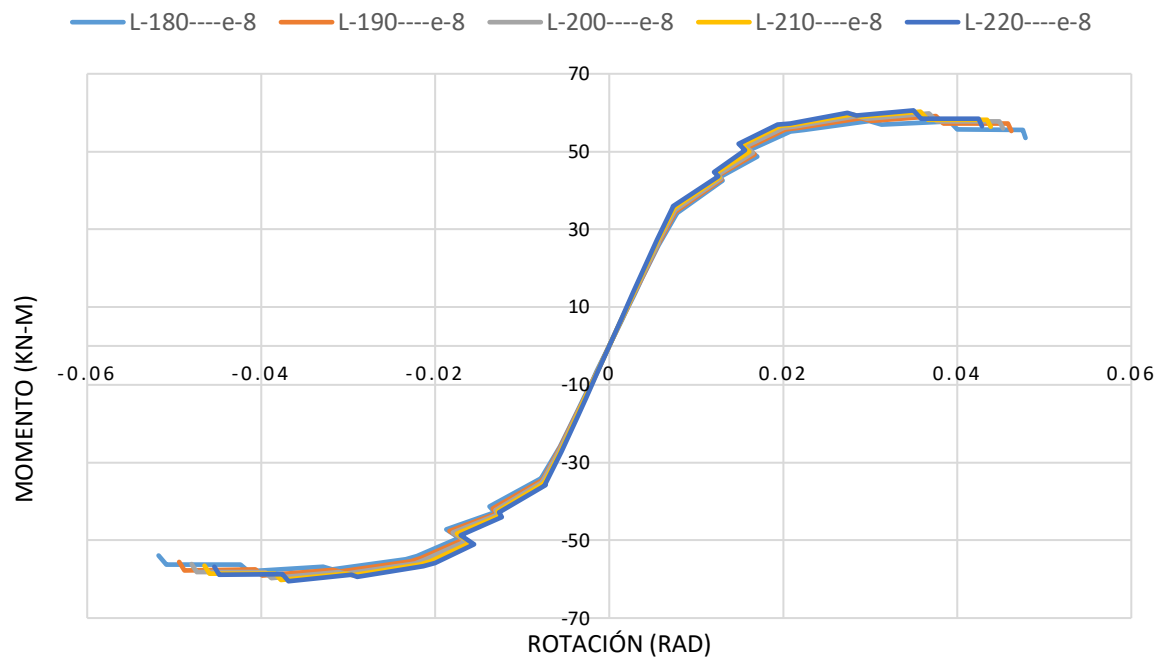


Figura 134. Envoltura de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 8mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.

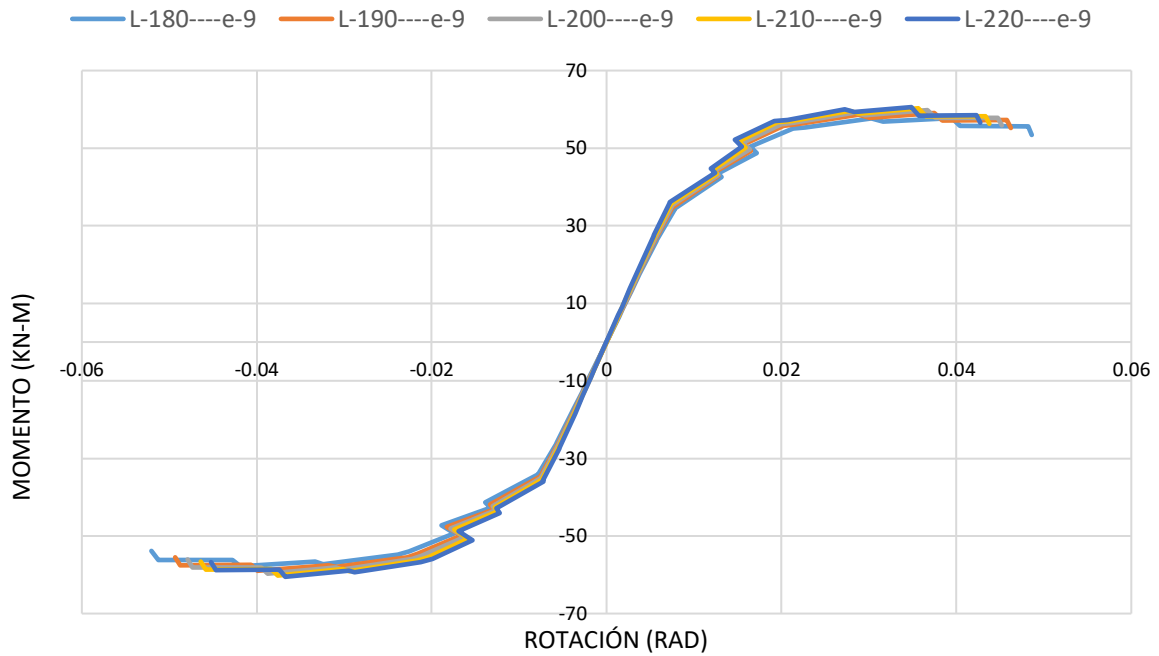


Figura 135. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 9mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.

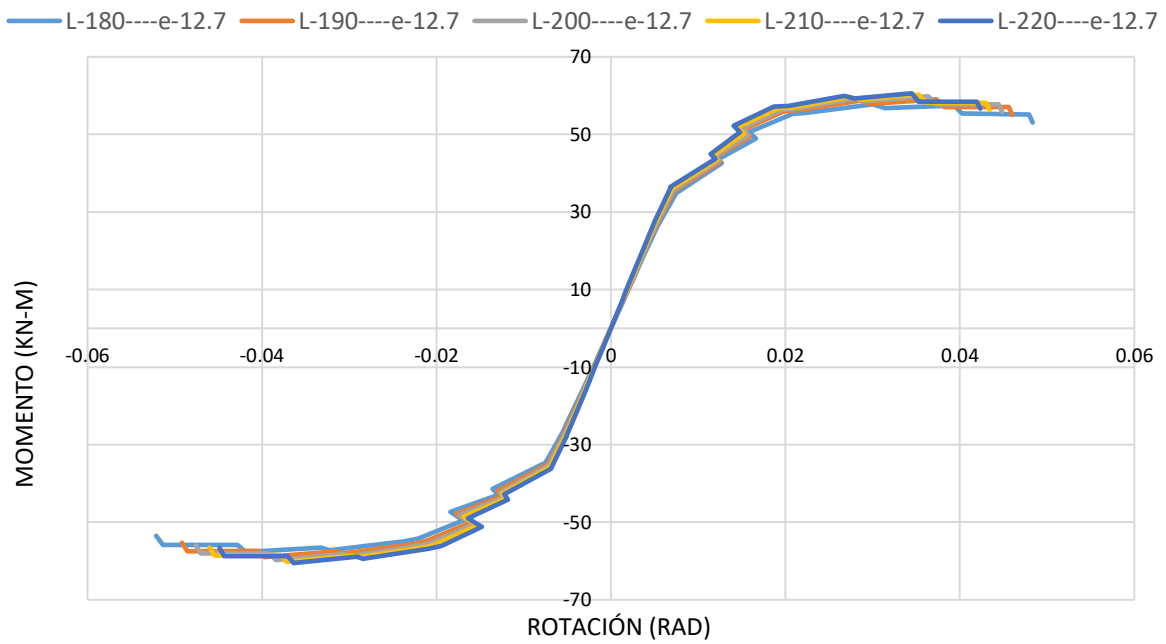


Figura 136. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 12.7mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.

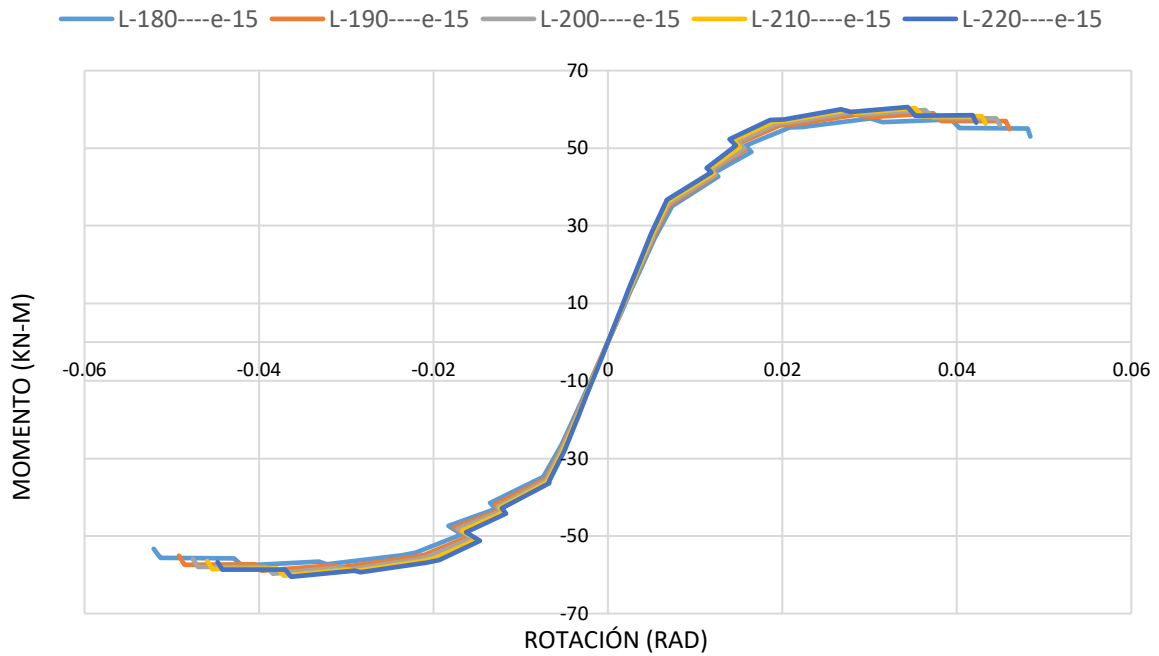


Figura 137. Envoltura de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 15mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.

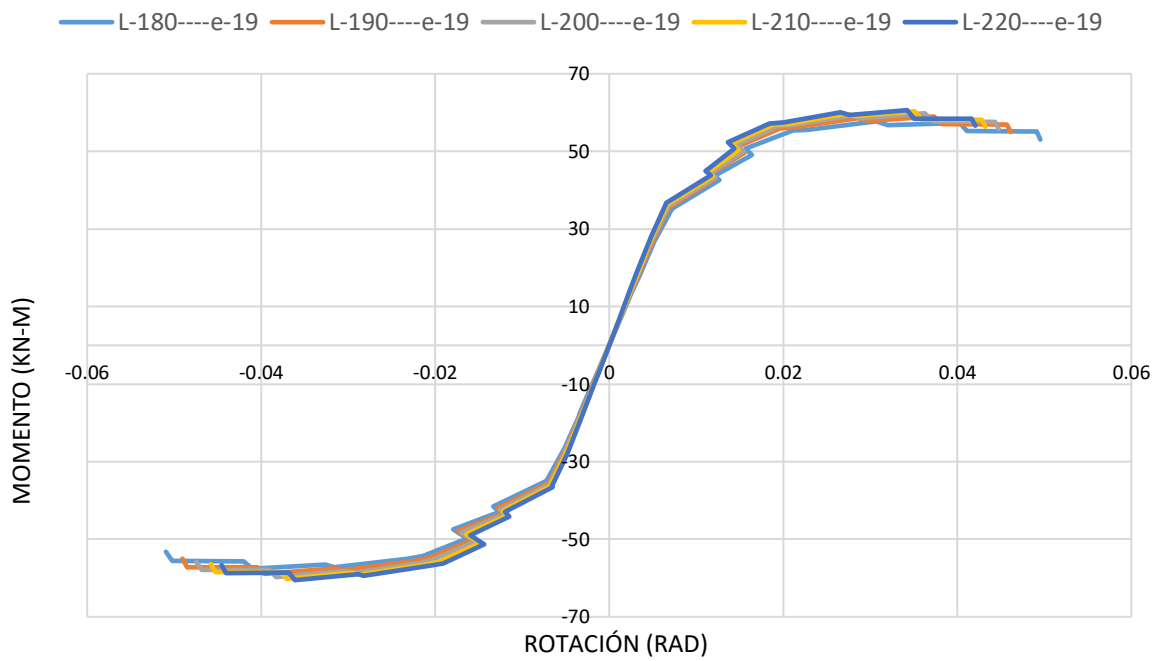


Figura 138. Envoltura de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 19mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.

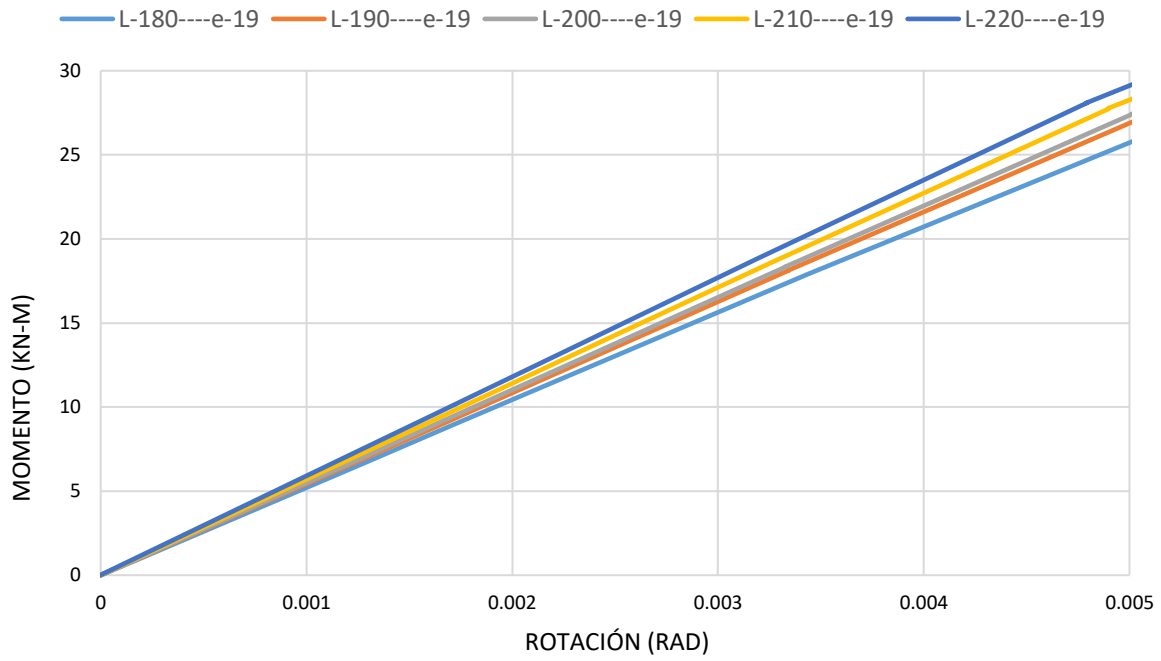


Figura 139. Rigidez rotacional inicial variando áreas. Construcción propia

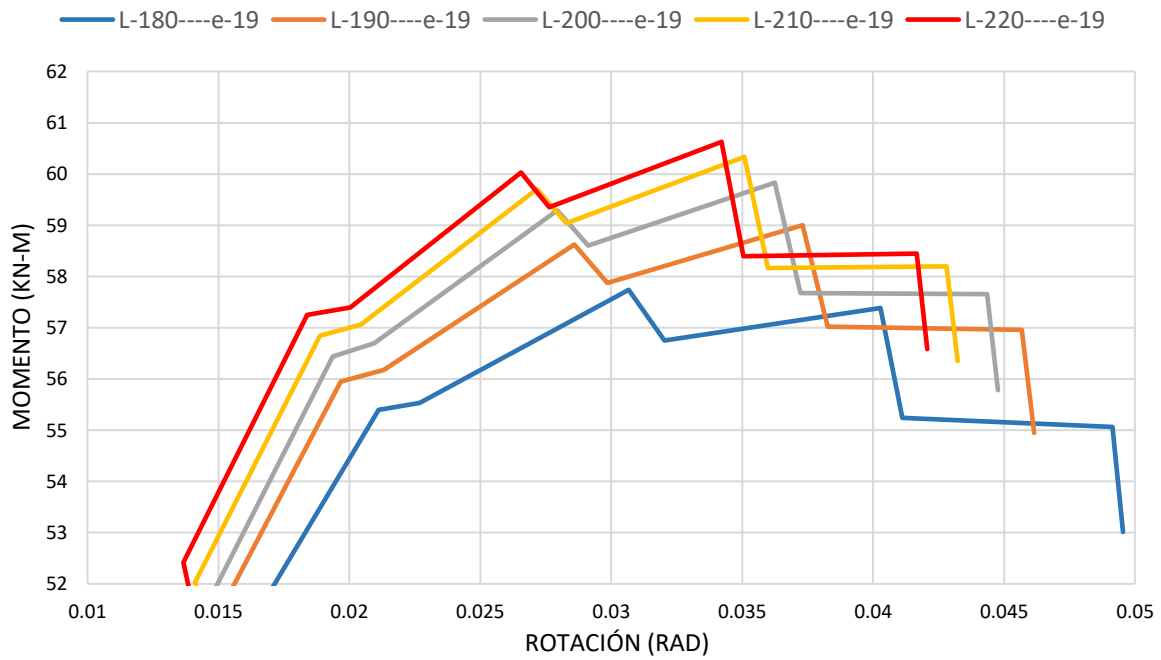


Figura 140. Momentos máximos obtenidos variando áreas. Construcción propia

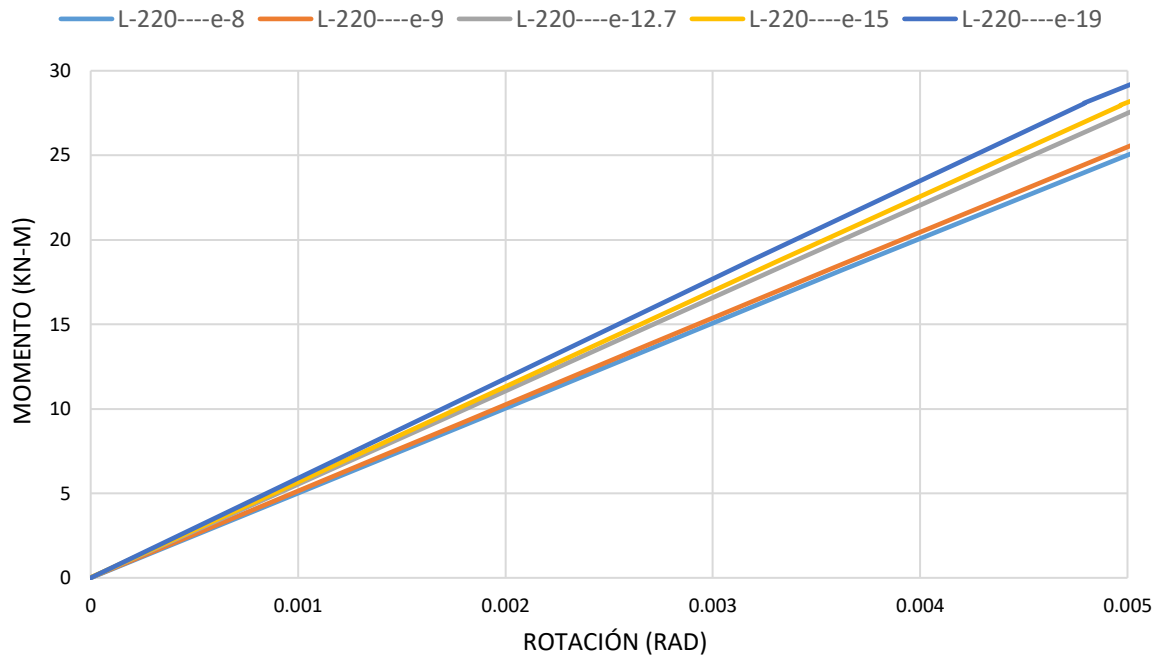


Figura 141. Rigidez rotacional inicial variando espesores. Construcción propia

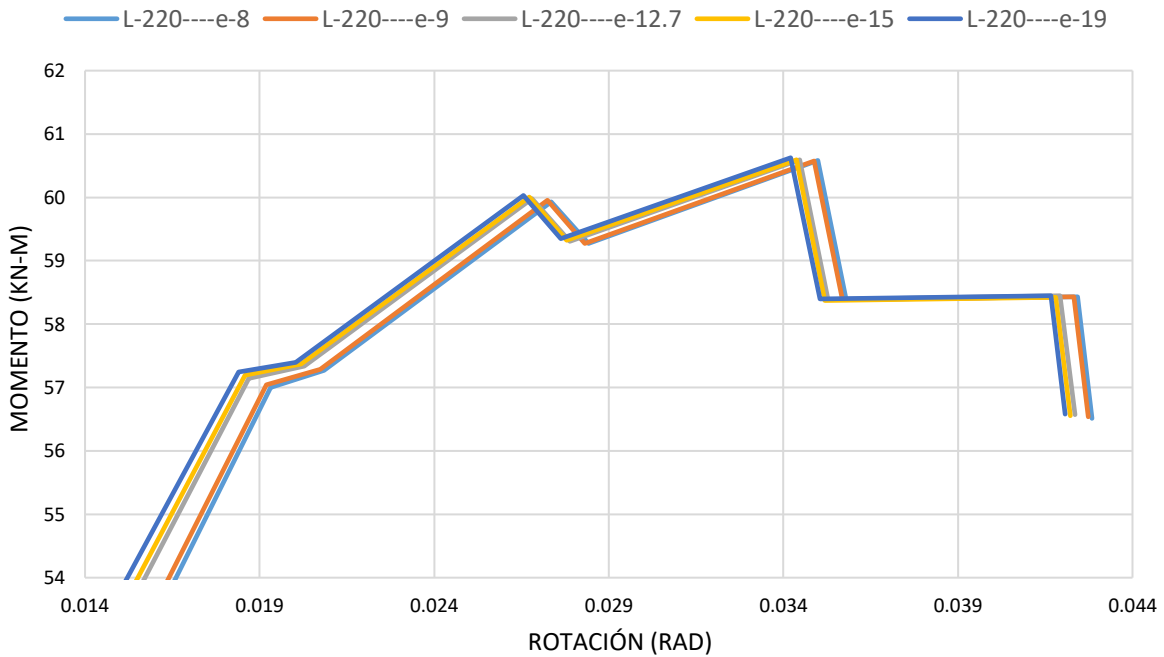


Figura 142. Momentos máximos obtenidos variando espesores. Construcción propia

5.3.2.27 Análisis respecto a las áreas

En la Figura 139 y Figura 140, se puede observar un incremento de la rigidez rotacional inicial con el aumento del área de las placas de continuidad, adicionalmente se aprecia un efecto sobre los momentos máximos conseguidos, para los cuales se obtiene una mayor resistencia en estas configuraciones con mayor área de placa, también se observan incrementos en las rotaciones con la disminución de las áreas de las placas de continuidad.

Respecto al índice de energía disipada, se encuentra que, a menor área se disipa más energía.

Debido a esto se realizó un posterior análisis ya no sobre el ensayo completo, sino acotando el problema a las rotaciones estandarizadas en la norma, con lo cual se redujo el problema a la determinación del área y decremento del momento plástico entre las rotaciones -0.04 y 0.04 radianes, las cuales se indican en la NSR-10, para calificación de conexiones para DES. A partir de esta actividad se encontró que a mayor área se obtienen mayores momentos resistentes, mayor rigidez rotacional inicial y mayor energía disipada de la conexión, lo cual es coherente con los resultados esperados.

5.3.2.28 Análisis respecto a los espesores

En las Figura 141 y Figura 142, se puede observar un incremento de la rigidez rotacional inicial, del momento máximo obtenido y disminución de las rotaciones con el aumento del espesor de las placas de continuidad. Adicionalmente se aprecia también un incremento en la energía disipada tanto para el ensayo completo como para la actividad en la que se acotó la rotación de -0.04 a 0.04 radianes, de lo cual se deduce que, a mayor espesor se disipa mayor energía; sin embargo, las variaciones en las resistencias y rotaciones de la conexión son menores con el cambio de espesor que con el cambio de área.

5.3.3 Modelación numérica de veinticinco (25) configuraciones de espesor y área de las placas de continuidad usando el F_y teórico

Los ensayos experimentales descritos en las secciones anteriores se realizaron con el fin de calibrar un (1) modelo numérico que se usaría de base para reproducir modelos de veinticinco (25) conexiones usando ANSYS APDL, en los cuales se varió la longitud (l) y el espesor de las placas de continuidad bajo las configuraciones descritas en la Tabla 15. Para esta nueva modelación, se usaron los valores teóricos de cada acero, en relación con los esfuerzos de fluencia mínimo especificado F_y , y la resistencia a tensión mínima especificada F_u . Las configuraciones geométricas se describen a continuación en la Tabla 46.

