



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS DE BORDE DE MUROS
SUJETOS A DISTINTAS CONFIGURACIONES DE CONFINAMIENTO Y
PRE-TRACCIÓN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JESUS OCTAVIO NÚÑEZ VENEGAS

PROFESOR GUÍA:
LEONARDO MASSONE SANCHEZ.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
AUGUSTO HOLMBERG FUENZALIDA.
FERNANDO YAÑEZ URIBE

SANTIAGO DE CHILE
JUNIO 2014

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: JESÚS NÚÑEZ V.
FECHA: 13/06/2014
PROF. GUIA: SR. LEONARDO MASSONE

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS DE BORDE DE MUROS SUJETOS A DISTINTAS CONFIGURACIONES DE CONFINAMIENTO Y PRE-TRACCIÓN.

El 27 de febrero del 2010 se produjo en Chile un terremoto de gran magnitud, el cual produjo severos daños en algunos edificios habitacionales de hormigón armado. En particular, se observó una falla que se localizó en las plantas bajas y en el borde libre de muros estructurados en forma transversal T. Esta falla se caracterizó por la pérdida del hormigón de recubrimiento, el colapso del núcleo de hormigón, la fractura o abertura de estribos de confinamiento como también el pandeo de la armadura longitudinal.

Debido a lo anterior, para estudiar y analizar experimentalmente este tipo de falla, se caracterizó una probeta de hormigón armado emulando el borde libre en compresión del muro T. Además se diseñó una matriz de ensayos con diferentes configuraciones de confinamiento (detallamiento de estribos, espaciamiento de estribos), configuraciones geométricas y de pre-tracción de la armadura longitudinal, esto último para emular la tracción del borde del muro durante un sismo.

A partir de los ensayos se analizó y comparó experimentalmente la respuesta global (en relación a la capacidad de carga, el nivel de degradación y la inestabilidad) además de la respuesta interna (en relación a la armadura de confinamiento y de la armadura longitudinal), evidenciándose un comportamiento particular para las probetas con pre-tracción. Éste se caracterizó por una disminución en la capacidad de carga y en algunos casos un corrimiento de la deformación en el máximo de carga, no observándose una reducción o aumento en la degradación comparado con las probetas sin pre-tracción.

En las probetas que presentaron confinamiento transversal se evidenció que el nivel de degradación posterior al máximo de carga fue menor comparado con aquellas que no presentaron confinamiento. También se evidenció que la pérdida de carga para deformaciones axiales cercanas a la máxima deformación en compresión para muros, estipulada en la actual normativa, fue menor para las probetas con confinamiento (cerca de un 27% de pérdida en relación a su carga máxima, para detallamiento ACI 318). Se apreció que los ganchos de estribos en 90° no tuvieron un buen comportamiento en cuanto al confinamiento, pues se abrieron, no anclándose al núcleo de hormigón.

Se apreció que los estribos de refuerzo transversal en el máximo de capacidad de carga alcanzaron aproximadamente un 25% de la tensión de fluencia, valor por debajo de la suposición de los modelos tradicionales de hormigón confinado.

En relación a las probetas con pre-tracción posiblemente la pérdida de capacidad esté relacionada con la velocidad con la que se cierran las grietas y con la pérdida de recubrimiento luego de cerradas las grietas, esto último presentado en el trabajo de Herrera (2013).

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. MOTIVACIÓN	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. METODOLOGÍA	5
1.5. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS.....	6
CAPÍTULO 2 : COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES	7
2.1. COMPORTAMIENTO DE HORMIGÓN NO CONFINADO.....	7
2.2. COMPORTAMIENTO DE ACERO.....	8
CAPÍTULO 3 : ENSAYO DE PROBETAS	9
3.1. CARACTERIZACIÓN ZONAS EN PROBETAS	13
3.2. INSTRUMENTACIÓN DE PROBETAS.....	14
3.3. PROCESO CONSTRUCTIVO DE PROBETAS	17
3.4. DESCRIPCIÓN Y MONTAJE DE ENSAYOS.....	19
3.4.1. Ensayo de compresión axial	19
3.4.2. Ensayo de tracción de barras longitudinales.....	21
CAPÍTULO 4 : ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	26
4.1. ANÁLISIS CUALITATIVO.....	26
4.1.1. DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE FALLA OBSERVADA.....	26
4.1.2. LARGO DE ZONA DE FALLA.....	27
4.2. ANÁLISIS CUANTITATIVO.....	34
4.2.1. PROBETAS SIN PRE-TRACCIÓN	34
4.2.1.1. COMPORTAMIENTO GLOBAL PROBETAS SIN PRE-TRACCIÓN	37
4.2.1.2. COMPORTAMIENTO PREVIO A CARGA MÁXIMA	41
4.2.1.3. COMPARACIÓN PROBETAS SIN PRE-TRACCIÓN	48
4.2.1.4. COMPORTAMIENTO POSTERIOR A CARGA MÁXIMA.....	53
4.2.1.5. COMPORTAMIENTO PROBETAS EN RELACIÓN A DS60	56
4.2.1.6. COMPORTAMIENTO TRANSVERSAL.....	58
4.2.1.6.1. Modelo analítico deformación transversal PANTAZOPOULOU	61
4.2.1.7. ANÁLISIS DE INESTABILIDAD.....	68

4.2.1.8. SENSORES INTERNOS	72
4.2.1.8.1. Modelo deformación estribos Massone & Lopez (2013).....	79
4.2.2. PROBETAS CON PRE-TRACCIÓN	84
CAPÍTULO 5 : CONCLUSIONES.....	100
BIBLIOGRAFÍA	102
ANEXOS	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Resultados ensayos a compresión, cilindros de hormigón no confinado	7
Tabla 2.2. Parámetros Experimentales Acero	9
Tabla 3.1. Matriz de ensayos	10
Tabla 3.2. Largo zona externa.....	13
Tabla 3.3. Largo zona central.....	13
Tabla 3.4. % de deformación luego de pre-tracción de barras longitudinales	23
Tabla 3.5. Largo de sensores internos LVDTs centrales.....	24
Tabla 3.6. Largo de sensores externos LVDTs globales y sensores SDP	25
Tabla 4.1. Largo de zona de falla	30
Tabla 4.1. Carga máxima y deformación axial a carga máxima	38
Tabla 4.2. Rigidez teórica y Rigidez experimental para probetas sin pre-tracción	42
Tabla 4.3. Degradación a una deformación axial de $\epsilon_{cc}+0.006$	54
Tabla 4.4. Pérdida de carga a una deformación axial de $\epsilon_{cc}+0.006$	56
Tabla 4.5. Error en la estimación de la deformación axial en el máximo de carga, modelo Pantazopoulou.....	64
Tabla 4.6. Desplazamientos laterales en máximo de carga, sensores SDPs.....	71
Tabla 4.7. Estado tensional de estribos en el máximo de carga.	76
Tabla 4.8. Índice de confinamiento, calculada de acuerdo a ecuación [4.22]	77
Tabla 4.9. Deformaciones en el máximo de carga armadura longitudinales.	82
Tabla 4.10. Valores característicos en máximo de carga , probetas con pre-tracción ...	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Daños producidos en el borde de muros esbeltos, de edificio Ñuñoa, imágenes Cáceres (2012)	1
Figura 1.2. Modelo plasticidad concentrada en muros esbeltos, imagen Alfaro (2013). ..	2
Figura 2.1. Máquina de ensayo a tracción de barras de acero.....	8
Figura 2.2. Ensayo de barras de acero	8
Figura 3.1. Detallamiento armadura transversal zona central	12
Figura 3.2. Detallamiento estribos zona externa	13
Figura 3.3. Caracterización instrumentación LVDTs	14
Figura 3.4. Sensores SDP	15
Figura 3.5. Esquema de ubicación Strain gauges , imagen Polanco (2012)	15
Figura 3.6. Elementos auxiliares para montaje de sensores LVDTs	16
Figura 3.7. Montaje e instalación de sensores strain gauges, imagen Polanco (2012)..	17
Figura 3.8. Armado de probetas a) sin confinamiento central, b) con confinamiento central a 100mm c) con confinamiento central a 150mm (imagen Polanco 2012)	18
Figura 3.9. Desmolde de probetas al séptimo día de hormigonado	18
Figura 3.10. Prensa hidráulica , para ensayos de compresión axial	19
Figura 3.11. A) Idealización de ensayo a tracción, B) materialización de ensayo a tracción.....	21
Figura 3.12. Planos de construcción pedestal para 6 barras longitudinales.....	22
Figura 3.13. A) Sistema de anclaje, B) materialización de anclaje de pernos LENTON LOCK	22
Figura 4.1. imagen A/A.1-Mecanismo de falla probetas sin confinamiento central. Imagen B/B-1Mecanismo de falla probetas con confinamiento central	26
Figura 4.2. Tipo de falla local, probetas con confinamiento central, A-Pandeos global B-Pandeos locales	27
Figura 4.3. Tipo de falla probetas sin confinamiento central, doble empotramiento en estribos de zona externa	28
Figura 4.4. Mecanismo de falla probeta 1	28
Figura 4.5. Mecanismo de falla probeta 7	29
Figura 4.6. Mecanismo de falla probeta 18	29
Figura 4.7. Mecanismo de falla probeta 10	29
Figura 4.8. Largo de zona de daño	31
Figura 4.9. Abertura de estribos en probeta P20 con terminación de estribos en 90°	31

Figura 4.10. Largo de falla normalizado por espaciamiento de estribos para probetas con confinamiento central	32
Figura 4.11. Evolución mecanismo de falla P19, A) estribo integro, B) fractura de estribo, C) semi pandeo global de barras.....	33
Figura 4.12. Caracterización curva tensión deformación axial zona de central.....	34
Figura 4.13. Compatibilidad de deformaciones entre zona externa y central.....	35
Figura 4.14. Descripción general probetas sin pre-tracción	37
Figura 4.15. Carga máxima y Tensión máxima probetas sin pre-tracción.....	39
Figura 4.16. Deformación axial en carga máxima	40
Figura 4.17. Rigidez en zona de deformaciones elásticas	42
Figura 4.18. Análisis seccional, probetas con excentricidad en la aplicación de la carga axial.....	43
Figura 4.19. Modelo Opensees efectuado por Herrera (2013) para probetas con excentricidad. izquierda : datos experimentales / derecha : modelo en Opensees	44
Figura 4.20. Curvas Carga deformación axial sensores LVDTs en zona central probeta P20.....	45
Figura 4.21. Curvas carga deformación axial sensores LVDTs en zona central probeta P17	45
Figura 4.22. Curvas Carga deformación axial sensores LVDTs en zona central probeta P23.....	46
Figura 4.23. Curvas carga deformación axial sensores LVDTs en zona central probeta P13.....	46
Figura 4.24. Curvas carga deformación axial sensores LVDTs en zona central probeta P19.....	47
Figura 4.25. Probetas con distinto ancho, sin confinamiento en zona central	48
Figura 4.26. Probetas con distinto ancho, con confinamiento en zona central.....	49
Figura 4.27. Probetas con distinto nivel de confinamiento	49
Figura 4.28. Probetas con distinta calidad de armadura de confinamiento	50
Figura 4.29. probetas con distinto detallamiento de armadura transversal	51
Figura 4.30. probetas con distinta esbeltez.....	52
Figura 4.31. Velocidad de degradación a una deformación axial de $\text{ecc}+0.006$ probetas sin pre-tracción.....	53
Figura 4.32. Velocidad de degradación a una deformación axial de $\text{ecc}+0.006$ probetas con pre-tracción.....	54
Figura 4.33. Degradación a una deformación axial de $\text{ecc}+0.006$	55
Figura 4.34. Pérdida de carga a una deformación axial al $\text{ecc}+0.006$	57

Figura 4.35. Probetas con problemas en registros de deformación transversal.....	58
Figura 4.36. Probetas sin problemas en registros de deformación transversal	59
Figura 4.37. Velocidad de expansión transversal con respecto a deformación axial	60
Figura 4.38. Efecto de confinamiento de armadura transversal dispuesta a lo largo de una columna, figura Paultre et al (2008).....	62
Figura 4.39. Modelo analítico expansión del hormigón Pantazopoulou	64
Figura 4.40. Modelo analítico expansión del hormigón Pantazopoulou, ecc experimental	65
Figura 4.41. Comportamiento modelo de expansión transversal de Pantazopoulou.....	66
Figura 4.42. Comparación de estimación de ecc en base a diferentes modelos y tensiones de estribos en máximo de capacidad de carga.....	67
Figura 4.43. Funcionamiento sensor SDP.....	68
Figura 4.44. Inestabilidad global , variable confinamiento	69
Figura 4.45. Variable relación esbeltez en relación inestabilidad global	69
Figura 4.46. Variable confinamiento en relación a inestabilidad.....	70
Figura 4.47. Variable, tipo de detallamiento en relación a inestabilidad.....	70
Figura 4.48. Comportamiento de estribos falla localizada en zona central con confinamiento central,P5	72
Figura 4.49. Comportamiento de estribos falla localizada en zona central con confinamiento central,P2,P3.....	72
Figura 4.50. Comportamiento estribos falla localizada en zona central-externa, sin confinamiento,P1.....	73
Figura 4.51. Comportamiento estribos falla zona central-externa con confinamiento,P4	73
Figura 4.52. Inicio de falla en zona superior probetas con confinamiento,P6,P18,P21,P22,P24	74
Figura 4.53. Inicio de falla en zona inferior probetas con confinamiento P13,P17,P19..	74
Figura 4.54. Deformación de estribos externos en máximo de carga	75
Figura 4.55. Deformación de estribos centrales en máximo de carga.....	75
Figura 4.56. Contraste modelo Cusson & Paultre y datos experimentales para tensión de estribos en máximo de carga.	77
Figura 4.57. Comparación de tensiones de estribos con resultados de Cusson & Paultre	78
Figura 4.58. Modelo Massone López deformación estribos probeta 5	79
Figura 4.59. Modelo Massone López deformación estribos probeta 21	79
Figura 4.60. Modelo Massone López deformación estribos probeta 19	80

Figura 4.61. Comportamiento armadura longitudinal, concentración de falla en zona central-externa.	81
Figura 4.62. Comportamiento armadura longitudinal, concentración de falla en zona central	81
Figura 4.63. Armadura longitudinal, propagación de falla desde zona externa-inferior a zona central.....	82
Figura 4.64. Deformación en máximo de carga armadura longitudinal	83
Figura 4.65. Descripción general probetas con pre-tracción	84
Figura 4.66. a) Comienzo ensayo a tracción, b) Término de ensayo a tracción, se observan grietas.....	84
Figura 4.67. Descripción general ensayo a compresión probetas con pre-tracción	85
Figura 4.68. Probeta P7, 1% de pre-tracción y probeta P8, 2% pre-tracción.....	86
Figura 4.69. Probetas con distinta altura, L=1.6m y L=1m	86
Figura 4.70. Probetas L=1m s@150mm, s@100mm, sin confinamiento	86
Figura 4.71. valores característicos en máximo de carga, probetas con pre-tracción....	88
Figura 4.72. Evolución de la expansión perimetral, probetas con pre-tracción.	89
Figura 4.73. Evolución de la expansión perimetral, probetas con 0%,1% y 2% de pre-tracción, sin confinamiento.....	90
Figura 4.74. Evolución de la expansión perimetral, probetas con distinto confinamiento y 2% de pre-tracción.	91
Figura 4.75. Evolución de la expansión perimetral, probetas con distinto confinamiento, 2% de pre-tracción probetas esbeltas,.....	91
Figura 4.76. Evolución de la expansión perimetral, probetas con distinta esbeltez, 2% de pre-tracción probetas esbeltas.	92
Figura 4.77. Velocidad de expansión transversal en toma de carga , probetas con pre-tracción.....	92
Figura 4.78. Inestabilidad probetas P7, P8, P9, probetas con pre-tracción, sin confinamiento	93
Figura 4.79. Inestabilidad probetas P10, P11, 16, probetas con pre-tracción, con confinamiento	93
Figura 4.80. Comportamiento estribos probetas con pre-tracción y con confinamiento.	94
Figura 4.81. Modelo propuesto para determinar la pérdida de resistencia del hormigón perimetral por nivel de pre-tracción Herrera (2013).....	95
Figura 4.82. Modelo para probetas con diferencia de confinamiento Herrera (2013).....	96
Figura 4.83. Caracterización de curva tensión-deformación por medio de rectas , probetas con pre-tracción.....	97

Figura 4.84. Comportamiento LVDTs individuales durante ensayo de compresión probeta P11.....	97
Figura 4.85. Comportamiento LVDTs individuales durante ensayo de compresión probeta P9.....	98
Figura 4.86. Comportamiento LVDTs individuales durante ensayo de compresión probeta P7.....	98
Figura 4.87. Comportamiento LVDTs individuales durante ensayo de compresión probeta P8.....	98
Figura 4.88. Comportamiento LVDTs individuales durante ensayo de compresión probeta P10.....	99
Figura 4.89. Comportamiento LVDTs individuales durante ensayo de compresión probeta P16.....	99
Figura 4.90. Anexo A Mecanismo de falla probeta 1.....	103
Figura 4.91. Anexo A Mecanismo de falla probeta 2.....	103
Figura 4.92. Anexo A Mecanismo de falla probeta 3.....	103
Figura 4.93. Anexo A Mecanismo de falla probeta 4.....	104
Figura 4.94. Anexo A Mecanismo de falla probeta 5.....	104
Figura 4.95. Anexo A Mecanismo de falla probeta 6.....	104
Figura 4.96. Anexo A Mecanismo de falla probeta 7.....	105
Figura 4.97. Anexo A Mecanismo de falla probeta 8.....	105
Figura 4.98. Anexo A Mecanismo de falla probeta 9.....	105
Figura 4.99. Anexo A Mecanismo de falla probeta 10.....	106
Figura 4.100. Anexo A Mecanismo de falla probeta 11.....	106
Figura 4.101. Anexo A Mecanismo de falla probeta 12.....	106
Figura 4.102. Anexo A Mecanismo de falla probeta 13.....	107
Figura 4.103. Anexo A Mecanismo de falla probeta 16.....	107
Figura 4.104. Anexo A Mecanismo de falla probeta 17.....	107
Figura 4.105. Anexo A Mecanismo de falla probeta 18.....	108
Figura 4.106. Anexo A Mecanismo de falla probeta 19.....	108
Figura 4.107. Anexo A Mecanismo de falla probeta 20.....	108
Figura 4.108. Anexo A Mecanismo de falla probeta 21.....	109
Figura 4.109. Anexo A Mecanismo de falla probeta 22.....	109
Figura 4.110. Anexo A Mecanismo de falla probeta 23.....	109
Figura 4.111. Anexo A Mecanismo de falla probeta 24.....	110
Figura 4.112. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 1.....	110

Figura 4.113. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 2.....	111
Figura 4.114. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 3.....	111
Figura 4.115. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 4.....	112
Figura 4.116. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 5.....	112
Figura 4.117. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 6.....	113
Figura 4.118. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 12.....	113
Figura 4.119. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 18.....	114
Figura 4.120. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 21.....	114
Figura 4.121. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 22.....	115
Figura 4.122. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 24.....	115
Figura 4.123. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P1	116
Figura 4.124. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P2	116
Figura 4.125. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P5	117
Figura 4.126. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P17	117
Figura 4.127. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P19	117
Figura 4.128. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P20	118
Figura 4.129. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P23	118
Figura 4.130. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P23	118
Figura 4.131. Anexo D Comportamiento transversal P1	119
Figura 4.132. Anexo D Comportamiento transversal P2	119
Figura 4.133. Anexo D Comportamiento transversal P3	120
Figura 4.134. Anexo D Comportamiento transversal P4	120
Figura 4.135. Anexo D Comportamiento transversal P5	121
Figura 4.136. Anexo D Comportamiento transversal P6	121
Figura 4.137. Anexo D Comportamiento transversal P13	122
Figura 4.138. Anexo D Comportamiento transversal P17	122
Figura 4.139. Anexo D Comportamiento transversal P18	123
Figura 4.140. Anexo D Comportamiento transversal P19	123
Figura 4.141. Anexo D Comportamiento transversal P20	124
Figura 4.142. Anexo D Comportamiento transversal P21	124
Figura 4.143. Anexo D Comportamiento transversal P22	125
Figura 4.144. Anexo D Comportamiento transversal P23	125
Figura 4.145. Anexo D Comportamiento transversal P24	126
Figura 4.146. Anexo E Comportamiento estribos P3	126

Figura 4.147. Anexo E Comportamiento estribos P6 y Modelo Massone-López	127
Figura 4.148. Anexo E Comportamiento estribos P18 y Modelo Massone-López	127
Figura 4.149. Anexo E Comportamiento estribos P19 y Modelo Massone-López	127
Figura 4.150. Anexo E Comportamiento estribos P21 y Modelo Massone-López	128
Figura 4.151. Anexo E Comportamiento estribos P24 y Modelo Massone-López	128
Figura 4.152. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 1	129
Figura 4.153. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 2	129
Figura 4.154. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 3	129
Figura 4.155. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 5	130
Figura 4.156. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 6	130
Figura 4.157. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 13	130
Figura 4.158. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 17	131
Figura 4.159. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 18	131
Figura 4.160. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 20	131
Figura 4.161. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 21	132
Figura 4.162. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 22	132
Figura 4.163. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 23	132
Figura 4.164. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 24	133
Figura 4.165. Anexo G Especificaciones Técnicas Prensa Hidráulica.	133
Figura 4.166. Anexo G Especificaciones Técnicas Pernos Lentok Lock.	134
Figura 4.167. Anexo G Especificaciones Técnicas Bomba Hidráulica, para pre-tracción de barras.	134
Figura 4.168. Anexo G Especificaciones Técnicas Gatos Hidráulicos, para pre-tracción de barras.	134

CAPÍTULO 1 :INTRODUCCIÓN

1.1.INTRODUCCIÓN

Históricamente Chile ha demostrado ser una de las zonas más sísmicas en el mundo, debido a que geográficamente se encuentra en el límite de 2 placas intercontinentales: la placa de Nazca y la placa Sudamericana, que constantemente están en proceso de subducción una de la otra.

Desde que se tienen registros, Chile ha sufrido numerosos terremotos, siendo uno de los más recientes: el 27 de febrero de 2010¹, que afectó una vasta zona del territorio chileno, evidenciando fallas estructurales en estructuras industriales al igual que en estructuras habitacionales. En estas últimas, se observó una falla común en los edificios habitacionales relativamente nuevos de gran altura (20-24 pisos), afectando muros esbeltos de hormigón armado estructurados en forma de T.

Dicha falla ocurrió en el alma de estos muros, concentrándose principalmente en el borde libre de los mismos, produciendo en esta zona una falla que presentó características como: descascaramiento del hormigón perimetral, abertura de armadura transversal o fractura de ésta, pandeo de barras longitudinales y aplastamiento del núcleo confinado de hormigón armado, caracterizándose también una propagación de una grieta horizontal a través del alma de los muros.

Esta falla mirada desde el punto de vista del diseño estructural, es una falla frágil, puesto que compromete la integridad estructural completa del edificio, la cual se concentra en las zonas bajas de estas edificaciones (planta de subterráneos o planta de primer nivel), produciendo una probabilidad de colapso o de pérdida de capacidad de carga y de deformación ante las solicitaciones sísmicas.

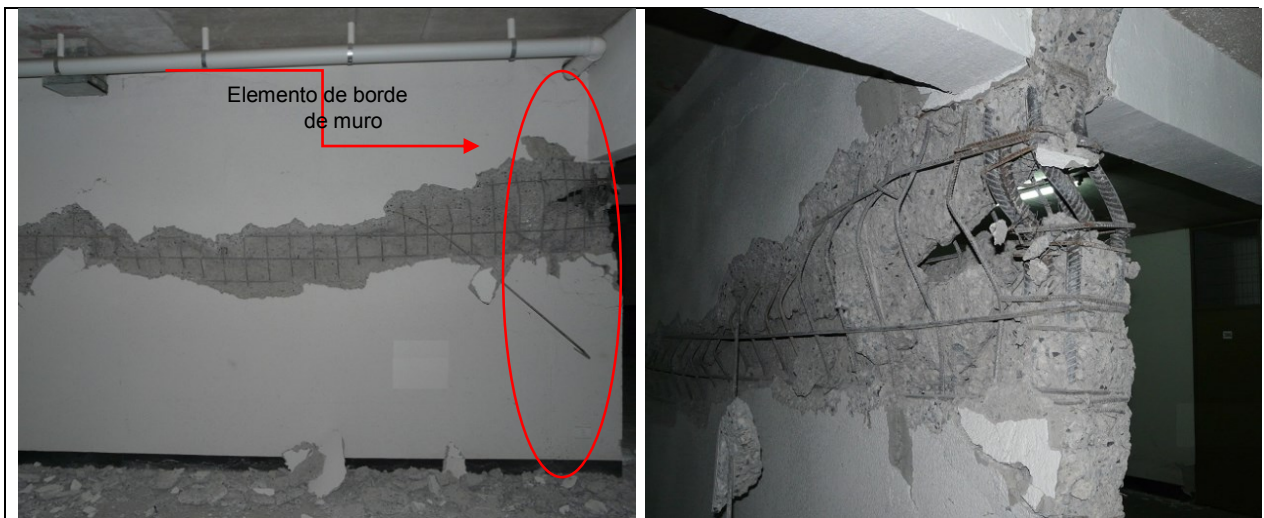


Figura 1.1. Daños producidos en el borde de muros esbeltos, de edificio Nuñoa, imágenes Cáceres (2012)

¹ A lo largo de esta investigación se abreviará como 27F.

La falla antes citada se puede explicar desde una mirada del análisis estructural por 2 componentes: la alta demanda de carga axial en el borde libre del muro (generada por la altura del edificio) y el momento volcante generado indirectamente por las deformaciones a nivel de techo asociadas al movimiento del sismo.