VARIACIÓN DE LA GEOMETRÍA						
		ESPESOR				
		8 mm	9 mm	13 mm	15 mm	19 mm
LONGITUD (l)	180 mm	L180E8T	L180E9T	L180E12.7T	L180E15T	L180E19T
	190 mm	L190E8T	L190E9T	L190E12.7T	L190E15T	L190E19T
	200 mm	L200E8T	L200E9T	L200E12.7T	L200E15T	L200E19T
	210 mm	L210E8T	L210E9T	L210E12.7T	L210E15T	L210E19T
	220 mm	L220E8T	L220E9T	L220E12.7T	L220E15T	L220E19T

Tabla 46. Configuración de longitud y espesor de placa de continuidad de los modelos numéricos para F_y y F_u teóricos. Construcción propia

Según lo descrito en la sección 1.9 Requisitos del NSR-10 para PRM-DMO y PRM-DES, se determinó el Momento Elástico M_y , Momento Plástico M_p , y $0.8M_p$ (ver Tabla 16) con el fin de verificar los requisitos de ángulo de deriva de piso. Tales momentos se observan graficados en todos los ciclos de histéresis mostrados a continuación.

5.3.3.1 L180E8T. A continuación, en la Tabla 47 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	180mm	M_{max} [kN-m]	61.24	-
Área de Placa	32.400mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	55.54	1.1 M_{max}
Espesor	8mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	59.28	0.97 M_{max}

Tabla 47. Detalles de la configuración L180E8T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 143 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración **L220E19**.

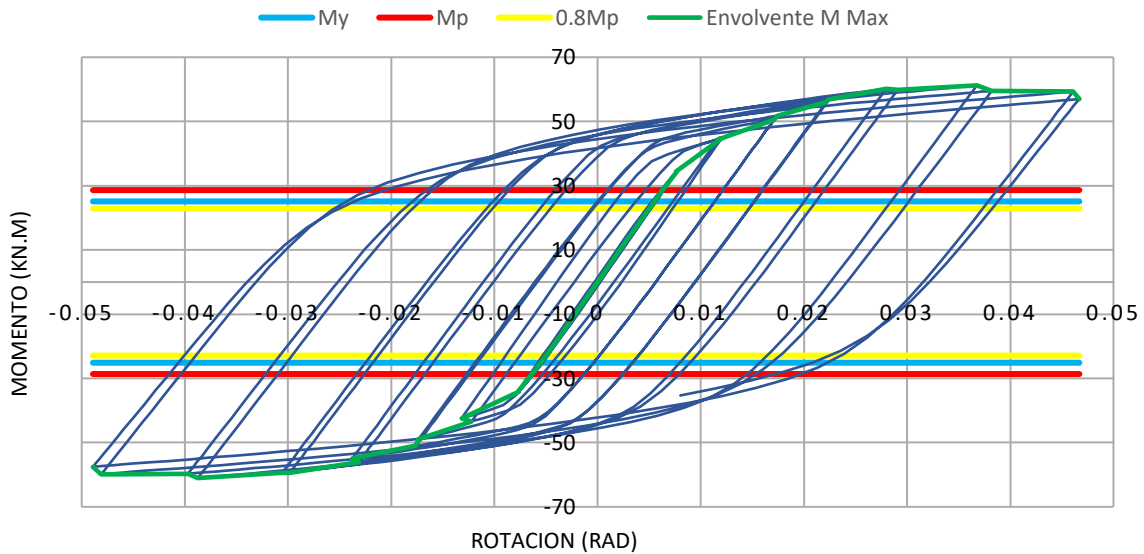


Figura 143. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E8T. Construcción propia.

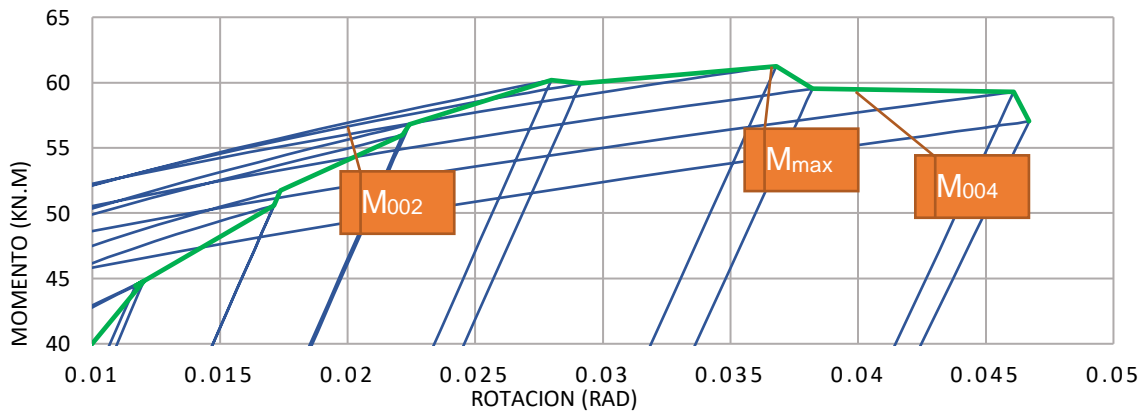


Figura 144. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E8T. Construcción propia

5.3.3.2 L180E9T. A continuación, en la Tabla 48 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	180mm	M_{max} [kN-m]	61.17	-
Área de Placa	32.400mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	55.39	1.1 M_{max}
Espesor	9mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	59.38	0.97 M_{max}

Tabla 48. Detalles de la configuración L180E9T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 145 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L180E9T.

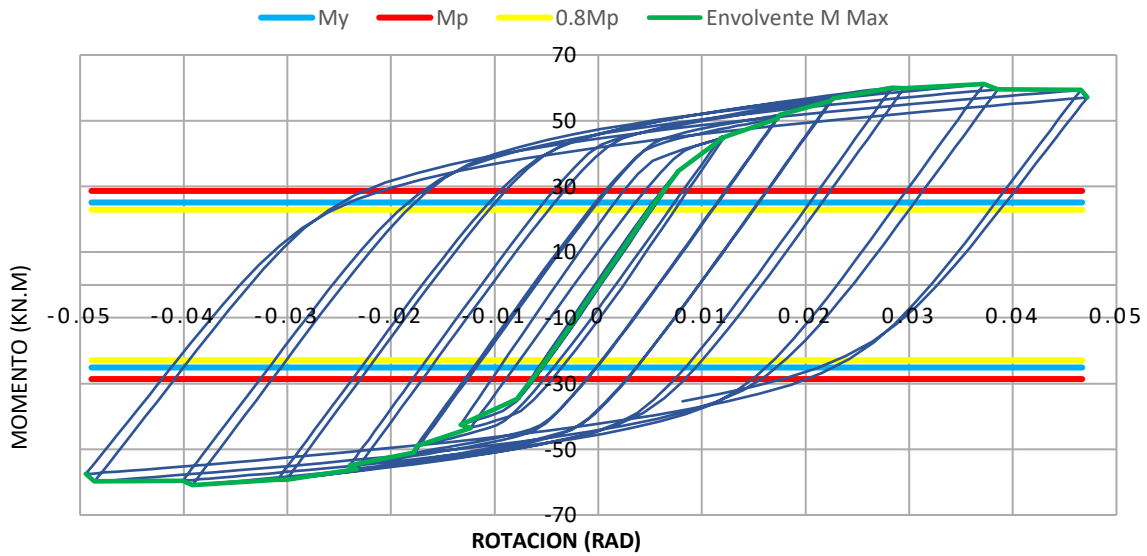


Figura 145. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E9T. Construcción propia.

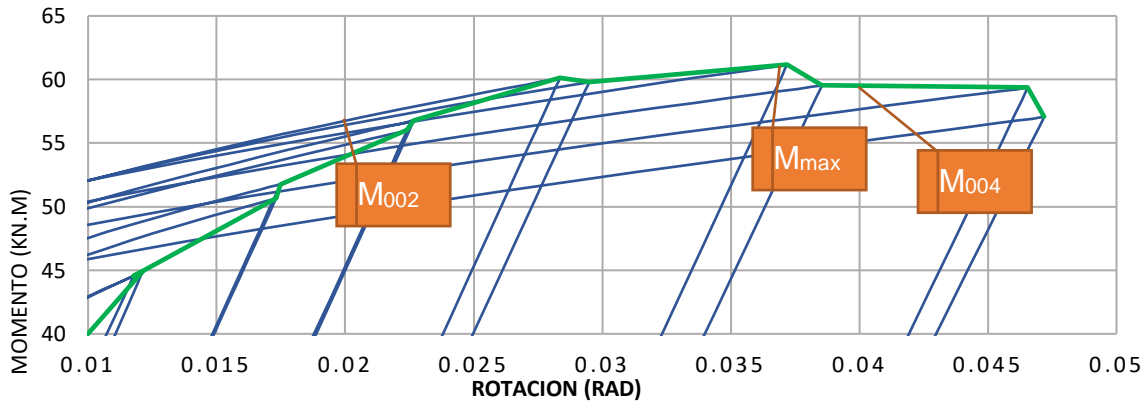


Figura 146. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E9T. Construcción propia

5.3.3.3 L180E12.7T. A continuación, en la Tabla 49 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	180mm	M_{max} [kN-m]	61.07	-
Área de Placa	32.400mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	56.27	1.09 M_{max}
Espesor	12.7mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	58.71	0.96 M_{max}

Tabla 49. Detalles de la configuración L180E12.7T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 147 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L180E12.7T.

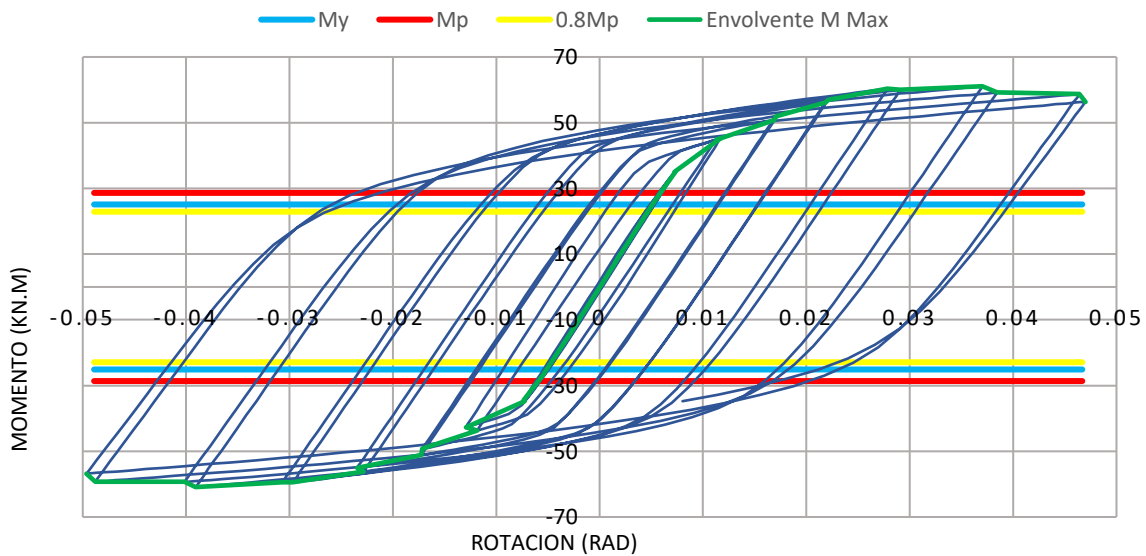


Figura 147. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E12.7T. Construcción propia.

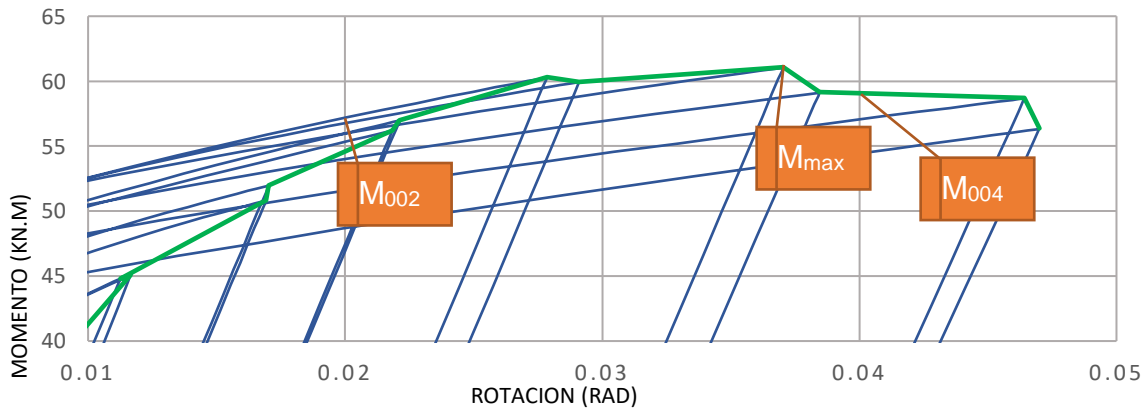


Figura 148. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E12.7T. Construcción propia

5.3.3.4 L180E15T. A continuación, en la Tabla 50 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	180mm	M_{max} [kN-m]	61.04	-
Área de Placa	32.400mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	55.48	1.1 M_{max}
Espesor	15mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	58.56	0.96 M_{max}

Tabla 50. Detalles de la configuración L180E15T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 149 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L180E15T.

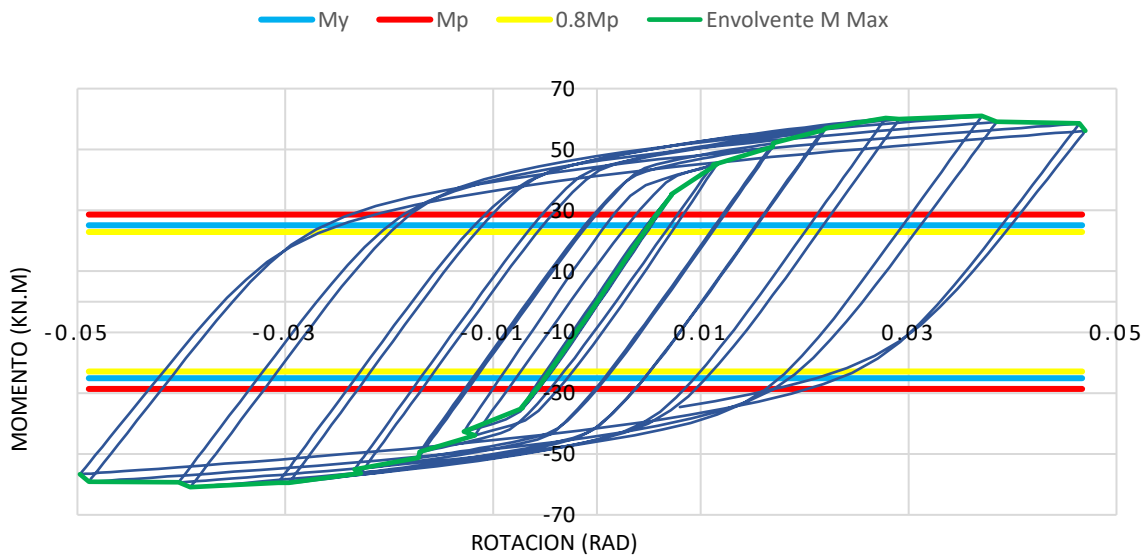


Figura 149. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E15T. Construcción propia.

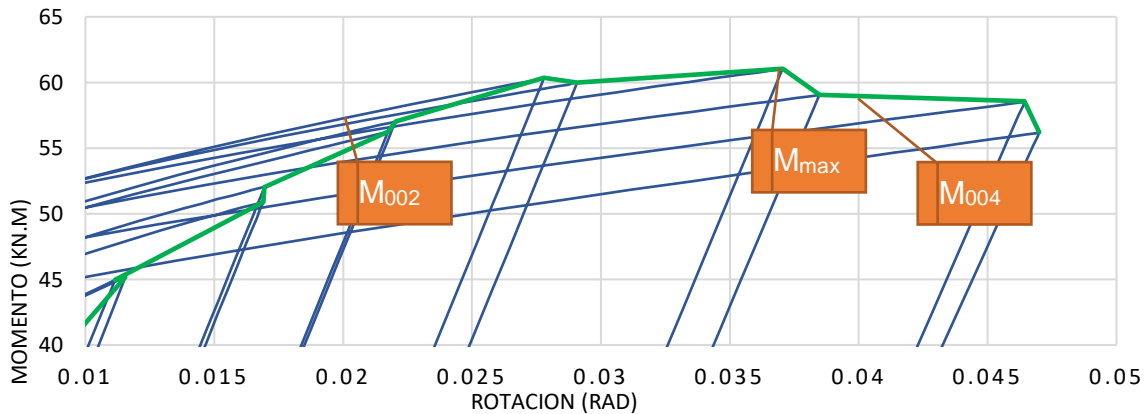


Figura 150. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E15T. Construcción propia

5.3.3.5 L180E19T. A continuación, en la Tabla 51 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	180mm	M_{max} [kN-m]	61.02	-
Área de Placa	32.400mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	57.32	1.06 M_{max}
Espesor	19mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	58.42	0.96 M_{max}

Tabla 51. Detalles de la configuración L180E19T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 151 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L180E19T.

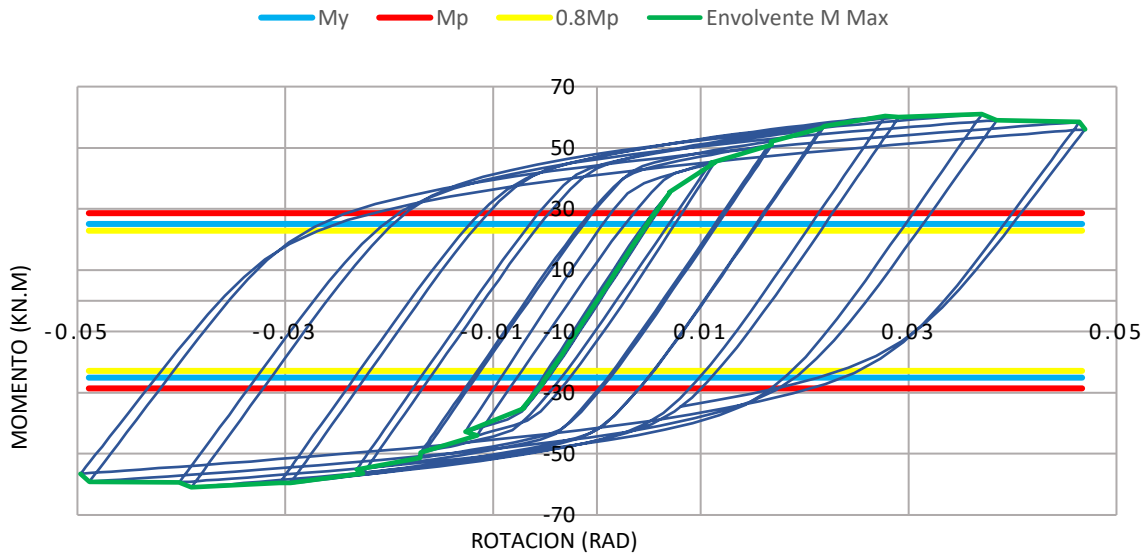


Figura 151. Gráfica Momento – Rotación configuración L180E19T. Construcción propia.

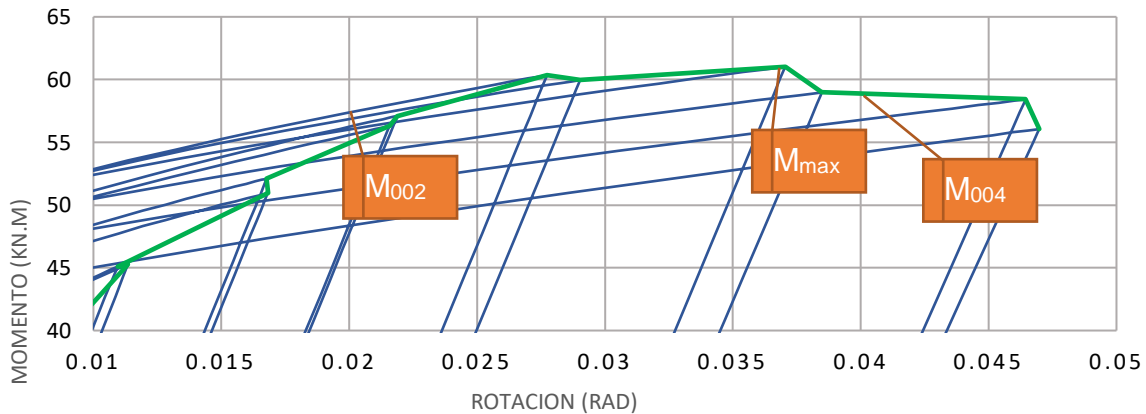


Figura 152. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L180E19T. Construcción propia

5.3.3.6 L190E8T. A continuación, en la Tabla 52 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	190mm	M_{max} [kN-m]	62.04	-
Área de Placa	36.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	57.69	1.07 M_{max}
Espesor	8mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.25	0.97 M_{max}

Tabla 52. Detalles de la configuración L190E8T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 153 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L190E8T.

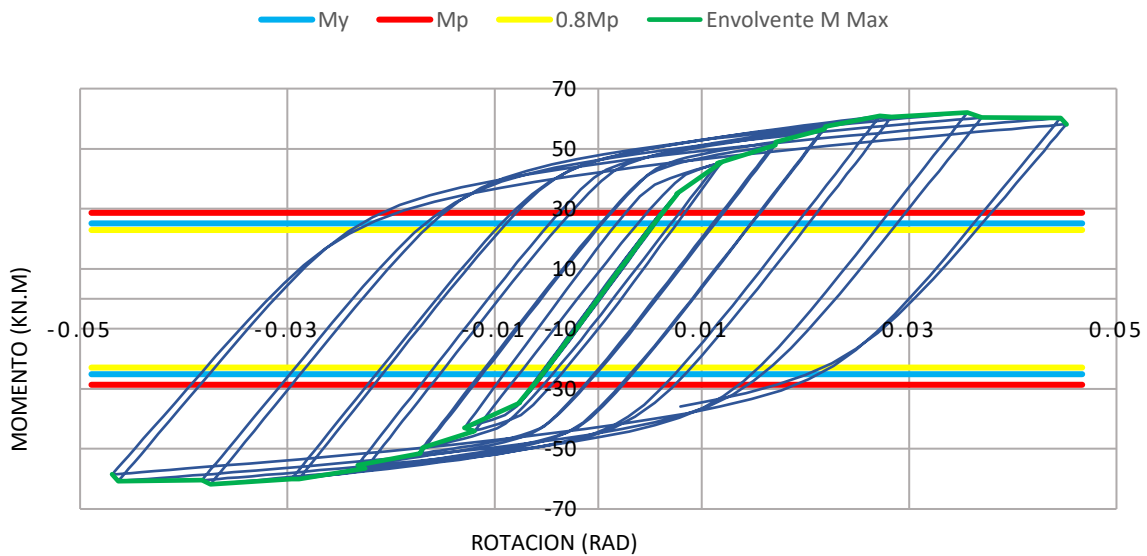


Figura 153. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E8T. Construcción propia.

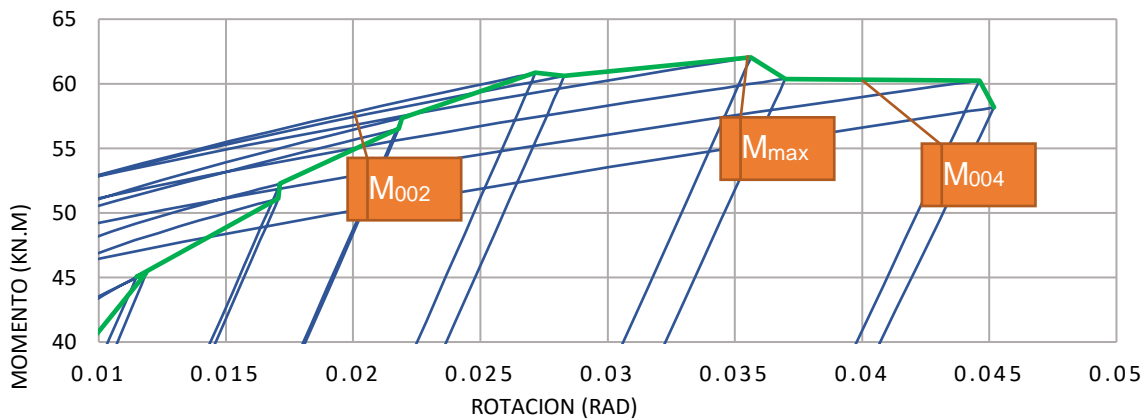


Figura 154. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E8T. Construcción propia

5.3.3.7 L190E9T. A continuación, en la Tabla 53 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	190mm	M_{max} [kN-m]	62.03	-
Área de Placa	36.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	57.67	1.08 M_{max}
Espesor	9mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.16	0.97 M_{max}

Tabla 53. Detalles de la configuración L190E9T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 155 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L190E9T.

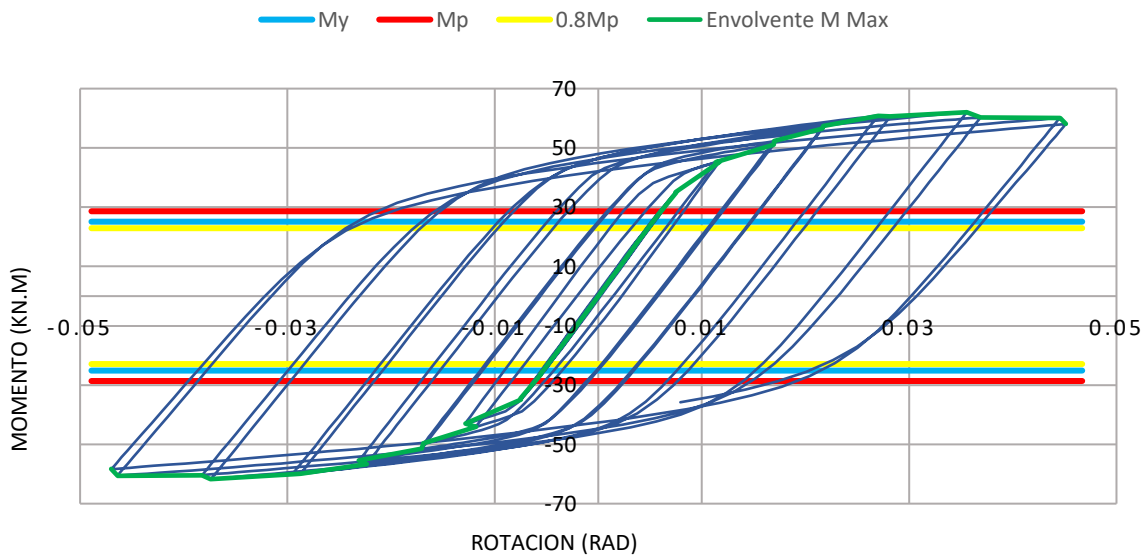


Figura 155. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E9T. Construcción propia.

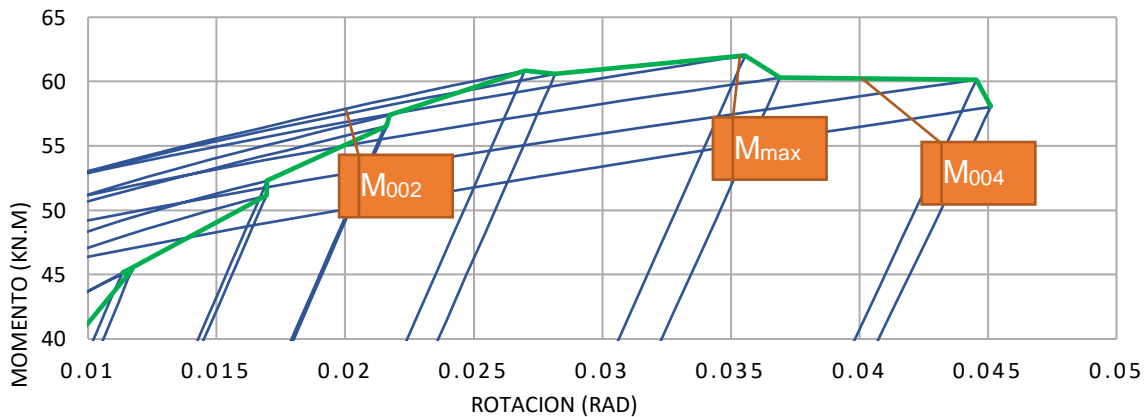


Figura 156. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E9T. Construcción propia

5.3.3.8 L190E12.7T. A continuación, en la Tabla 54 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	190mm	M_{max} [kN-m]	65.11	-
Área de Placa	36.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	61.51	1.06 M_{max}
Espesor	12.7mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	62.12	0.95 M_{max}

Tabla 54. Detalles de la configuración L190E12.7T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 157 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L190E12.7T.

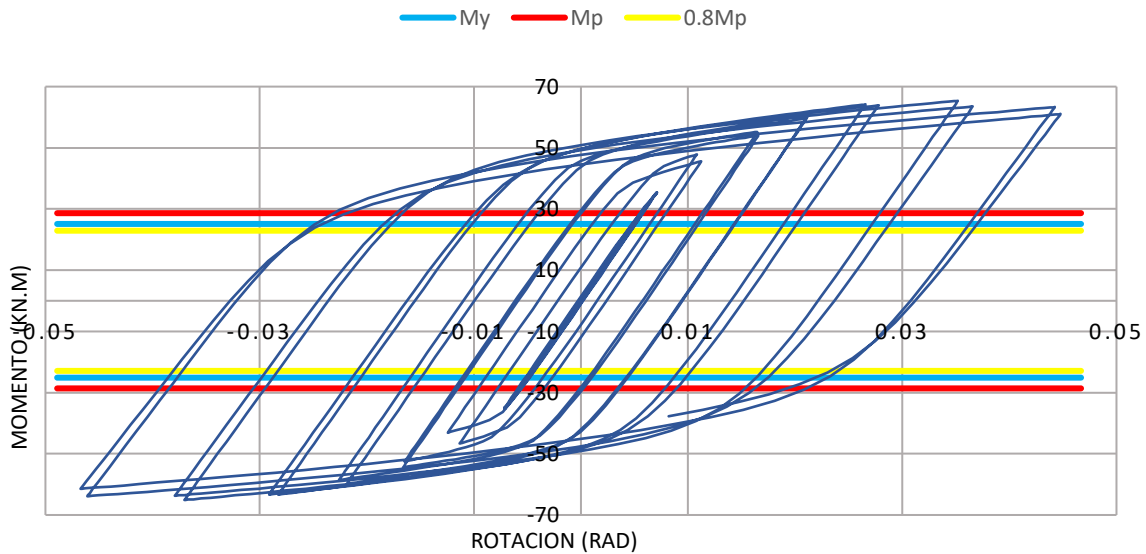


Figura 157. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E12.7T. Construcción propia.

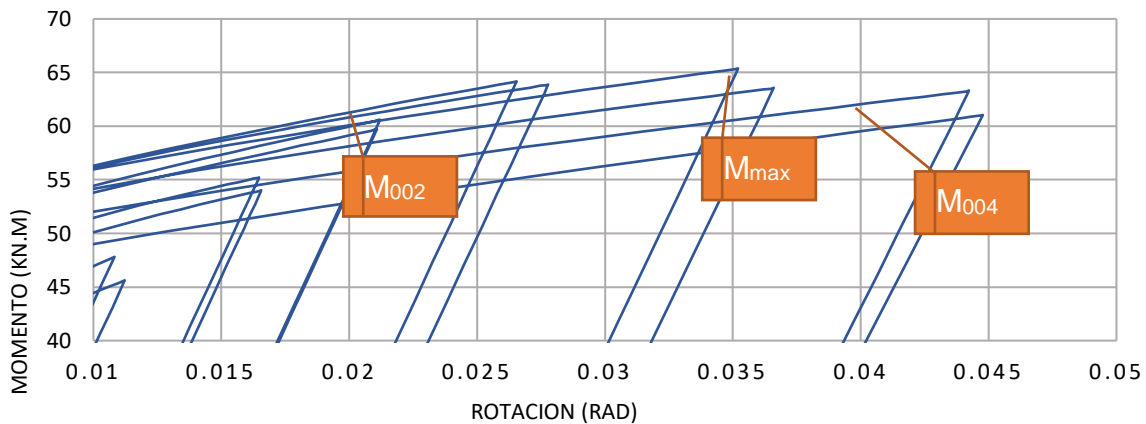


Figura 158. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E12.7T. Construcción propia

5.3.3.9 L190E15T. A continuación, en la Tabla 55 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	190mm	M_{max} [kN-m]	62.09	-
Área de Placa	36.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	58.45	1.06 M_{max}
Espesor	15mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.05	0.97 M_{max}

Tabla 55. Detalles de la configuración L190E15T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 159 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L190E15T.

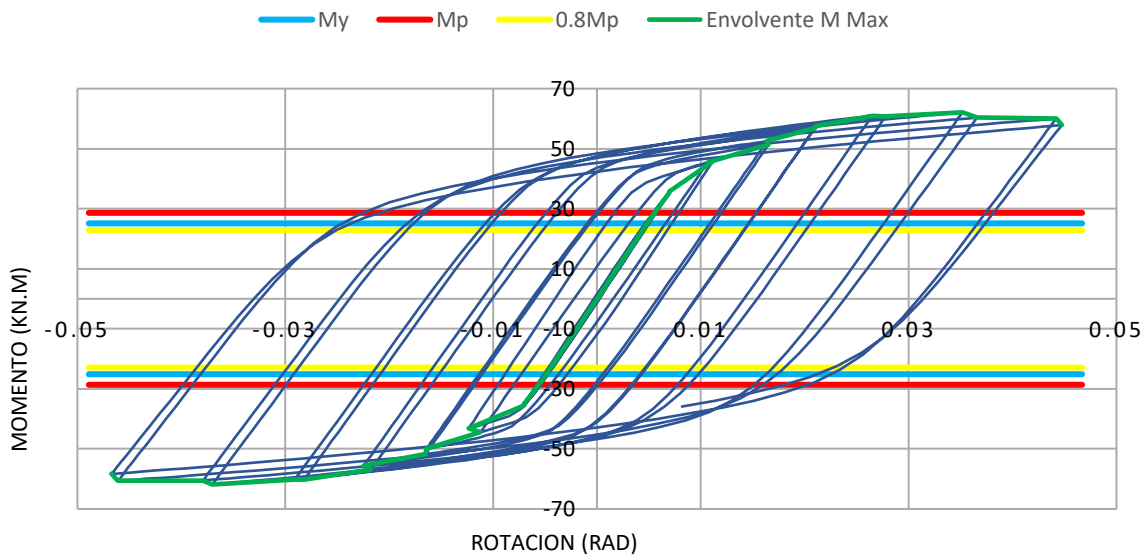


Figura 159. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E15T. Construcción propia.

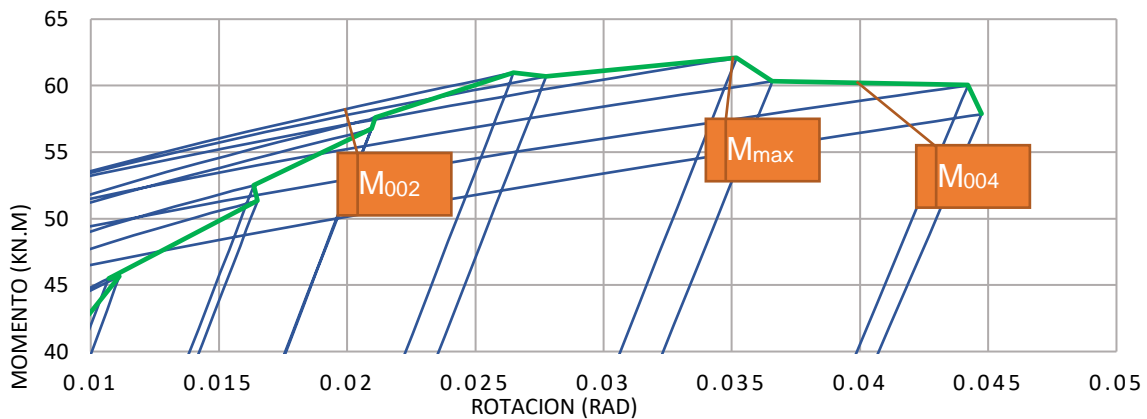


Figura 160. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E15T. Construcción propia

5.3.3.10 L190E19T. A continuación, en la Tabla 56 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	190mm	M_{max} [kN-m]	62.10	-
Área de Placa	36.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	58.48	1.06 M_{max}
Espesor	19mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.03	0.97 M_{max}

Tabla 56. Detalles de la configuración L190E19T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 161 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L190E19T.

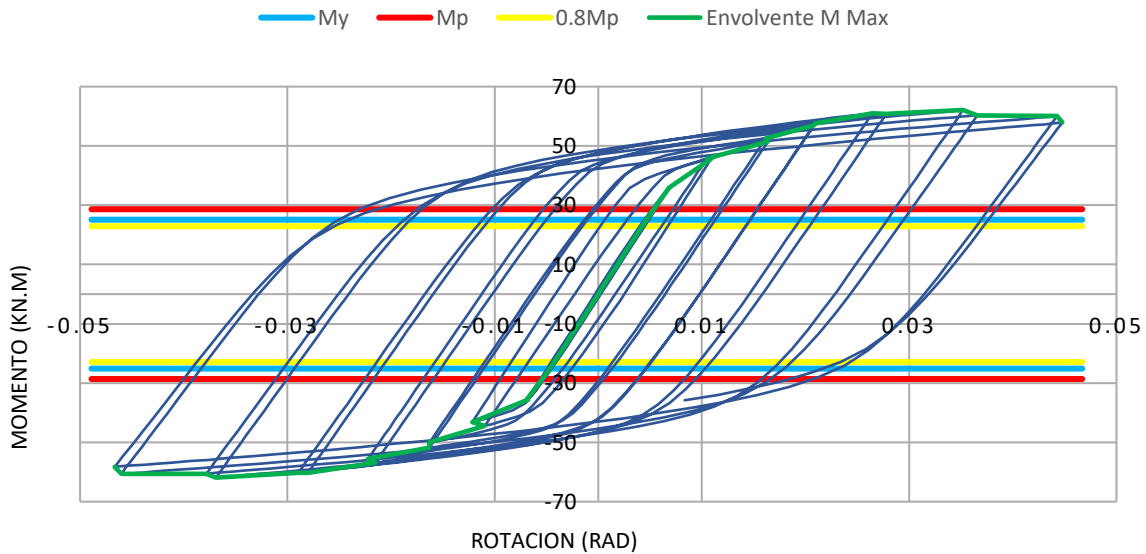


Figura 161. Gráfica Momento – Rotación configuración L190E19T. Construcción propia.

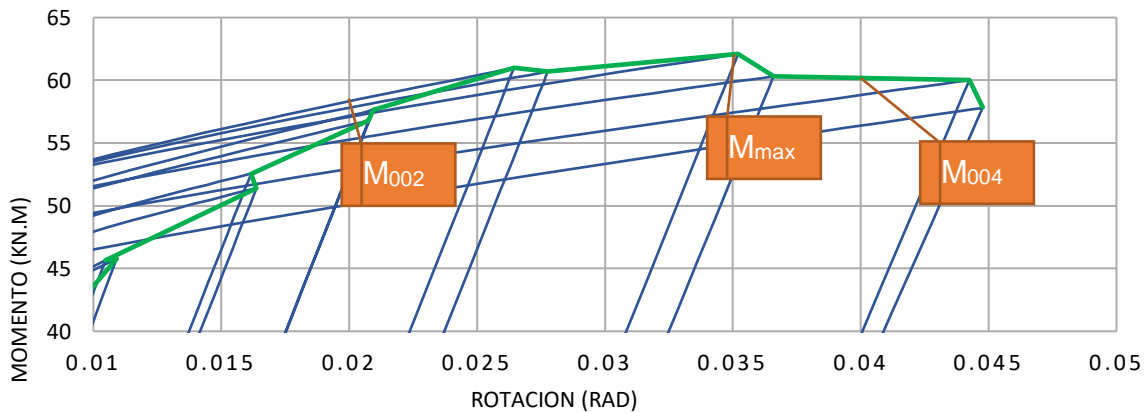


Figura 162. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L190E19T. Construcción propia

5.3.3.11 L200E8T. A continuación, en la Tabla 57 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	200mm	M_{max} [kN-m]	62.36	-
Área de Placa	40.000mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	58.04	1.07 M_{max}
Espesor	8mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.41	0.97 M_{max}

Tabla 57. Detalles de la configuración L200E8T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 163 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L200E8T.

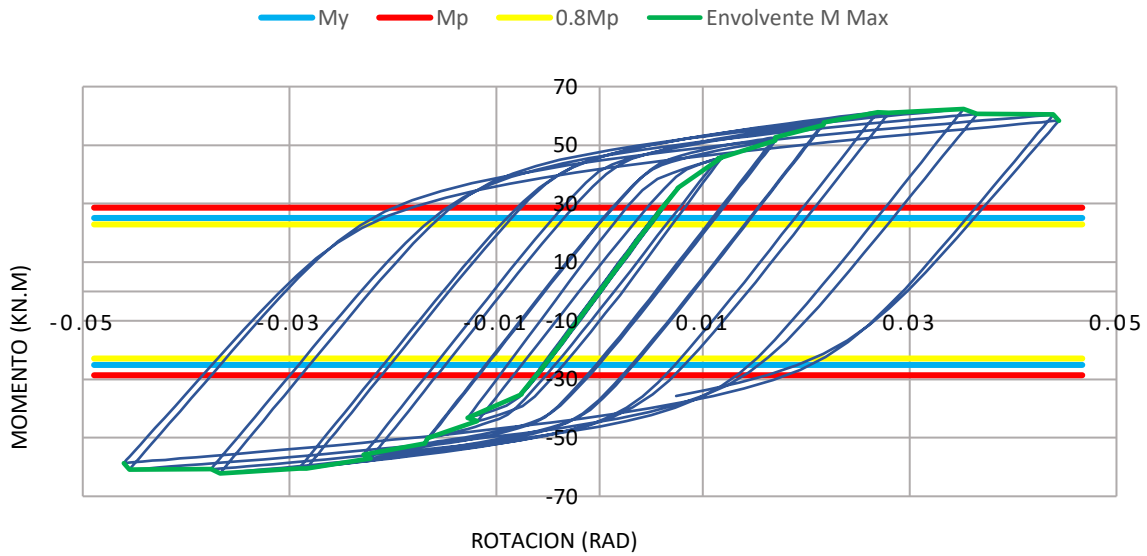


Figura 163. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E8T. Construcción propia.

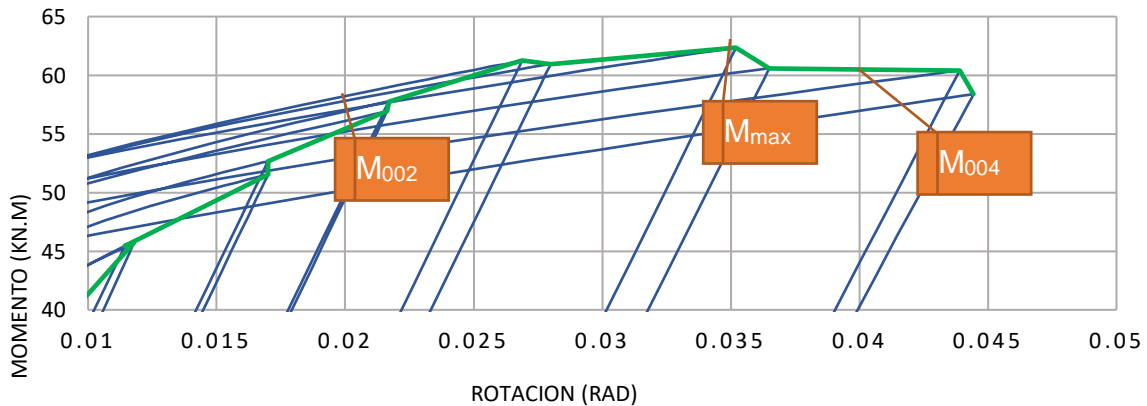


Figura 164. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E8T. Construcción propia

5.3.3.12 L200E9T. A continuación, en la Tabla 58 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	200mm	M_{max} [kN-m]	62.42	-
Área de Placa	40.000mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	58.06	1.07 M_{max}
Espesor	9mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.42	0.97 M_{max}

Tabla 58. Detalles de la configuración L200E9T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 165 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L200E9T.

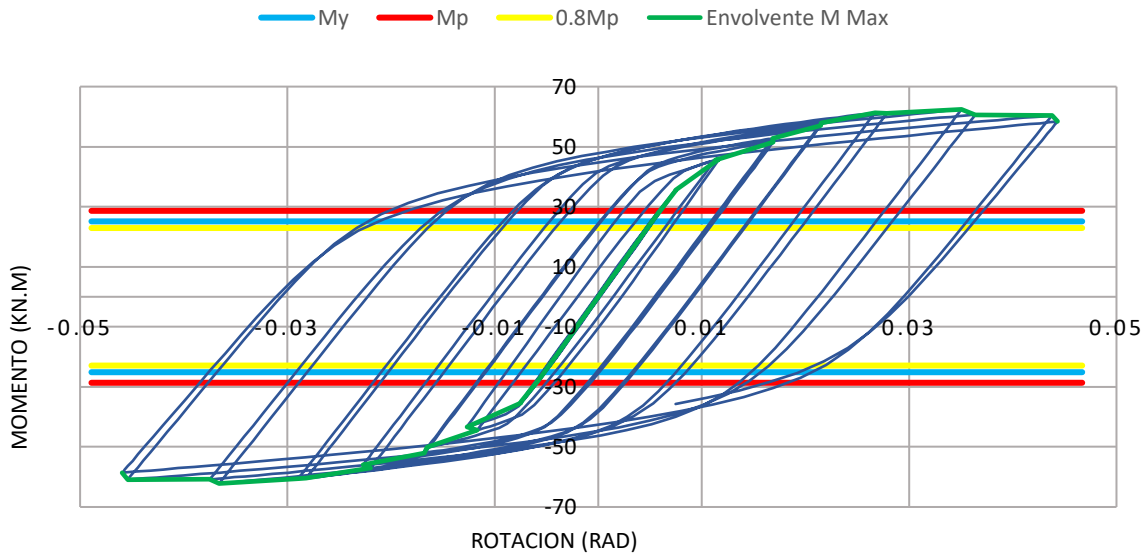


Figura 165. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E9T. Construcción propia.

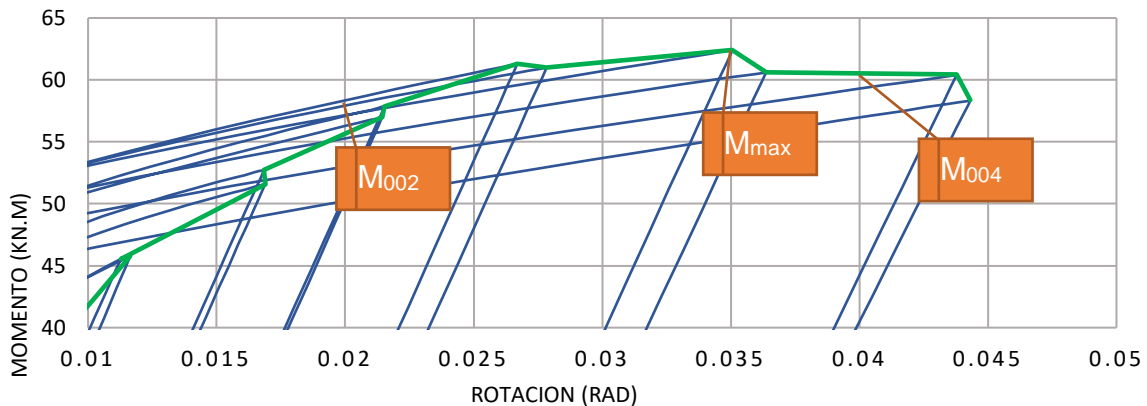


Figura 166. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E9T. Construcción propia

5.3.3.13 L200E12.7T. A continuación, en la Tabla 59 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	200mm	M_{max} [kN-m]	62.49	-
Área de Placa	40.000mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	58.15	1.07 M_{max}
Espesor	12.7mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.36	0.97 M_{max}

Tabla 59. Detalles de la configuración L200E12.7T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 167 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L200E12.7T.