Estos 2 componentes producen una rótula plástica en el borde del muro luego de sobrepasar el rango elástico de deformaciones, tal como se observa en el modelo plasticidad concentrada en muros esbeltos

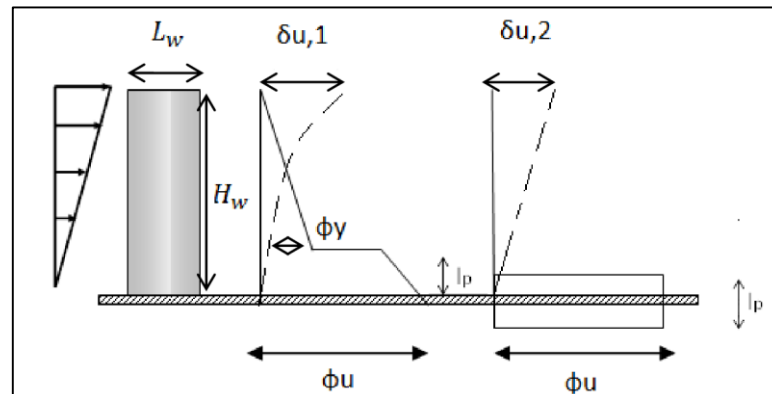


Figura 1.2. Modelo plasticidad concentrada en muros esbeltos, imagen Alfaro (2013).

De acuerdo a los antecedentes presentados, este trabajo de tesis tiene por objetivo, estudiar experimentalmente el borde libre de muros de hormigón armado en base a ensayos de compresión axial pura².

Se contará con un set de 24 columnas rectangulares³ de hormigón armado, las cuales tendrán distintas configuraciones geométricas, de confinamiento en la zona de estudio (zona central), y de pre-tracción de la armadura longitudinal, esto último para poder simular la respuesta del elemento de borde ante una carga cíclica tracción-compresión sísmica.

Con ello, se analizará la respuesta y sensibilidad ante estas variables tanto de la respuesta global (capacidad de carga, ductilidad, inestabilidad global, expansión perimetral, tipo y forma de daño entre otras cosas) como de los elementos internos de estas probetas, es decir, de los estribos y armadura longitudinal.

Esta investigación, corresponde a la continuación del trabajo de tesis efectuado por Polanco (2012), quien estudió la respuesta de 10 probetas bajo un marco experimental y analítico. A partir de ello, se complementará este trabajo con los 14 ensayos restantes y se agregarán nuevos análisis en base a sensores no utilizados en la tesis de Polanco (2012), todo bajo un marco de análisis experimental

² Solo existe 1 probeta con excentricidad de diseño en la aplicación de la carga axial.

³ En adelante se nombra a las columnas de hormigón armado como probetas.

1.2.MOTIVACIÓN

Dentro de las principales razones que motivan este trabajo de tesis se pueden mencionar:

- La proyección estadística muestra que la construcción de edificios habitacionales ha sufrido una expansión durante las últimas 3 décadas, observando un aumento significativo en el número de pisos y una estructuración constante en cuanto al espesor de muros (aproximadamente 20cm), lo cual trae como consecuencia que estos tengan una mayor demanda de carga axial, factor influyente a la hora de producirse muchos de los daños en los bordes de muros vistos en el último terremoto. Por esta razón, es una necesidad estudiar los elementos de borde de muros dado que se proyecta un aumento de altura de estos edificios a futuro.
- Los daños producidos por el terremoto del 27F, donde se observaron graves daños en el borde de muros de hormigón armado en edificios habitacionales, ubicados en las plantas bajas, los cuales presentaron: pandeo de armadura longitudinal, colapso del núcleo de hormigón, fractura de estribos, entre otras cosas. Todo esto hace que sea relevante estudiar la sensibilidad de los distintos elementos (geométricos y detallamiento) de borde de muros T.
- Chile es y será un país donde se produzcan terremotos de grandes magnitudes que exigirán un buen desempeño de las construcciones habitacionales, por ello, es indispensable asegurar conductas dúctiles de los edificios y no frágiles como se vieron en algunas edificaciones en el último terremoto del 27F.
- Avanzar en el estudio de elementos de hormigón confinado, bajo el marco de diseño por desplazamiento, el cual ha desplazado al método de diseño por resistencia para así mejorar la respuesta de las estructuras de hormigón armado bajo desplazamientos sísmicos.

1.3.OBJETIVOS

1.3.1.OBJETIVO GENERAL

1. Ensayar un set de 24 probetas de hormigón armado sometidos a distintas configuraciones (geométricas, de detallamiento y pre-tracción de la armadura longitudinal) estudiando su respuesta experimental ante una carga de compresión axial.

1.3.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2. Comparar la respuesta de las diferentes probetas ante distintos parámetros como: relación de aspecto (largo/ancho), esbeltez, distintas configuraciones de la armadura de confinamiento (espaciamiento de estribos, calidad de acero de estribos, distinto detallamiento de armadura transversal), distinta cuantía de armadura longitudinal y nivel de pre-tracción de armadura longitudinal, para de esta forma poder analizar las distintas sensibilidades en la respuesta global carga-deformación axial.
3. Analizar la respuesta de sensores locales ubicados en la armadura transversal y longitudinal para así analizar fenómenos como inicio de inestabilidad y pérdida de recubrimiento.
4. Corroborar supuestos utilizados en modelos analíticos (carga-deformación axial) del comportamiento de hormigón confinado y comparar modelos analíticos de comportamiento de hormigón transversal y de estribos.
5. Evaluar disposiciones del decreto supremo DS60 (2011) posterior al 27F las cuales establecen limitaciones para la deformación máxima de las fibras más comprimidas, así como disposiciones de detallamiento de la armadura transversal (terminación de ganchos de estribos en 135°).

1.4.METODOLOGÍA

La metodología que sigue este trabajo de tesis para alcanzar los objetivos antes citados es la siguiente:

- i. **Recopilación de material bibliográfico:** Recopilar en base a investigaciones publicadas, metodologías o formas de dar a conocer los resultados obtenidos de los datos experimentales, así como ideas principales de los resultados alcanzados en estas investigaciones.
- ii. **Recopilación de antecedentes de probetas ensayadas anteriormente:** Obtener los datos experimentales de las 10 probetas anteriores y el comportamiento de los materiales (acero y hormigón), ambos grupos de ensayos efectuados en la tesis de Polanco (2012).
- iii. **Diseño de matriz de ensayos:** Analizar experimentalmente bajo el marco de diseño de la matriz de ensayos efectuada por Polanco (2012) la sensibilidad de las distintas variables asociadas al confinamiento y pre-tracción de las probetas.
- iv. **Ensayos de probetas de hormigón armado:** Ensayar las 14 probetas restantes de la matriz original de ensayos y obtener los resultados asociados a dichos ensayos. Dentro de estos 14 ensayos, en 6 probetas su armadura longitudinal es previamente traccionada en las instalaciones de IDIEM, y posteriormente todas las probetas (14 restantes) se prueban en un ensayo de compresión axial pura en las instalaciones de IDIEM. Los ensayos están enmarcados en el proyecto Innova CORFO del Instituto Chileno del Cemento y Hormigón ICH, "10CREC-8580- Metodología de Diseño Sísmico de Muros de Edificios"
- v. **Procesamiento de los registros de ensayos:** Procesar (ordenar, manipular, etc.) la información obtenida de los sensores (strain gauges y LVDTs) que fueron los utilizados en la instrumentación de las probetas; filtrar los datos para una correcta interpretación de los resultados y buscar la mejor forma de relacionarlos para obtener conclusiones de éstos.
- vi. **Obtención de resultados:** Analizar con herramientas computacionales (gráficos, tablas, información digital etc.) los datos disponibles, y caracterizar el comportamiento global (curvas carga deformación axial, modos de falla etc.), como los sensores locales (estribos y barras longitudinales) de las probetas de HA.

1.5. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS

Para una correcta organización y comprensión de esta investigación, ésta se divide en 5 capítulos:

- I. **Capítulo 1: Introducción** : En este capítulo se presenta una introducción de los alcances del trabajo de tesis, la motivación que la indujo, los objetivos esperados y la metodología utilizada para poder analizar y concluir los objetivos planteados.
- II. **Capítulo 2: Comportamiento de los materiales**: En este capítulo se describen los ensayos efectuados a los materiales que conforman la probeta de hormigón armado, es decir, ensayos de compresión a cilindros de hormigón no confinado y ensayos de tracción para barras de acero de 2 calidades A63-42H y A44-28H, ambos grupos de ensayos con la finalidad de obtener los parámetros representativos de estos materiales.
- III. **Capítulo 3: Ensayos de probetas de hormigón armado**: Este capítulo engloba el montaje, la instrumentación de los sensores y la metodología de los ensayos a las probetas de hormigón confinado, además de una descripción y comentarios acerca de la matriz de ensayos efectuada.
- IV. **Capítulo 4: Presentación y análisis de resultados**: En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos a las probetas de hormigón confinado, se analizan y comparan tanto los comportamientos globales y los comportamientos locales (análisis de sensores internos), todo esto basado en los registros de los sensores y registros audiovisuales (fotografías y videos de los ensayos).
- V. **Capítulo 5: Conclusiones y comentarios**: En base al capítulo 4 se presentan las principales conclusiones y comentarios acerca de las comparaciones de las diferentes probetas de hormigón armado.

CAPÍTULO 2 :COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES

En base a los resultados obtenidos en el trabajo de tesis Polanco (2012), se describe un resumen de los aspectos más relevantes acerca de los ensayos de compresión axial a cilindros de hormigón no confinado y ensayos de tracción de barras de acero, todo esto con el propósito de obtener sus parámetros fundamentales.

2.1.COMPORTAMIENTO DE HORMIGÓN NO CONFINADO

Para lograr determinar la resistencia máxima de las probetas de hormigón no confinado, se ensayaron probetas cilíndricas de altura 30cm y diámetro 15cm. Los ensayos de compresión axial concéntrica fueron realizados sobre una máquina universal INSTRON 60Lx de 60 ton de capacidad.

Tabla 2.1.Resultados ensayos a compresión, cilindros de hormigón no confinado

Probeta	Medidas [mm/mm]	Peso [Kg]	Resistencia a la compresión [kN]	f'c [MPa]
1	150/300	12.49	660.6	37.4
2	150/300	12.33	748	42.3
3	150/300	12.33	588.1	33.3
4	150/300	13.1	715.5	40.5
5* ⁴	150/300	12.99	1314.8	74.4
6*	150/300	13.96	1280.3	72.4
7*	150/300	13.05	1347.3	76.2
8*	150/300	12.95	290.5	16.4
9*	150/300	12.99	1380.8	78.1
10	150/300	12.5	746.4	42.2
11	150/300	12.33	537.3	30.4
12*	150/300	--	1190.8	67.4
13	150/300	--	774.5	43.8
14*	150/300	--	1271.9	72.0
15	150/300	--	802.9	45.4
16	150/300	--	638.3	36.1

Se observa que las probetas registran valores disímiles entre ellas (posiblemente por algún error de las mediciones, por el tipo de hormigón usado, la metodología de construcción de las probetas, tipo de árido etc.).

Se opta por definir un rango de resistencias a compresión para poder caracterizar la resistencia promedio del hormigón sin confinar, utilizado posteriormente en la construcción de los elementos de borde de muro, este límite comprende aquellas resistencias mayores a 20MPa y menores a 60MPa. Definido este rango, el promedio de resistencias a compresión para el hormigón utilizado es de $f'_c=39.1$ MPa.

⁴ * Estos cilindros están fuera del intervalo 20MPa y 60MPa, definido para calcular f'_c

2.2.COMPORTAMIENTO DE ACERO

Para poder caracterizar los parámetros de las curvas tensión-deformación del acero utilizado en el refuerzo de los elementos de borde de muro, se ensayaron en el trabajo de tesis de Polanco (2012), una serie de barras de acero a tracción, con distintos diámetros de barras ($\phi=8\text{mm}$, $\phi=12\text{mm}$, $\phi=18\text{mm}$, $\phi=22\text{mm}$) y diferentes calidades de acero (A63-42H, A44-28H), los ensayos se realizaron en una maquina universal de compresión INSTRON 60Lx de capacidad de 60ton.



Figura 2.1.Máquina de ensayo a tracción de barras de acero.

Los resultados obtenidos luego de ensayar las barras longitudinales son:

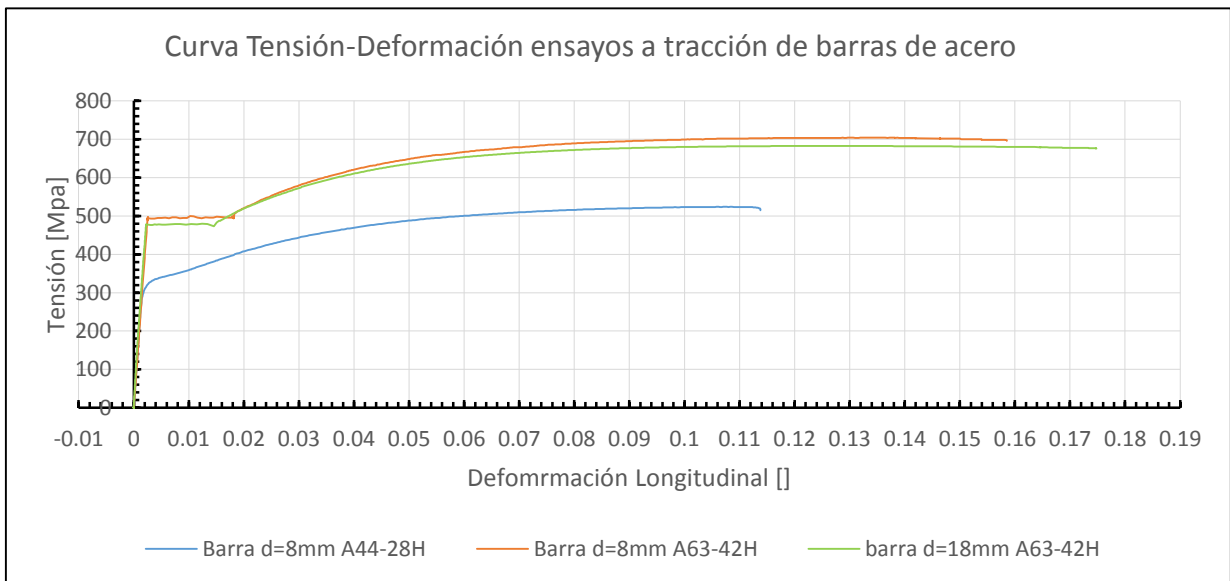


Figura 2.2.Ensayo de barras de acero

En el diseño y construcción de las probetas de hormigón armado confinado de la matriz de ensayos, se utilizaron para los estribos 2 calidades de acero con un diámetro de 8mm; en tanto, para la armadura longitudinal de refuerzo se utilizó un diámetro de 18mm con calidad de acero A63-42H. Un resumen de los parámetros más importantes obtenidos de estos ensayos son los observados en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros Experimentales Acero

	Tensión fluencia [MPa]	Deformación en fluencia []
D=8mm A44-28H	330	0,00165
D=8mm A63-42H	495	0,00247
D=18mm A63-42H	477	0,00238

Cabe destacar que como se realiza sólo un análisis experimental en este trabajo de tesis, sólo los parámetros relevantes de los ensayos son los expuestos, sin olvidar que se pueden extraer otros parámetros del acero para un análisis analítico.

CAPÍTULO 3 : ENSAYO DE PROBETAS

Es necesario explicar que, para caracterizar la respuesta de los elementos de borde de muros de hormigón armado ante solicitaciones sísmicas, es que se diseñan y ensayan probetas a escala rectangulares de hormigón armado, las cuales presentan distintas configuraciones geométricas, de detallamiento, y espaciamiento de la armadura transversal, además de condiciones iniciales (pre-tracción de armadura longitudinal).

Para focalizar el estudio, las probetas son divididas en 3 zonas: 2 externas y una central de estudio. Las zonas externas presentan configuraciones constantes de confinamiento y detallamiento de la armadura transversal, mientras que la zona central es la que presenta las distintas configuraciones antes citadas.

Consiguientemente, se espera que en la zona central ocurra el daño, pues es la zona más propensa a dañarse debido a que su configuración es menos restrictiva que las zonas externas.

A continuación se presenta la matriz de ensayos, de acuerdo a ello, es necesario destacar que 10 de estos ensayos fueron efectuados durante el trabajo de Polanco (2012), sin embargo este trabajo de tesis se abarca el total de los ensayos para efectuar una correcta comparación y análisis de los resultados.

Tabla 3.1. Matriz de ensayos

Probeta	Nomenclatura	Altura [m]	pre-tracción [%]	Espaciamiento estribos [mm]	calidad armadura estribos	detallamiento estribos	ancho [mm]	cuantía longitudinal
1	TH100T0C0W130	1	0	0	A63-42H	-	130	0,039
2	TH100T0C0W180	1	0	0	A63-42H	-	180	0,028
3	TH100T0C0W250	1	0	0	A63-42H	-	250	0,020
4	TH100T0CA100W130	1	0	100	A63-42H	A	130	0,039
5	TH100T0CA100W180	1	0	100	A63-42H	A	180	0,028
6	TH100T0CA100W250	1	0	100	A63-42H	A	250	0,020
7	TH100T1C0W180	1	1	0	A63-42H	-	180	0,028
8	TH100T2C0W180	1	2	0	A63-42H	-	180	0,028
9	TH160T2C0W180	1,6	2	0	A63-42H	-	180	0,028
10	TH100T2CA100W180	1	2	100	A63-42H	A	180	0,028
11	TH160T2CA100W180	1,6	2	100	A63-42H	A	180	0,028
12	TH160T0CA100W180	1,6	0	100	A63-42H	A	180	0,028
13	TH100T0CA150W180	1	0	150	A63-42H	A	180	0,028
14	TH100T0CM150W180	1	0	150	A44-28H	M	180	0,028
15	TH100T0CM100W180	1	0	100	A44-28H	M	180	0,028
16	TH100T2CA150W180	1	2	150	A63-42H	A	180	0,028
17	TH100T0CM150W180	1	0	150	A63-42H	M	180	0,028
18	TH100T0CM100W180	1	0	100	A44-28H	M	180	0,028
19 ⁵	TH100T0CM100W180	1	0	100	A44-28H	M	180	0,028
20	TH100T0CA2100W180	1	0	100	A63-42H	A2	180	0,028
21	TH100T0CD1100W180	1	0	100	A63-42H	D1	180	0,038
22	TH100T0CD2100W180	1	0	100	A63-42H	D2	180	0,038
23	TH100T0CE1100W180	1	0	100	A63-42H	E1	180	0,038
24	TH100T0CE2100W180	1	0	100	A63-42H	E2	180	0,038

Cabe destacar que las probetas P14 y P15 fueron descartadas de los posteriores análisis, pues su falla se concentró en la zona externa, siendo reemplazadas por las probetas P17 y P18.

La nomenclatura que se considera en la matriz de ensayos indica a TH como la altura de las probetas en cm.; T indica el % de pre-tracción en relación a su largo original, luego se indica el tipo de detallamiento de armadura transversal utilizado, A, M, A2, D1, D2, E1, (Figura 2.1), y posteriormente, se indica el espaciamento de los estribos en mm. Y W representa el ancho de la sección en mm.

⁵ La probeta P19, tiene una excentricidad de diseño del 10% sobre su lado largo igual a 3cm.

A continuación se describen las variables que conforman las distintas configuraciones para la matriz de ensayos y sus posibles implicancias en los resultados esperados.

- **Altura:** En la matriz de ensayos se consideran 2 alturas, de 1.6m y 1m, esto para estudiar la inestabilidad global de las probetas en relación a la esbeltez.
- **Relación de aspecto:** En la matriz de ensayos se consideran 3 tipos de secciones 300mmx130mm, 300mmx180mm y 300mmx250mm, esto para estudiar los efectos del confinamiento para distintos tipos de secciones.

Se observa que la relación más común en la matriz de ensayos es de 300mmx180mm pues las secciones típicas de muros poseen aproximadamente un espesor de 200mm.

- **Nivel de confinamiento:** Se consideran espaciamientos de estribos de 150mm, 100mm y sin confinamiento en la zona central, con el fin de observar la sensibilidad de este parámetro en cuanto a capacidad de carga y degradación de las probetas.
- **Pre-tracción:** Se consideran 2 niveles de pre-tracción 1% y 2% (deformación de la armadura longitudinal), con el propósito de aproximar el efecto de ciclo tracción-compresión provocado ante un sismo.
- **Calidad armadura estribos:** Se consideran 2 tipos de calidades de acero para la armadura transversal, el fin es observar la sensibilidad que tiene esta variable en cuanto a las capacidades de carga y de ductilidad pasado el máximo de carga.
- **Cuantía de armadura longitudinal:** En la matriz de ensayo se consideran 2 grupos de cantidades de barras longitudinales 6 y 8.

Indirectamente surgen 2 cuantías más relacionadas con el ancho de las probetas, como se ha mencionado anteriormente.

- **Detallamiento de armadura transversal en zona central:** Se considera en la matriz de ensayos 6 tipos de detallamientos, que se describen a continuación :

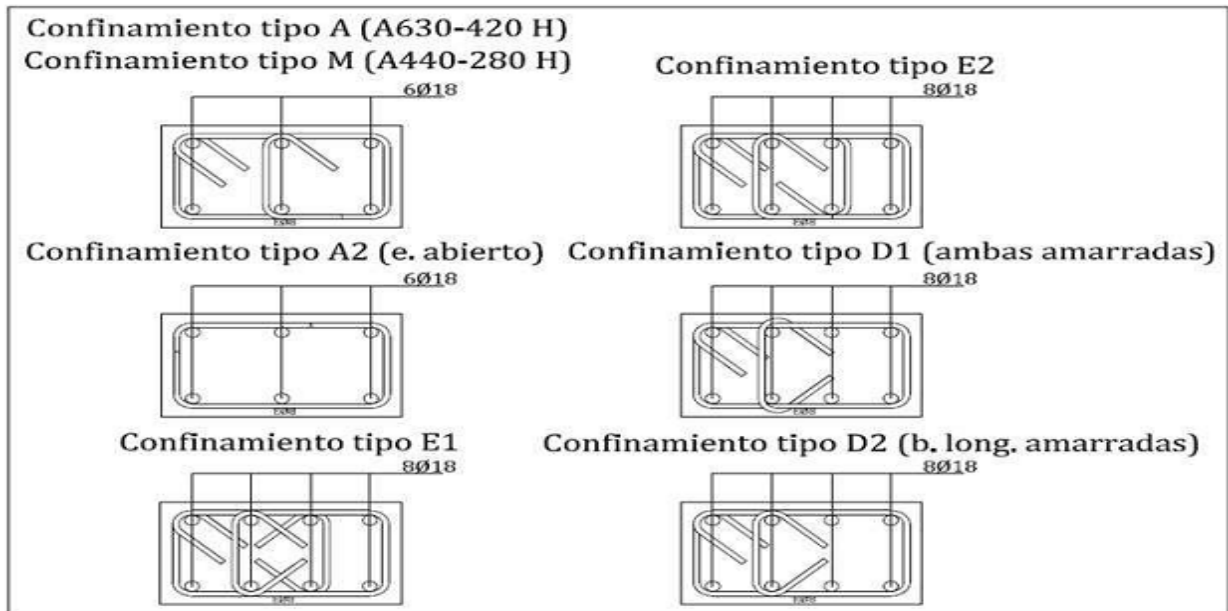


Figura 3.1. Detallamiento armadura transversal zona central

-El detallamiento típico en la matriz de ensayos es el tipo A para probetas con 6 barras longitudinales, el cual representa la configuración estándar según el código de diseño ACI-318 2008. Dicho detallamiento considera 1 estribo con terminación en 135°, el cual confina las 4 barras externas y una traba que amarra las barras centrales.

-El tipo de detallamiento A2 para probetas con 6 barras longitudinales, representa la antigua configuración, donde el estribo presenta terminación en 90°.

-El tipo de detallamiento E1 para probetas con 8 barras longitudinales, representa 1 estribo con terminación en 135° y 2 trabas con terminaciones en 135° las cuales restringen la posibilidad de pandeo de éstas.

-El tipo de detallamiento E2 para probetas con 8 barras longitudinales, representa 1 estribo con terminación en 135° que confina el primer y cuarto par de barras, y 2 trabas que confinan las barras interiores.

-El tipo de detallamiento D1 para probetas con 8 barras longitudinales, representa 1 estribo con terminaciones en 135° y una traba con terminaciones en 135° la cual amarra el estribo y las barras longitudinales.

-El tipo de detallamiento D2 para probetas con 8 barras longitudinales, representa 1 estribo con terminaciones de 135° y 1 traba con terminaciones en 135° que amarra sólo las barras longitudinales

El fin de tener distintas configuraciones para la armadura transversal, es estudiar la sensibilidad de éstos en la respuesta de las probetas desde que comienza la degradación del hormigón perimetral.

3.1. CARACTERIZACIÓN ZONAS EN PROBETAS

Las probetas fueron divididas en 3 zonas: 2 externas y una zona central de estudio, a continuación se caracterizan las zonas externas e internas.

I. ZONA EXTERNA

Con el propósito de que el daño se concentre en la zona central, es que la configuración de las zonas externas se encuentra más restringida en cuanto a espaciamiento de los estribos. El detallamiento que se utiliza en la zona externa es el presentado en la siguiente figura:

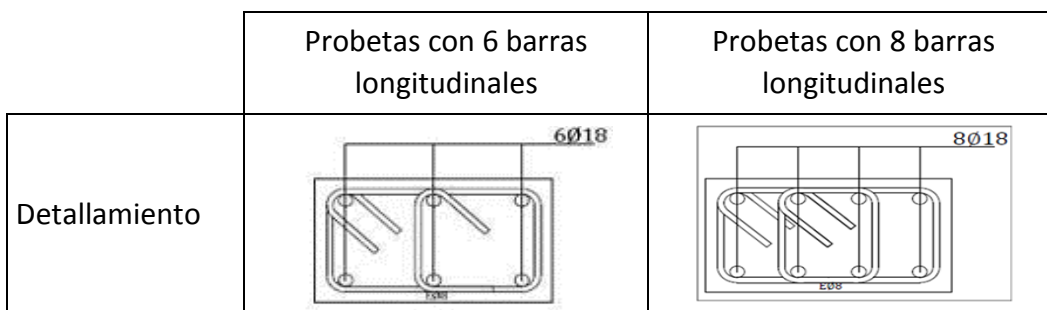


Figura 3.2. Detallamiento estribos zona externa

En cuanto al espaciamiento de la armadura transversal en la zona externa, éste fue de 75mm y los largos de las zonas externas se detallan en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2. Largo zona externa

	Largo zona externa [mm]	
	Probetas L=1m	Probetas L=1.6m
Espaciamiento zona central s=100	300	600
Espaciamiento zona central s=150	275	-----
Sin confinamiento zona central	300	600

II. Zona central

La caracterización en la zona central en cuanto al detallamiento de la armadura transversal y calidad de armadura, es la presentada en la Figura 3.1 la longitud de la zona central es la que se indica en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Largo zona central

	Espaciamiento Zona central [mm]
Espaciamiento zona central s=100	400
Espaciamiento zona central s=150	450
Sin confinamiento zona central	400

3.2. INSTRUMENTACIÓN DE PROBETAS

Para caracterizar los resultados y alcanzar los objetivos propuestos, las probetas fueron instrumentadas tanto externa como internamente con 3 tipos de sensores: LVDTs *transformador diferencial de variación lineal*, SDP y Strain Gauges *galga extensiométrica* (sensores internos).