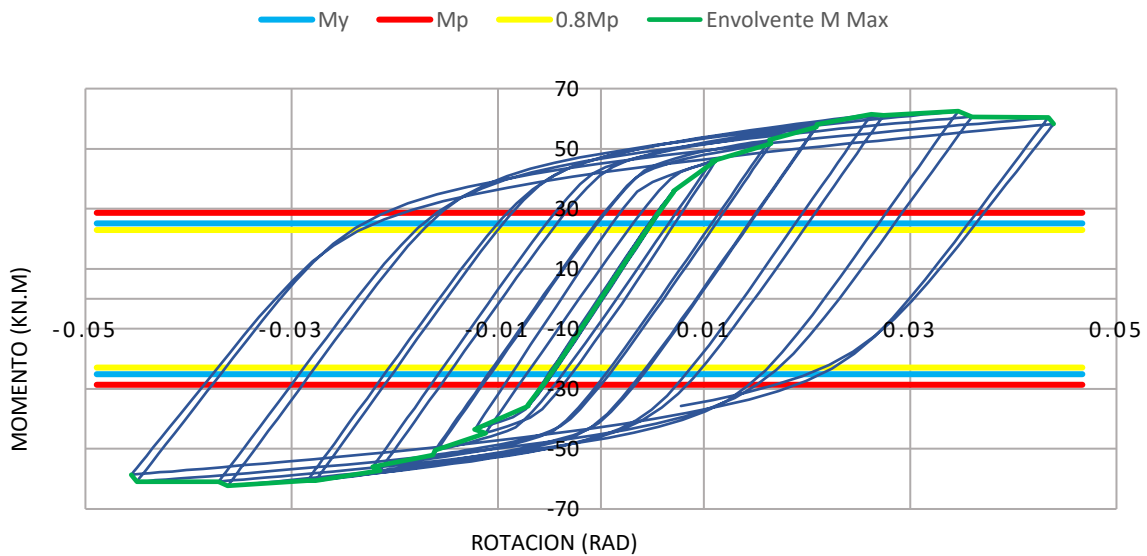


Figura 167. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E12.7T. Construcción propia.

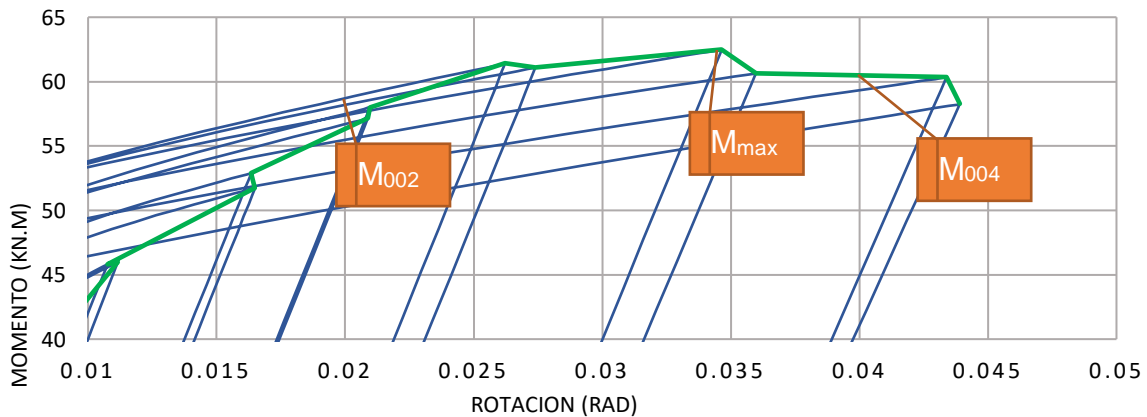


Figura 168. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E12.7T. Construcción propia

5.3.3.14 L200E15T. A continuación, en la Tabla 60 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	200mm	M_{max} [kN-m]	62.52	-
Área de Placa	40.000mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	58.86	1.06 M_{max}
Espesor	15mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.35	0.97 M_{max}

Tabla 60. Detalles de la configuración L200E15T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 169 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L200E15T.

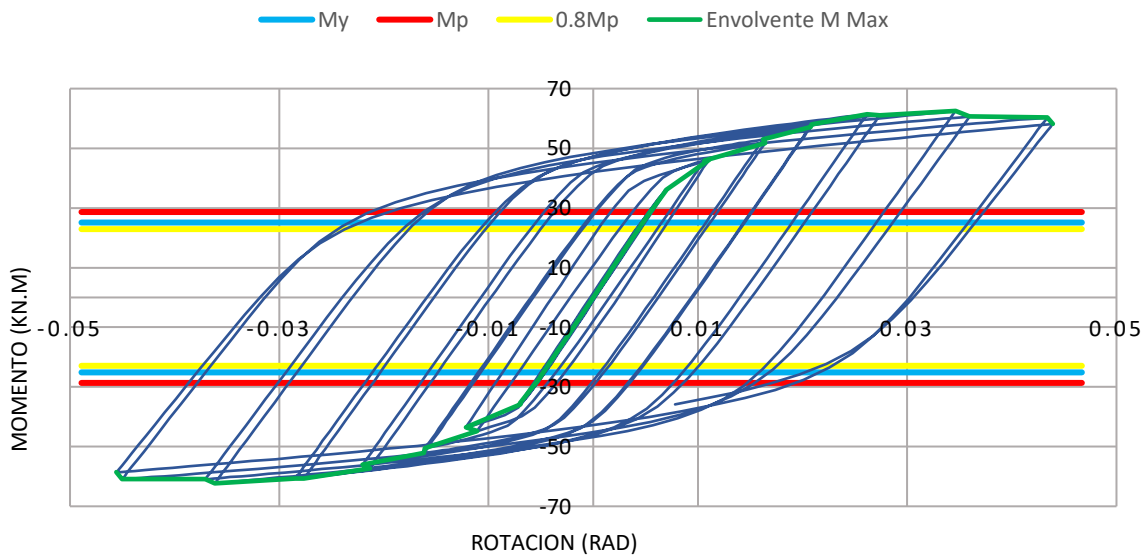


Figura 169. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E15T. Construcción propia.

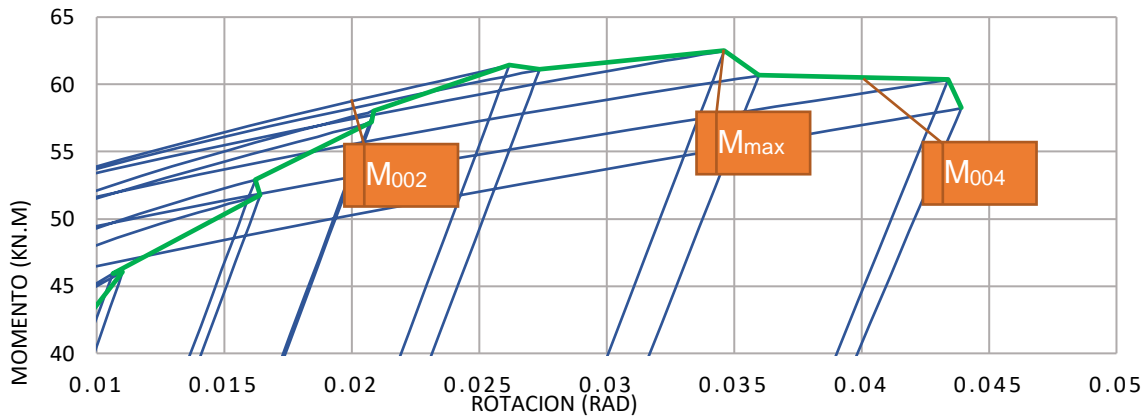


Figura 170. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E15T. Construcción propia

5.3.3.15 L200E19T. A continuación, en la Tabla 61 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	200mm	M_{max} [kN-m]	62.57	-
Área de Placa	40.000mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	58.94	1.06 M_{max}
Espesor	19mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.31	0.96 M_{max}

Tabla 61. Detalles de la configuración L200E19T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 171 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L200E19T.

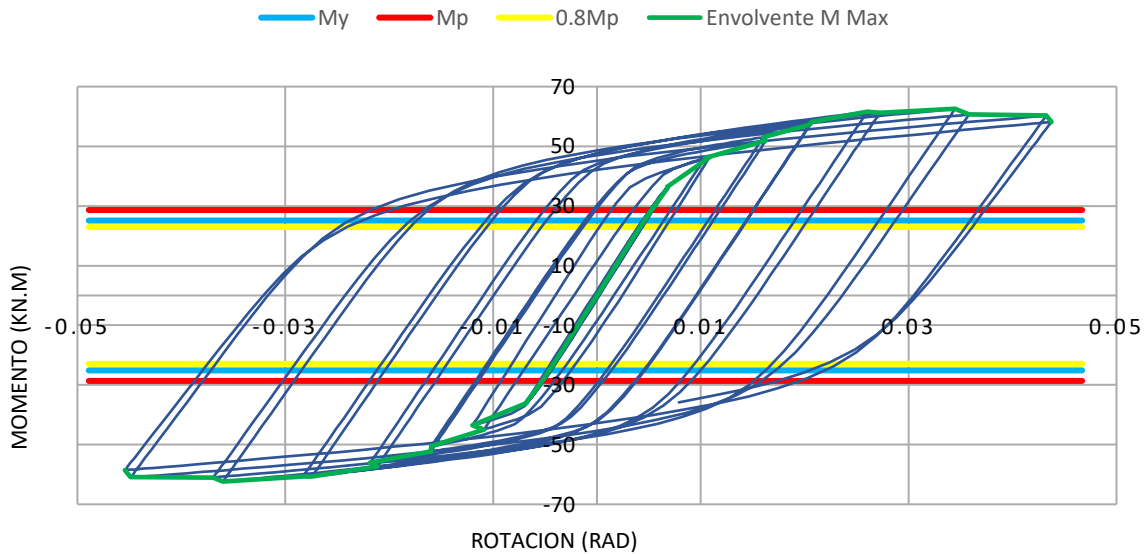


Figura 171. Gráfica Momento – Rotación configuración L200E19T. Construcción propia.

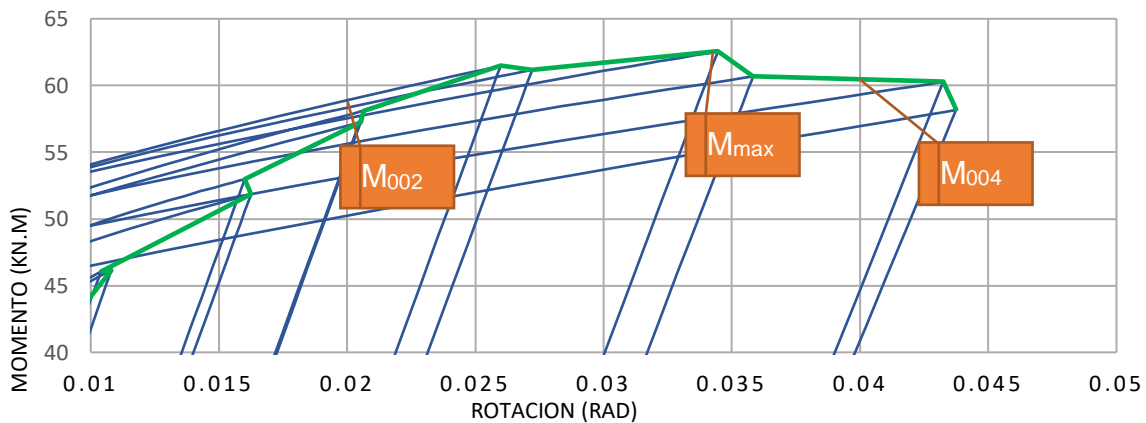


Figura 172. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L200E19T. Construcción propia

5.3.3.16 L210E8T. A continuación, en la Tabla 62 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	210mm	M_{max} [kN-m]	62.68	-
Área de Placa	44.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	58.39	1.07 M_{max}
Espesor	8mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.61	0.97 M_{max}

Tabla 62. Detalles de la configuración L210E8T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 173 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L210E8T.

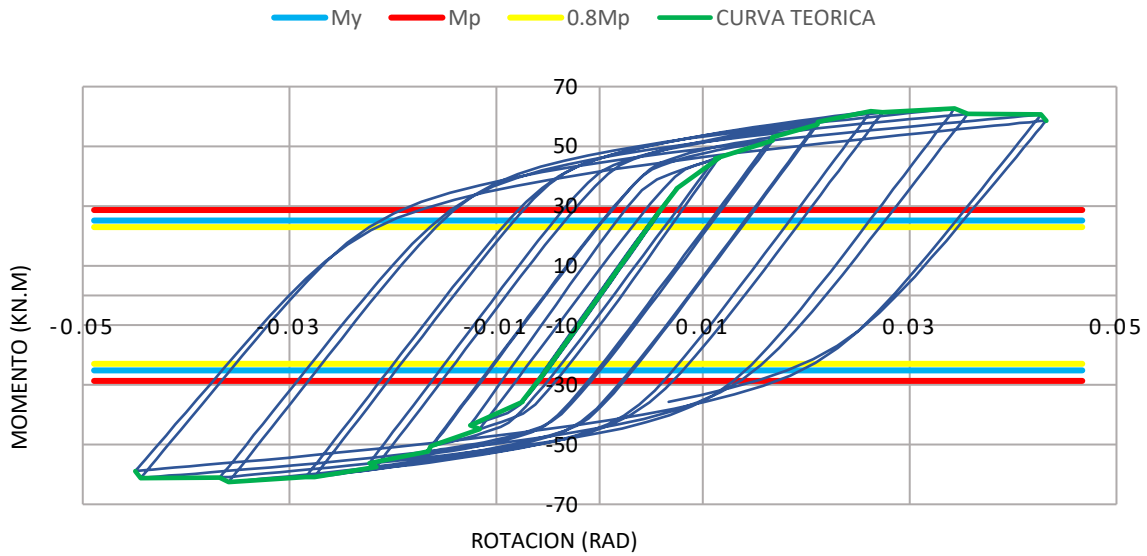


Figura 173. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E8T. Construcción propia.

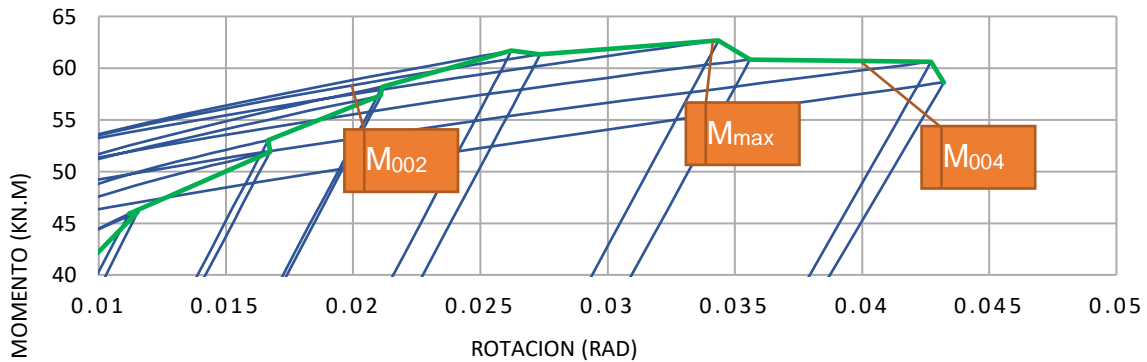


Figura 174. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E8T. Construcción propia

5.3.3.17 L210E9T. A continuación, en la Tabla 63 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	210mm	M_{max} [kN-m]	62.73	-
Área de Placa	44.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	59.14	1.06 M_{max}
Espesor	9mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.62	0.97 M_{max}

Tabla 63. Detalles de la configuración L210E9T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 175 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L210E9T.

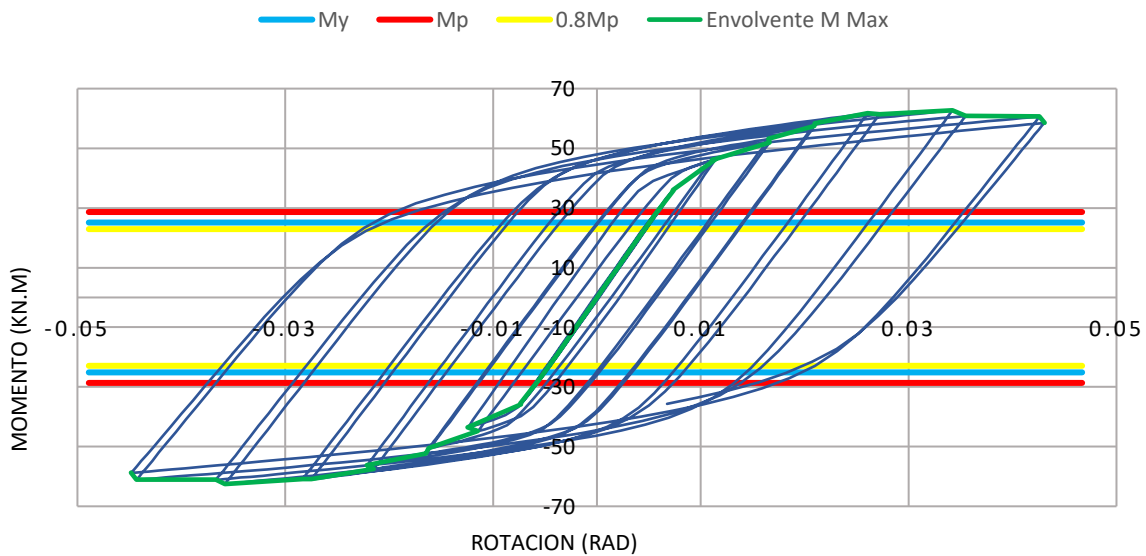


Figura 175. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E9T. Construcción propia.

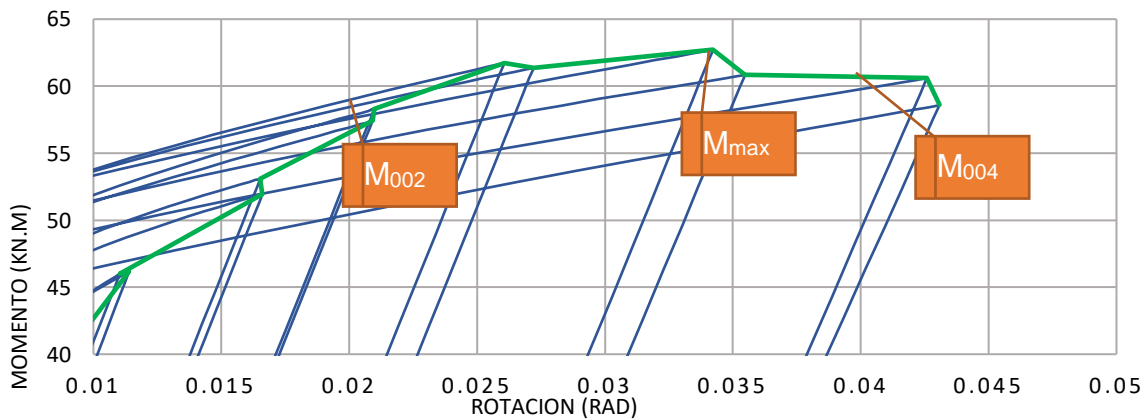


Figura 176. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E9T. Construcción propia

5.3.3.18 L210E12.7T. A continuación, en la Tabla 64 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	210mm	M_{max} [kN-m]	62.71	-
Área de Placa	44.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	59.17	1.06 M_{max}
Espesor	12.7mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.61	0.97 M_{max}

Tabla 64. Detalles de la configuración L210E12.7T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 177 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L210E12.7T.

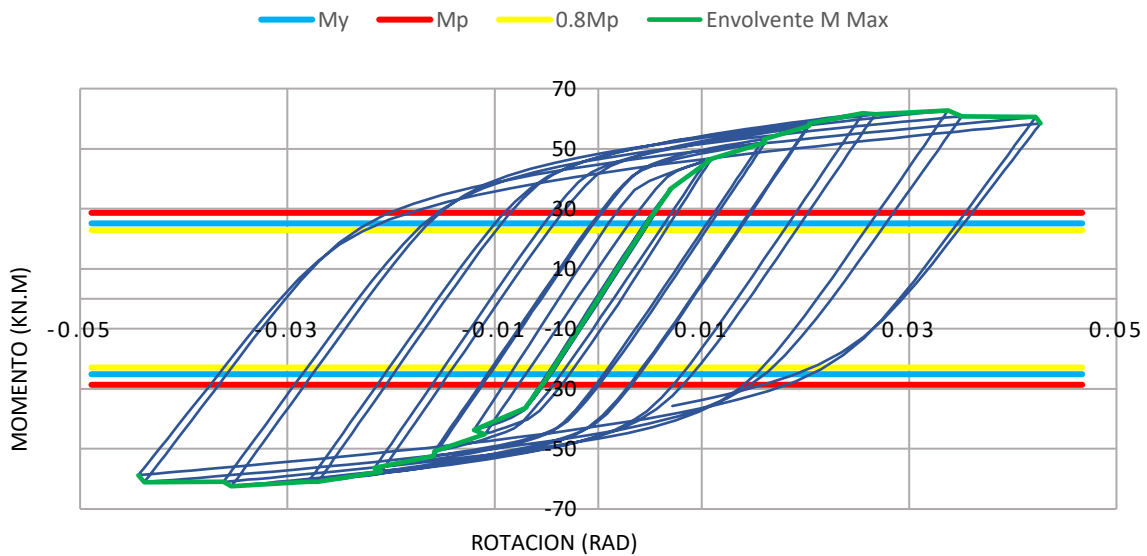


Figura 177. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E12.7T. Construcción propia.

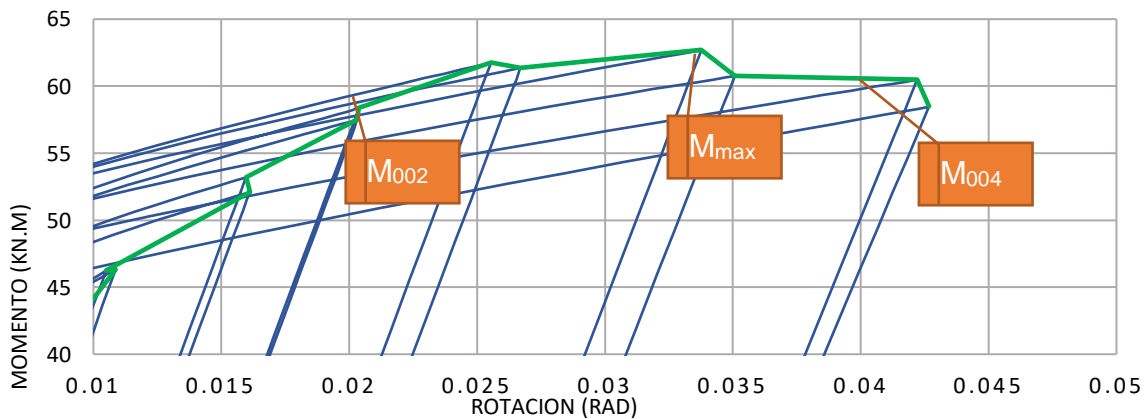


Figura 178. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E12.7T. Construcción propia

5.3.3.19 L210E15T. A continuación, en la Tabla 65 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	210mm	M_{max} [kN-m]	62.81	-
Área de Placa	44.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	59.27	1.06 M_{max}
Espesor	15mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.55	0.96 M_{max}

Tabla 65. Detalles de la configuración L210E15T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 179 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L210E15T.

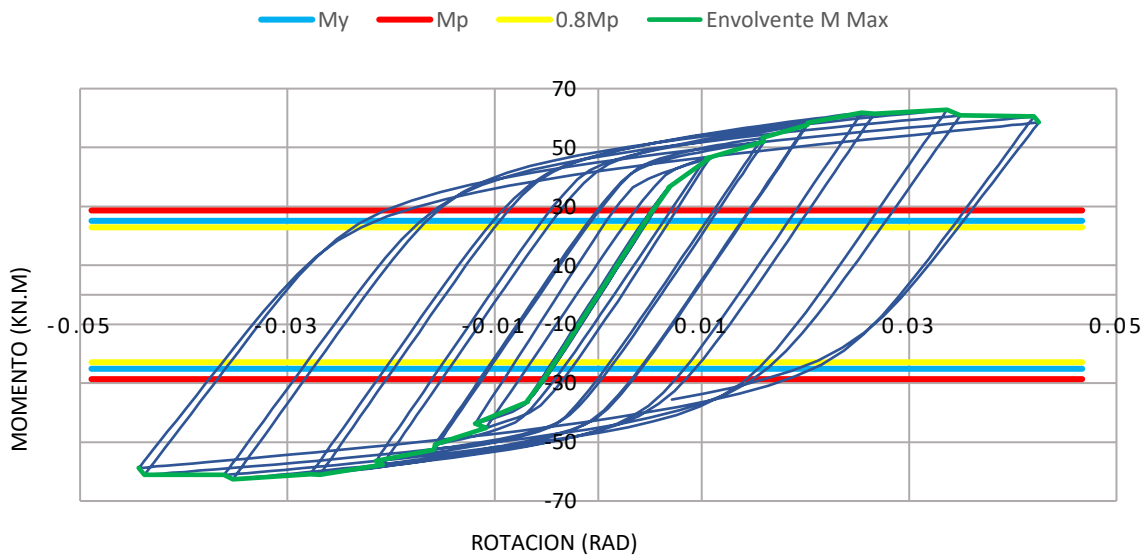


Figura 179. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E15T. Construcción propia.

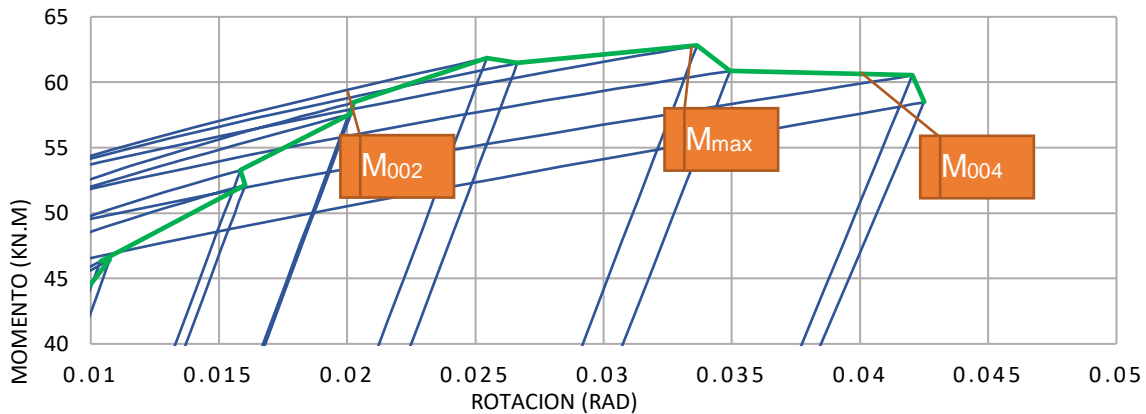


Figura 180. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E15T. Construcción propia

5.3.3.20 L210E19T. A continuación, en la Tabla 66 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	210mm	M_{max} [kN-m]	62.86	-
Área de Placa	44.100mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	59.84	1.05 M_{max}
Espesor	19mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.53	0.96 M_{max}

Tabla 66. Detalles de la configuración L210E19T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 181 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L210E19T.

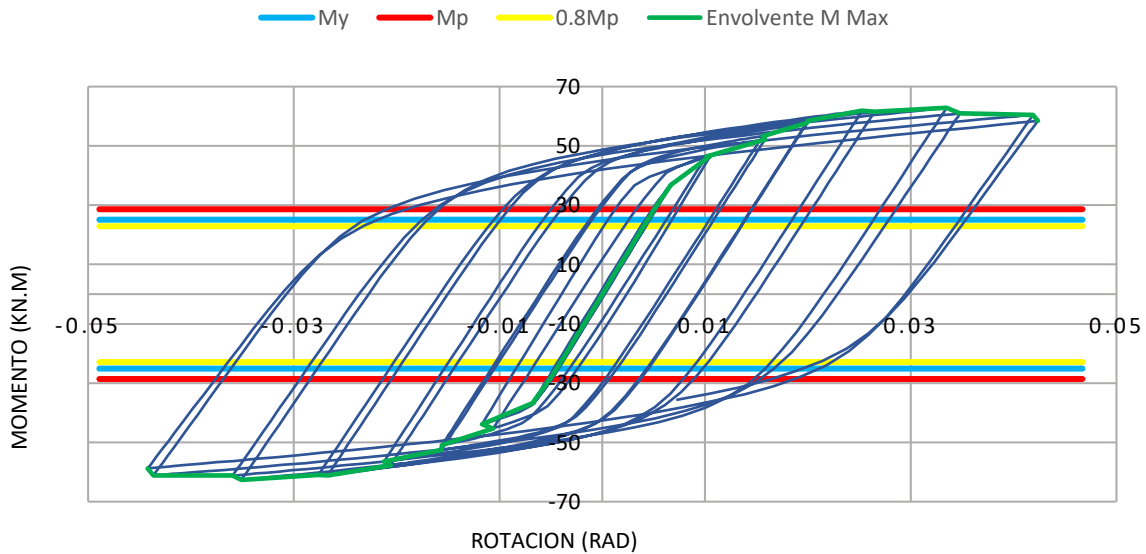


Figura 181. Gráfica Momento – Rotación configuración L210E19T. Construcción propia.

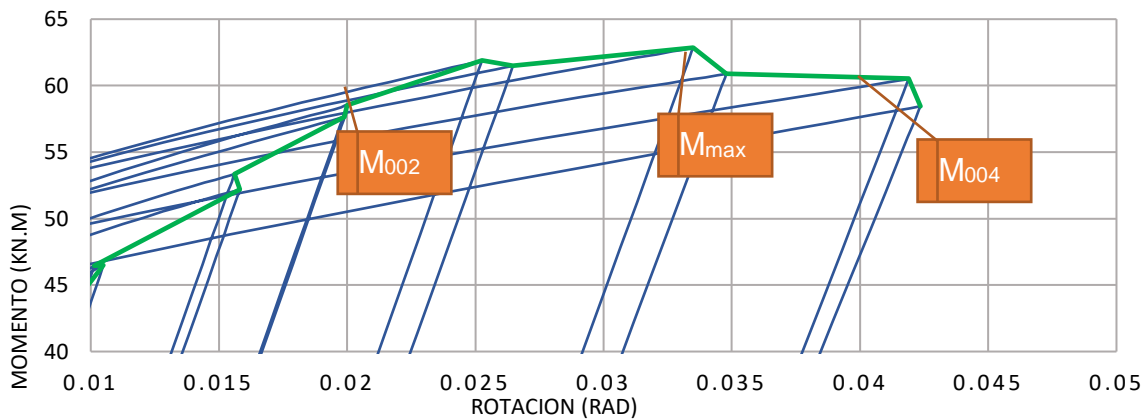


Figura 182. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L210E19T. Construcción propia

5.3.3.21 L220E8T. A continuación, en la Tabla 67 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	220mm	M_{max} [kN-m]	62.99	-
Área de Placa	48.800mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	58.73	1.07 M_{max}
Espesor	8mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.78	0.96 M_{max}

Tabla 67. Detalles de la configuración L220E8T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 183 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L220E8T.

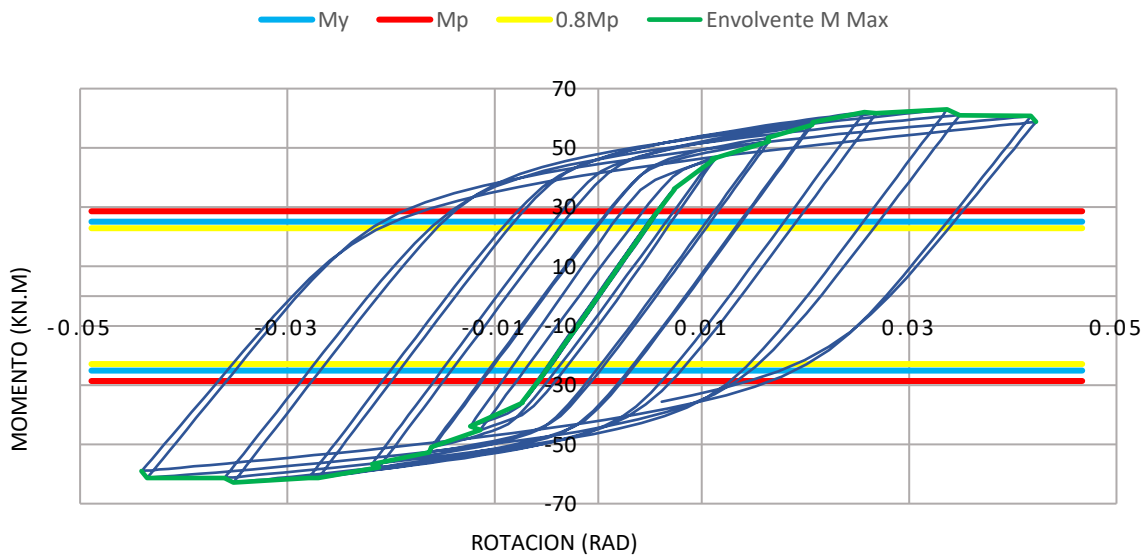


Figura 183. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E8T. Construcción propia.

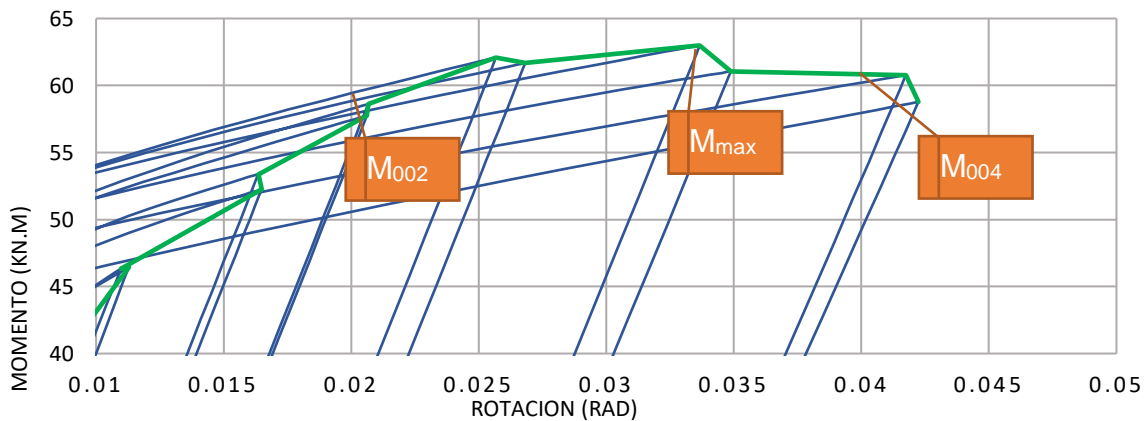


Figura 184. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E8T. Construcción propia

5.3.3.22 L220E9T. A continuación, en la Tabla 68 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	220mm	M_{max} [kN-m]	63.05	-
Área de Placa	48.800mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	59.53	1.06 M_{max}
Espesor	9mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.81	0.96 M_{max}

Tabla 68. Detalles de la configuración L220E9T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 185 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L220E9T.

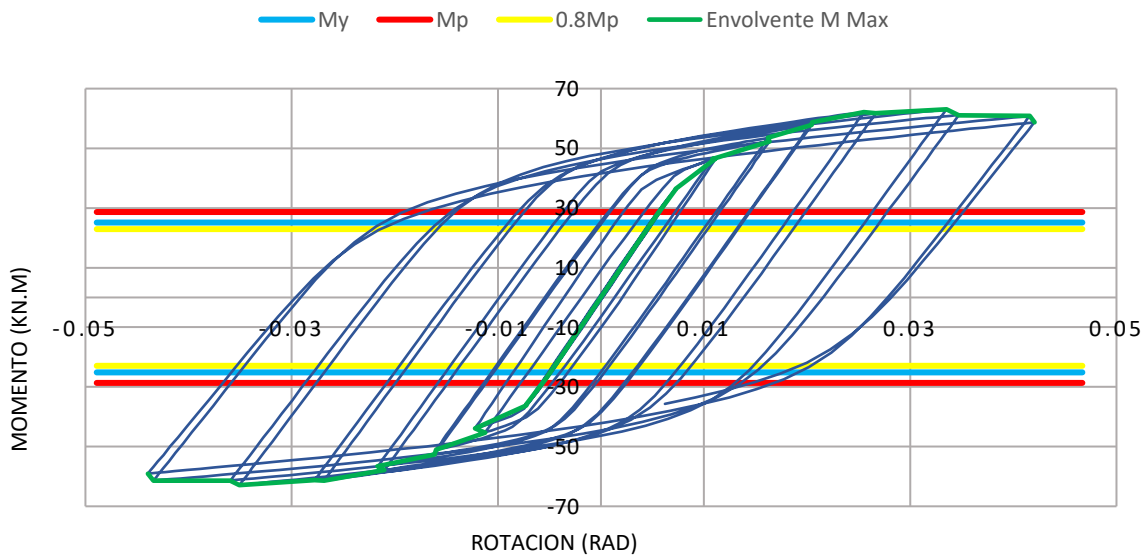


Figura 185. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E9T. Construcción propia.

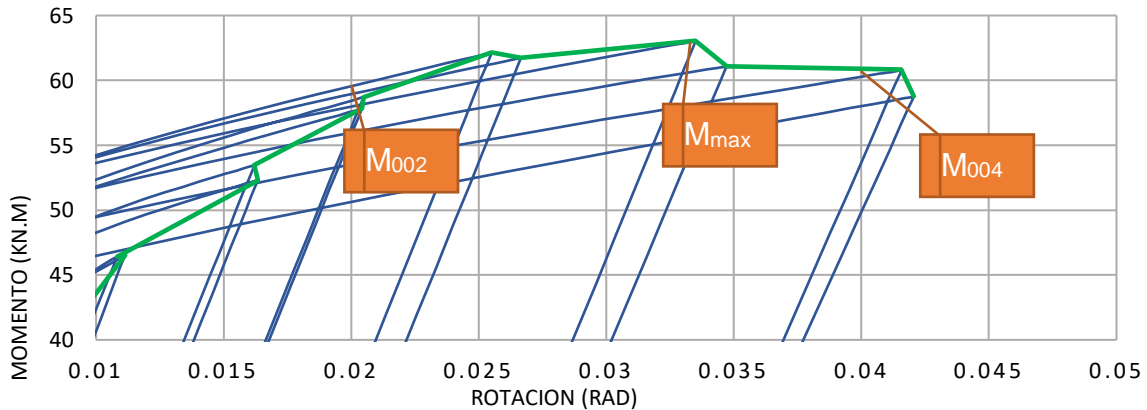


Figura 186. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E9T. Construcción propia

5.3.3.23 L220E12.7T. A continuación, en la Tabla 69 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	220mm	M_{max} [kN-m]	63.07	-
Área de Placa	48.800mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	60.13	1.05 M_{max}
Espesor	12.7mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.72	0.96 M_{max}

Tabla 69. Detalles de la configuración L220E12.7T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 187 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L220E12.7T.

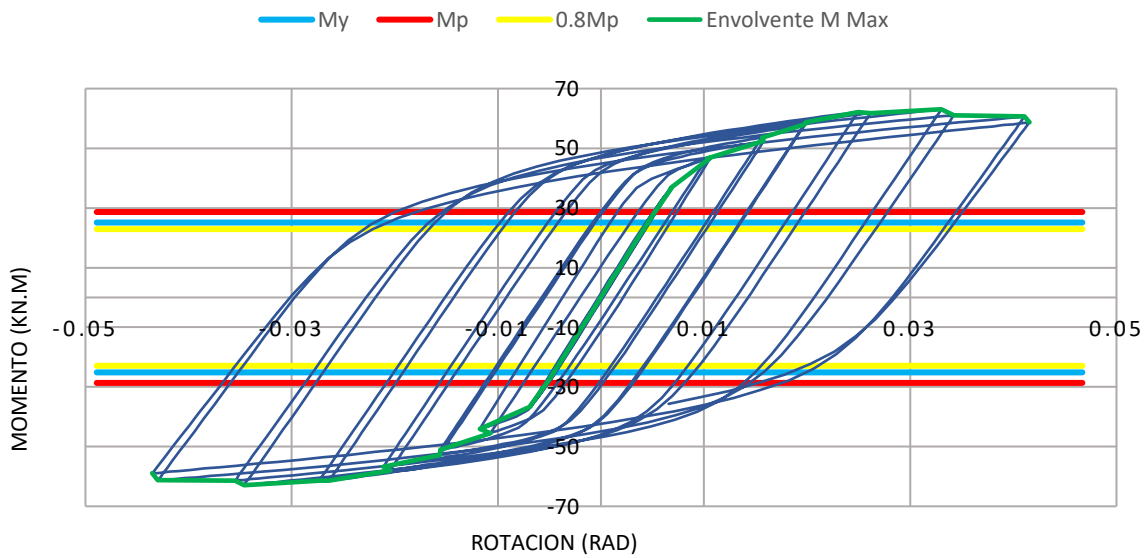


Figura 187. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E12.7T. Construcción propia.

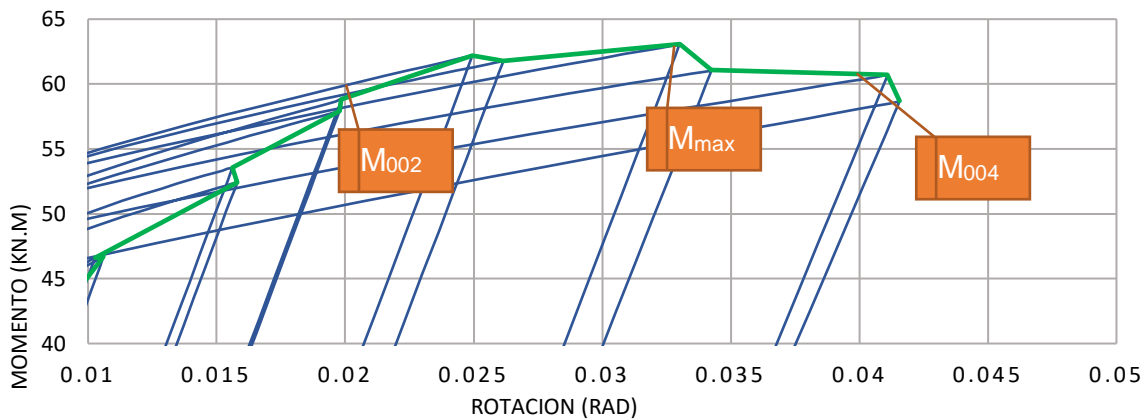


Figura 188. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E12.7T. Construcción propia

5.3.3.24 L220E15T. A continuación, en la Tabla 70 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	220mm	M_{max} [kN-m]	63.10	-
Área de Placa	48.800mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	60.17	1.05 M_{max}
Espesor	15mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.70	0.96 M_{max}

Tabla 70. Detalles de la configuración L220E15T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 189 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L220E15T.

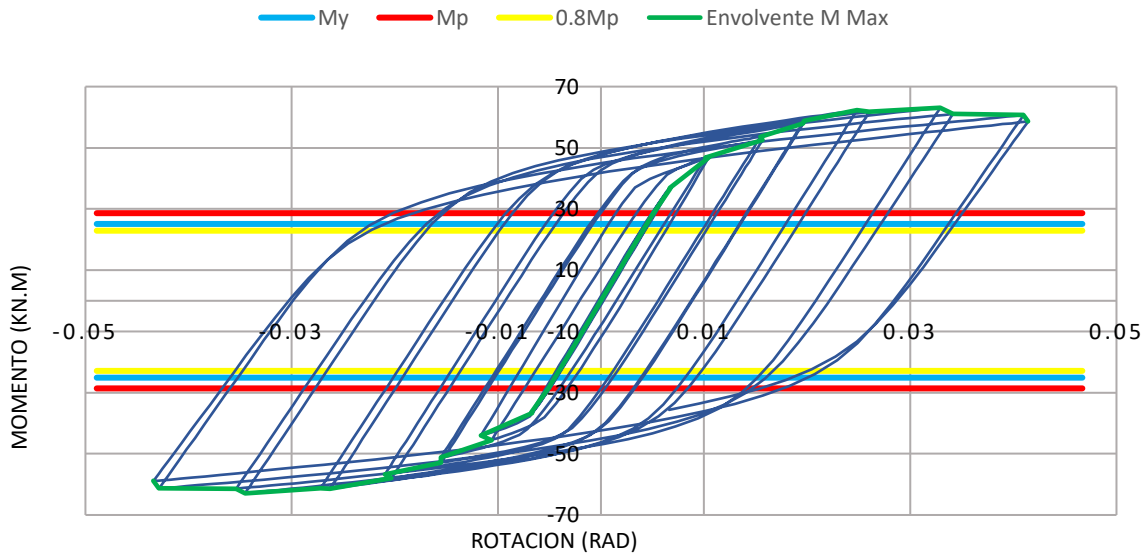


Figura 189. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E15T. Construcción propia.

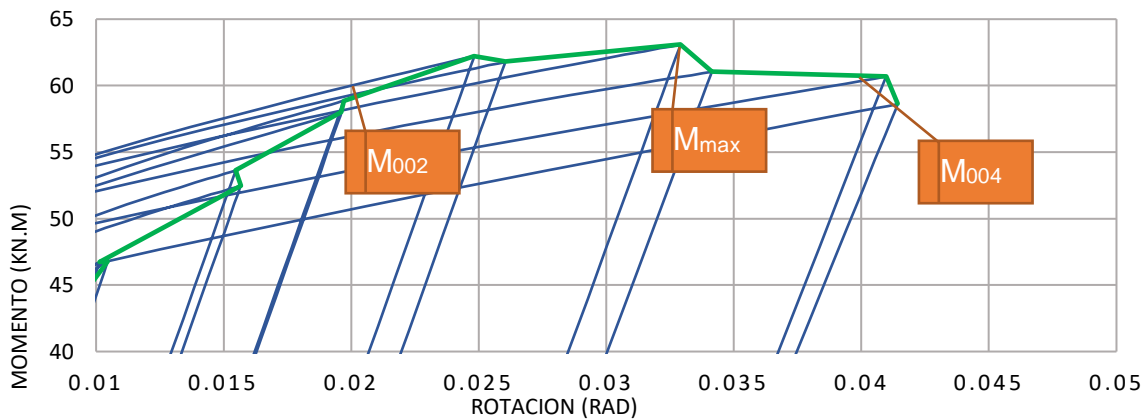


Figura 190. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E15T. Construcción propia

5.3.3.25 L220E19T. A continuación, en la Tabla 71 se detalla la configuración definida para las placas de continuidad para este modelo de conexión:

Detalle Configuración		Momentos		Variación respecto a M_{max}
Longitud de placa	220mm	M_{max} [kN-m]	63.13	-
Área de Placa	48.800mm ²	$M_{0,02}$ [kN-m]	60.21	1.05 M_{max}
Espesor	19mm	$M_{0,04}$ [kN-m]	60.18	0.95 M_{max}

Tabla 71. Detalles de la configuración L220E19T. para el modelo de la conexión. Construcción propia.

La Figura 191 muestra la histéresis de la curva momento rotación de la configuración L220E19T.

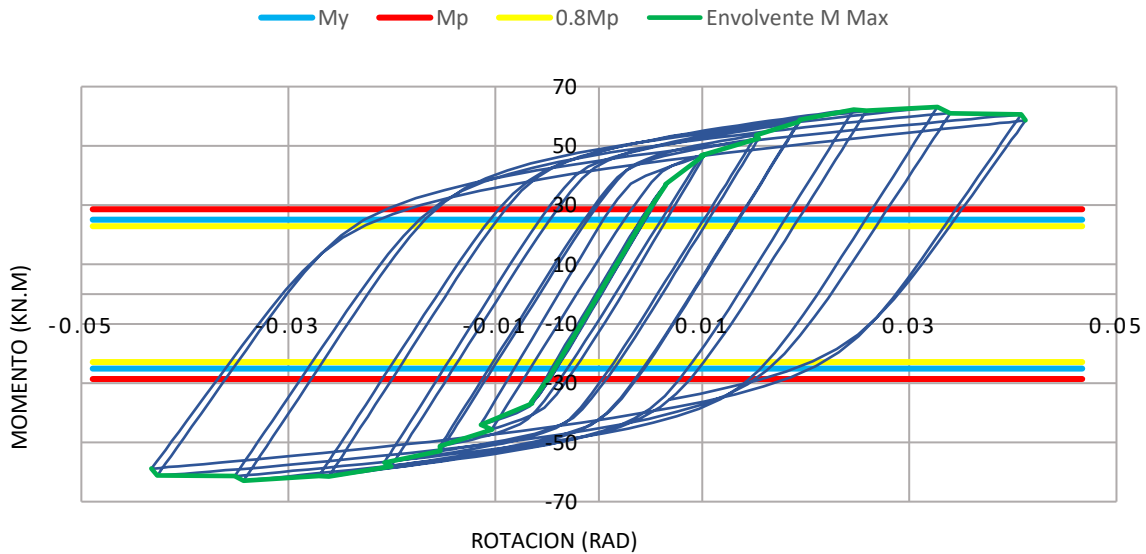


Figura 191. Gráfica Momento – Rotación configuración L220E19T. Construcción propia.