- **LVDTs:** La finalidad de estos sensores es la obtención de las curvas carga-deformación, tanto longitudinalmente como transversalmente en la zona central de estudio.

Las probetas se instrumentaron con 4 LVDTs longitudinales en la zona central, 2 LVDTs transversales en la zona central y 4 LVDTs longitudinales externos, tal como se indica en figura 3.3.

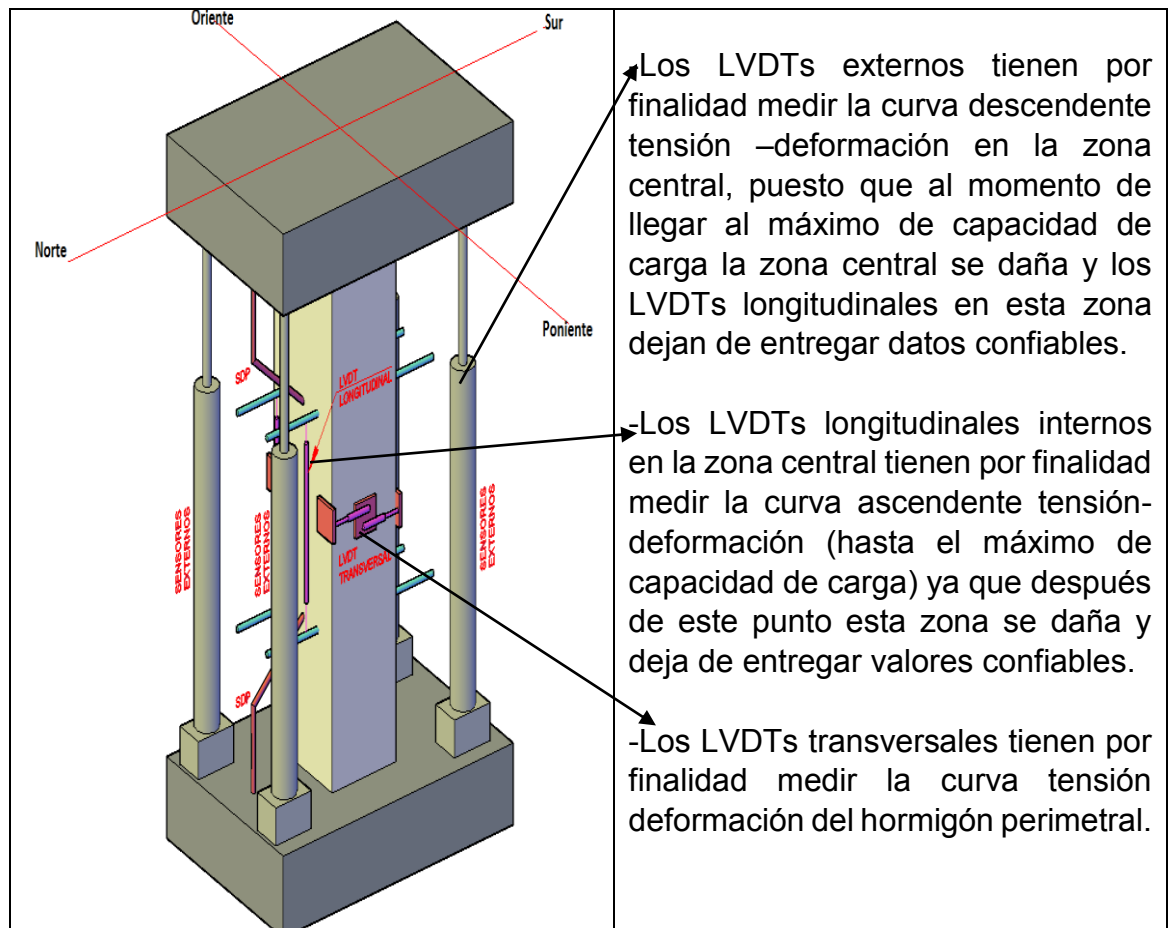


Figura 3.3. Caracterización instrumentación LVDTs

- **SDPs:** Corresponde a un tipo de sensor que tiene por finalidad medir la deformación angular de la probeta. Para lograr estudiar la inestabilidad global de ésta, se dispusieron 2 sensores por probeta; uno en la zona inferior y otro en la zona superior.



Figura 3.4. Sensores SDP

- **Strain Gauges:** la finalidad de estos sensores, es medir la respuesta local de las armaduras longitudinales y transversales.

Para ello, se dispuso de 3 sensores sobre los estribos: 1 sobre el lado largo del estribo en la zona exterior superior y 1 sobre el lado largo y otro sobre el lado corto de la zona central (cuando exista confinamiento).

Además se dispuso de 6 sensores sobre las barras longitudinales, ubicados en la zona exterior inferior, 2 de estos sensores en las barras centrales, 1 sobre la barra de la esquina izquierda (superior) y otro sobre la barra de la esquina derecha (inferior) vistos en planta. En la figura 3.5 se aprecia esquema de ubicación de los sensores Strain gauges.

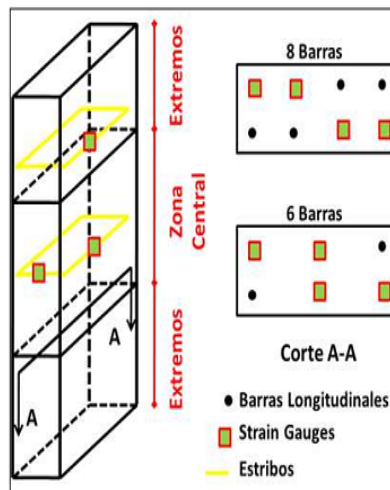


Figura 3.5. Esquema de ubicación Strain gauges, imagen Polanco (2012)

Cabe destacar que a la hora de construir las probetas, se dispusieron elementos auxiliares para poder materializar el posterior montaje de los sensores externos. De esta manera, se dispusieron 4 barras de aluminio para poder montar los LVDTs longitudinales de la zona central y 2 placas de aluminio para poder montar los LVDTs transversales, tal como se indica en la figura 3.6.

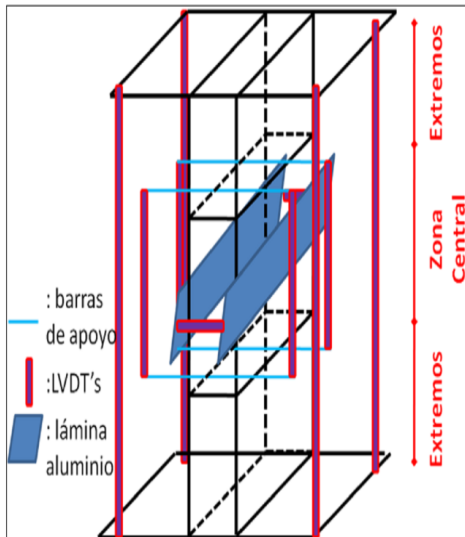


Figura 3.6. Elementos auxiliares para montaje de sensores LVDTs

3.3.PROCESO CONSTRUCTIVO DE PROBETAS

El proceso constructivo de la matriz de probetas se llevó a cabo en el trabajo de tesis de Polanco (2012), por lo cual se hará un resumen de los puntos más relevantes de éste.

- I. **DISEÑO DE PROBETAS:** El diseño de las probetas fue efectuado en la tesis de Polanco (2012), donde se estudiaron los distintos parámetros y configuración con el objeto de que capturarán la mejor combinatoria de variables a la hora de realizar comparaciones y análisis.
- II. **ARMADO DE PROBETAS:** El primer paso para el armado de las probetas fue instalar los sensores internos Strain gauges, esta labor fue realizada por IDIEM, mediante sus estándares aprobados en instrumentación. Para el correcto montaje de estos sensores, se debe dejar la zona donde se pondrán los sensores totalmente pulidos, luego de esta etapa se pegan estos sensores con un epóxico y se cubren con silicona para asegurar un correcto funcionamiento, y finalmente se cubren con un adhesivo metálico, la zona de colocación de estos sensores fue de 40mm.

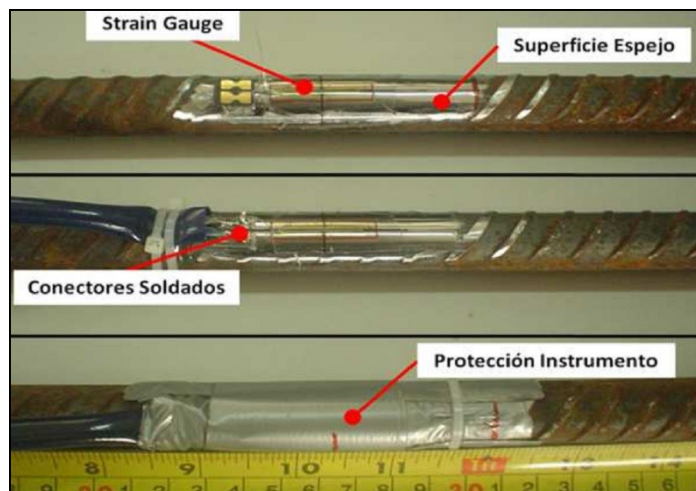


Figura 3.7. Montaje e instalación de sensores strain gauges, imagen Polanco (2012).

Una vez instalados los sensores, se procede a armar las probetas según planos de diseño, mediante un procedimiento estándar para todas ellas, además de instalar los elementos auxiliares (Figura 3.6).

Por último se procede a poner el moldaje de madera para cada una de las probetas, teniendo especial cuidado en aquellas probetas que se pre-traccionan, en las cuales se deben hacer orificios en cada cara de los moldajes, de tal manera que logre pasar las barras longitudinales (aproximadamente 85cm). En la figura 3.8 se muestra lo antes comentado hasta el paso previo al hormigonado.

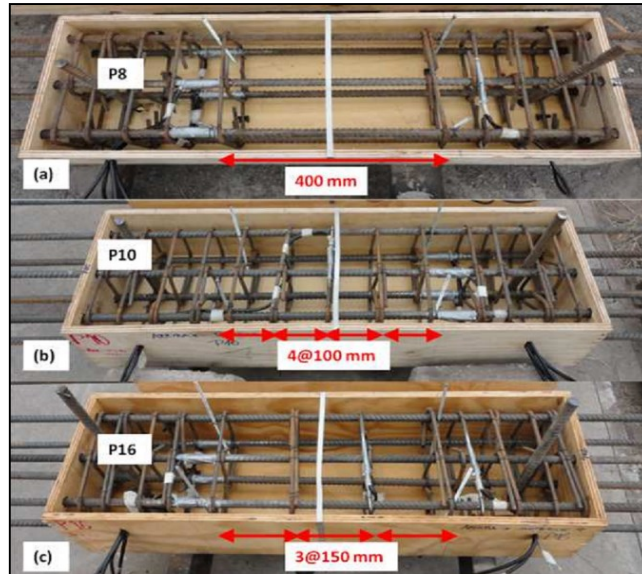


Figura 3.8. Armado de probetas a) sin confinamiento central, b) con confinamiento central a 100mm c) con confinamiento central a 150mm (imagen Polanco 2012)

- III. **HORMIGONADO DE PROBETAS:** Para el hormigonado de las probetas se dispuso de un hormigón ($f_c' = 39.1$ MPa) tal como se indicó en la sección 2.1, el cual se caracterizó por tener tamaño máximo de áridos de 20mm y un cono de 12 cm puesto en obra. El hormigonado fue mediante paladas y se utilizó un vibrador de transmisión flexible de 3m, introducido por 30s, cada 30cm para evitar nidos en el hormigón.
- IV. **DESMOLDE DE PROBETAS:** Luego de 21 días de hormigonado para cada probeta, se desmolda el moldaje, observándose solo pequeñas imperfecciones. En la imagen 3.9 se observan las probetas 9 y 11 tras 7 días de hormigonado.

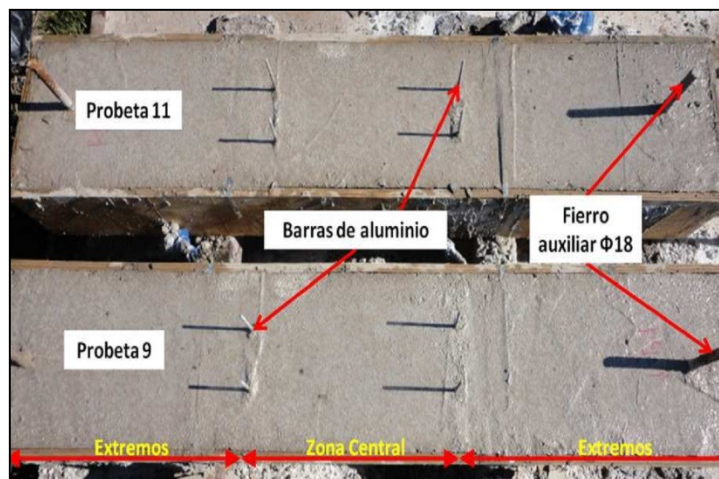


Figura 3.9. Desmolde de probetas al séptimo día de hormigonado

3.4.DESCRIPCIÓN Y MONTAJE DE ENSAYOS

Para poder analizar el comportamiento de las probetas, estas son sometidas a ensayos de compresión axial, 6 de las cuales son sometidas previamente a un ensayo de tracción de sus barras longitudinales (según matriz de ensayos). A continuación se describen y caracterizan ambos ensayos.

3.4.1.ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL

El ensayo de compresión axial tiene como objetivo simular el borde libre del muro de hormigón armado, que frente a un evento sísmico tienen altas demandas de compresión en esta zona (ciclo compresión/tracción).

Los ensayos de las probetas de hormigón armado se realizan sobre una prensa hidráulica ubicada en las instalaciones de IDIEM, dicha prensa tiene una capacidad máxima de carga de 500 Ton, un esquema general de esta prensa se presenta a continuación.

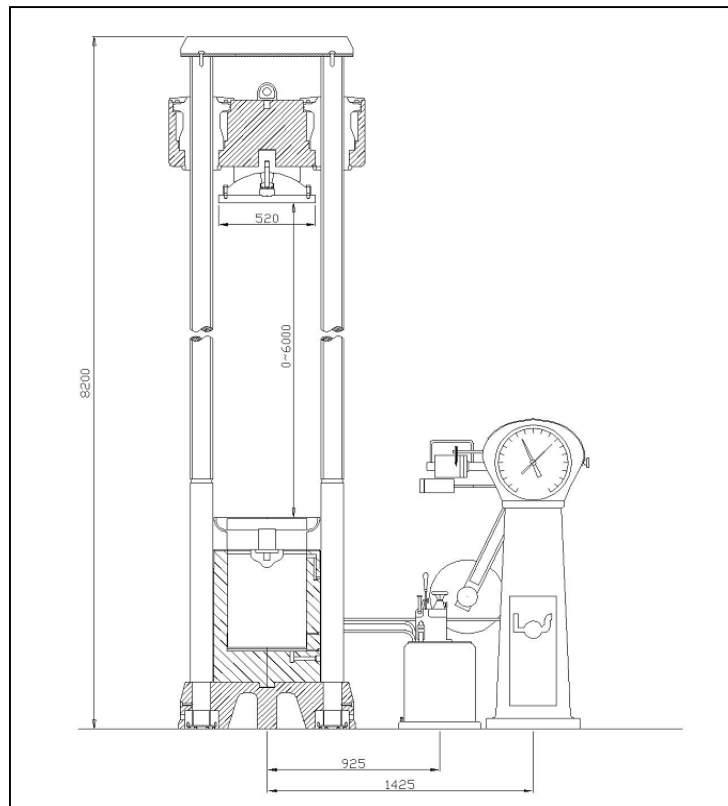


Figura 3.10. Prensa hidráulica , para ensayos de compresión axial

Esta prensa se encuentra anclada a las fundaciones del edificio en la parte inferior, y en la parte superior está sujeta mediante cables a modo de arriostrar la maquina al edificio, esta prensa mide la fuerza ejercida a las probetas mediante la reacción que le ejerce el fluido al actuador hidráulico. Esta prensa presenta 2 placas de acero, una fija y otra móvil de 20cm de espesor cada una. Las características técnicas de esta prensa se presentan en Anexo G.

Para ejercer las fuerzas de compresión, la placa superior se mantiene fija (plato superior) y la placa superior (plato inferior) tiene la libertad de desplazamiento vertical, condicionada a no tener desplazamientos laterales mediante 2 columnas de acero.

Durante el ensayo, la parte placa inferior es la que ejerce la fuerza de compresión mediante 2 émbolos que son alimentados por un motor principal ubicado al lado derecho (Figura 3.10), las características de esta prensa hacen que la probeta tenga libertad de girar en la parte superior y en la inferior no, no obstante la probeta puede girar en la parte inferior debido al mecanismo propio de la falla.

Para poder ensayar correctamente las probetas, el personal de IDIEM sigue estándares los cuales se resumen a continuación:

- i. Trasladar las probetas desde el sitio de la construcción hasta las instalaciones de IDIEM donde son ensayadas.
- ii. Montar las probetas mediante un teclé y dejarlas apoyadas en la placa inferior de la prensa hidráulica, verificando que no exista excentricidad entre la probeta y las placas de la prensa. Además se asegura que las caras de apoyo de las probetas estén libres de imperfecciones.
- iii. Una vez montadas las probetas, estas son instrumentadas, poniendo los LVDTs centrales (con ayuda de los elementos auxiliares) y posteriormente los LVDTs externos, tomando medición y dejando acta de los aspectos relevantes en el lugar de ensayo (largo de probeta, largo inicial de LVDTs, etc.).
- iv. Cuando las probetas están ya instrumentadas y verificadas, se conectan los sensores al panel de toma de datos y se chequean que estén en funcionamiento, además se conectan los equipos audiovisuales para poder tener registro del ensayo.
- v. Finalmente se comienza el ensayo, incrementando en intervalos de carga regulares la fuerza de la prensa hidráulica, una vez llegado al máximo de carga, comienzan a producirse los daños y son retirados los sensores LVDTs en la zona central, y se comienza la descarga de la probeta también a intervalos regulares de carga, hasta que los LVDTs externos han llegado a su capacidad máxima de deformación.

3.4.2. ENSAYO DE TRACCIÓN DE BARRAS LONGITUDINALES

El traccionar las barras longitudinales tiene como objetivo emular la demanda de tracción producida en el ciclo compresión/tracción durante un evento sísmico en los bordes de los muros T de hormigón armado, para poder materializar esta tracción de las barras longitudinales, es que se idea un sistema de anclaje de la probeta a 2 pedestales de H.A. los cuales son comprimidos por sendos gatos hidráulicos, en el cual los anclajes bloquean la separación del pedestal a las barras longitudinales salientes de las probetas, de esta manera por la reacción de los pedestales la probeta es traccionada llevando tanto el hormigón como su armadura longitudinal a que se traccione.

Esquemáticamente se aprecia a continuación:

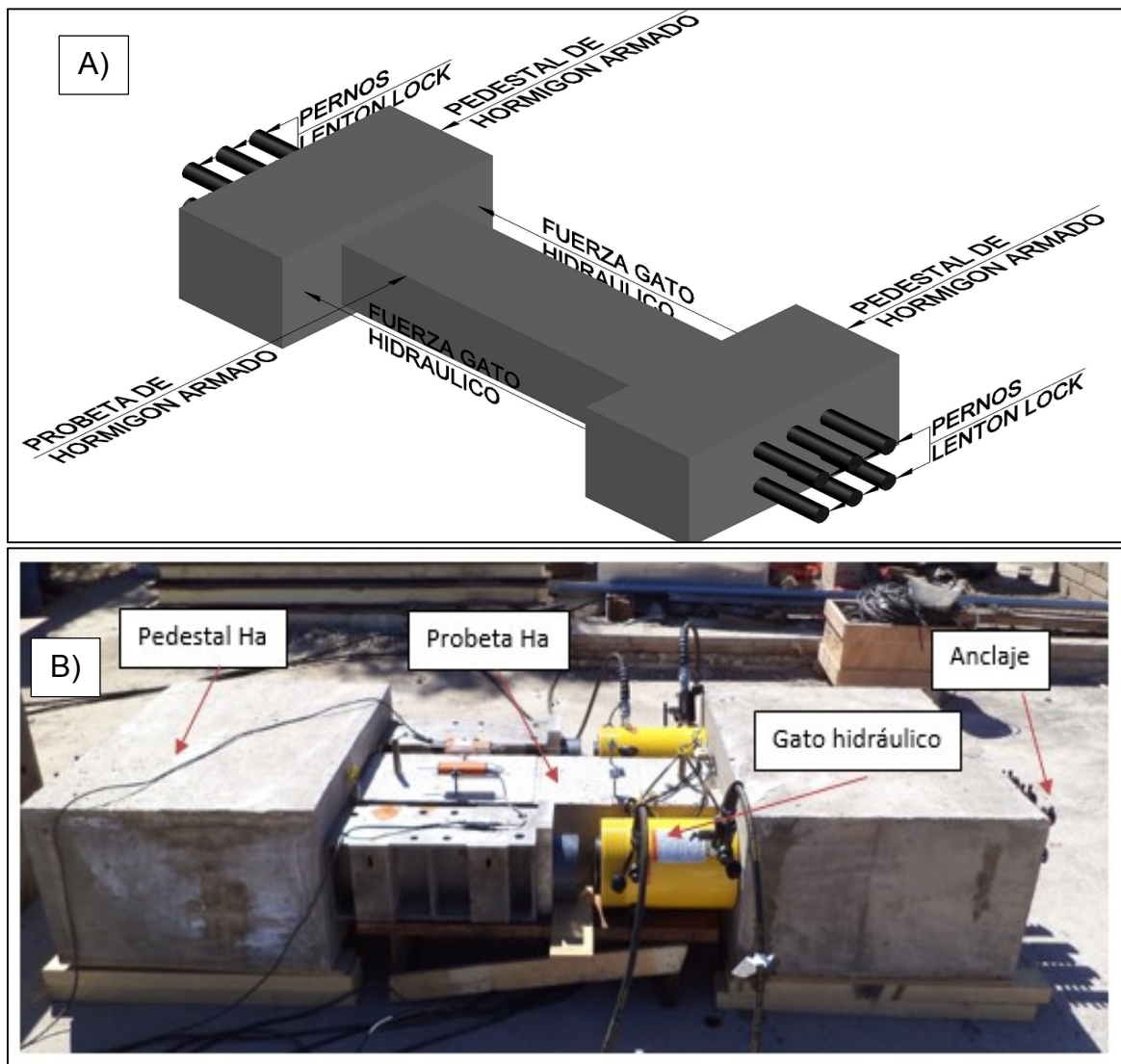


Figura 3.11.A) Idealización de ensayo a tracción, B) materialización de ensayo a tracción

El proceso constructivo del sistema de tracción de barras se describe a continuación

- **Pedestales de hormigón armado:** En el trabajo de tesis de Polanco (2012) se diseñaron 2 tipos de pedestales, para 6 y 8 barras longitudinales, luego en el proceso de esta tesis se decidió no traccionar las probetas que tenían 8 barras longitudinales por lo que sólo se emplean para traccionar las barras longitudinales 2 pedestales de 6 orificios, en los orificios de los pedestales se introdujeron 6 tubos de Pvc para evitar el roce del hormigón con las barras a la hora de montar las barras de acero dentro de éstos. A continuación se muestran los planos de construcción para los pedestales de 6 barras longitudinales.

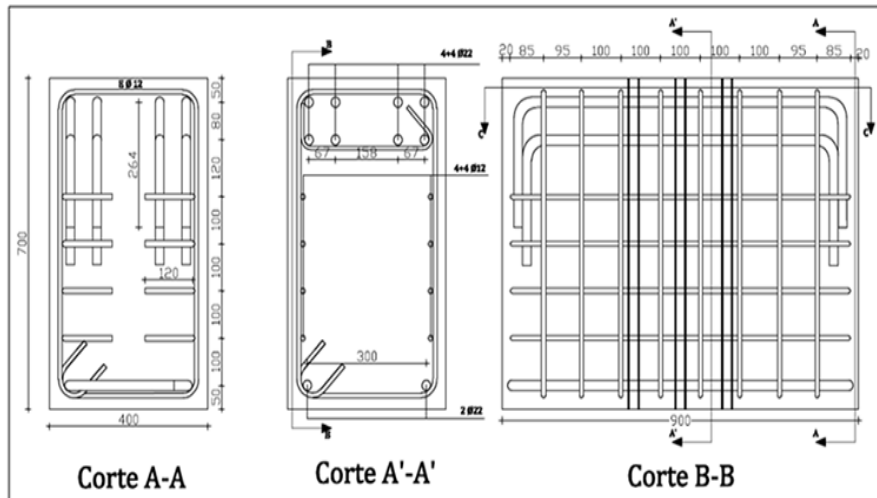


Figura 3.12. Planos de construcción pedestal para 6 barras longitudinales

- **Sistema de anclaje probeta-pedestal:** para asegurar que la probeta sea traccionada correctamente, se deben anclar las barras longitudinales a los pedestales de forma segura y estable. El sistema utilizado para tal objetivo fue fijar las barras longitudinales salientes de los pedestales por medio de un conector de barras de refuerzo tipo LENTON LOCK de ERICO tal como se muestra a continuación:

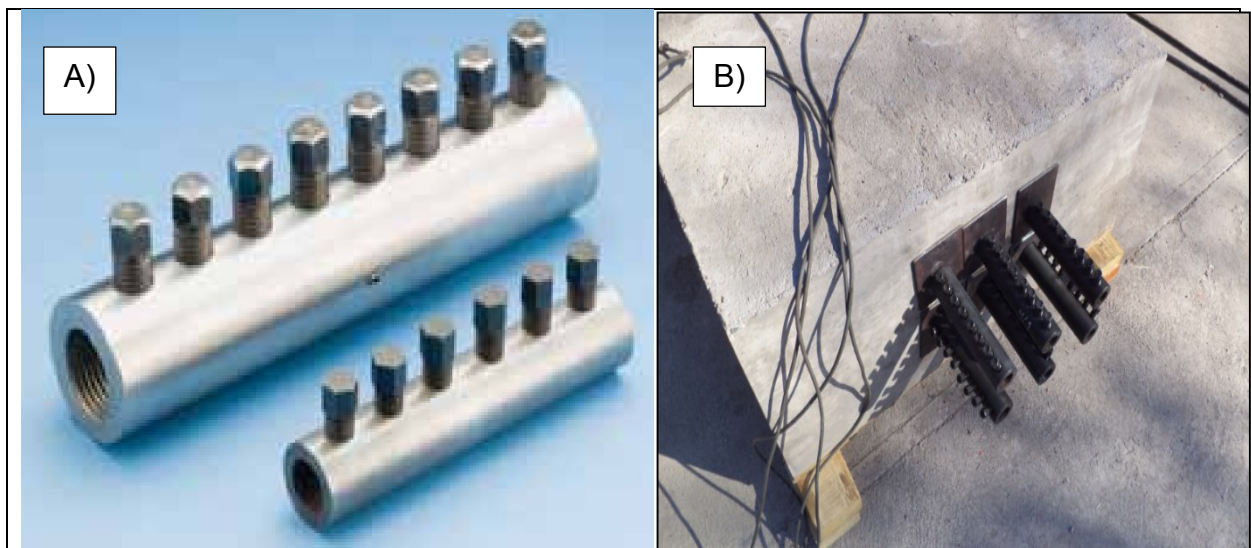


Figura 3.13. A) Sistema de anclaje, B) materialización de anclaje de pernos LENTON LOCK

Este tipo de conector se utiliza para unir barras de acero, mediante la unión de cada extremo de barra al sistema de anclaje.