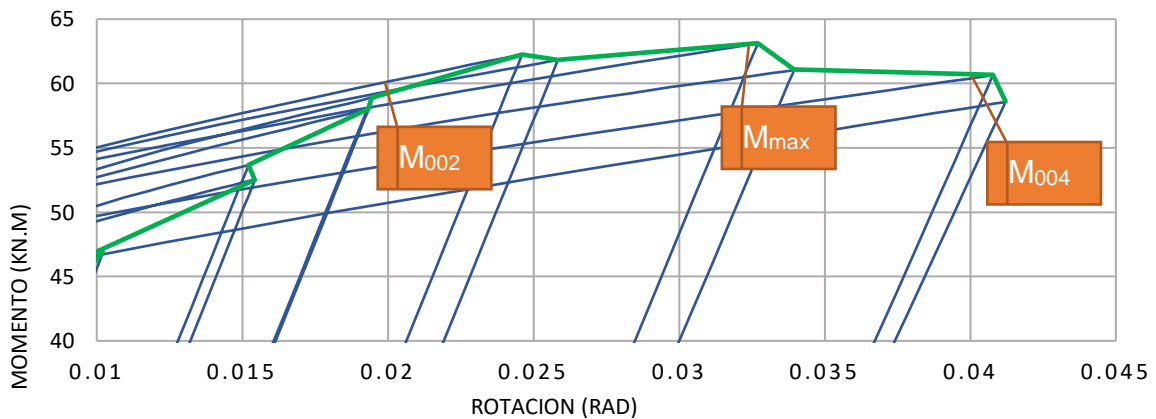


Figura 192. Detalle de ubicación de Momentos para configuración L220E19T. Construcción propia

5.3.3.26 Resumen de los resultados de los modelos.

Energía disipada. A continuación, se presenta el resumen de las áreas contenidas en las curvas Momento-Rotación (ver Tabla 72), las cuales son proporcionales a la energía disipada por cada conexión.

		ESPESOR				
		8 mm	9 mm	13 mm	15 mm	19 mm
LONGITUD (l)	180 mm	6.51	6.58	6.76	6.81	6.89
	190 mm	6.30	6.35	6.49	6.53	6.63
	200 mm	6.13	6.17	6.29	6.36	6.42
	210 mm	5.94	5.98	6.11	6.15	6.23
	220 mm	5.82	5.86	5.98	6.02	6.10

Tabla 72. Áreas contenidas en las curvas de Momento – Rotación según la configuración. Construcción propia.

En la Figura 195 se puede observar la distribución en superficie de la Tabla 72, en la cual se relaciona la distribución de disipación de energía según el espesor y longitud de la placa de continuidad evaluada.

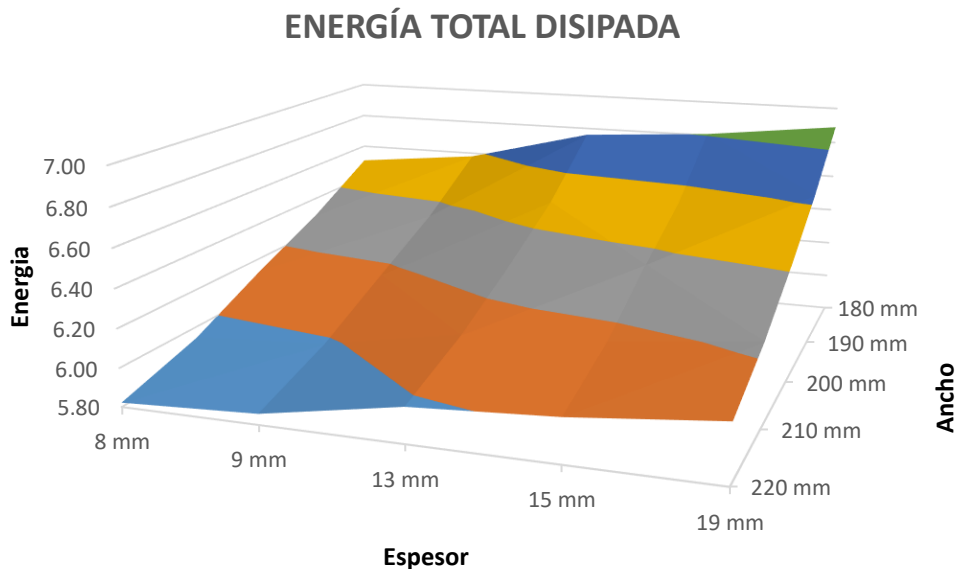


Figura 193. Superficie gráfica de disipación de energía según espesor y longitud de placa de continuidad. Construcción propia

Se observa que la configuración que más energía disipa es aquella que tiene menor dimensión en la placa de continuidad, pero mayor espesor de pletina. Para el caso expuesto, la configuración L220E8T es aquella que menos energía disipa, comparada con las demás configuraciones.

Según la resistencia requerida medida a la flexión de cada conexión, determinada en la cara de la columna, se evaluó la energía disipada a -0.04rad y 0.04rad de cada ciclo de histéresis, el cual es el requisito del ángulo de deriva de piso para DES al 0.8Mp (ver Tabla 73 y Figura 194)

		ESPESOR				
		8 mm	9 mm	13 mm	15 mm	19 mm
LONGITUD (l)	180 mm	6.23	6.26	6.33	6.40	6.46
	190 mm	6.00	6.05	6.18	6.22	6.31
	200 mm	5.84	5.87	5.99	6.05	6.11
	210 mm	5.66	5.70	5.82	5.86	5.93
	220 mm	5.54	5.58	5.70	5.74	5.81

Tabla 73. Energía disipada a -0.04rad y 0.04rad para cada configuración de conexión. Construcción propia

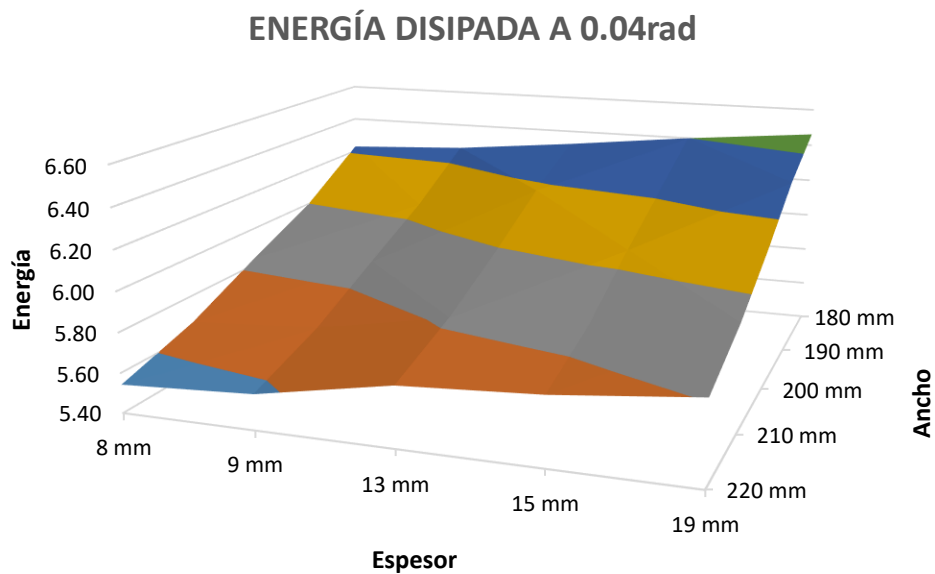


Figura 194. Energía disipada a -0.04rad y 0.04rad para cada configuración de conexión. Construcción propia

Momentos máximos por configuración. Al realizar la revisión del M_{MAX} obtenido durante los ciclos de histéresis para todas las configuraciones dentro de la gráfica Momento – Rotación (ver Tabla 74), se puede observar que, a mayor dimensión de la placa de continuidad, el M_{MAX} es más elevado, sin embargo, su variación no es significativa, tal y como se observa en la Figura 195.

		ESPESOR				
		8 mm	9 mm	13 mm	15 mm	19 mm
LONGITUD (l)	180 mm	61.245	61.173	61.077	61.047	61.021
	190 mm	62.043	62.030	62.118	62.099	62.102
	200 mm	62.357	62.420	62.494	62.517	62.576
	210 mm	62.678	62.729	62.712	62.820	62.860
	220 mm	62.992	63.056	63.078	63.101	63.132

Tabla 74. Momentos máximos obtenidos para cada configuración. Unidades expresadas en MPa. Construcción propia.

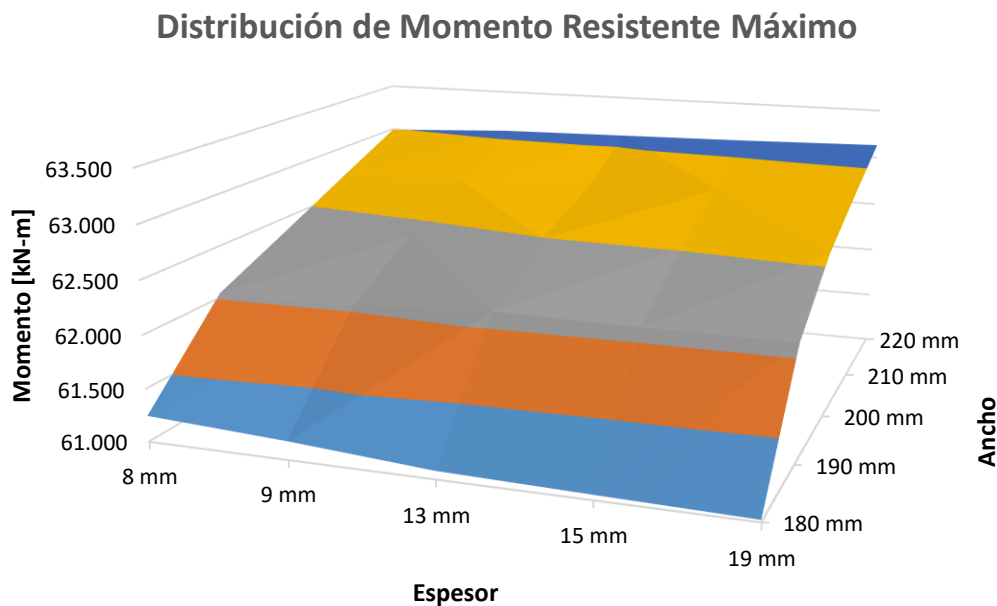


Figura 195. Distribución de resistencia máxima obtenida por cada configuración de conexión. Construcción propia

En la Tabla 75 se observan los momentos máximos obtenidos para cada configuración, normalizados respecto al M_p de la viga, el cual fue calculado en la Tabla 16.

		ESPESOR				
		8 mm	9 mm	13 mm	15 mm	19 mm
LONGITUD (l)	180 mm	2.055	2.053	2.050	2.049	2.048
	190 mm	2.082	2.082	2.084	2.084	2.084
	200 mm	2.093	2.095	2.097	2.098	2.100
	210 mm	2.103	2.105	2.104	2.108	2.109
	220 mm	2.114	2.116	2.117	2.117	2.119

Tabla 75. Valores de $M_{m\acute{a}x}$ normalizados respecto al M_p descrito en la Tabla 16

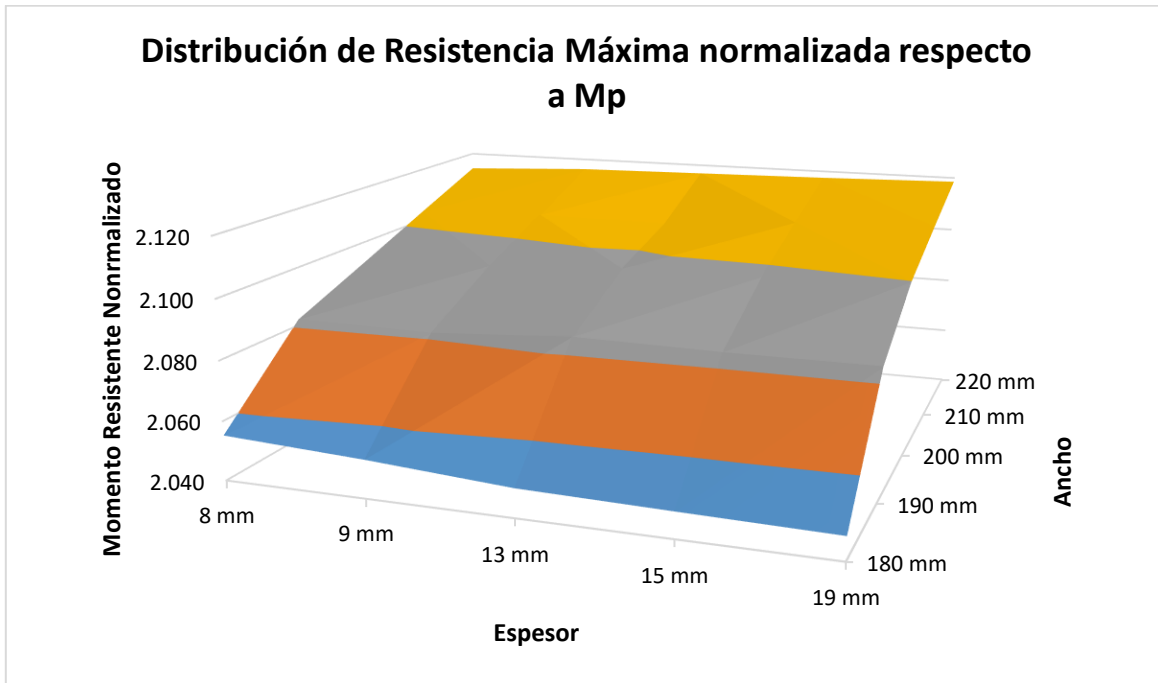


Figura 196. Distribución de Momentos máximos normalizados respecto al M_p

La envolvente de momentos máximos obtenidos de la curva momento - rotación por cada ciclo se detalla a continuación.

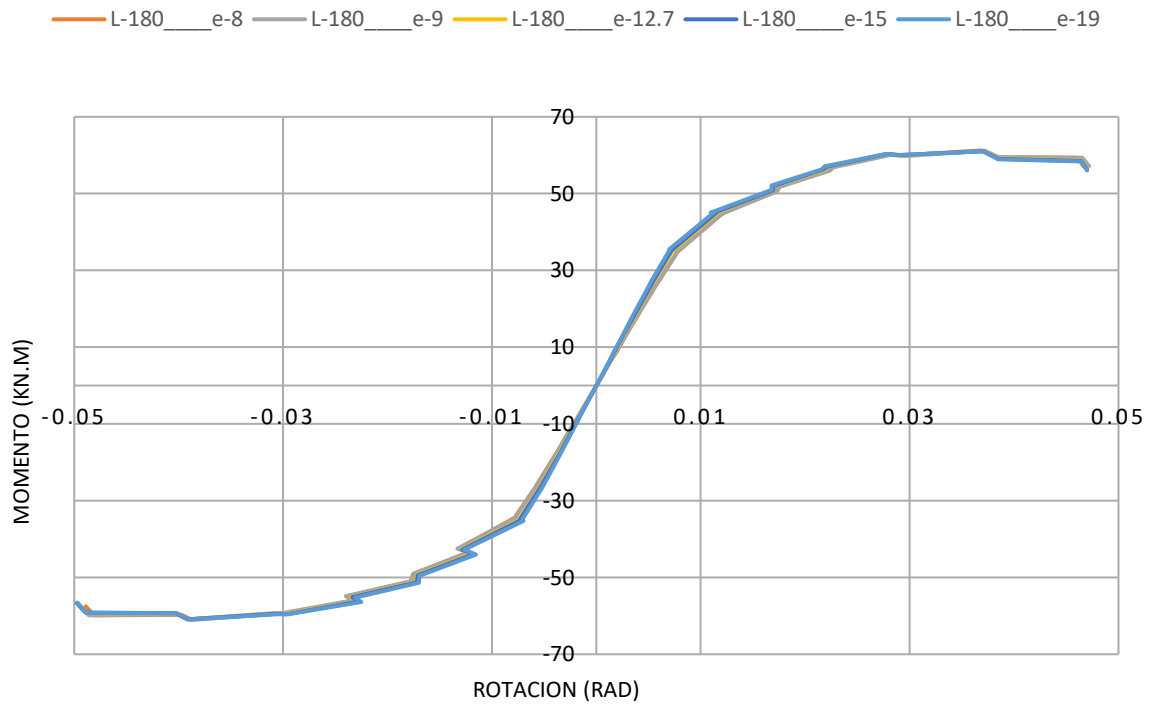


Figura 197. Envoltura de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 180mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.

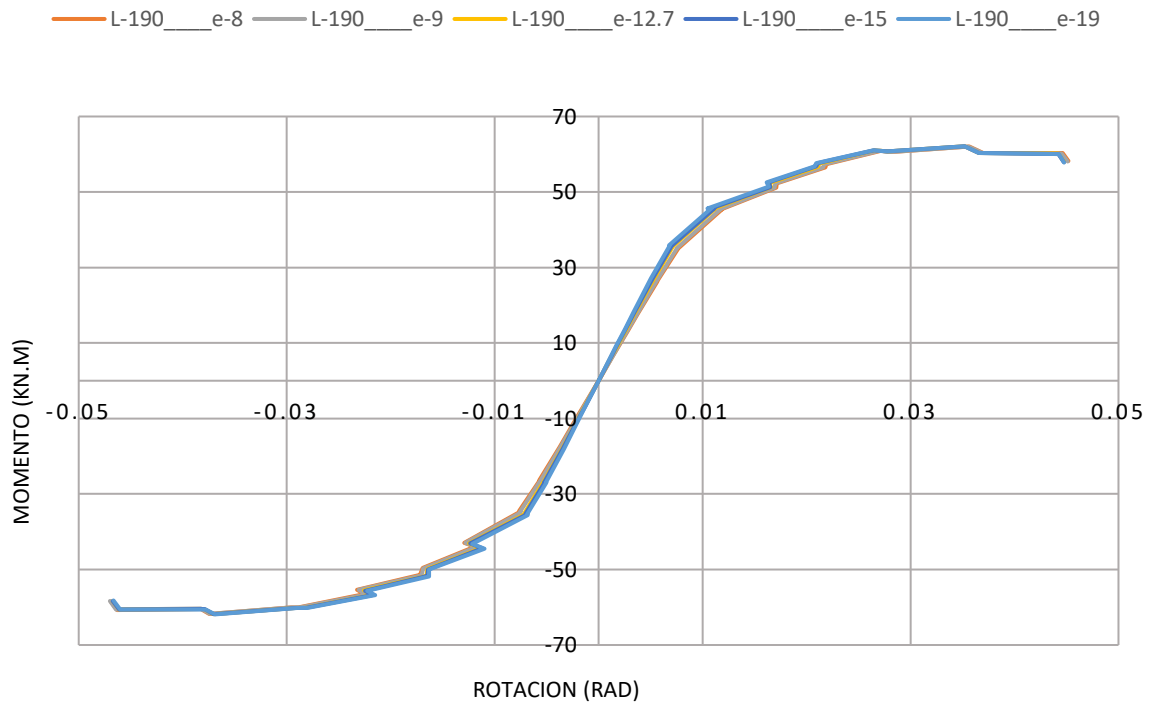


Figura 198. Envoltura de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 190mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.

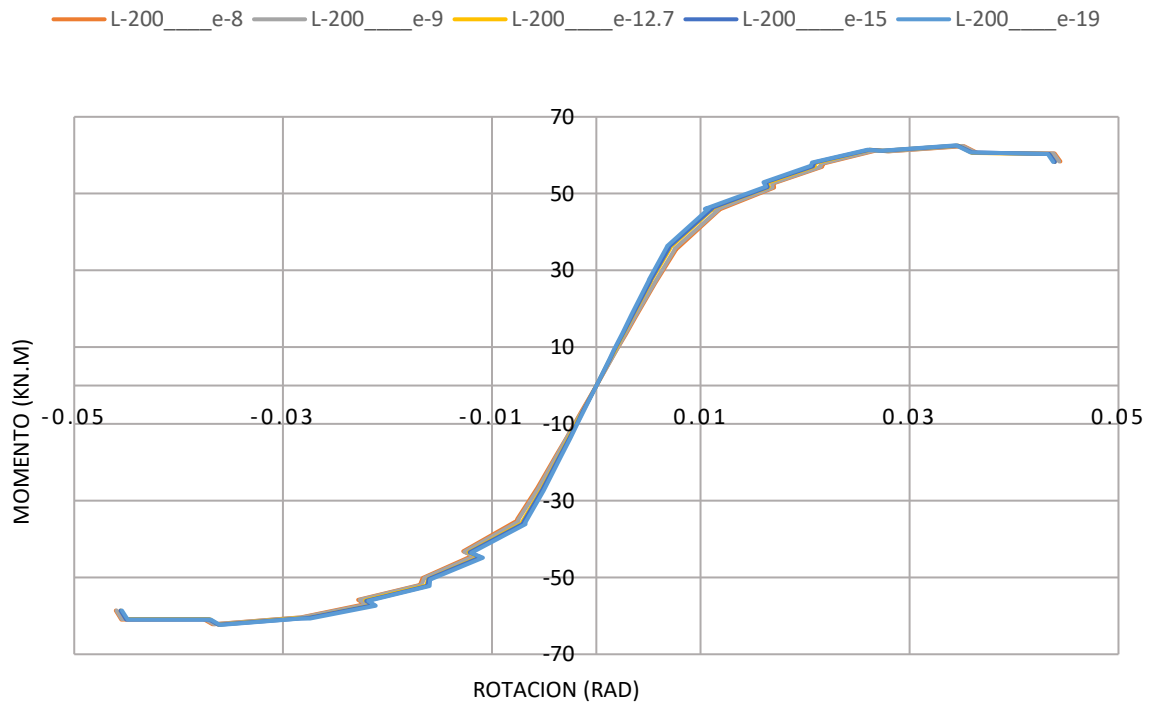


Figura 199. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 200mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.

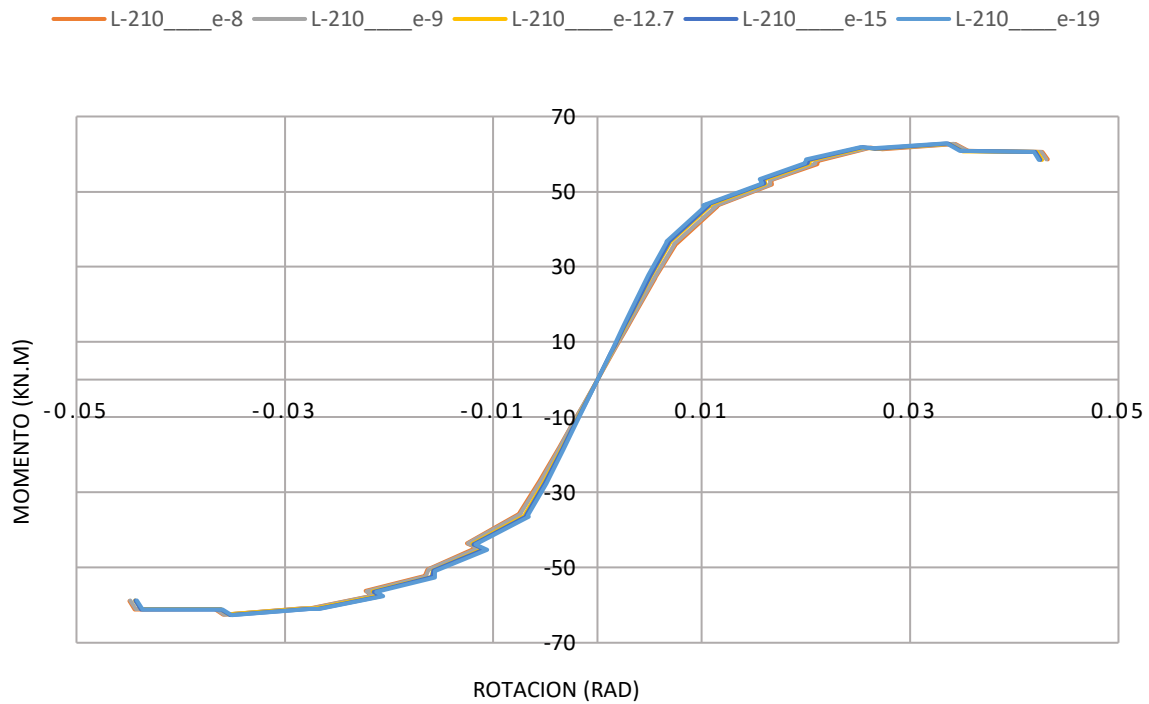


Figura 200. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 210mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.

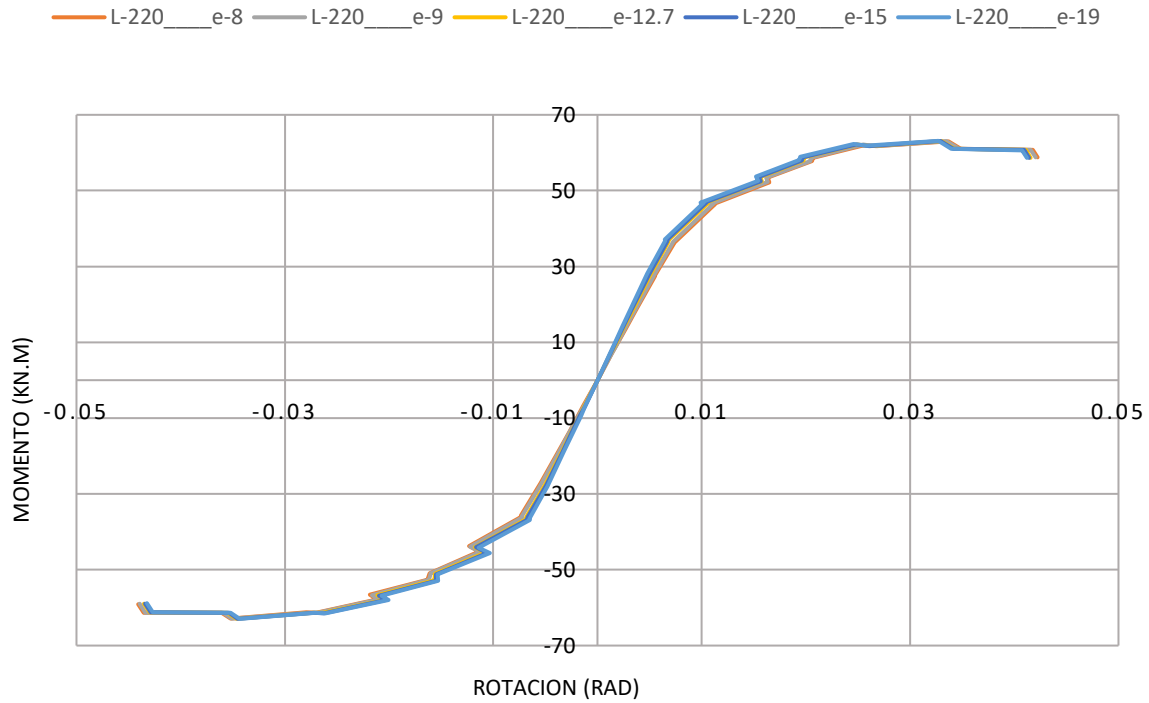


Figura 201.. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el área con una dimensión de 220mm de lado y de amplía el espesor de las placas de continuidad. Construcción propia.

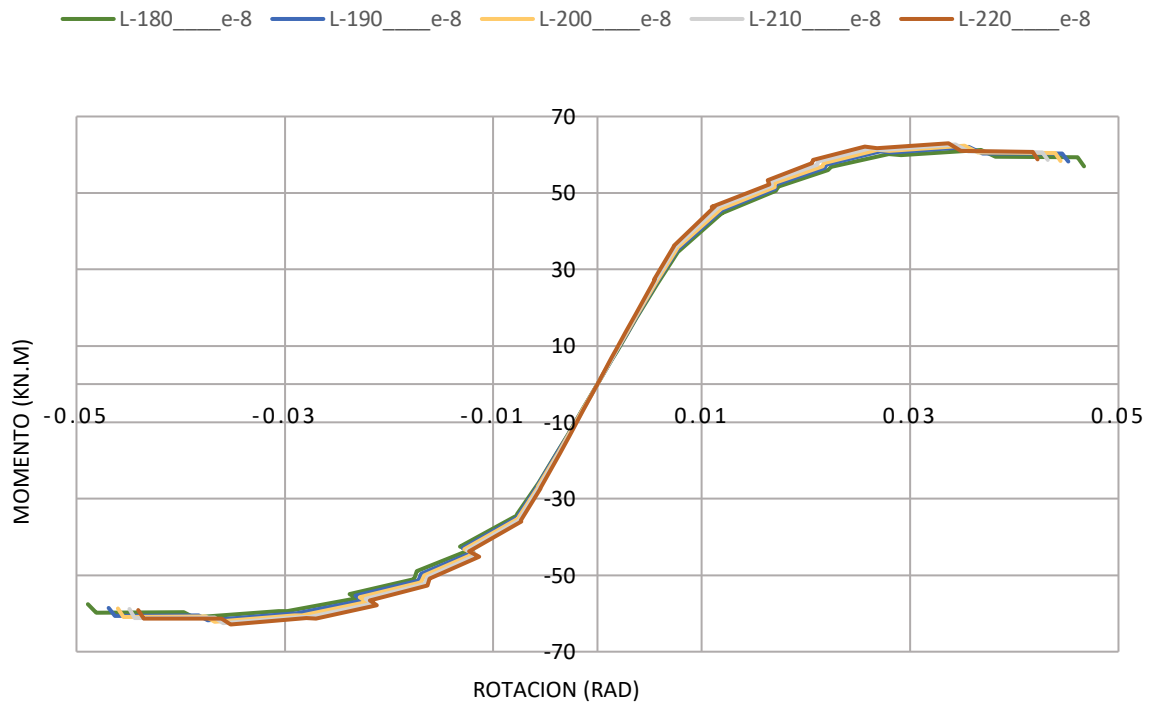


Figura 202. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 8mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.

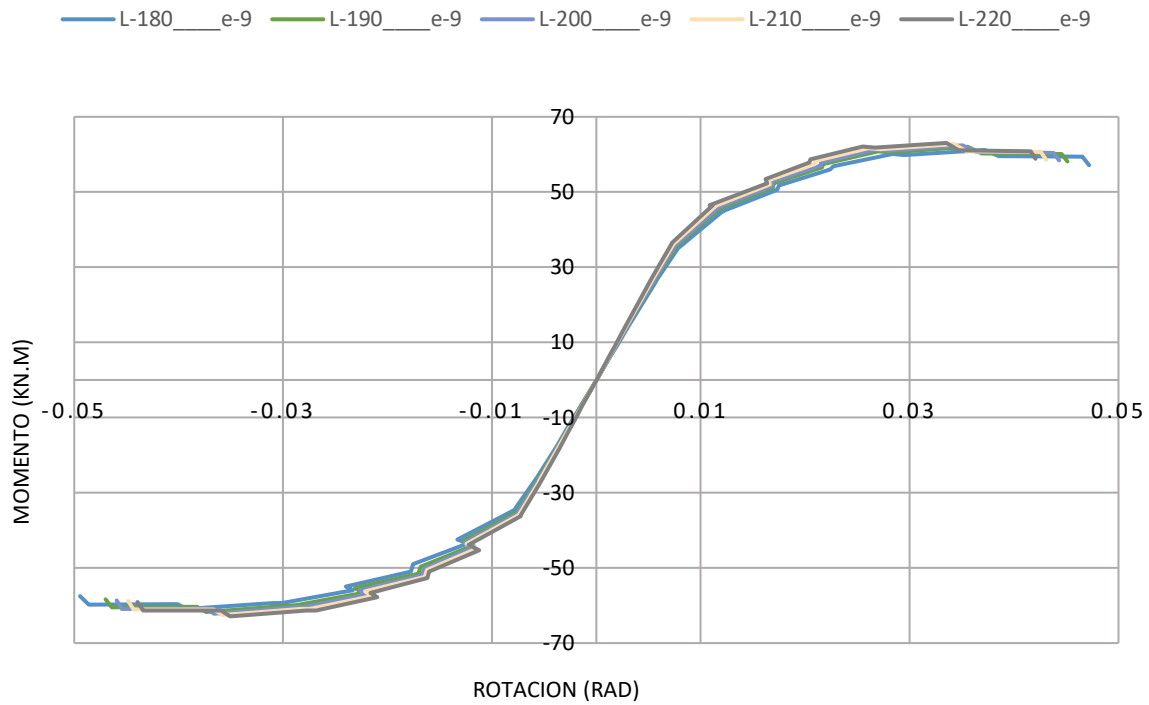


Figura 203. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 9mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.

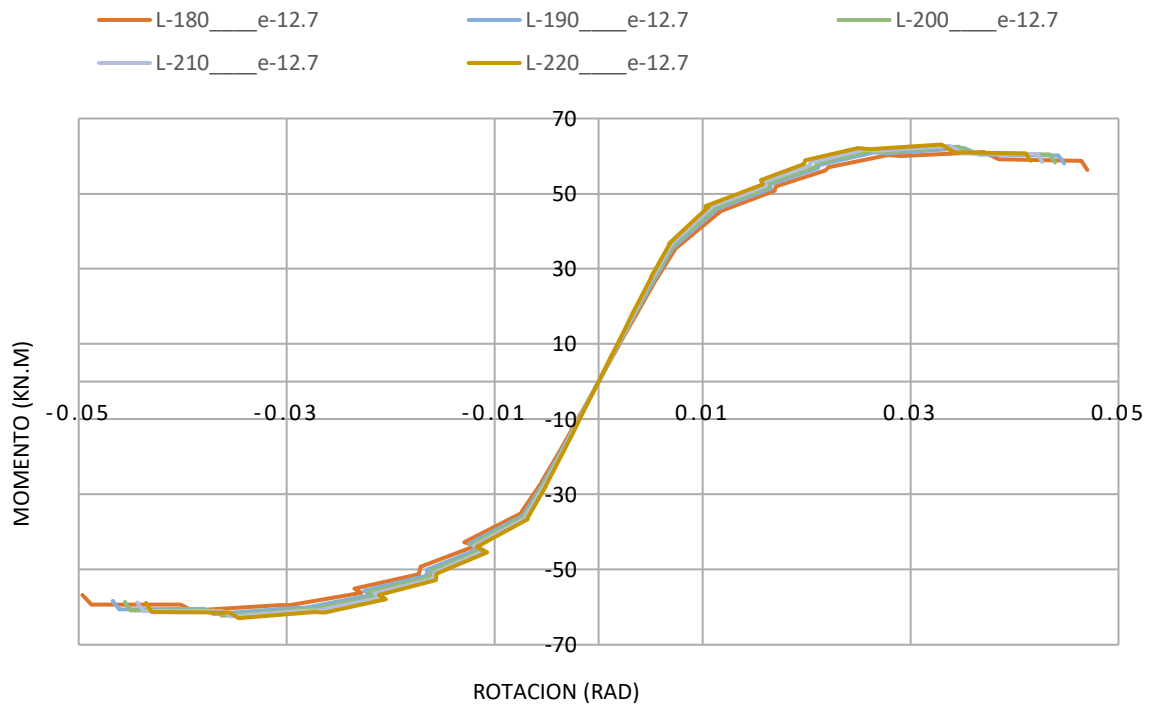


Figura 204. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 12.7mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.

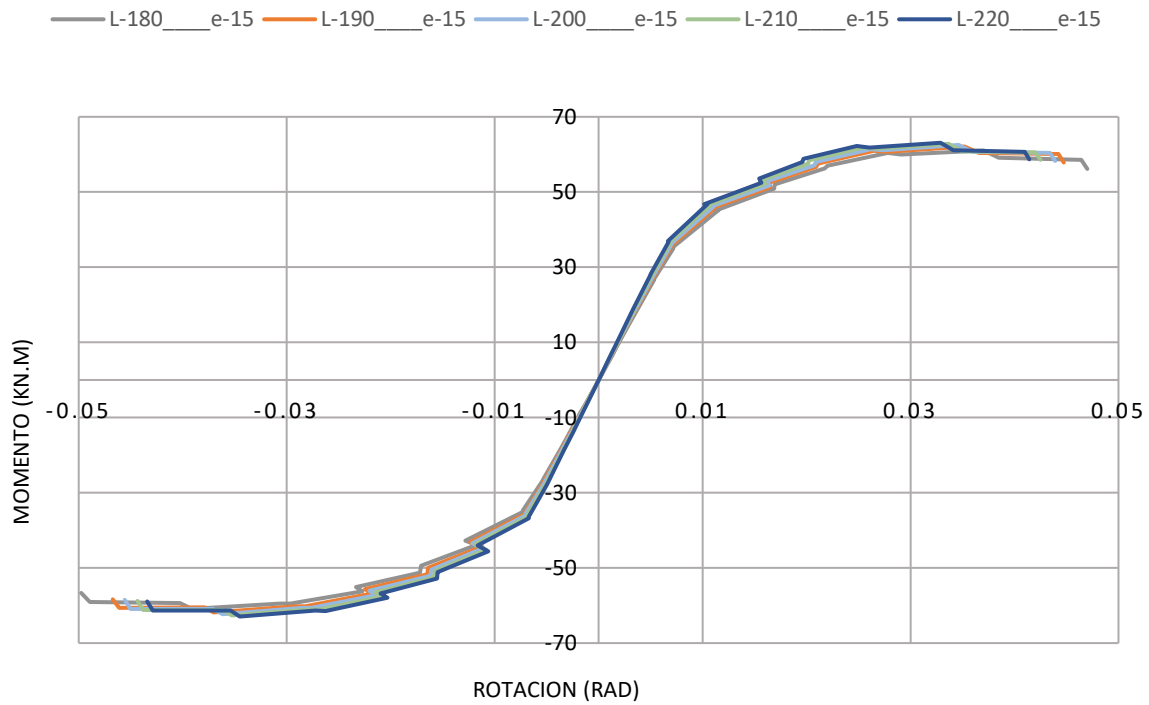


Figura 205. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 15mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.

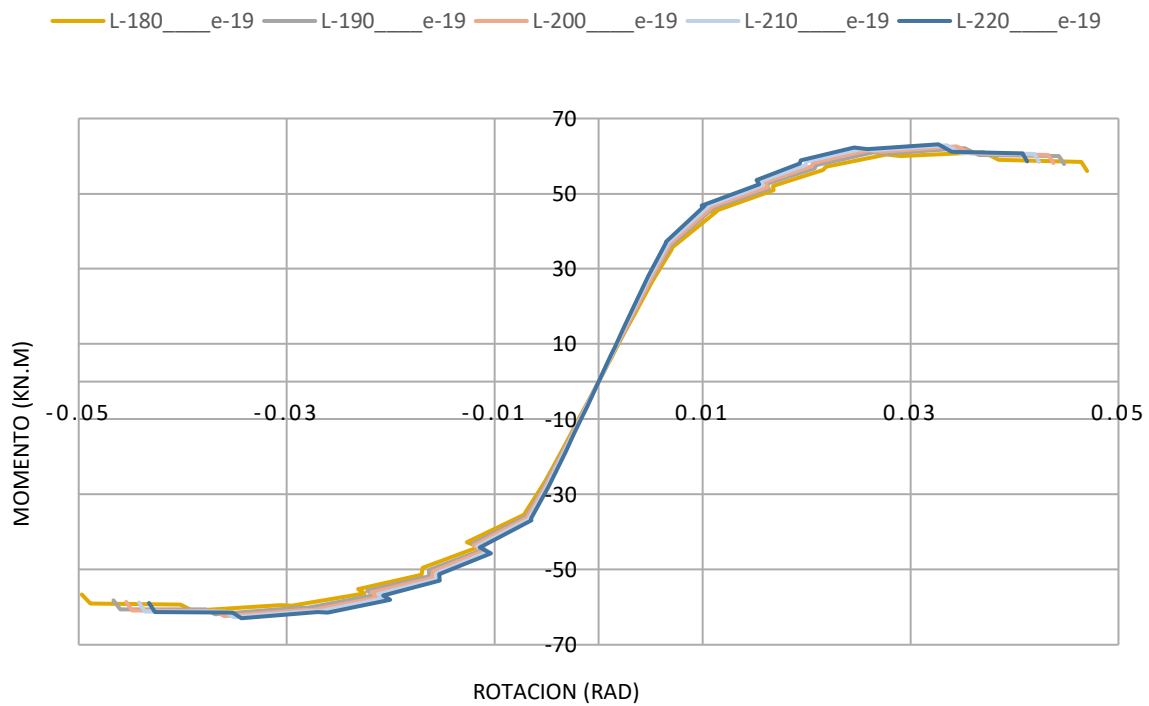


Figura 206. Envolvente de momentos máximos por cada ciclo cuando se mantiene constante el espesor de 19mm y se varía el área de las placas de continuidad. Construcción propia.

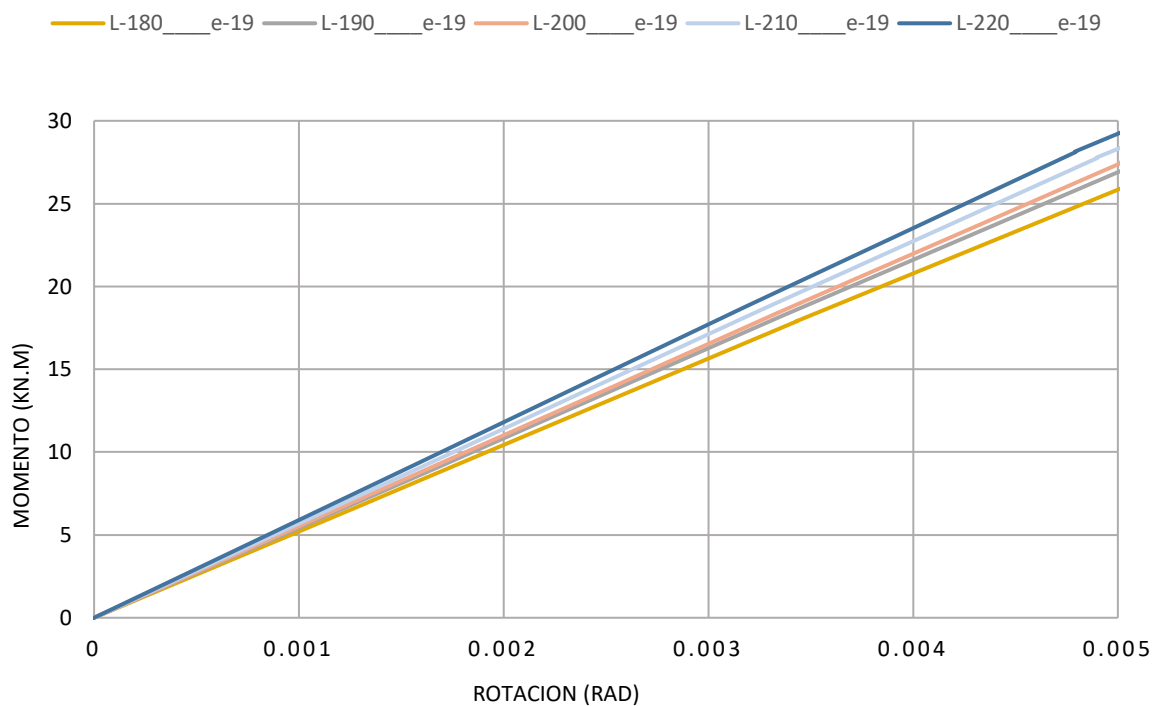


Figura 207. Rigidez rotacional inicial variando áreas. Construcción propia

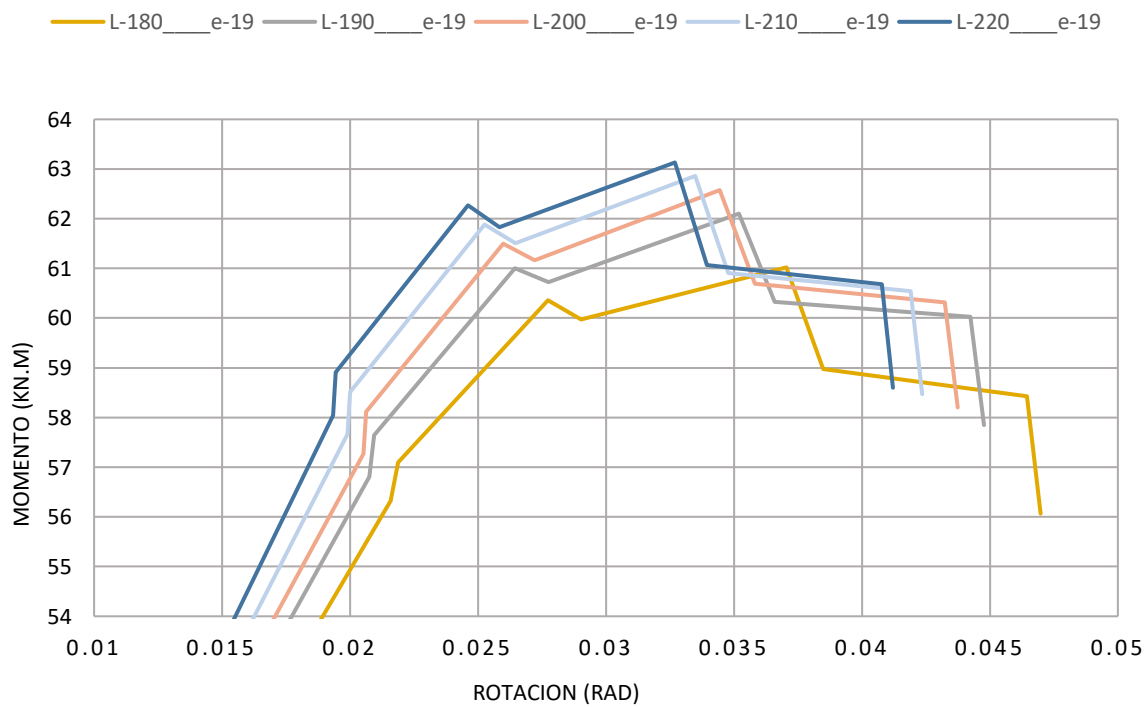


Figura 208. Momentos máximos obtenidos variando áreas. Construcción propia

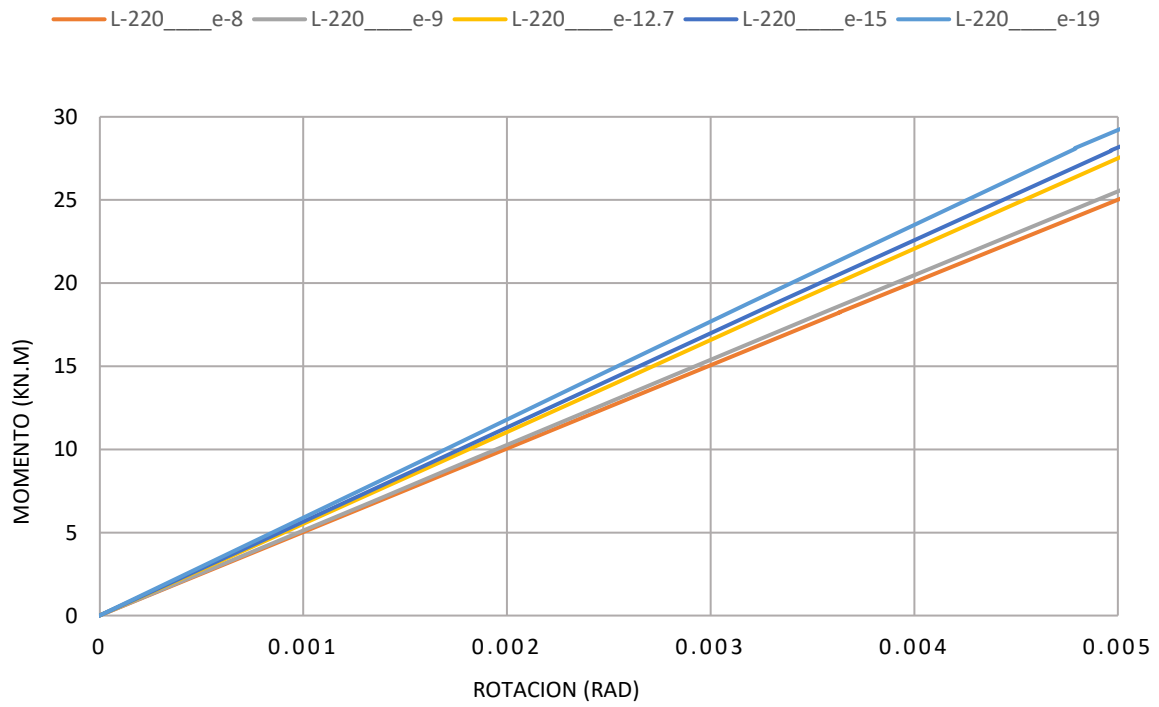


Figura 209. Rigidez rotacional inicial variando espesores. Construcción propia

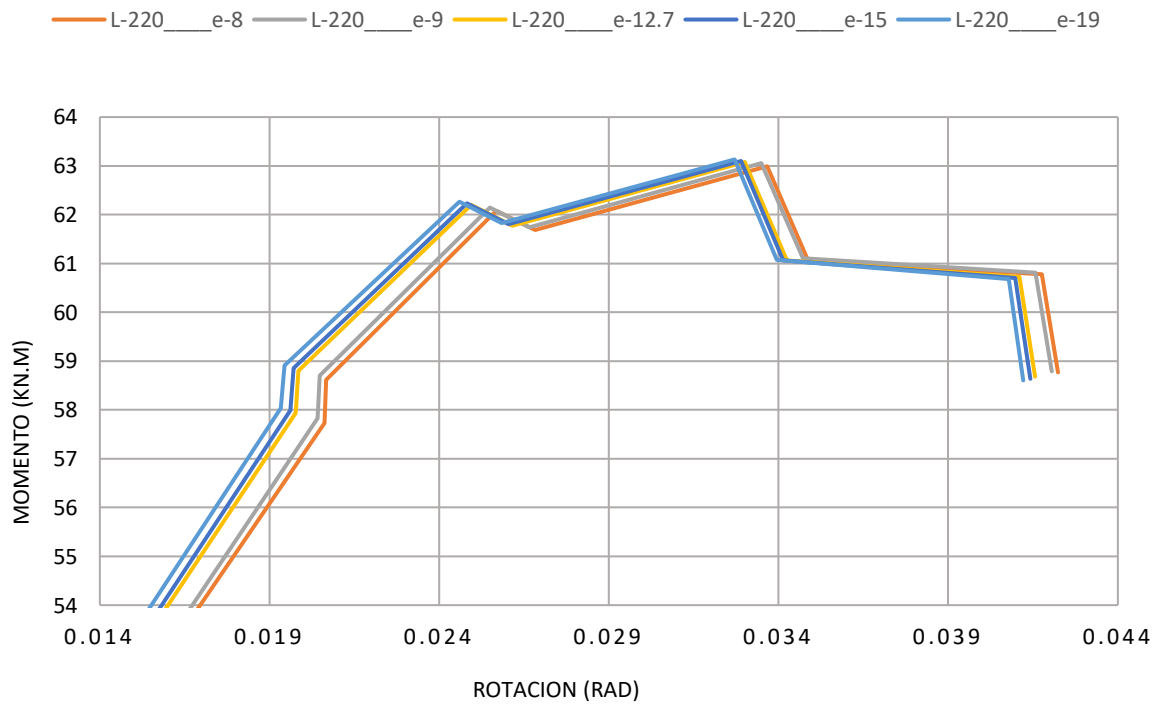


Figura 210. Momentos máximos obtenidos variando espesores. Construcción propia

5.3.3.27 Análisis respecto a las áreas

En la Figura 207 y Figura 208, se puede observar un incremento de la rigidez rotacional inicial con el aumento del área de las placas de continuidad, adicionalmente se aprecia un efecto sobre los momentos máximos conseguidos, para los cuales se obtiene una mayor resistencia en estas configuraciones con mayor área de placa, también se observan incrementos en las rotaciones con la disminución de las áreas de las placas de continuidad.