Para fijar los conectores a las barras longitudinales, se utilizan tornillos de apriete los cuales tienen un determinado torque de aprieta para cada diámetro de barra. En el caso de los ensayos de tracción, se utilizaron 4 tuercas y una placa de acero (para disminuir las tensiones conector-pedestal), el torque de apriete fue de aproximadamente el 75% del que especifica el catálogo de los pernos (Anexo G), observándose buenos resultados.

Es importante señalar que estos conectores cumplen una serie de normas internacionales como IBC, UBC, ACI 318, DIN 1045 etc. Además, otra característica especial es que garantiza un deslizamiento barra-conector menor a 0.1mm.

- **Gatos hidráulicos:** para poder ejercer la tracción a las probetas de H.A, se utilizan 2 gatos hidráulicos ENARPAC RRH-10010 de capacidad nominal 96 Ton. Los cuales están conectados en paralelo, y que funcionan mediante una bomba eléctrica ENARPAC ZE4420SB de potencia 1.5HP (Especificaciones técnicas descritas en anexo G).

El montaje de las probetas estuvo a cargo de personal del departamento de la Facultad Ingeniería Civil de la Universidad de Chile; la instrumentación y ensayo de las probetas estuvo a cargo de personal de IDIEM, el cual bajo estándares calificados traccionó las probetas.

Luego de tener provisto el sistema completo para la tracción de la probeta, ésta fue instrumentada en sus sensores internos Strain gauges y en sus sensores LVDTs longitudinales de la zona central, con el propósito de medir el % de alargamiento y posteriormente la respuesta carga-deformación axial. La carga que se aplicó a los pedestales fue de forma gradual en pasos de 1Mpa hasta alcanzar la deformación de diseño; una vez alcanzada esta deformación, los gatos descargaban en pasos de 2 MPa.

Los resultados del porcentaje de alargamiento obtenidos se muestran en la Tabla 3.4

Tabla 3.4. % de deformación luego de pre-tracción de barras longitudinales

	% Pre-tracción teórica	% Pre-tracción ensayo luego de descarga
Probeta 7	1	1,37
Probeta 8	2	2,03
Probeta 9	2	2,07
Probeta 10	2	1,92
Probeta 11	2	2,15
Probeta 16	2	2,07

Para poder obtener los resultados posteriores (capítulo 4) se utilizan los largos reales de las probetas y sensores, estos fueron medidos antes del inicio de cada ensayo.

A continuación se presentan estos valores

Tabla 3.5. Largo de sensores internos LVDTs centrales

Probeta	Nomenclatura	Lvdt_C_SP [mm]	Lvdt_C_SO [mm]	Lvdt_C_NP [mm]	Lvdt_C_NO [mm]
P1	TH100T0COW130	447	447	439	451
P2	TH100T0COW180	415	433	440	417
P3	TH100T0COW250	445	438	440	437
P4	TH100T0CA100W130	447	438	452	430
P5	TH100T0CA100W180	438	435	445	443
P6	TH100T0CA100W250	435	435	410	430
P7	TH100T1COW180	445	443	440	452
P8	TH100T2COW180	425	430	425	426
P9	TH160T2COW180	440	441	432	437
P10	TH100T2CA100W180	430	413	430	423
P11	TH160T2CA100W180	415	415	420	430
P12	TH160T0CA100W180	435	445	435	441
P13	TH100T0CA150W180	480	480	490	480
P16	TH100T2CA150W180	495	490	487	503
P17	TH100T0CM150W180	475	485	475	485
P18	TH100T0CM100W180	410	415	410	405
P19	TH100T0CA100W180	465	475	470	475
P20	TH100T0CA2100W180	420	420	430	425
P21	TH100T0CD1100W180	425	430	420	435
P22	TH100T0CD2100W180	420	410	415	410
P23	TH100T0CE1100W180	410	425	410	425
P24	TH100T0CE2100W180	415	415	410	415

Donde:

Lvdt_C_SP: sensor central (interno) ubicado en sector Sur –Poniente.

Lvdt_C_SO: sensor central (interno) ubicado en sector Sur-Oriente.

Lvdt_C_NP: sensor central (interno) ubicado en sector Nor-Poniente.

Lvdt_C_NO: sensor central (interno) ubicado en sector Nor-Oriente.

Orientación de acuerdo a Figura 3.3.

Tabla 3.6. Largo de sensores externos LVDTs globales y sensores SDP

Probeta	Nomenclatura	Lvdt_G_S P [mm]	Lvdt_G_S O [mm]	Lvdt_G_N P [mm]	Lvdt_G_N O [mm]	SPD_SUP	SPD_INF
P1	TH100T0C0W130	1000	1000	1000	1000	333	333
P2	TH100T0C0W180	1000	1000	1000	1000	330	330
P3	TH100T0C0W250	1000	1000	1000	1000	330	330
P4	TH100T0CA100W130	1000	1000	1000	1000	330	330
P5	TH100T0CA100W180	1000	1000	1000	1000	330	330
P6	TH100T0CA100W250	1000	1000	1000	1000	330	330
P7	TH100T1C0W180	1007	1007	1007	1007	330	330
P8	TH100T2C0W180	1014	1014	1014	1014	330	330
P9	TH160T2C0W180	1622	1622	1622	1622	405	405
P10	TH100T2CA100W180	1015	1015	1015	1015	255	250
P11	TH160T2CA100W180	1618	1618	1618	1618	400	400
P12	TH160T0CA100W180	1600	1600	1600	1600	-----	-----
P13	TH100T0CA150W180	1010	1010	1010	1010	330	330
P16	TH100T2CA150W180	1006	1006	1006	1006	330	330
P17	TH100T0CM150W180	1000	1000	1000	1000	330	330
P18	TH100T0CM100W180	1000	1000	1000	1000	336	340
P19	TH100T0CA100W180	1003	1003	1003	1003	331	330
P20	TH100T0CA2100W180	1002	1002	1002	1002	333	333
P21	TH100T0CD1100W180	1005	1005	1005	1005	333	335
P22	TH100T0CD2100W180	1003	1003	1003	1003	330	330
P23	TH100T0CE1100W180	1003	1003	1003	1003	330	330
P24	TH100T0CE2100W180	1005	1005	1005	1005	330	330

Donde:

Lvdt_G_SP: sensor global (externo) ubicado en sector Sur –Poniente.

Lvdt_G_SO: sensor global (externo) ubicado en sector Sur-Oriente.

Lvdt_G_NP: sensor global (externo) ubicado en sector Nor-Poniente.

Lvdt_G_NO: sensor global (externo) ubicado en sector Nor-Oriente.

Orientación de acuerdo a Figura 3.3.

CAPÍTULO 4 :ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos, tanto de los sensores como de los archivos digitales (fotografías y videos) de los ensayos. Se exponen los resultados más importantes, dejando en anexos los restantes.

4.1. ANÁLISIS CUALITATIVO

4.1.1.DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE FALLA OBSERVADA

Al observar el mecanismo de falla de las probetas una vez alcanzado el máximo de capacidad de carga, se logra apreciar 2 modos de falla representativos, que dependen de si la zona central presenta o no confinamiento transversal.

Las probetas que no presentan confinamiento transversal en la zona central, luego de alcanzar el máximo de capacidad de carga, se aprecia que las barras longitudinales se empotran en el primer estribo de las zonas externas, y se pandean globalmente entre estos estribos, además se pierde completamente el hormigón de recubrimiento.

Las probetas que presentan confinamiento transversal en la zona central, luego de alcanzar el máximo de capacidad de carga, se observa la aparición de una grieta inclinada entre estribos de esta zona. Con ello, se observa conjuntamente pandeos globales o locales de las barras longitudinales entre los estribos; las barras longitudinales se deforman en forma de S.

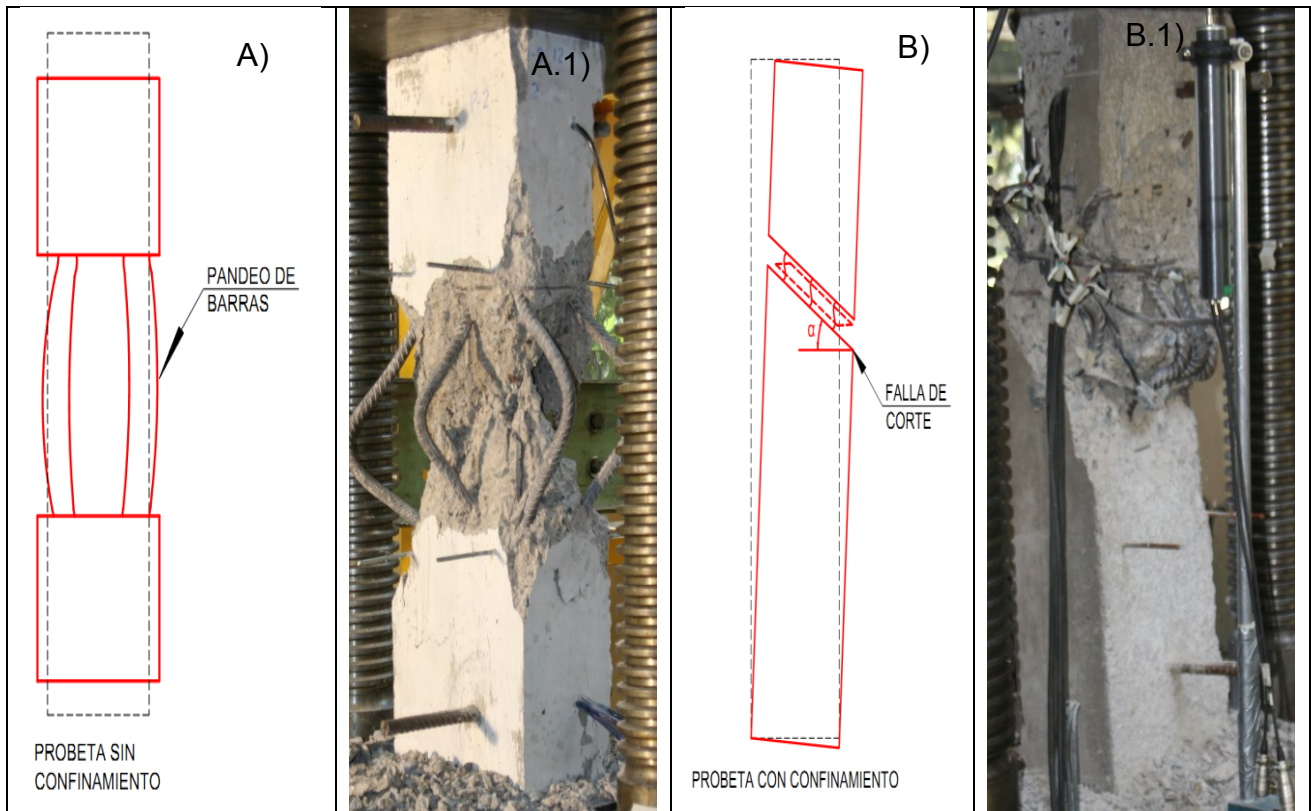


Figura 4.1. imagen A/A.1-Mecanismo de falla probetas sin confinamiento central. Imagen B/B-1Mecanismo de falla probetas con confinamiento central

4.1.2.LARGO DE ZONA DE FALLA

En esta sección se describe una forma de estimar cuantitativamente el largo de la zona de daño, puesto que es un parámetro importante para relacionar la degradación posterior a la carga máxima, ya que, este parámetro relaciona los datos entregados por los LVDTs longitudinales de la zona central con los LVDTs externos. A continuación se describe la metodología para estimar el largo de la zona de daño.

1-Probetas con confinamiento transversal central: para las probetas con confinamiento en la zona central se describen 2 procedimientos (dependiendo del tipo de pandeo de barras longitudinales) para poder estimar el largo de la zona de daño.

Pandeo de barras longitudinales en más de 2 estribos (pandeo global): para cuantificar el largo de daño, se ubica la zona de daño mediante fotografías tomadas en las 4 caras de la probeta ubicando, el empotramiento que tuvo el pandeo entre los estribos. Luego se cuantifica el número de estribos contenidos en el pandeo y se relaciona con su espaciamiento, obteniendo un largo de daño para cada cara, promediándose los 4 valores.

Pandeo de barras longitudinales entre 2 estribos (pandeo local): para cuantificar el largo de daño se ubica la zona de daño mediante fotografías tomadas en las 4 caras y se cuenta en número de pandeos locales por cara y se relacionan con el espaciamiento de los estribos, obteniendo un largo de daño para cada cara, promediándose los 4 valores.

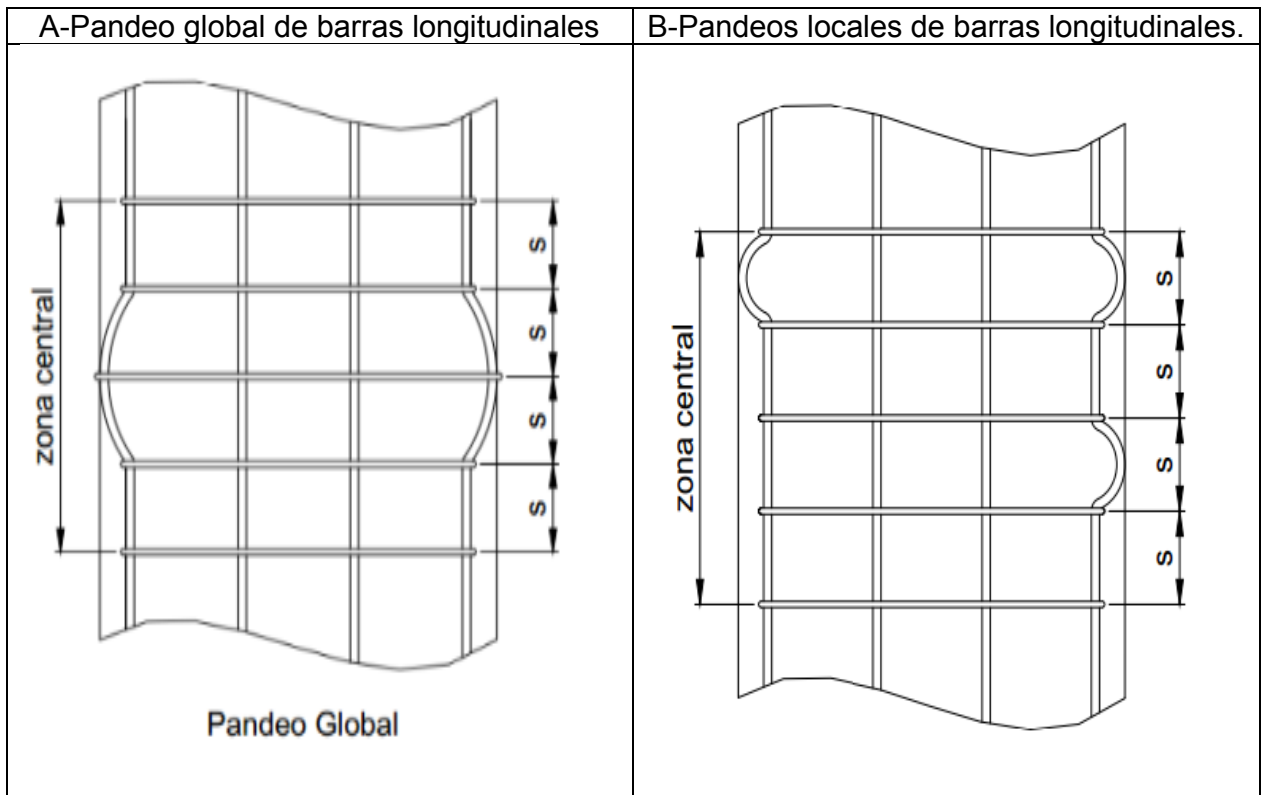


Figura 4.2. Tipo de falla local, probetas con confinamiento central, A-Pandeos global B-Pandeos locales

2- Probetas sin confinamiento transversal central: para estimar el largo de daño en las probetas sin confinamiento transversal central, se chequea mediante fotografías en las 4 caras de la probeta que el largo de pandeo de las barras longitudinales sea el doble empotramiento en los primeros estribos de las zonas externas, promediándose los valores obtenidos en las 4 caras de la probeta en caso que no lo sea.

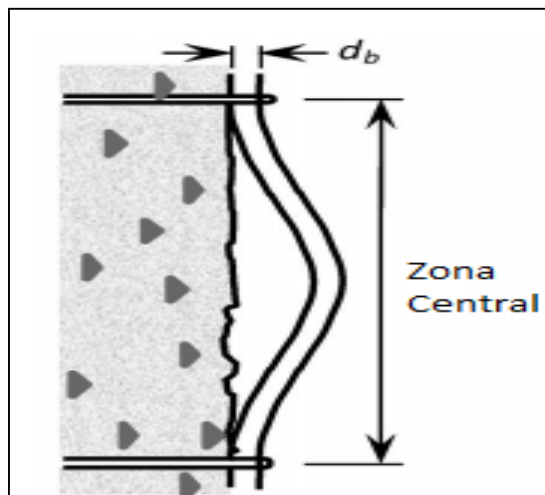


Figura 4.3. Tipo de falla probetas sin confinamiento central, doble empotramiento en estribos de zona externa

A continuación se dan a conocer 4 probetas a modo de abarcar el espectro de probetas de la matriz de ensayos, en las cuales se observa el largo de la zona de daño estimado a partir de la metodología anterior, en Anexo A se encuentran el resto de las probetas, las líneas rojas representan los estribos involucrados en el mecanismo de falla y las líneas verdes representan para el caso de las probetas con confinamiento central, los estribos involucrados.

LD=Largo de zona de daño [mm], S=espaciamento de estribos.

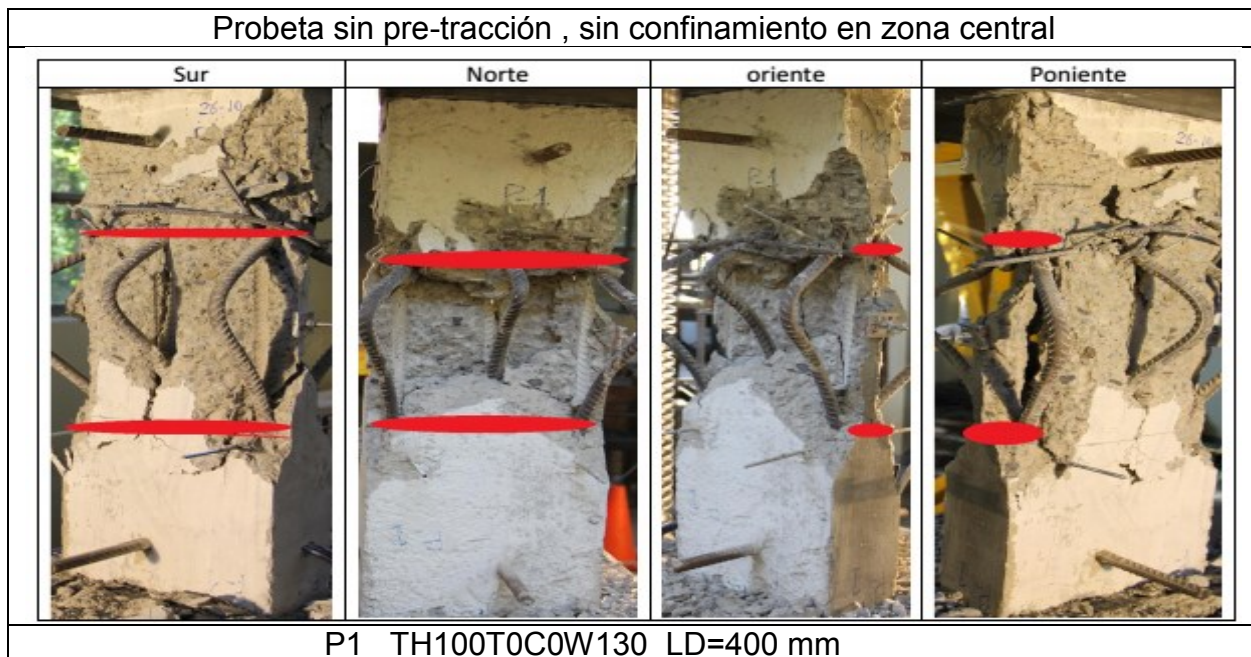
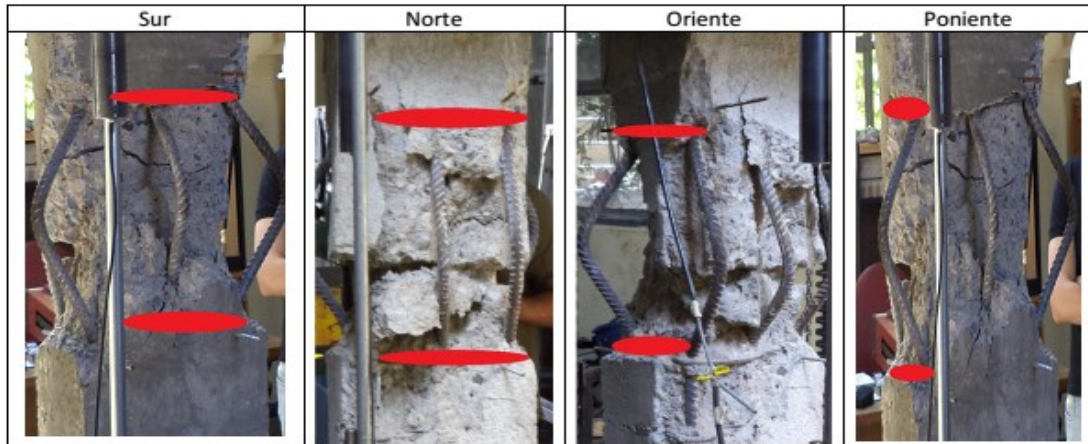


Figura 4.4. Mecanismo de falla probeta 1

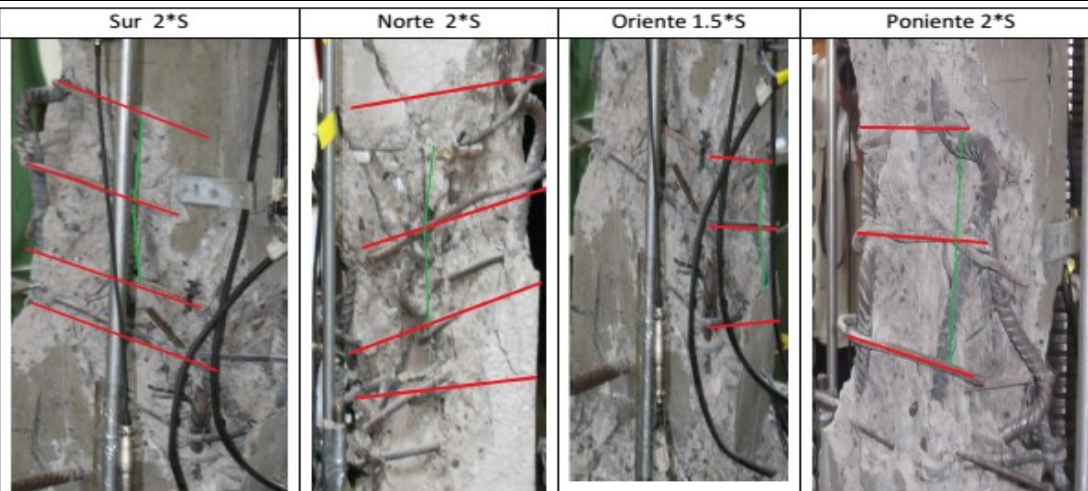
Probeta con pre-tracción , sin confinamiento en zona central



P7_TH100T1C0W180_LD=400mm

Figura 4.5.Mecanismo de falla probeta 7

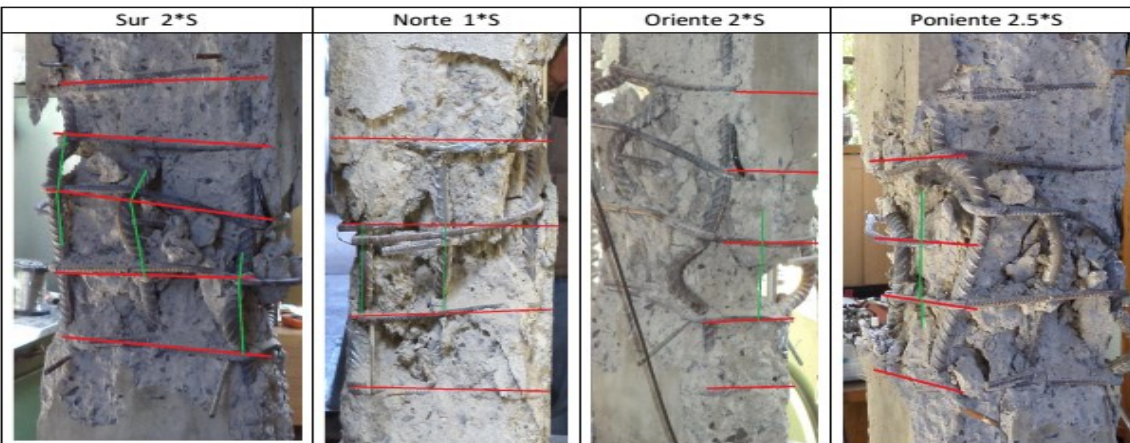
Probeta sin pre-tracción , con confinamiento en zona central



P18_TH100T0CM100W180_LD=1.9*S=190mm

Figura 4.6.Mecanismo de falla probeta 18

Probeta con pre-tracción , con confinamiento en zona central



P10_TH100T2CA100W180_LD=(2+1+2+2.5)*S/4=2*S=100*2=200mm

Figura 4.7.Mecanismo de falla probeta 10

En la Tabla 4.1 se describe toda la matriz de ensayos en la cual se muestra el espaciamiento, el largo de daño y la zona donde se presentó la falla, “C” representa la falla zona central, “C-E” representan la falla en transición zona central-externa.

Tabla 4.1. Largo de zona de falla

Probeta	Nomenclatura	Espaciamiento [mm]	Largo de daño [mm]	Zona falla
1	TH100T0C0W130	---	400	C
2	TH100T0C0W180	---	400	C
3	TH100T0C0W250	---	400	C
4	TH100T0CA100W130	100	225	C-E
5	TH100T0CA100W180	100	170	C-E
6	TH100T0CA100W250	100	190	C-E
7	TH100T1C0W180	---	400	C
8	TH100T2C0W180	---	420	C
9	TH160T2C0W180	---	400	C
10	TH100T2CA100W180	100	200	C
11	TH160T2CA100W180	100	225	C
12	TH160T0CA100W180	100	175	C
13	TH100T0CA150W180	150	330	C-E
16	TH100T2CA150W180	150	300	C
17	TH100T0CM150W180	150	300	C
18	TH100T0CM100W180	100	190	C
19	TH100T0CM100W180	100	115	C
20	TH100T0CA2100W180	100	360	C
21	TH100T0CD1100W180	100	175	C
22	TH100T0CD2100W180	100	190	C
23	TH100T0CE1100W180	100	175	C
24	TH100T0CE2100W180	100	194	C

El Largo de zona de daño se muestra gráficamente en la Figura 4.8, además de representar la carga máxima de cada probeta.

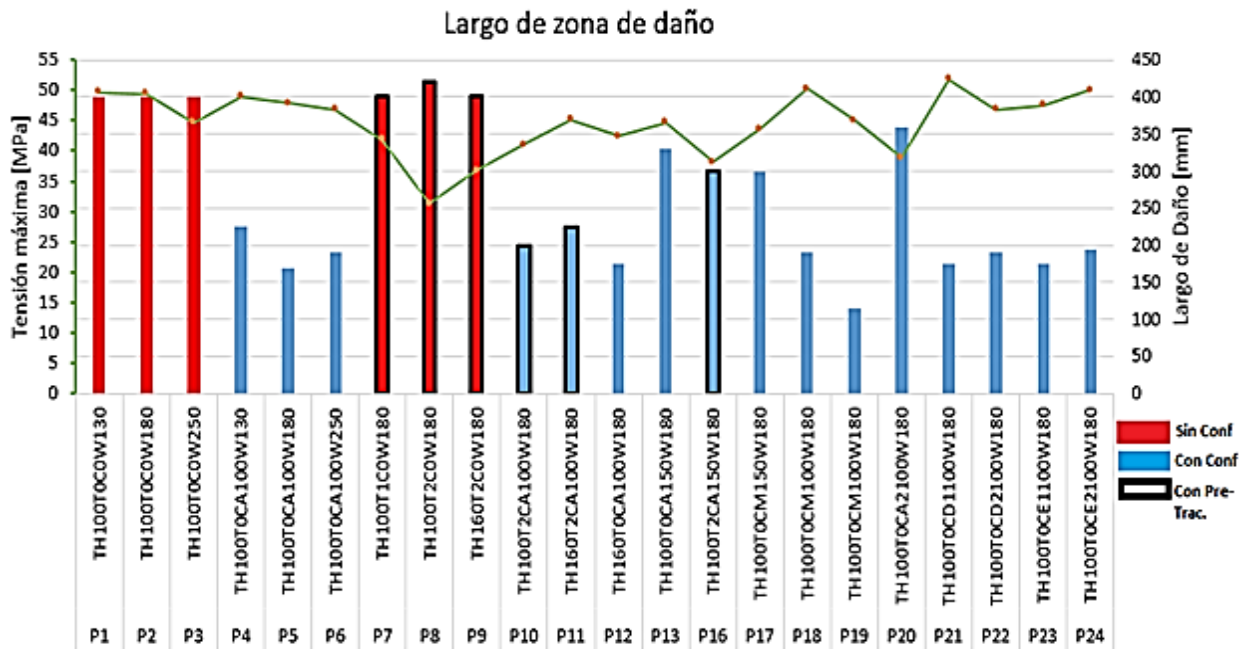


Figura 4.8. Largo de zona de daño

La Figura 4.8 muestra que aparentemente no existe una relación entre el largo de falla y la capacidad de carga máxima, pues probetas sin confinamiento presentan capacidades de carga máxima similares a probetas con confinamiento, más bien el largo de falla está ligado al espaciamiento de los estribos, pues son las barras longitudinales las que generan mediante el pandeo la zona de falla, y el espaciamiento de estribos limita este mecanismo de falla.

Se evidencia que la única probeta que presenta un largo de daño mayor comparada con las probetas con mismo espaciamiento es la probeta P20. En esta probeta se observó que los estribos se abrieron, ya que sus terminaciones eran en 90°, no anclándose al núcleo hormigón. Esta probeta se comportó como una probeta sin confinamiento (con un largo de daño un poco menor a las probetas sin confinamiento).



Figura 4.9. Abertura de estribos en probeta P20 con terminación de estribos en 90°

Al normalizar los resultados por el espaciamiento respectivo en la zona central se obtiene lo mostrado en Figura 4.10.

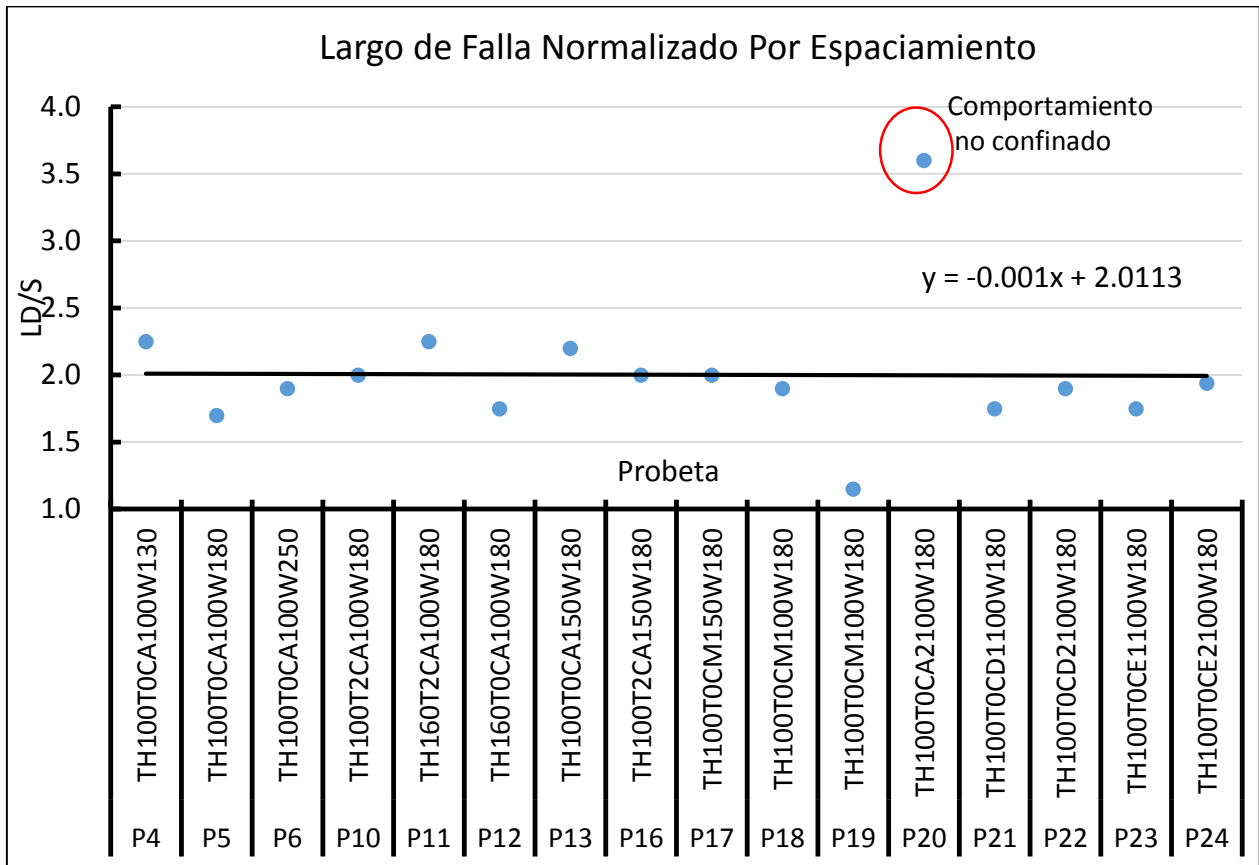


Figura 4.10. Largo de falla normalizado por espaciamiento de estribos para probetas con confinamiento central

La Figura 4.10 muestra que el largo de daño para las probetas con confinamiento transversal en general es 2 veces el espaciamiento de estribos $LD=2*S$. La única probeta que se escapa de este comportamiento es la P19, la cual presentó un largo daño de $LD=1.1*S$.

Esta probeta por diseño tiene una excentricidad en la aplicación de la carga axial de 3cm sobre su lado largo, por lo que se esperaría que el daño fuese mayor que las probetas sin excentricidad en alguna de sus caras ya que algunas zonas están más comprimidas que las otras, sin embargo, no presenta esta condición.

Para poder explicar el comportamiento de esta probeta se analiza la evolución de la falla tal como se muestra en la Figura 4.11.

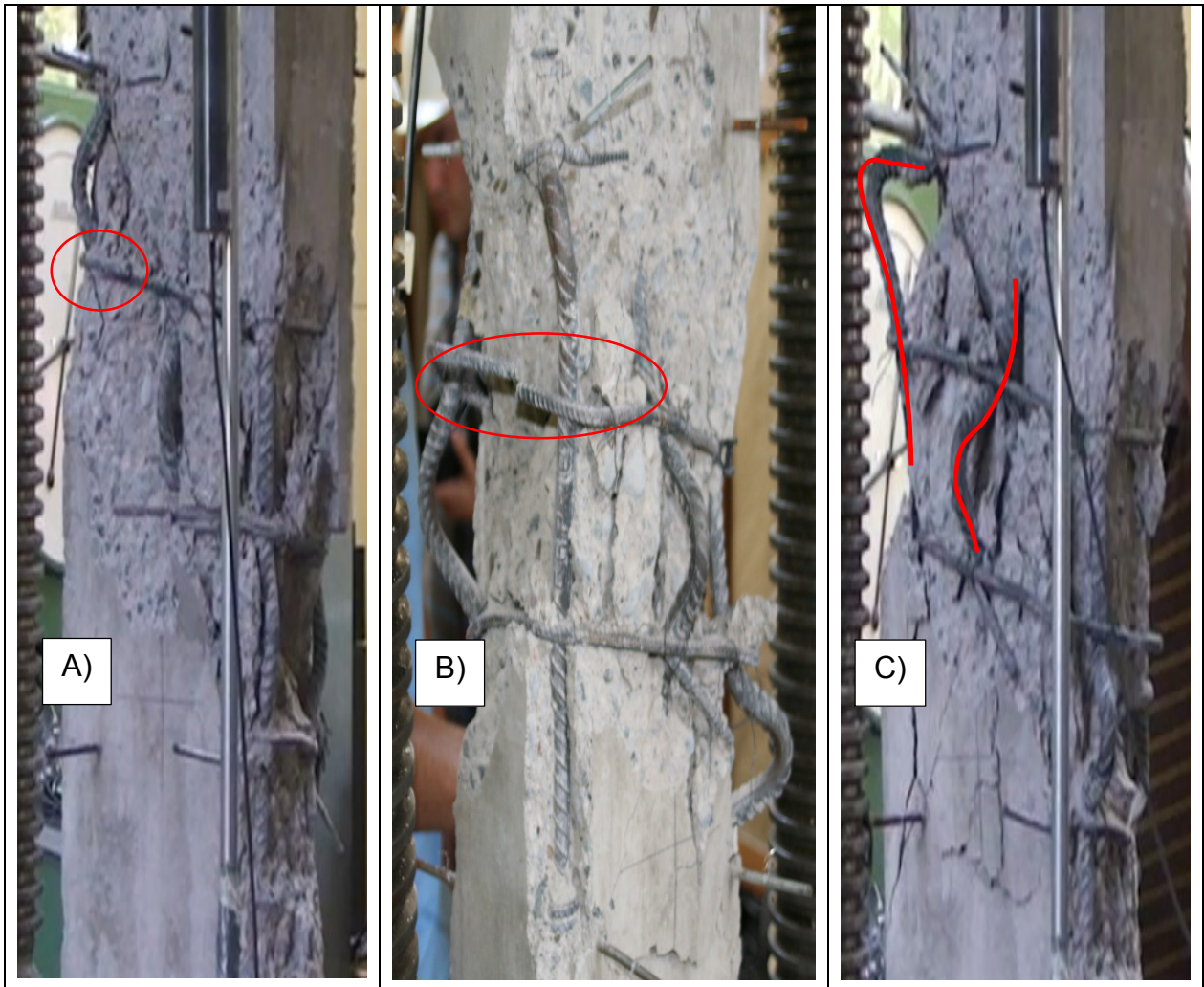


Figura 4.11. Evolución mecanismo de falla P19, A) estribo integro, B) fractura de estribo, C) semi pandeo global de barras.

Al analizar con detenimiento la evolución del mecanismo de falla de esta probeta (P19), se observa que mientras ocurría la falla de corte, se fracturó un estribo, lo que hizo que el pandeo local que ocurría en ese estribo se transformara en un semi pandeo global. Al fracturarse ese estribo se observa como la primera barra (izquierda a derecha) tiende a empotrarse en el estribo inferior al fracturado, y la segunda barra en el superior, por lo cual ese estribo deja de entregar confinamiento y la separación de diseño pasa a ser 2*S, por lo cual esta probeta estaría dentro del patrón de daño expuesto en la Figura 4.10.

Esta probeta presentó en primera instancia pandeo local y luego de la fractura del estribo presentó un doble empotramiento, por lo cual el tipo de falla fue mixto.

4.2. ANÁLISIS CUANTITATIVO

Para una mejor comprensión de los resultados expuestos en este trabajo de tesis, la presentación de resultados se dividirá en probetas sin pre-tracción y probetas con pre-tracción, ya que el comportamiento de cada grupo de probetas es distinto, sin embargo cabe resaltar que aunque la presentación de los resultados sea en secciones distintas, igualmente se compararán resultados entre ambas secciones.

4.2.1. PROBETAS SIN PRE-TRACCIÓN

En esta sección se presentan los resultados relevantes en el análisis de las probetas sin pre-tracción, se dan a conocer los resultados globales (curvas carga-deformación axial), como también el comportamiento de los sensores internos de estribos y armadura longitudinal.

Para poder caracterizar el comportamiento carga deformación axial en la zona de estudio (zona central), se utilizan para la curva ascendente hasta el máximo de capacidad de carga los sensores LVDTs ubicados en la zona central, y para la curva descendente los sensores LVDTs externos.

Esta metodología de obtención del comportamiento tensión deformación axial, se debe a que una vez llegada a la carga máxima, la probeta presenta pérdida del hormigón de recubrimiento en esta zona y los sensores dejan de entregar datos confiables o son retirados, por lo cual no se tiene certeza de sus registros, por tal motivo para obtener el comportamiento posterior a la carga máxima se utilizan los sensores LVDTs externos mediante una compatibilización de deformaciones con las zonas externas, tal como se muestra en la Figura 4.12

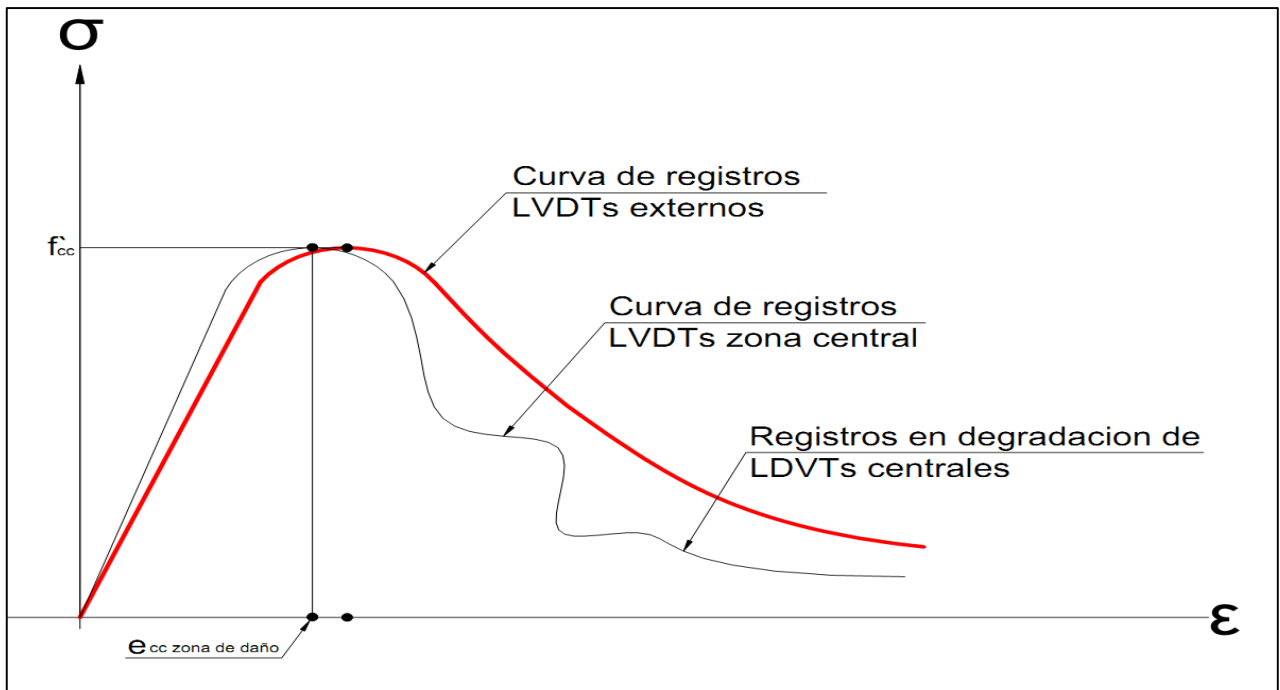


Figura 4.12. Caracterización curva tensión deformación axial zona de central

En la Figura 4.12 se observa una rigidez diferente antes del máximo de carga, esto se debe a que los sensores externos sufren un acomodo pues la probeta se ajusta a las placas de la prensa hidráulica, se observa también la diferencia en la deformación ϵ_{cc} en la carga máxima, la cual se corrige mediante la compatibilidad de deformación, al igual que la curva en degradación entregada por los LVDTs externos.

A continuación se resume la metodología para obtener la curva carga deformación axial, en el proceso de carga y descarga, esta metodología presenta el supuesto que las zonas externas sufren una deformación elástica y luego se descargan, esta hipótesis se corroborará posteriormente en el análisis de estribos y barras longitudinales (sección 4.2.1.8).

- Se asume compatibilidad de deformaciones y descarga lineal en la zona sin daño pasado el máximo de carga.

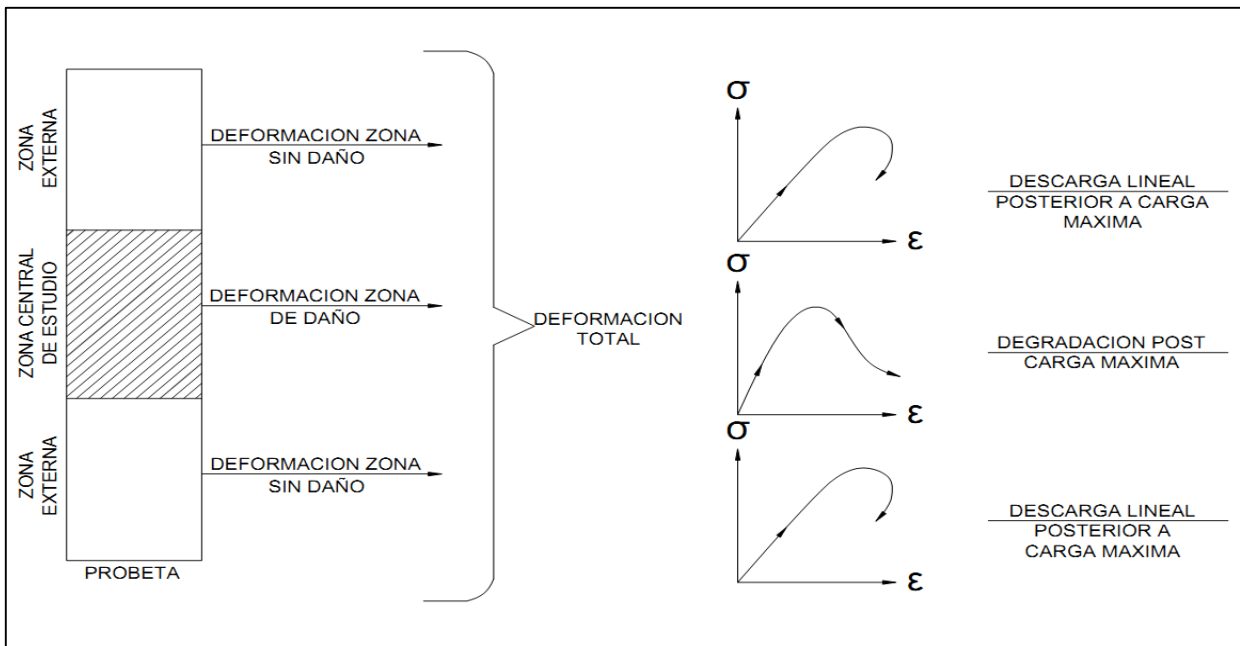


Figura 4.13. Compatibilidad de deformaciones entre zona externa y central

$$\delta_{total} = \delta_{daño} + \delta_{sin_daño}$$

Ecuación [4.1]

$$\epsilon_{total} * L_{Probeta} = \epsilon_{daño} * L_{daño} + \epsilon_{sin_daño} * L_{sin_daño}$$

$$\Delta \epsilon_{sin\ daño_post_peak} * E_* = \Delta \sigma$$

Ecuación [4.2]

$$E_* = \frac{E_H * A_H + E_s * A_s}{A_H + A_s}$$

- Mirado desde el punto de vista de los sensores externos y pasado el máximo de carga, reemplazando [4.3] en [4.2]

$$\varepsilon_{ex_total_post_peak} * L_{Pr obeta} = \varepsilon_{ex_daño_post_peak} * L_{daño} + \frac{\Delta\sigma * L_{sin_daño}}{\frac{E_H * A_H + E_s * A_s}{A_H + A_s}} \quad \text{Ecuación [4.3]}$$

- Descartando los registros antes del máximo de capacidad de carga de los sensores externos

$$\varepsilon_{ex_total} = \varepsilon_{ex_peak} + \varepsilon_{ex_post_peak} \quad \text{Ecuación [4.5]}$$

Y reemplazando [4.5] en [4.4]

$$\varepsilon_{ex_daño_post_peak} = (\varepsilon_{ex_total} - \varepsilon_{ex_p}) * \frac{L_{Pr obeta}}{L_{daño}} - \frac{\Delta\sigma * (L_{Pr obeta} - L_{daño}) * (A_H + A_s)}{E_H * A_H + E_s * A_s} \quad \text{Ecuación [4.5]}$$

- La ecuación 4.5 describe el comportamiento pasado el máximo de carga de la zona de daño en base a los sensores externos, compatibilizando la deformación en el máximo de carga para los sensores internos en la zona de daño pasado el máximo de carga se obtiene :

$$\varepsilon_{int} = \varepsilon_{int_peak} + \varepsilon_{ext_daño_post_peak} \quad \text{Ecuación [4.6]}$$

Y reemplazando [4.5] en [4.6], finalmente se obtiene la relación para la curva descendiente de la zona de daño basado en los sensores externos:

$$\varepsilon_{int} = \varepsilon_{int_peak} + (\varepsilon_{ex_total} - \varepsilon_{ex_peak}) * \frac{L_{Pr obeta}}{L_{daño}} - \frac{\Delta\sigma * (L_{Pr obeta} - L_{daño}) * (A_H + A_s)}{E_H * A_H + E_s * A_s} \quad \text{Ecuación [4.7]}$$

donde:

ε_{int} = deformación en zona de daño basado en sensores externos (LVDTs) pasado el máximo de carga

ε_{int_peak} = deformación en el máximo de carga basado en sensores internos (LVDTs)

ε_{ex_total} = deformación de sensores externos pasado el máximo de carga

ε_{ex_peak} = deformación en el máximo de carga basado en sensores externos (LVDTs)

$L_{Próbata}$ = largo de probeta

$L_{daño}$ = largo de zona de daño

E_H = Módulo de elasticidad del hormigón

E_s = Módulo de elasticidad del Acero

A_H = Área del hormigón

A_s = Área del Acero

$\Delta\sigma$ = diferencia de tensión entre el máximo de carga y el mínimo de carga

4.2.1.1.COMPORTAMIENTO GLOBAL PROBETAS SIN PRE-TRACCIÓN

Siguiendo la metodología de la sección 4.2.1 se obtienen curvas que presentan las siguientes características generales:

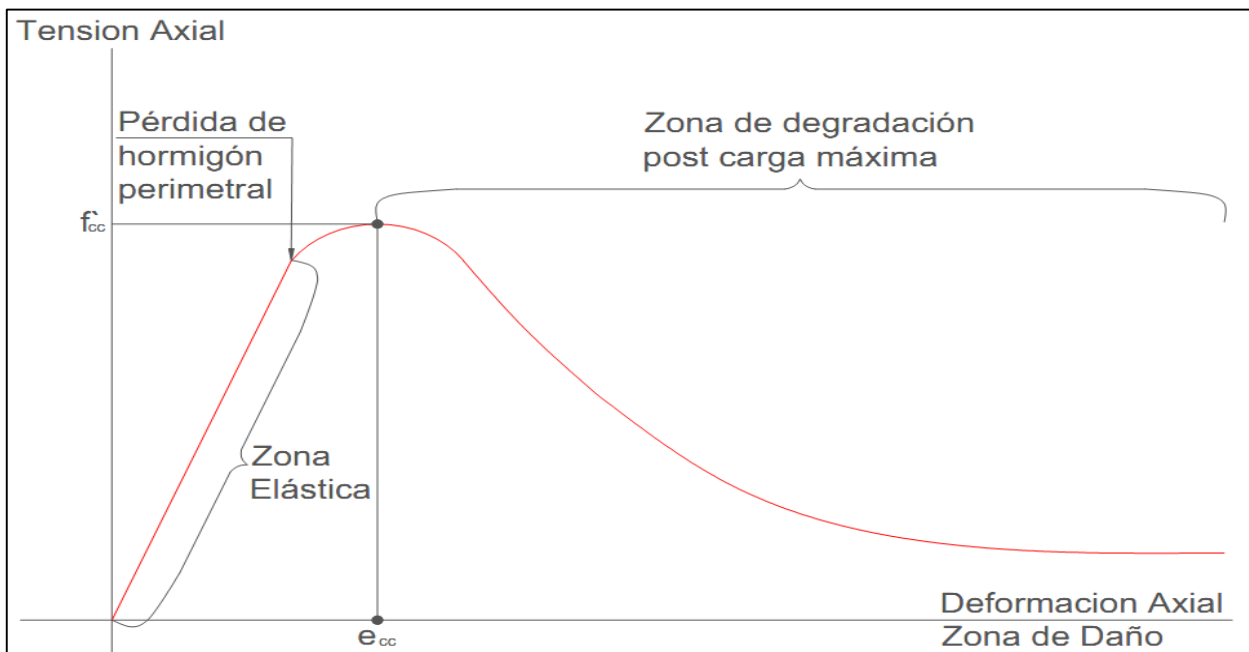


Figura 4.14. Descripción general probetas sin pre-tracción

Para las probetas sin pre-tracción se observan gráficos similares en términos generales, se ven 3 zonas relevantes, la zona antes del máximo de carga

(comportamiento lineal y comportamiento en degradación de hormigón perimetral) y la zona posterior al máximo de carga (zona de degradación).