Respecto al índice de energía disipada, se encuentra que, a menor área se disipa más energía.

Debido a esto se realizó un posterior análisis ya no sobre el ensayo completo, sino acotando el problema a las rotaciones estandarizadas en la norma, con lo cual se redujo el problema a la determinación del área y decremento del momento plástico entre las rotaciones -0.04 y 0.04 radianes, las cuales se indican en la NSR-10 para calificación de conexiones para DES. A partir de esta actividad se encontró que a mayor área se obtienen mayores momentos resistentes, mayor rigidez rotacional inicial y mayor energía disipada de la conexión, lo cual es coherente con los resultados esperados.

5.3.3.28 Análisis respecto a los espesores

En las Figura 209 y Figura 210, se puede observar un incremento de la rigidez rotacional inicial, del momento máximo obtenido y disminución de las rotaciones con el aumento del espesor de las placas de continuidad. Adicionalmente se aprecia también un incremento en la energía disipada tanto para el ensayo completo como para la actividad en la que se acotó la rotación de -0.04 a 0.04 radianes, de lo cual se deduce que, a mayor espesor se disipa mayor energía; sin embargo, las variaciones en las resistencias y rotaciones de la conexión son menores con el cambio de espesor que con el cambio de área.

6. CONCLUSIONES

- El aumento del área de las placas de continuidad incrementa la rigidez rotacional inicial, el momento resistente y energía disipada por la conexión, entendiendo la energía disipada como el área bajo las curvas de histéresis en las gráficas Momento-Rotación.
- El aumento del espesor de las placas de continuidad incrementa la rigidez rotacional inicial, el momento resistente y la energía disipada por la conexión.
- La variación del área de las placas de continuidad es más influyente en el comportamiento de las curvas de histéresis en las gráficas Momento – Rotación, que la variación del espesor de estas, por lo cual, cuando se requieren resistencias mayores, se recomienda enfatizar más en el aumento del área, que en el aumento de espesor de las placas de continuidad.
- El modelo fue validado mediante la implementación de 4 resortes o cojinetes en los apoyos de la conexión, los cuales generaban una disminución de las reacciones los cuales empezaban a generar variaciones a partir de la aplicación de una fuerza igual a 30KN, carga en la que empezaban a divergir las curvas con lo cual se aproximó más el comportamiento del modelamiento a los resultados experimentales.
- Comparativamente entre el modelamiento con el esfuerzo de fluencia experimental y el esfuerzo de fluencia teórico, se observaron las mismas tendencias descritas anteriormente; no obstante, el esfuerzo último F_u teórico resultó ser mayor que el obtenido experimentalmente, lo cual incidió en momentos resistentes mayores en aproximadamente 3%; así mismo, esta mayor resistencia última, proveyó a las conexiones bajo estudio, mayor rigidez rotacional, lo cual incidió en rotaciones menores en 0.002 rad respecto a las experimentales.

- A partir del estudio realizado sobre las 25 conexiones tanto con el esfuerzo de fluencia obtenido de los ensayos de tracción, como del esfuerzo de fluencia teórico, encontramos que los resultados sugieren el cumplimiento de los requisitos de momento y rotación estipulados en el numeral F.3.5.3 de la norma NSR-10 para capacidades especiales de disipación de energía (DES).

BIBLIOGRAFÍA

- American Institute of Steel Construction. (2016). *Prequalified connections for special and intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, ANSI/AISC 358-16*. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.
- American Institute of Steel Construction. (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 341-16*. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.
- American Institute of Steel Construction. (2016). *Specification for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 360-16*. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.
- American Society for Testing and Materials;. (2016). Standard Test Methods for Tension Tensile of Metallic Materials E8/E8M – 16a. West Conshohocken, United States of America.
- Andrade , C. (2015). Calificación de Conexiones de Perfiles I de Acero - Viga Conectada al Eje Debil. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Anónimo. (2017, 09 17). *Degenkolb*. Retrieved from http://degenkolb.com/practice_areas/seismic_ordinances/pre_northridge_steel_moment_frame_buildings/
- Anónimo. (Desconocido). *Estructuras de Concreto Reforzado bajo la acción sísmica sostenida*.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá D.C.: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Bedford, A., & Fowler, W. (2008). *Mecánica para Ingeniería - Estática*. México: Pearson Education.
- Beer, F. B., Johnston, R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2015). *Mechanic of Materials*. New York: McGraw-Hill Education.

- Chen, Y., & Ying, W. (2015). Behaviour of square hollow section brace-H-shaped steel shord T-joints under axial compression. *Thin-Walled Structures* 89, 192-204.
- Clavijo , F. (2016). *Desarrollo de Software para diseño de conexiones en estructuras de acero bajo las especificaciones del AISC*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Crisafulli, F. J. (2014). *Diseño Sismoresistente de Construcciones de Acero*. Santiago de Chile: Asociación Latinoamericana del Acero.
- D'aniello, M., Guneyisi, E., Landolfo, L., & Mermerdas, K. (2013). Analytical prediction of available rotation capacity of cold-formed rectangular and square hollow section beams. *Thin-Walled Structures* 77, 141-152.
- Del Savio, A., Nethercot, D., Vellasco, P., Andrade, S., & Martha, L. (2009). Generalised component-based model for beam-to-column connections including axial versus moment interaction. *Journal of Constructional Steel Research* 65, 1876-1895.
- Díaz, C., Victoria, M., Marti, P., & Querin, O. (2011). FE model of beam-to-column extended end-plate joints. *Journal of Constructional Steel Research* 67, 1578-1590.
- Dylan, R. (2008). Steel moment frames 101 - What to consider when creating wide-open spaces. *Structural Engineer*, 28.
- Fadden, M. (2013). *Cyclic bending behavior of hollow structural section and their application in seismic moment frame systems*. Michigan: University of Michigan.
- Fadden, M., & McCormick, J. (2012). Cyclic quasi-static testing of hollow structural section beam members. *Journal of Structural Engineering* © ASCE 138, 561-570.
- Gallego, M., & Sarria, A. (2015). *El Concreto y los Terremotos*. Bogotá: Asocreto.
- Haddad, M. (2014). Concentric tubular steel braces subjected to seismic loading: Finite. *Journal of Constructional Steel Research*, 155-166.

- Higaki, B. E. (2014). *Contribuição à análise estrutural de edifícios de aço com ênfase nas ligações semi-rígidas*. São Carlos: São Carlos.
- Higaki, B. E. (2014). *Contribuição À Análise Estrutural De Edifícios De Aço Com Ênfase Nas Ligações Semi-Rígidas*. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Hudovernik, M., Kosel, F., Staupendhal, D., Tekkaya, A., & Kuzman, K. (2014). Application of the bending theory on square-hollow section made from high strength steel with changing angle of the bending plane. *ournal of Materials Processing Technology 214*, 2505-2513.
- Kartal, M., Basaga, H., Bayraktar, & Muvafik, M. (2010). Effects of Semi-Rigid Connections on structural responses. *Electronic Journal of Structural Engineering 10*, 22-35.
- Ley 400 (Agosto 19, 1997).
- Martín R., A. (2010). *Simulación mediante el método de los elementos finitos de una estructura metálica*. Madrid: Carlos III de Madrid.
- McCormac, J. C., & Csernak, S. C. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero*. New Jersey: Alfaomega Grupo Editor S.A.
- Métodos Analíticos para la Estimación de los Tensores de Tensión y Deformación Elasto-Plásticos en las Inmediaciones de una Entalla*. (2018, Abril 20). Retrieved from <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70578/fichero/Cap%C3%ADtulo+2.pdf>.
- Miranda, E. (2001). Daños en Estructuras de Acero como Resultado del Sismo del 17 de Enero de 1994 en Northridge, California. *Centro Nacional de Prevención de Desastres, México*, 502-509.
- Moehle, J. (2015). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. United States of America: McGraw-Hill Education.
- Packer, J., Wardenier, J., Zhao, X., Van der Vegte, G., & Kurobane, Y. (2010). *Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly*

static loading. Ontario (Canada): Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire.

Roa , M. A., & Garzón, D. A. (2002). *Introducción al Modelamiento por EF con ANSYS*. Bogotá D.C.: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia.

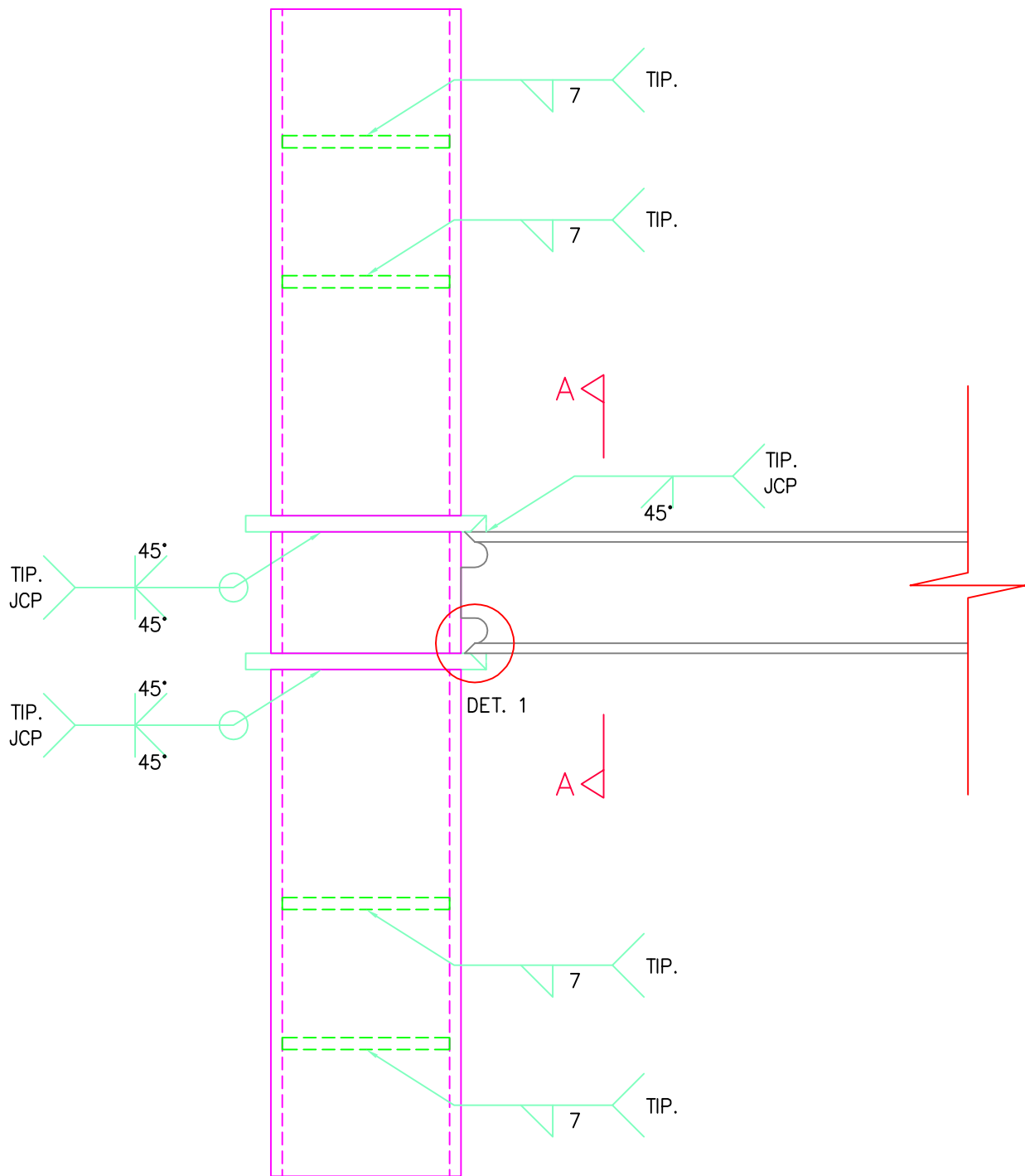
Rochel, R. (2012). *Análisis y Diseño Sísmico de Edificios*. Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT.

Rubio, I. (2005). *Estudio Tridimensional de los Efectos Dinámicos del Viento sobre Estructuras Esbeltas, aplicación al caso de Puentes*. Sevilla, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros .

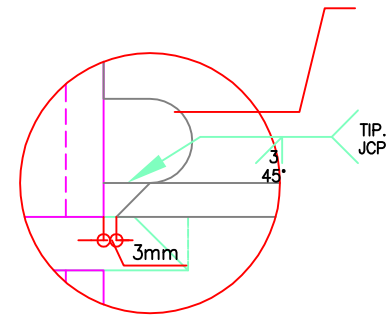
SAP IP, Inc. (n.d.). Ansys Release 16.2.

Segui, W. (2013). *Steel Design*. United States of America: Cengage Learning.

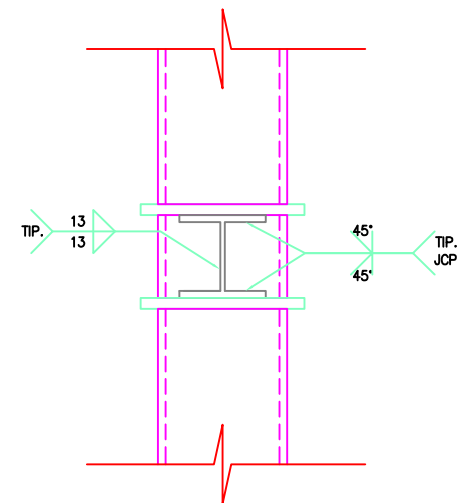
ANEXO A – PLANOS



AGUJERO DE ACCESO
VER GEOMETRÍA FIGURA 5.2 AWS
ALT. 1



DETALLE 1



CORTE A-A

OBRA :

CONEXIÓN
METÁLICA PTE
150X150X9 Y
HEA 100

CALCULO :
WILLIAM GONZÁLEZ PRADINE
MAT. 20202-14507

ARQUITECTO:

CONTENIDO :
-CONEXIÓN
-DETALLE 1
-CORTE A-A

MODIFICACIONES :

MATERIALES :

DIBUJO:

ESCALA:
INDICADAS

VERSION:
1

FECHA:

PLANO No

E-1

ULTIMO PLANO



OBRA :

CONEXIÓN METÁLICA PTE 150X150X9 Y HEA 100

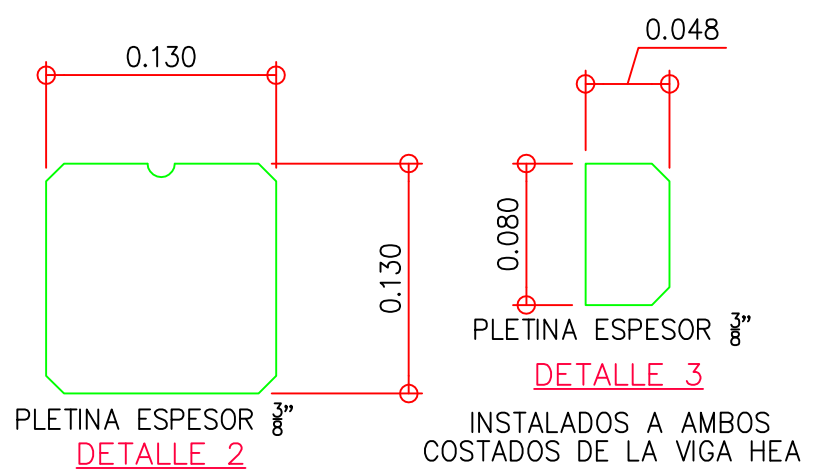
CALCULO :
 WILLIAM GONZÁLEZ PRADINE
 MAT. 2020-14507

ARQUITECTO:

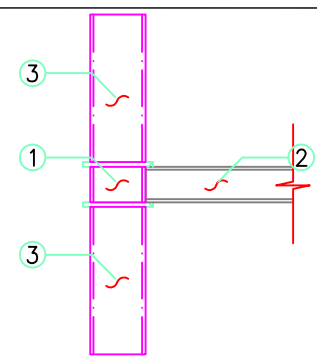
CONTENIDO :
 -CONEXIÓN
 -PROCESO DE ARMADO

MODIFICACIONES :

MATERIALES :



PROCESO DE ARMADO



- NOTAS:**
- MEDIDAS DADAS EN MILIMETROS PARA LA SOLDADURA
 - MEDIDAS DADAS EN METROS PARA LOS ELEMENTOS
 - REALIZAR BISELES Y SOLDADURAS DE COMPLETA PENETRACIÓN SEGÚN F.3.1.4-2 NSR-10, SOLDADURA DE DEMANDA CRÍTICA ENTRE EL TUBO Y LOS RIGIDIZADORES DE CONTINUIDAD.
 - PREPARAR LAS JUNTAS SEGÚN DETALLE 1, PRESENTAR LA VIGA EN EL TUBO, REALIZAR SOLDADURAS DE FILETE POSTERIOR A ESTAS SOLDADURAS JCP
 - LOS CORDONES DE SOLDADURA NO DEBEN UNIRSE EN NINGÚN ÁNGULO
 - SOLDADURA E70XX

DIBUJO:

ESCALA: INDICADAS

VERSION: 1

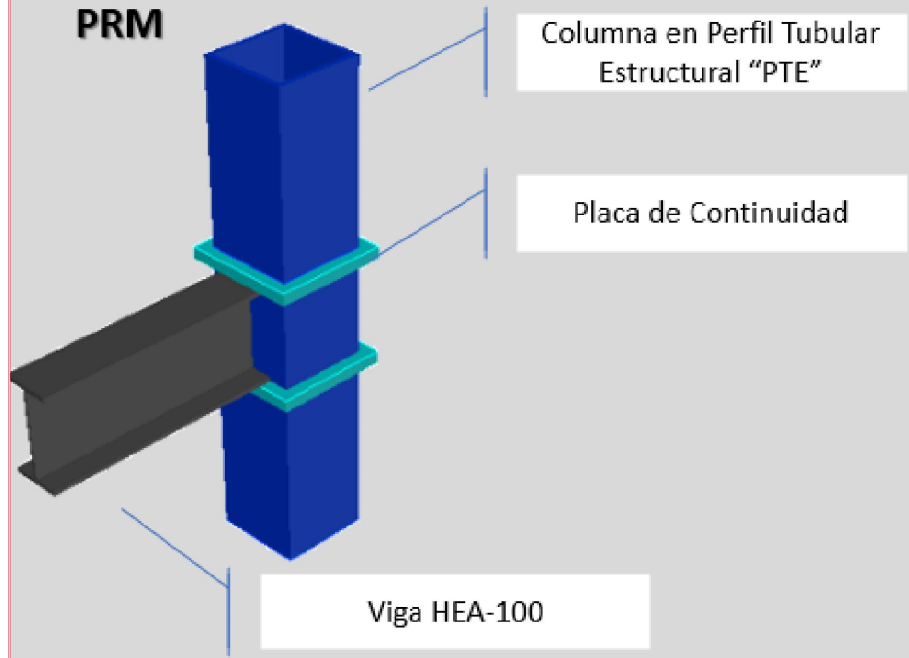
FECHA:

PLANO No

E-2

ULTIMO PLANO

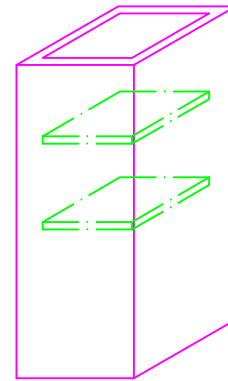
PRM



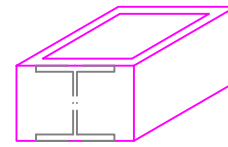
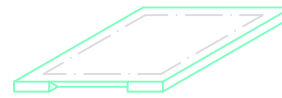
Columna en Perfil Tubular Estructural "PTE"

Placa de Continuidad

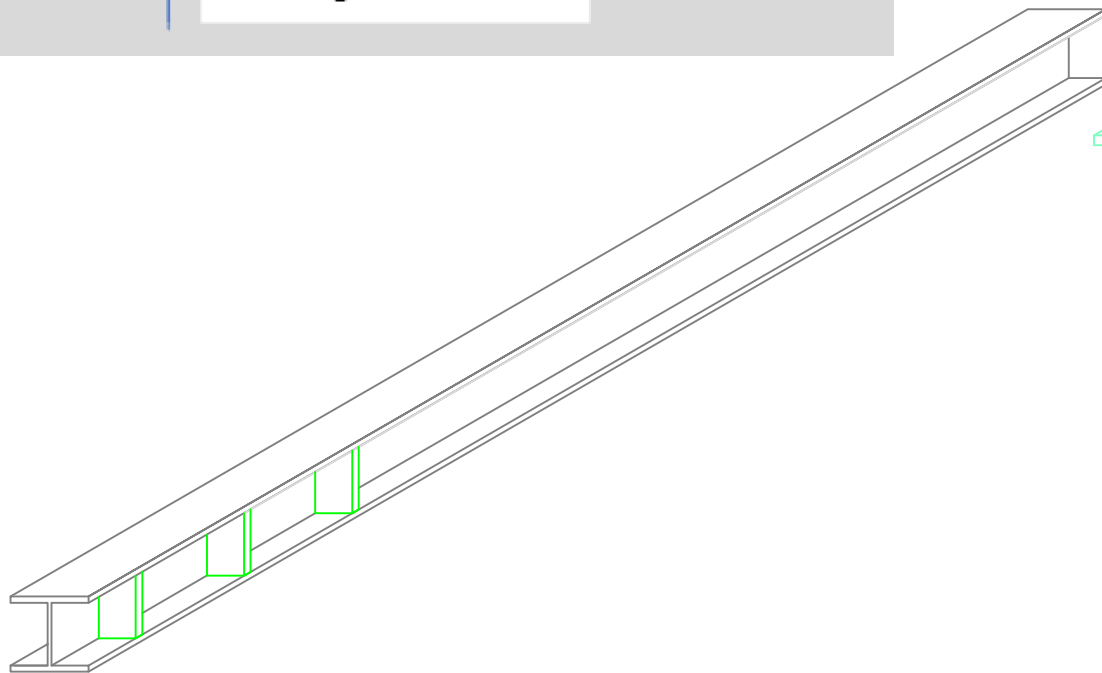
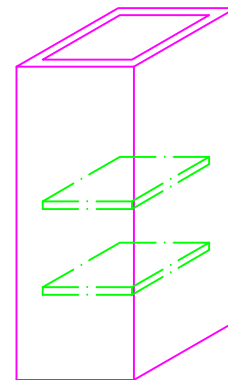
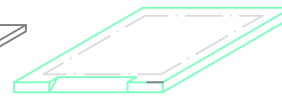
Viga HEA-100



PLATINA DE 190X190



PLATINA DE 190X190



OBRA :

CONEXIÓN METÁLICA PTE 150X150X9 Y HEA 100

CALCULO :
WILLIAM GONZÁLEZ PRADINE
MAT. 2020-14507

ARQUITECTO:

CONTENIDO :
-ESQUEMA GENERAL

MODIFICACIONES :

No.	Descripción	Fecha

MATERIALES :

DIBUJO:

ESCALA: INDICADAS

VERSION: 1

FECHA:

PLANO No

E-3

ULTIMO PLANO