Cabe destacar que las tensiones para la matriz de ensayos se obtuvieron asumiendo que no existe agrietamiento es decir que el área transversal se mantiene constante , $\sigma = \frac{P}{A}$ lo cual no es cierto pasado el nivel de carga donde comienza la pérdida de recubrimiento, sin embargo, esta metodología tiene un buen acercamiento a la hora de analizar y comparar los resultados obtenidos.

En base a la metodología citada en el apartado 4.2.1 a continuación se describe en la Tabla 4.1, y en la Figura 4.15 los resultados generales (carga máxima, deformación a carga máxima, y tensión máxima), estos valores corresponden al promedio de los datos obtenidos por los sensores LVDTs centrales.

Tabla 4.1. Carga máxima y deformación axial a carga máxima

Probeta	Nomenclatura	Carga Máxima [Tonf]	ecc []	T_max [MPa]
P1	TH100T0C0W130	184.2	0.00259	47.2
P2	TH100T0C0W180	267.1	0.00236	49.5
P3	TH100T0C0W250	335.2	0.00226	44.7
P4	TH100T0CA100W130	188.0	0.00195	48.2
P5	TH100T0CA100W180	258.7	0.00218	47.9
P6	TH100T0CA100W250	350.7	0.00190	46.8
P12	TH160T0CA100W180	223.4	0.00205	41.4
P13	TH100T0CA150W180	241.0	0.00213	44.6
P17	TH100T0CM150W180	247.4	0.00238	45.8
P18	TH100T0CM100W180	243.7	0.00213	45.1
P19	TH100T0CM100W180	242.9	0.00347	45.0
P20	TH100T0CA2100W180	215.3	0.00167	39.9
P21	TH100T0CD1100W180	279.8	0.00189	51.8
P22	TH100T0CD2100W180	253.0	0.00198	46.9
P23	TH100T0CE1100W180	256.5	0.00197	47.5
P24	TH100T0CE2100W180	270.3	0.00251	50.1

Donde:

T_{max} : Tensión a carga máxima, calculada como $T_{max} = \text{Carga máxima} / (\text{área total})$.

e_{cc} : Deformación axial al estado de carga máxím

Cabe destacar que la tensión máxima no es totalmente representativa, ya que luego de la pérdida de recubrimiento (pasado el rango lineal), el hormigón pierde área, por lo cual este valor sólo se utilizará como aproximación.

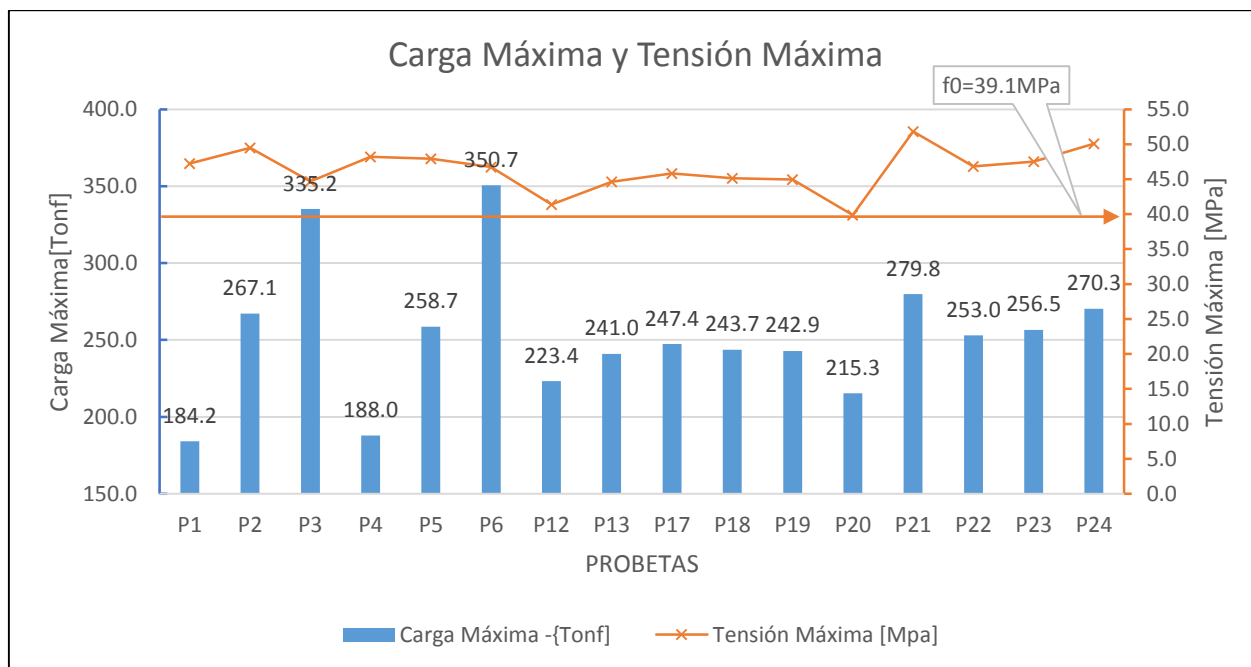


Figura 4.15. Carga máxima y Tensión máxima probetas sin pre-tracción

De la Figura 4.15 se observa de las probetas en relación a la carga máxima, que esta está relacionada directamente con el área transversal, observándose un aumento de la capacidad de carga en relación al aumento del área transversal (probetas P1-P2-P3-P4-P5-P6). También se observa que existe un aumento de carga máxima en relación a la cuantía longitudinal (probetas P21-P22-P23-P24), en relación al confinamiento se observa que este no provee un aumento significativo en relación a la capacidad de carga máxima, esto se debe a que este grupo de probetas tiene un bajo índice de confinamiento⁶ (Figura 4.56).

Se observa de la probeta P21, que un detallamiento más restrictivo en cuanto al pandeo de las barras longitudinales (la traba amarra estribo y barra longitudinal) provee una capacidad de carga mayor en relación a las probetas con 8 barras longitudinales, pues retrasa el pandeo y la posterior pérdida de recubrimiento.

La probeta P12 presenta una carga máxima menor que sus probetas similares, esto se podría deber al efecto de la esbeltez, mientras que la P20 también presenta un descenso de la carga máxima hecho que podría deberse a la abertura brusca de los estribos ver (Figura 4.9), pero se observa del archivo de video del ensayo que la abertura de los estribos ocurre de forma gradual. Tal vez la pérdida de capacidad se deba a una menor resistencia del hormigón (Tabla 2.1) en relación a la dispersión de datos, o podría deberse a lo expuesto en 4.1.2.1, en relación a que esta probeta presentó zonas traccionadas y comprimidas al inicio del ensayo, posiblemente por algún tipo de asimetría en las barras longitudinales o un apoyo no parejo de las caras de la probeta con la prensa.

⁶ Según Cusson & Paultre (1995) un bajo índice de confinamiento es menor al 5%.

En términos de tensiones máximas se observa que todas las probetas al tener armadura longitudinal, presentan una tensión mayor que la de los cilindros de hormigón, $f_0=39.1\text{Mpa}$, como era de esperar.

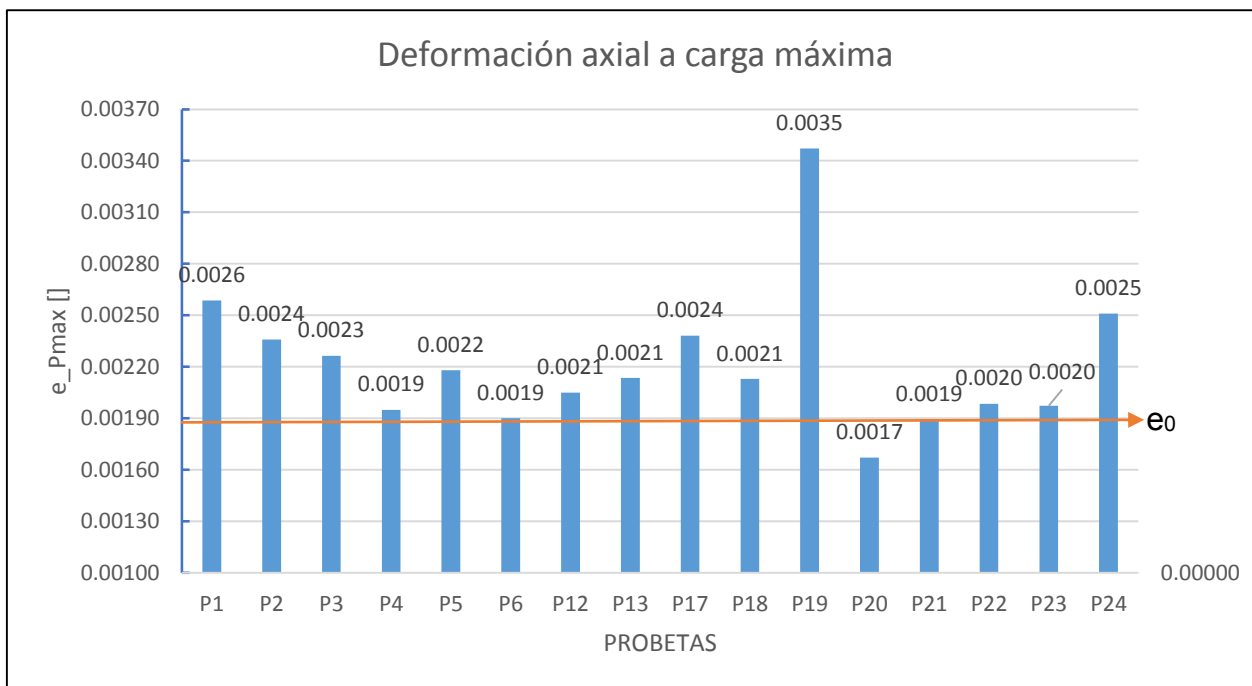


Figura 4.16. Deformación axial en carga máxima

e_0^7 : deformación de cilindros de hormigón.

De la Figura 4.16 no se observa un aumento de la deformación en el máximo de capacidad de carga en relación al confinamiento, hecho que se debe posiblemente a que todas las probetas poseen un bajo índice de confinamiento.

Se observa que la probeta P20 tiene una menor deformación axial en el máximo de carga. Hecho que se podría relacionar con su baja carga máxima, por lo cual la hipótesis de que la construcción de la probeta haya sido con un hormigón de menor calidad podría ser posible.

La mayor deformación de la probeta P19 se debe simplemente a que los sensores individuales registraron valores muy distintos, por lo cual el promedio no es representativo (ver Figura 4.24)

⁷ En el trabajo de Polanco (2012) se ensayaron cilindros con dimensiones iguales a los ensayados para obtener f_0 , los cuales mostraron que en promedio la deformación en el máximo de carga es de 0.0019.

4.2.1.2.COMPORTAMIENTO PREVIO A CARGA MÁXIMA

Al analizar las curvas carga deformación axial para las probetas sin pre-tracción se observa que algunas probetas presentan una Rigidez⁸ distinta a la teórica en el rango lineal de deformaciones tal como se muestra en Figura 4.17 y en la Tabla 4.2, la Rigidez del hormigón armado en el rango lineal elástico de deformaciones es calculado como sigue :

-Equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones:

Equilibrio de fuerzas

$$\sum Fx = \int \sigma_h * dA + \sum_i \sigma_s * A_s = P \quad \text{Ecuación [4.8]}$$

Rango Elástico de deformaciones

$$\sigma_h = E_h * \varepsilon_h \quad \text{Ecuación [4.9]}$$

$$\sigma_s = E_s * \varepsilon_s$$

-Reemplazando [4.9] en [4.8] y dividiendo por el área total

$$\varepsilon_h = \varepsilon_s \rightarrow P = E_h * \varepsilon_h * A_h + E_s * \varepsilon_s * A_s$$
$$P = E_h * \varepsilon_h * A_h + E_s * \varepsilon_s * A_s = \varepsilon_{prom} * [A_s * E_s + A_h * E_h] = P \quad \text{Ecuación [4.10]}$$

-De donde se deduce que la rigidez de hormigón armado en el rango elástico de deformaciones es:

$$K = A_s * E_s + A_h * E_h \quad \text{Ecuación [4.11]}$$

En base a la ecuación [4.11] se calcula la rigidez para las probetas sin pre-tracción, las que se observan en la Tabla 4.2, experimentalmente se calculan las rigideces a una deformación axial del 0.00075, cuya deformación está dentro del rango lineal de deformaciones axiales (Figura 4.37).

⁸ Se entiende por Rigidez axial $K=EA/L$, en este caso se representa como $E*A$ del gráfico carga-deformación, entendiendo que el largo es constante para todas las probetas (excepto P12).

Tabla 4.2. Rigidez teórica y Rigidez experimental para probetas sin pre-tracción

Probeta	Nomenclatura	P_0.00075	e_0.00075	Rigidez Exp [Tonf]	Rigidez teórica [Tonf]	Error [%]
P1	TH100TOCOW130	85.8	0.00075	114400.0	120458.3	5.0%
P2	TH100TOCOW180	121.5	0.00075	162000.0	156458.3	3.5%
P3	TH100TOCOW250	165	0.00075	220000.0	206858.3	6.4%
P4	TH100TOCA100W130	85.8	0.00075	114400.0	120458.3	5.0%
P5	TH100TOCA100W180	124.2	0.00075	165600.0	156458.3	5.8%
P6	TH100TOCA100W250	161.25	0.00075	215000.0	206858.3	3.9%
P13	TH100TOCA150W180	97.2	0.00075	129600.0	156458.3	17.2%
P17	TH100TOCM150W180	83.7	0.00075	111600.0	156458.3	28.7%
P18	TH100TOCM100W180	113.4	0.00075	151200.0	156458.3	3.4%
P19	TH100TOCM100W180	59.4	0.00075	79200.0	156458.3	49.4%
P20	TH100TOCA2100W180	81	0.00075	108000.0	156458.3	31.0%
P21	TH100TOCD1100W180	113.4	0.00075	151200.0	165411.1	8.6%
P22	TH100TOCD2100W180	113.4	0.00075	151200.0	165411.1	8.6%
P23	TH100TOCE1100W180	75.6	0.00075	100800.0	165411.1	39.1%
P24	TH100TOCE2100W180	113.4	0.00075	151200.0	165411.1	8.6%

Donde:

P_0.00075: Carga a una deformación axial de 0.00075

e_0.00075: Deformación axial al 0.00075.

Error: error respecto Elasticidad promedio.

■ representa aquellos errores de rigidez sobre un 10%.

Gráficamente se observa:

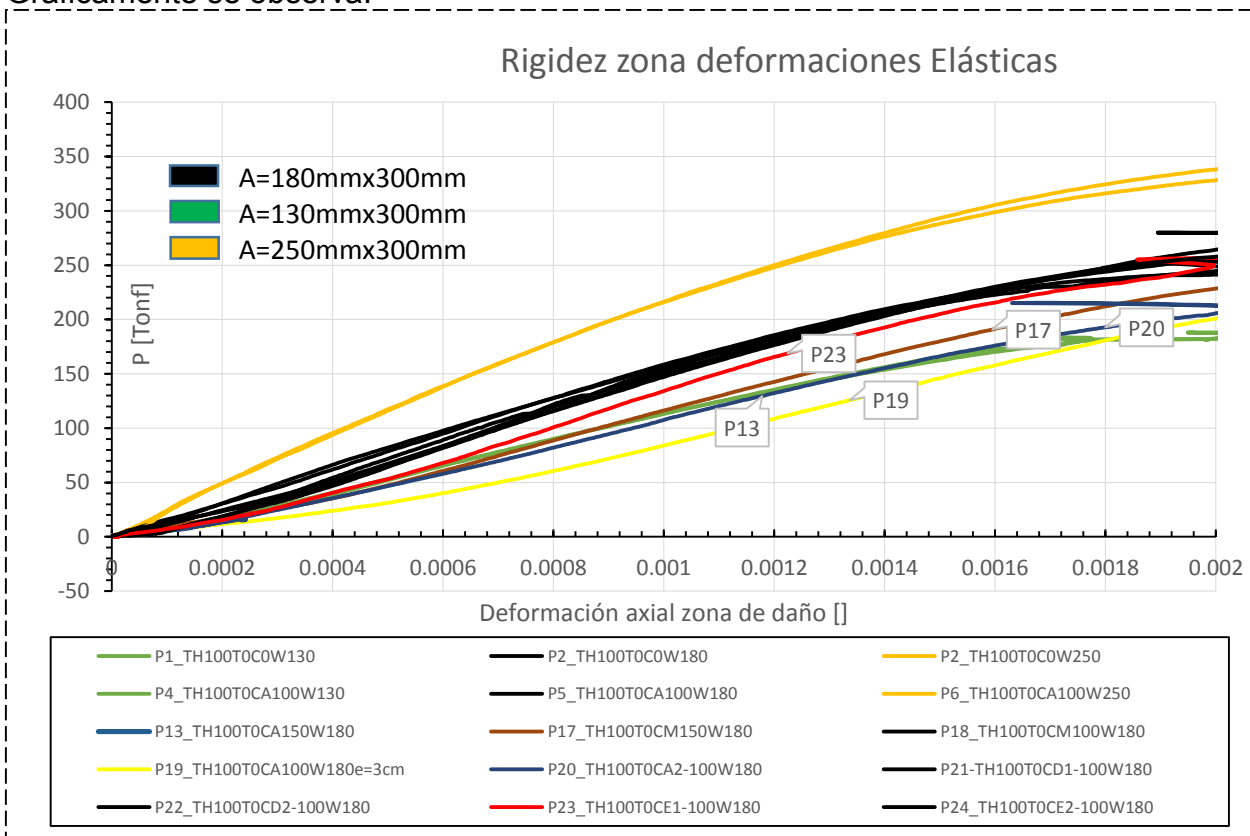


Figura 4.17. Rigidez en zona de deformaciones elásticas

Observando la Figura 4.17, es posible apreciar que P13-P17-P17-P20-P23 se alejan de las curvas representativas para las probetas con ancho de 180mm, por lo cual se analiza las posibles causas de esta pérdida de rigidez en estas probetas. Cabe destacar que las restantes probetas muestran resultados acordes. Las probetas con ancho de 300mm son las que presentan la mayor rigidez y las probetas con 130mm son las que presentan la menor rigidez (excluyendo a las probetas con pérdida de rigidez).

La probeta P19, es una de las probetas que presenta pérdida de rigidez, y es la que se diseñó con una excentricidad en la aplicación de la carga axial, por lo cual se analizará mediante un análisis seccional⁹ la existencia de alguna relación en la pérdida de rigidez con la excentricidad de la carga axial en el rango elástico de deformaciones, todo esto para poder explicar la posible disminución de la rigidez en las probetas P13-P17-P20-P23 y P19.

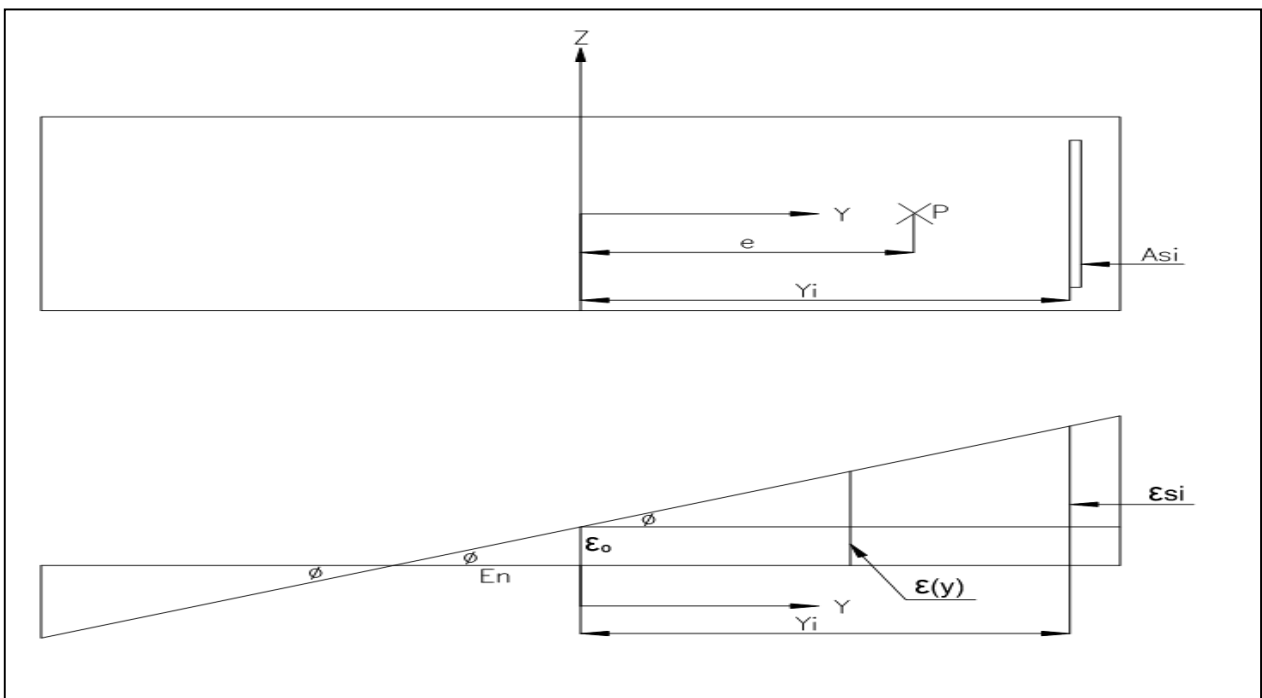


Figura 4.18. Análisis seccional, probetas con excentricidad en la aplicación de la carga axial.

Donde:

ϵ_{si} : deformación de la capa i -ésima de armadura longitudinal

As_i : capa de armadura i -ésima

Y_i : distancia al centroide de la sección de la capa de armadura i -ésima

E_n : distancia del centroide al eje neutro de la sección

ϵ_0 : deformación producida por la carga axial concéntrica

ϕ : curvatura de la sección.

e : excentricidad de la carga axial

P : carga axial

I : inercia, sobre el eje que se considera la excentricidad

⁹ Solo se expondrá el resultado final de este análisis.

Luego del análisis de obtiene como resultado la siguiente expresión

$$P = \varepsilon_h(y) * \left(\frac{E_h * A_h + E_s * \sum_i A_{si} * \left(1 + \frac{y_i}{\left(1 + \frac{-E_h * I + E_s * \sum_i (y_i^2 - e * y_i) * A_{si}}{e * E_h * A_h + E_s * \sum_i (e - y_i) * A_{si}} \right)} \right)}{\left(1 + \frac{y}{\left(1 + \frac{-E_h * I + E_s * \sum_i (y_i^2 - e * y_i) * A_{si}}{e * E_h * A_h + E_s * \sum_i (e - y_i) * A_{si}} \right)} \right)} \right) \quad \text{Ecuación [4.12]}$$

La carga promedio de los 4 sensores LVDTs, se ubica en $y=0$ (centroide de la sección), además al ser una sección simétrica los términos en la sumatoria Y_i se anulan, por lo que queda

$$P = \varepsilon_h(y) * (E_h * A_h + E_s * \sum_i A_{si}) \quad \text{Ecuación [4.13]}$$

Observándose que la rigidez de la probeta no depende de la aplicación de la carga axial al tomarse en el centroide de la sección, y tiene como valor el mismo expresado en la ecuación [4.11].

Otro hecho que avala lo antes expuesto, con un análisis más detallado, es el efectuado por Herrera (2013), él modeló la respuesta analítica tensión-deformación axial mediante un modelo de fibras basado en Opensees a una sección con excentricidad en la carga axial, en la Figura 4.19 se observa el modelo de respuesta para P5 y P19 comparando la excentricidad de la aplicación de la carga axial, observándose una misma Elasticidad¹⁰ para probetas con distinta excentricidad.

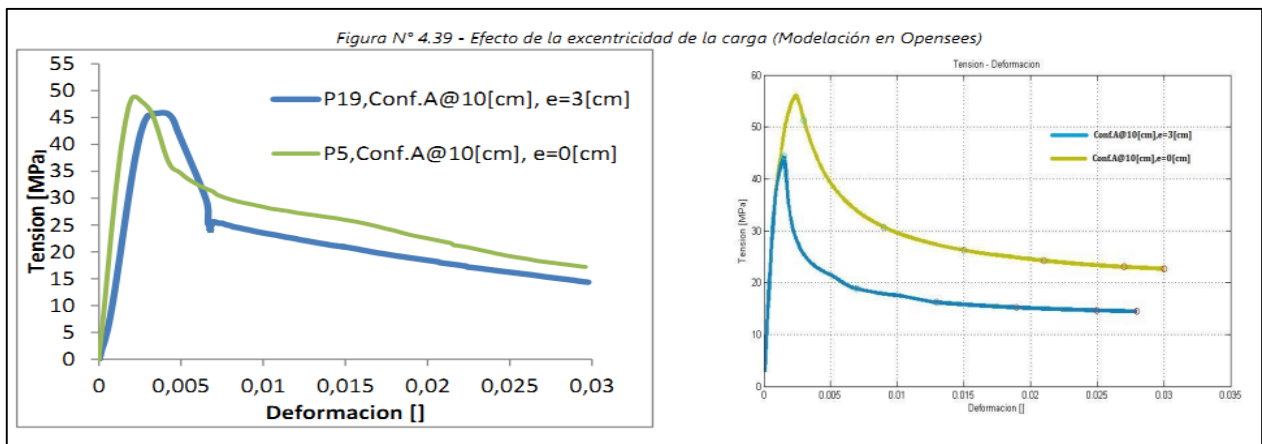


Figura 4.19. Modelo Opensees efectuado por Herrera (2013) para probetas con excentricidad. izquierda : datos experimentales / derecha : modelo en Opensees

¹⁰ En este caso se presentaron los resultados con curvas Tensión-deformación, de igual forma la rigidez expresada como $E * A$ se representa en esta curvas como una misma elasticidad.

Por lo descrito anteriormente, queda descartada una excentricidad accidental para explicar este comportamiento distinto en estas 5 probetas.

A continuación se analizan los sensores individuales para las probetas que presentaron una rigidez experimental menor a la teórica. (Diferencia sobre un 10%).

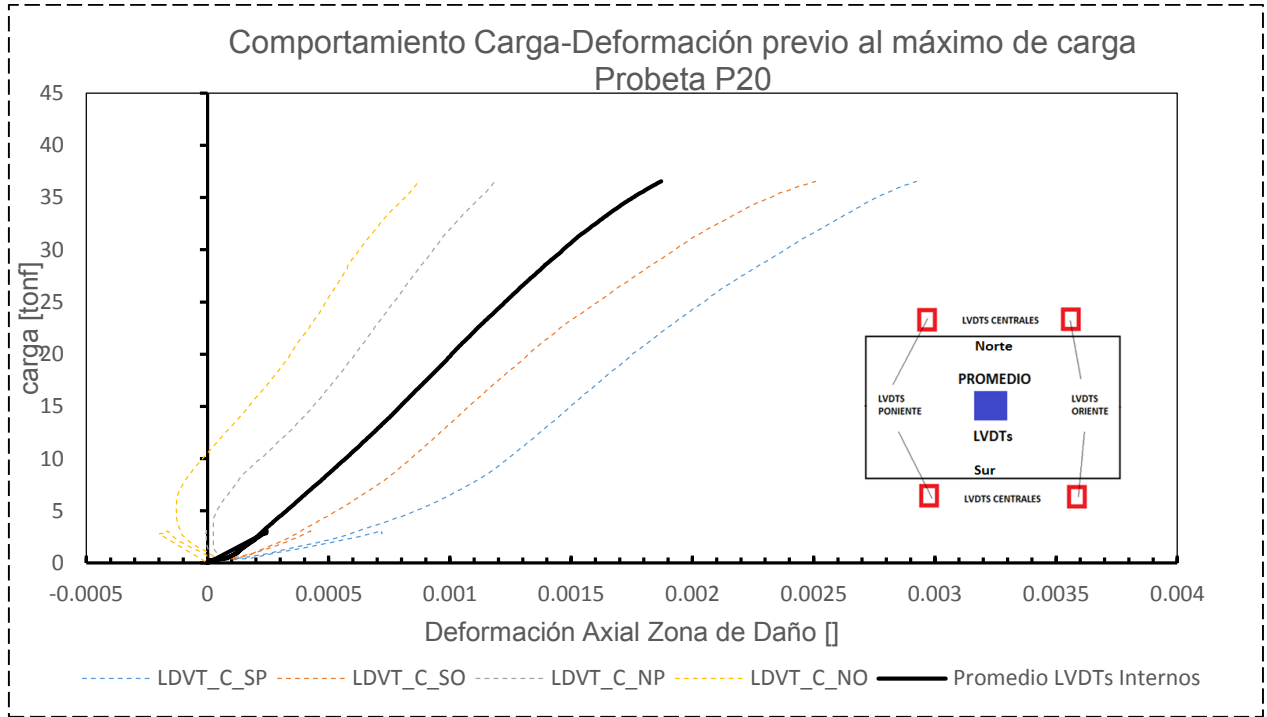


Figura 4.20. Curvas Carga deformación axial sensores LVDTs en zona central probeta P20

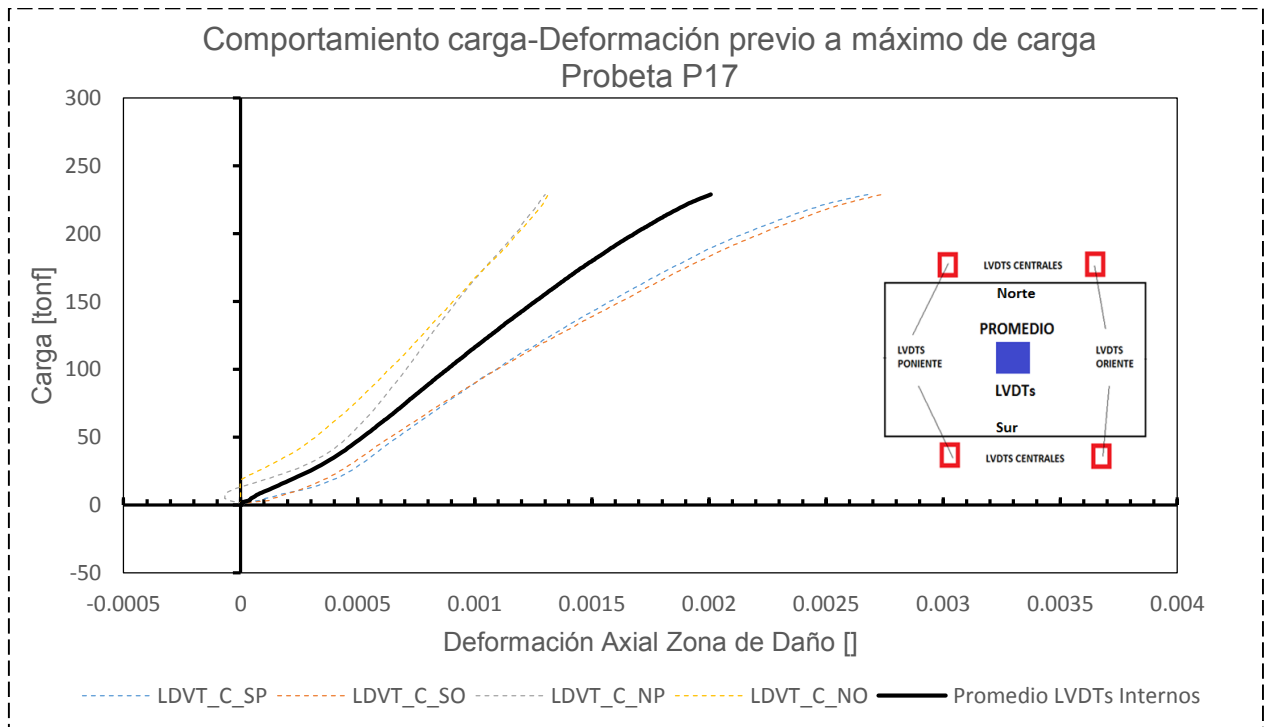


Figura 4.21. Curvas carga deformación axial sensores LVDTs en zona central probeta P17

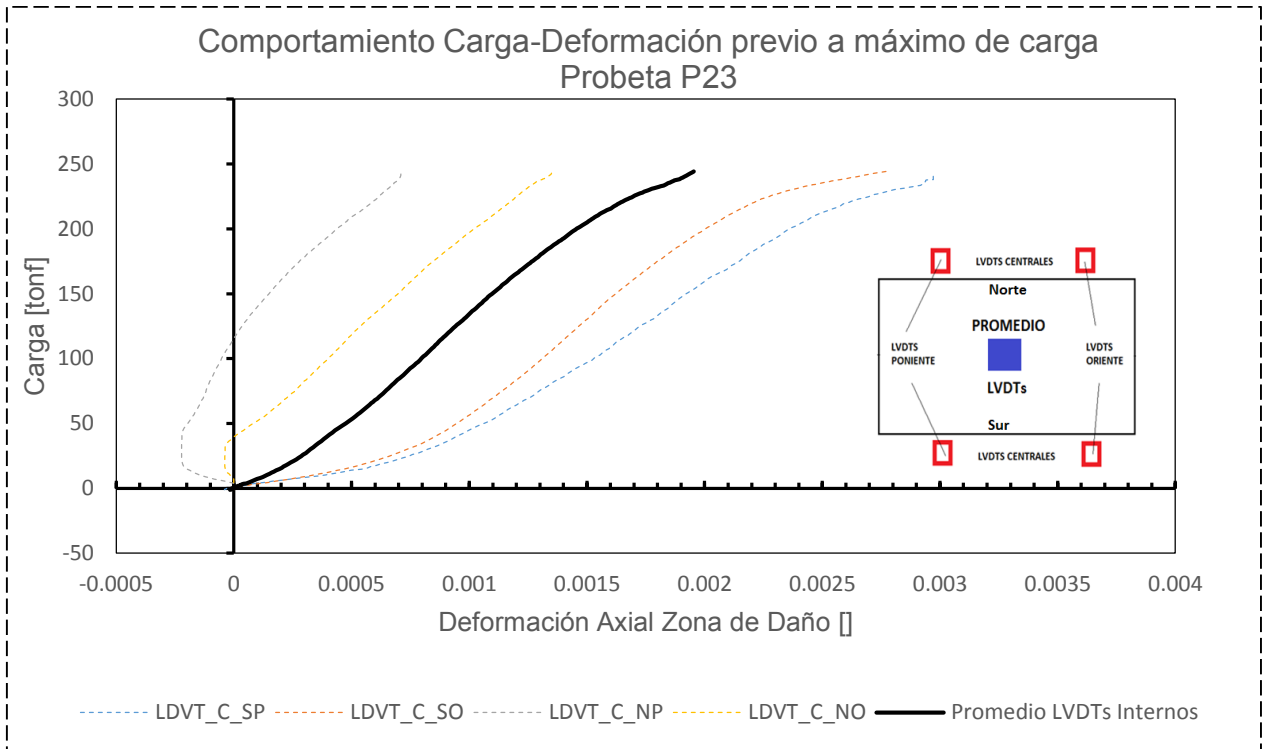


Figura 4.22. Curvas Carga deformación axial sensores LVDTs en zona central probeta P23

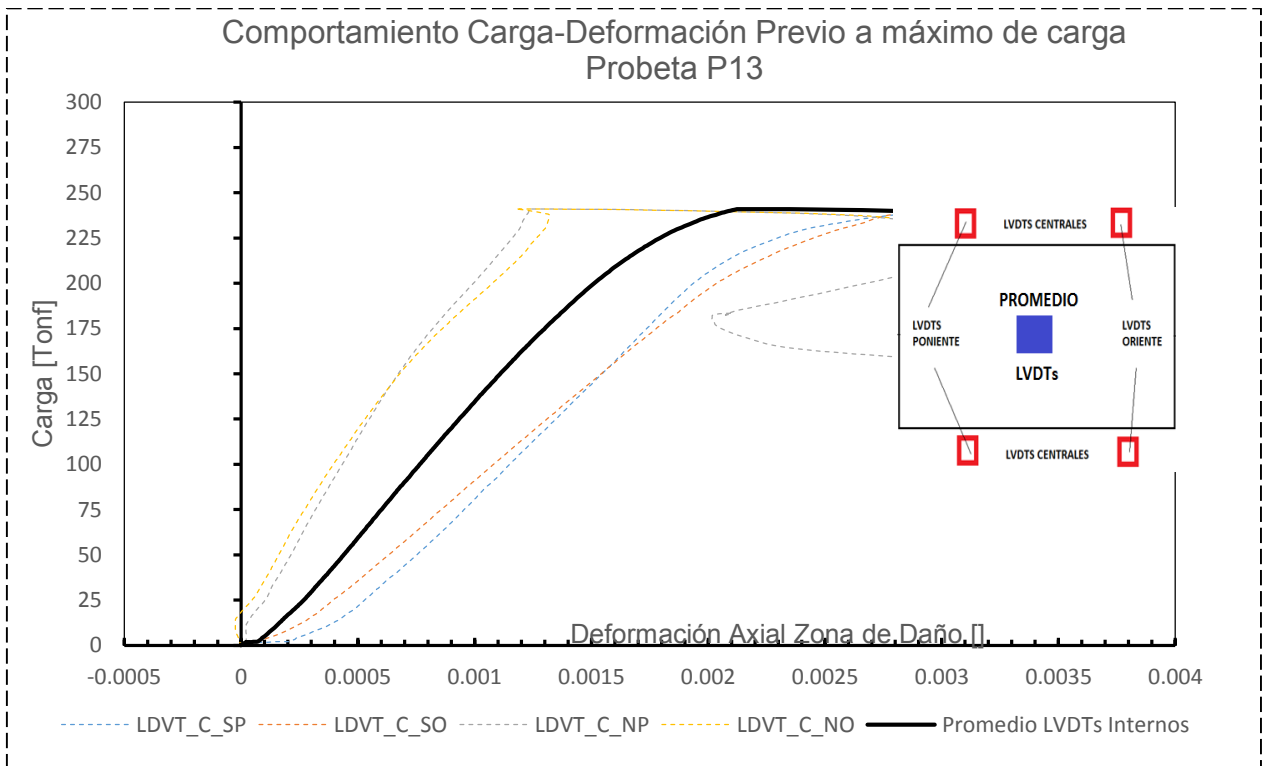


Figura 4.23. Curvas carga deformación axial sensores LVDTs en zona central probeta P13

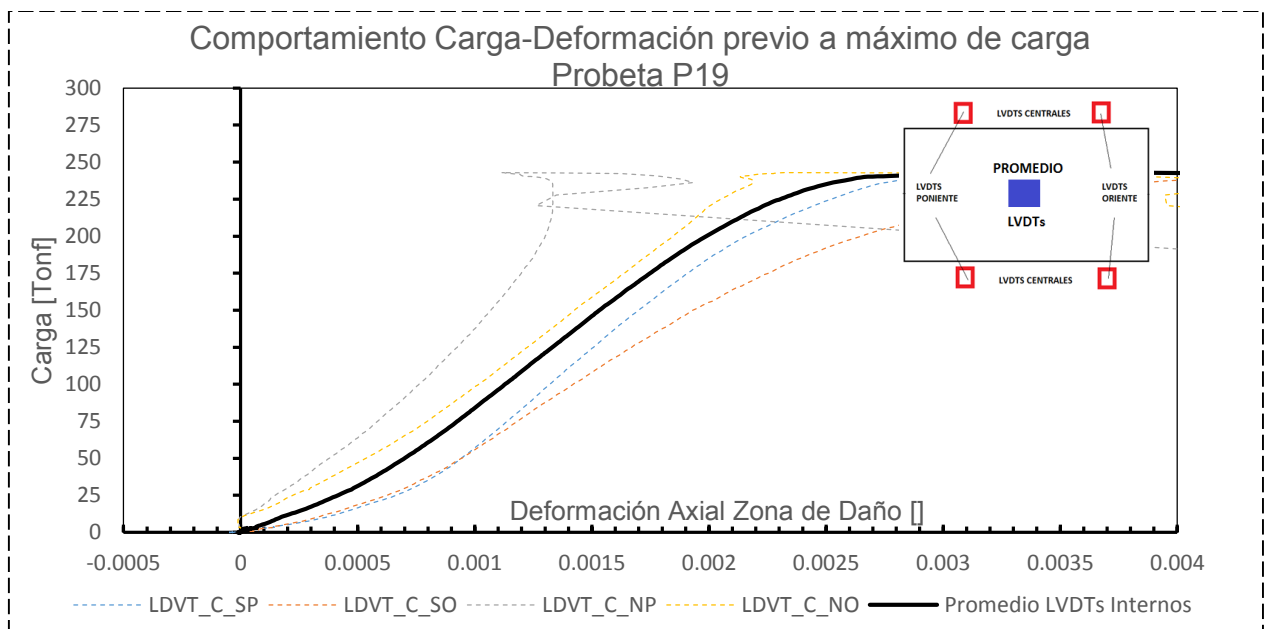


Figura 4.24. Curvas carga deformación axial sensores LVDTs en zona central probeta P19

De la Figura 4.20 la Figura 4.24 se observa comportamientos similares en cuanto a registro de sensores, se aprecia que una zona se tracciona (registros negativos), y otra zona se comprime (registros positivos) para deformaciones axiales bajas, este comportamiento se observa solo en estas probetas (ver Anexo B).

Este comportamiento podría ser explicado por varias causas, entre las cuales se destacan que las barras longitudinales en la construcción no hayan quedado simétricas lo cual implicaría que la tensión no se distribuya simétricamente y se perdiese rigidez (Ecuación [4.12]). Otro factor podría ser que la superficie de contacto de la probeta con las placas de la prensa no hubiese quedado completamente apoyada ocasionando concentraciones de tensiones sobre el área de apoyo.

Otra hipótesis podría ser la pérdida prematura de hormigón perimetral, con lo cual se hubiese perdido área y en consecuencia se haya creado una excentricidad de la carga axial, al revisar los videos y fotografías se observa que esto no ocurrió por lo cual queda descartada esta hipótesis.

La posible explicación anterior matemáticamente se avala, pues la rigidez $k=EA/L$ es directamente proporcional al área, donde en este caso la rigidez quedaría representada como:

$$K = \frac{E_h * A_h + E_s * A_s * (A_h + A_s)}{A_h + A_s * L} = \frac{E_h * A_h + E_s * A_s}{L} \tag{Ecuación [4.13]}$$

Y una pérdida de área traería consigo una pérdida de rigidez.

Sin embargo no se aprecia que el comportamiento explicado haya alterado la capacidad de carga máxima en relación a la disminución de la rigidez, por lo cual tal vez podría ser solo una toma errónea de los registros por parte de los sensores..

4.2.1.3.COMPARACIÓN PROBETAS SIN PRE-TRACCIÓN

En esta sección se compara el comportamiento carga-deformación axial en relación a las distintas variables de la matriz de ensayos. Los resultados son el promedio de los sensores LVDTs, por lo cual representan los resultados en el centro de la probeta.

i. Probetas sin confinamiento central , con distinto ancho

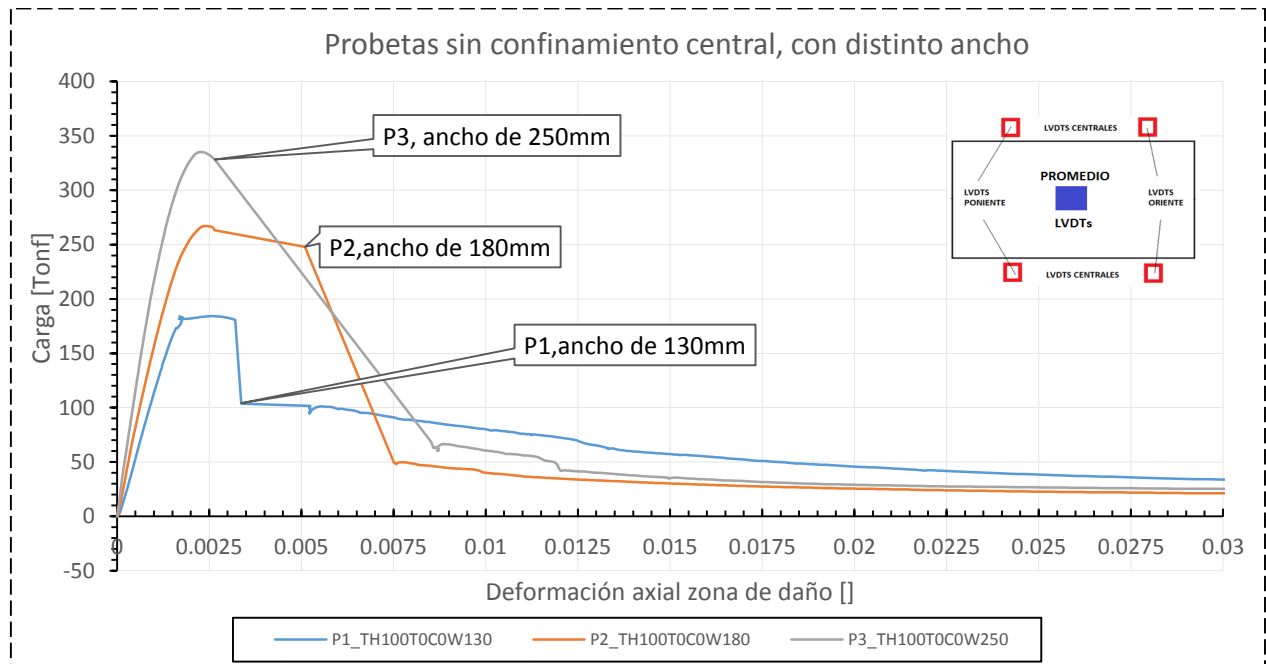


Figura 4.25. Probetas con distinto ancho, sin confinamiento en zona central

De la Figura 4.25 se observa que la rigidez aumenta acorde al aumento del ancho, la carga máxima también aumenta en relación al ancho de la probeta, estos hechos se verifican pues ambos dependen del área de la sección.

La deformación en el máximo de carga es similar para las 3 probetas pues esta depende principalmente de la armadura longitudinal la cual otorga ductilidad, pasado el máximo de carga se aprecia un descenso brusco de la capacidad de carga, hecho debido a la ausencia de confinamiento provocando una falla frágil. Para grandes deformaciones (superiores al 1%) prácticamente ha disminuido la capacidad de carga en un 90%.

ii. Probetas con confinamiento central , con distinto ancho

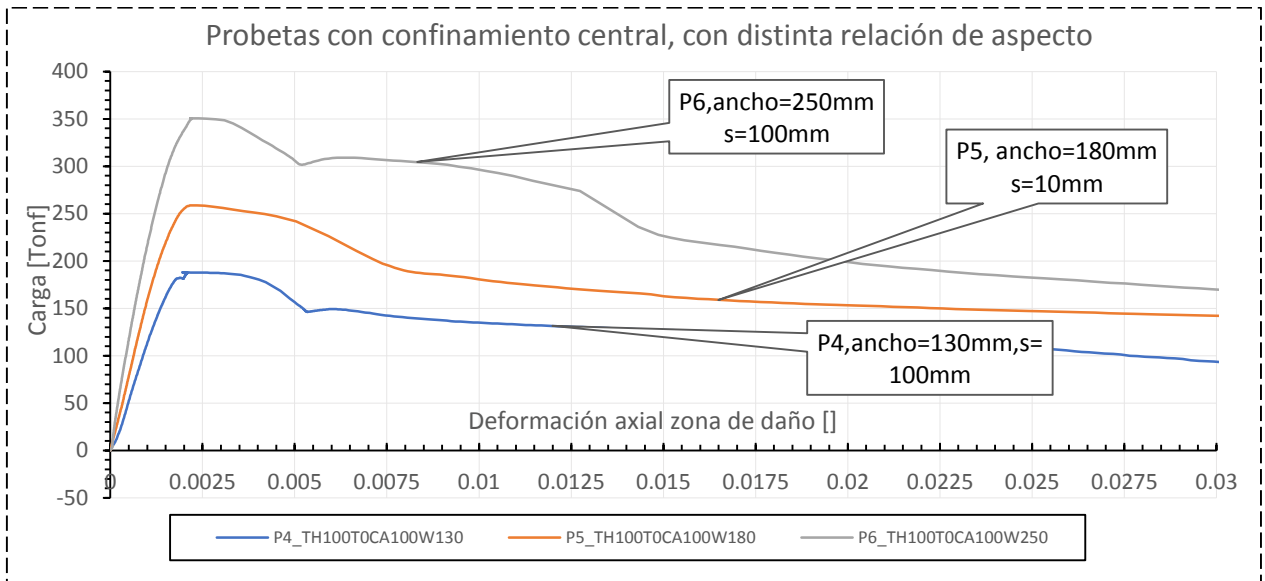


Figura 4.26. Probetas con distinto ancho, con confinamiento en zona central

Se observa de la Figura 4.26 y en relación a la Figura 4.25, un pequeño aumento de la deformación en el máximo de carga, como de la carga máxima. Este hecho es atribuible al confinamiento, este aumento es pequeño ya que el índice de confinamiento es pequeño, posterior al máximo de carga si se observan diferencias en relación a la Figura 4.25, la presencia de estribos retrasa la degradación a medida que aumenta la deformación axial, el nivel de pérdida de carga es similar para las 3 probetas P4-P5-P6 pues presentan espaciamientos de estribos $s=100\text{mm}$, teniendo un índice de confinamiento similar.

iii. Probetas con distinto nivel de confinamiento

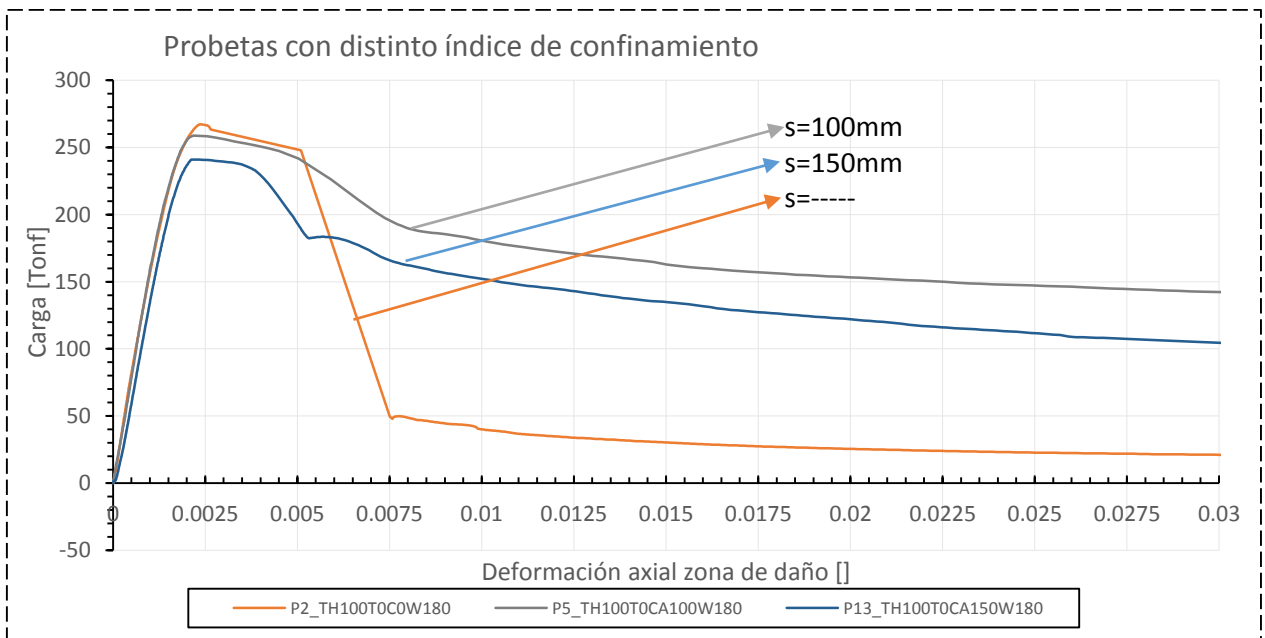


Figura 4.27. Probetas con distinto nivel de confinamiento

De la Figura 4.27 se observa que el nivel de confinamiento tiene gran relevancia en la respuesta pasado el máximo de carga (degradación), observándose que la velocidad de degradación¹¹ es significativamente más lenta para las probetas con confinamiento, esto se debe a que la armadura de confinamiento retrasa el pandeo de barras longitudinales, aumentando la ductilidad de las probetas.

iv. Probetas con distinta calidad de armadura de confinamiento

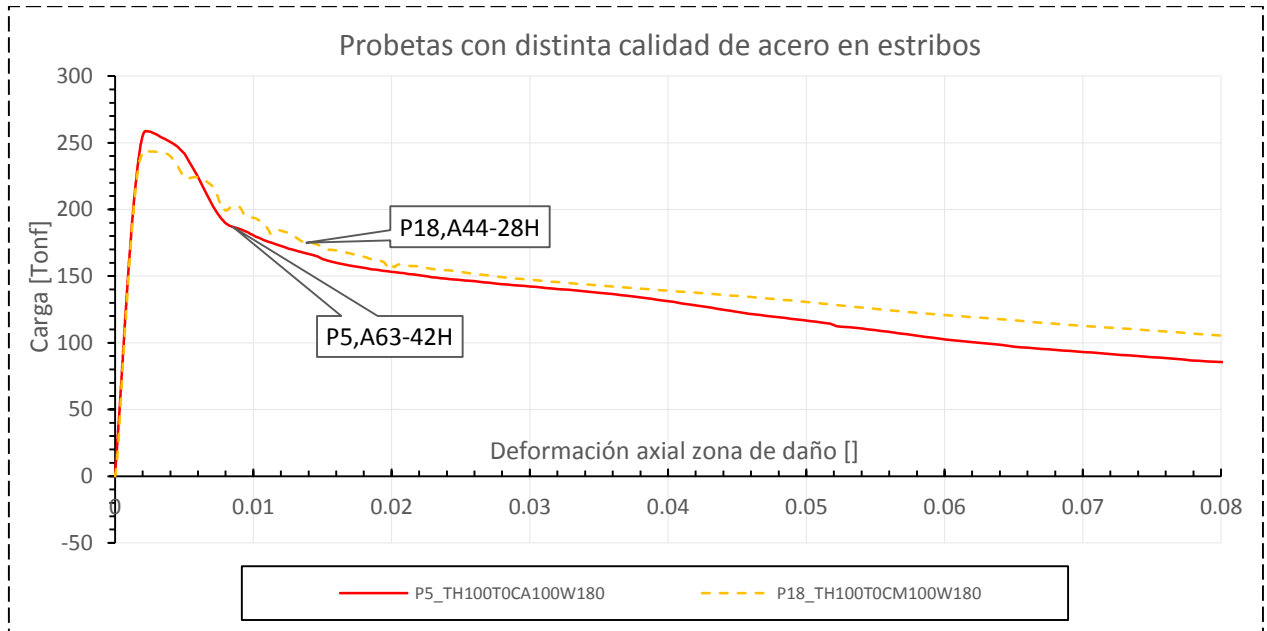


Figura 4.28. Probetas con distinta calidad de armadura de confinamiento

Es posible apreciar de la Figura 4.28 que una calidad diferente de armadura de confinamiento no otorga diferencias significativas antes del máximo de carga, se aprecia sin embargo que el nivel de degradación es más lento para la armadura de menor calidad, lo cual no es acorde al fenómeno físico de expansión de estribos, pues una armadura de mayor calidad aporta una mayor resistencia a contener el pandeo de las barras longitudinales, pues su deformación de fluencia es mayor.

Se aprecia de los sensores Strain gauges en los estribos (ver sección 4.2.1.8), que estos fluyeron para altas deformaciones axiales sobre el 2%, por lo cual las diferencias se deberían apreciar en este rango de deformaciones hecho no apreciable en el gráfico, por lo cual esta diferencia se podría deber a que al promediar los sensores se perdió el comportamiento esperado.

¹¹ Se entiende a velocidad de degradación como la relación entre la pérdida de carga a medida que aumenta la deformación axial en la zona de degradación.

v. Probetas con distinto detallamiento de armadura transversal

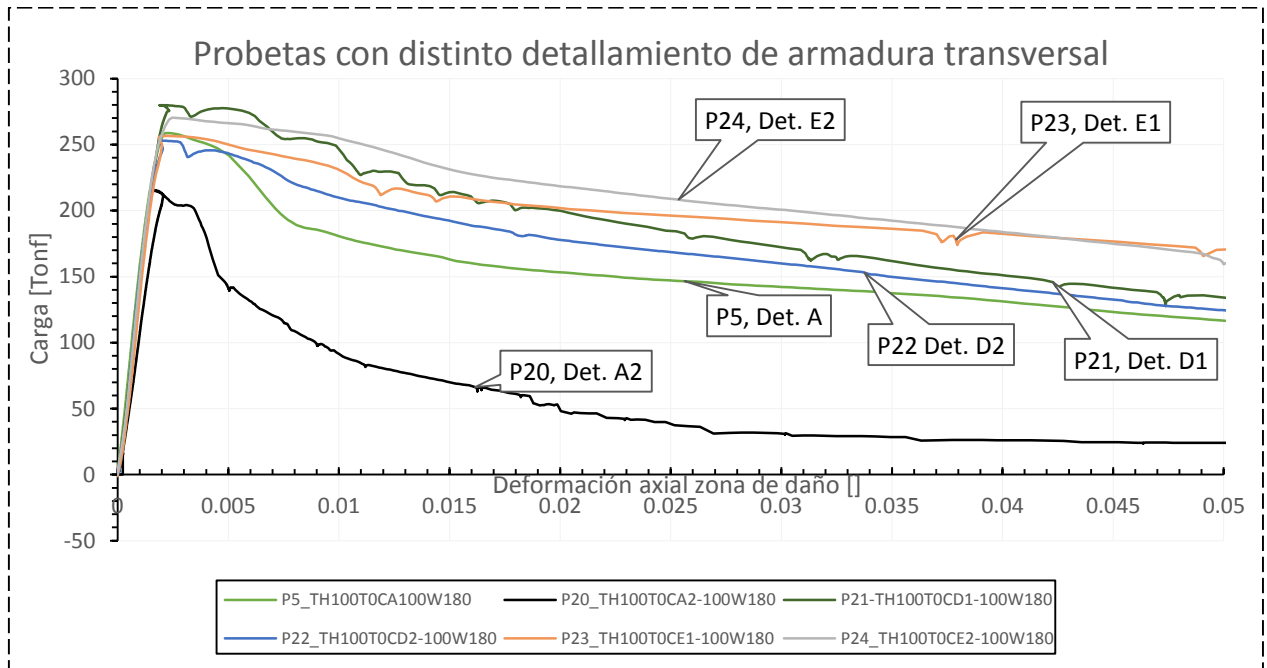


Figura 4.29. probetas con distinto detallamiento de armadura transversal

Se aprecia de la Figura 4.29 que el detallamiento A2 se comporta casi como si no confinase la zona central, ya que las fotografías indican que los ganchos de los estribos se abrieron (Figura 4.9), no otorgando confinamiento.

Los detallamientos restantes confinaron mejor el núcleo de hormigón y retrasaron la pérdida de carga comparados con el detallamiento estándar A (ACI-318). Se observa que al agregar más trabas en el interior de los estribos (E1 y E2 2 trabas, D1 y D2 1 traba), estos disminuyen la velocidad de degradación, hecho debido al aumento del coeficiente de confinamiento. El detallamiento D1 confinó de mejor forma que D2, pues en este la traba amarra tanto estribo como barras longitudinales.

vi. Probetas con distinta esbeltez

A continuación se compara el comportamiento tensión deformación axial para probetas con distinta esbeltez, la probeta P11, solo se registraron deformaciones hasta el máximo de carga, ya que esta probeta no fue instrumentada con sensores externos.

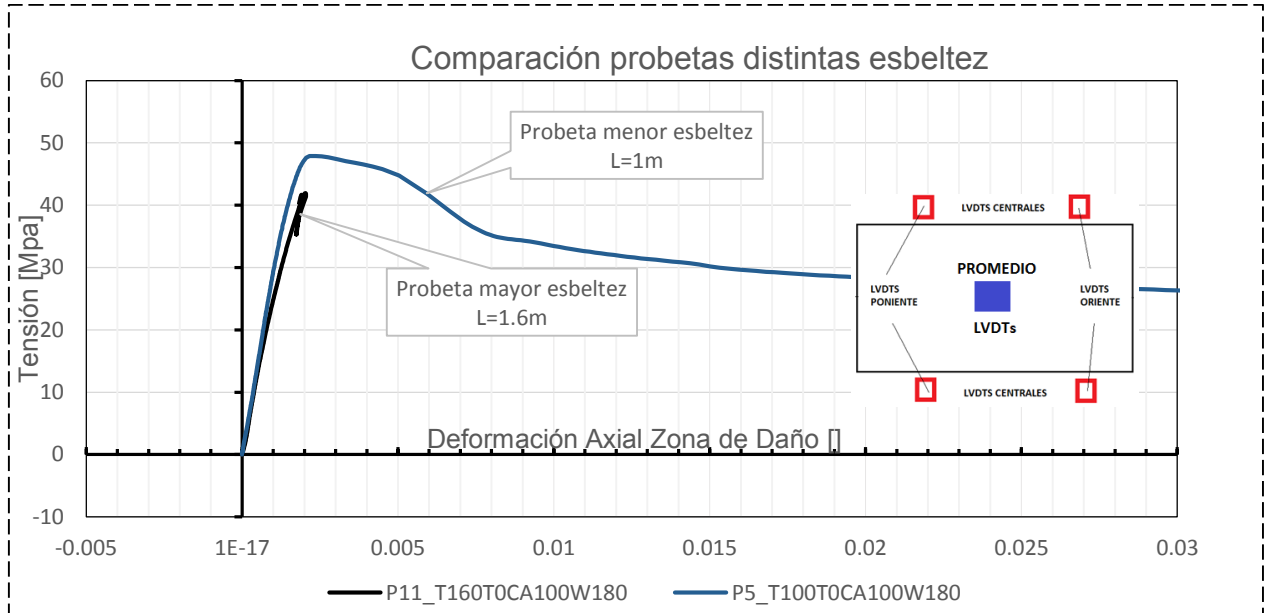


Figura 4.30. probetas con distinta esbeltez

De la Figura 4.30 se observa un cambio de rigidez aproximadamente para 25 MPa, esto podría deberse a una pérdida prematura del hormigón perimetral en alguna de las caras de la probeta lo cual hizo que se perdiera área y por consiguiente rigidez.

De la Figura 4.117 se observa que aproximadamente para 25MPa los sensores individuales LVDTs centrales de la probeta P12 muestran mayor variación en su deformación axial, hecho que podría afirmar lo antes comentado.

A diferencia de las probetas P19-P13-P20-P23 esta probeta si presenta una rigidez similar durante aproximadamente el 60% de su carga máxima comparada con su símil P5, por lo cual si es aceptable que una pérdida prematura de hormigón perimetral cambie la rigidez de esta probeta.

4.2.1.4.COMPORTAMIENTO POSTERIOR A CARGA MÁXIMA

La velocidad de degradación posterior al máximo de carga es importante, pues da a conocer el nivel de pérdida de carga a medida que aumenta la deformación axial. Dado que la curva carga-deformación axial es no lineal para ese rango de deformaciones, es difícil estimar una velocidad de degradación, por lo cual una forma sencilla de cuantificar este nivel de degradación es fijar una deformación luego del máximo de capacidad de carga y asumir linealidad en la curva, como metodología para estimar este punto de alta deformación axial, se calcula a una deformación axial de 0.006 luego de la deformación en el máximo de carga. ($e_{cc}+0.006$).

Se adopta esta metodología para poder incluir en la comparación a las probetas con pre-tracción, ya que estas probetas presentan un comportamiento carga-deformación axial diferente a las probetas sin pre-tracción (ver sección 4.2.2) y podría ser no apropiado comparar la degradación a un nivel fijo de deformaciones (por ejemplo al 0.008), por lo cual se define el punto de alta deformación axial como un aumento de deformación axial de 0.006 luego de la deformación en el máximo de carga.

El punto $e_{cc}+0.006$ estará cercano al rango de deformaciones exigido como máxima deformación axial a compresión en muros de H.A definido en DS60¹² (2011).

Gráficamente la velocidad de degradación queda descrita en las siguientes figuras:

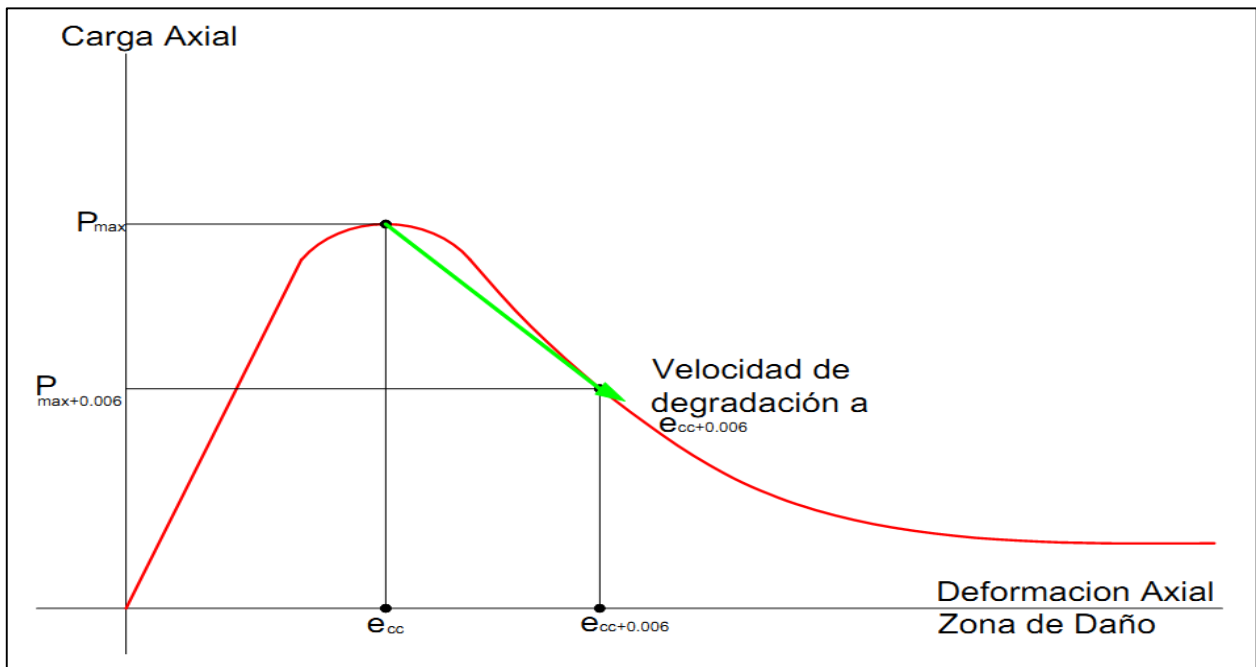


Figura 4.31. Velocidad de degradación a una deformación axial de $e_{cc}+0.006$ probetas sin pre-tracción.

¹² Decreto supremo promulgado posterior al terremoto del 27 de febrero del 2010, en el cual se adoptan nuevas exigencias para el diseño sísmico y cálculo de hormigón armado, se adopta una deformación máxima de un 0.008 en la zona más comprimida en muros de H.A

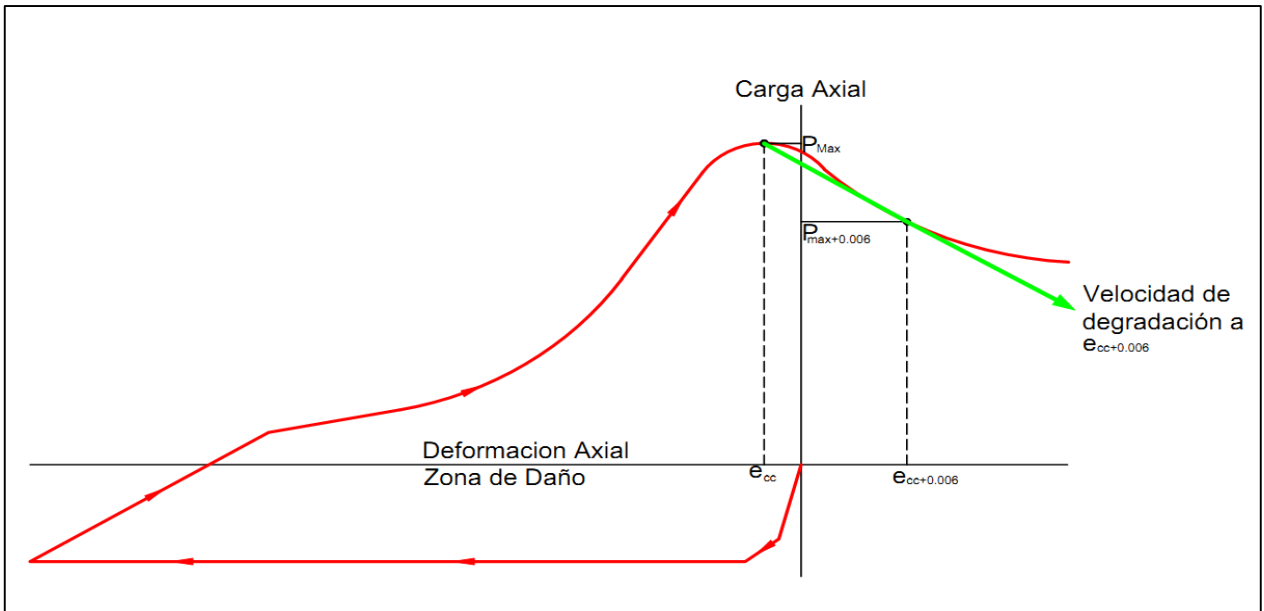


Figura 4.32. Velocidad de degradación a una deformación axial de $e_{cc}+0.006$ probetas con pre-tracción.

Tabla 4.3. Degradación a una deformación axial de $e_{cc}+0.006$.

Probeta	Nomenclatura	Carga Máxima [Tonf]	e_{cc} []	$e_{cc}+0.006$	$P_{e_{cc}+0.006}$	ID ¹³ []
P11	TH160T2CA100W180	243.9	-0.0020	0.0040	232.7	1.00
P10	TH100T2CA100W180	221.2	0.0022	0.0082	209.7	1.02
P24	TH100T0CE2100W180	270.3	0.0025	0.0085	258.5	1.00
P23	TH100T0CE1100W180	256.5	0.0020	0.0080	239.1	1.47
P21	TH100T0CD1100W180	279.8	0.0019	0.0079	254.6	2.13
P22	TH100T0CD2100W180	253.0	0.0020	0.0080	220.4	2.75
P18	TH100T0CM100W180	243.7	0.0021	0.0081	200.4	3.66
P6	TH100T0CA100W250	350.7	0.0022	0.0082	304.4	3.91
P4	TH100T0CA100W130	188.0	0.0019	0.0079	140.7	3.99
P17	TH100T0CM150W180	247.4	0.0024	0.0084	183.2	5.42
P19	TH100T0CA100W180	242.9	0.0035	0.0095	174.7	5.75
P5	TH100T0CA100W180	258.7	0.0022	0.0082	187.8	5.99
P16	TH100T2CA150W180	206.3	0.0004	0.0064	126.0	6.78
P13	TH100T0CA150W180	241.0	0.0021	0.0081	157.6	7.04
P8	TH100T2C0W180	168.7	0.0010	0.0070	71.7	8.19
P1	TH100T0C0W130	184.2	0.0026	0.0086	85.5	8.34
P20	TH100T0CA2100W180	212.8	0.0020	0.0080	108.5	8.80
P9	TH160T2C0W180	198.3	-0.0026	0.0034	30.3	14.18
P7	TH100T1C0W180	226.0	0.0018	0.0078	40.0	15.70
P2	TH100T0C0W180	267.1	0.0024	0.0084	46.8	18.60
P3	TH100T0C0W250	335.2	0.0023	0.0083	112.5	18.80

¹³ Se define el índice de degradación como la velocidad de degradación normalizada por la menor velocidad de degradación.

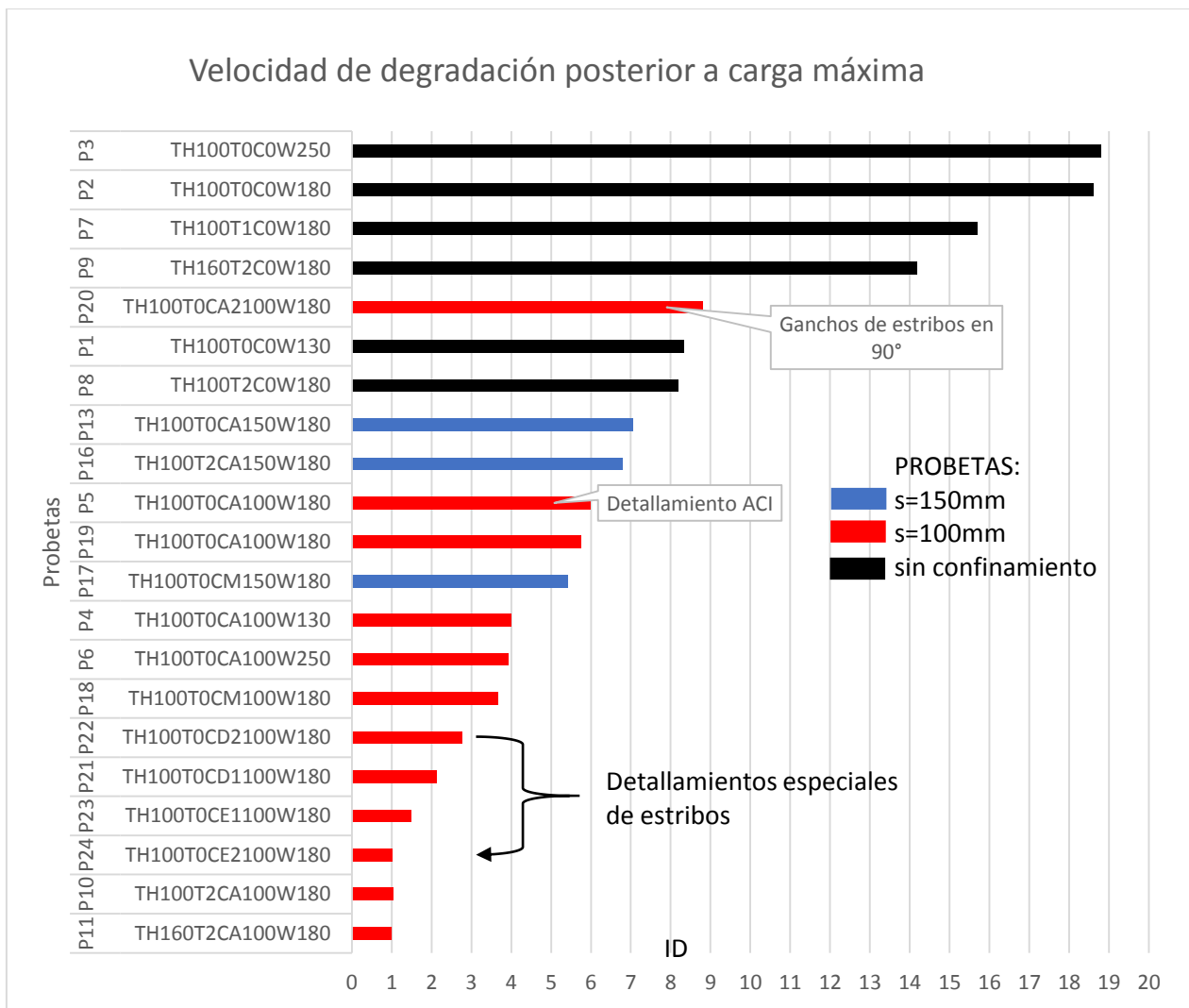


Figura 4.33. Degradación a una deformación axial de $\epsilon_{cc}+0.006$

De la Figura 4.33 se observa que las variables que predominan, son la separación de estribos (ligada a presión de confinamiento), observándose un menor índice de degradación para aquellas con $s=100\text{mm}$ y con detallamientos especiales, casi 2.5 veces más lenta su velocidad comparada con el detallamiento estándar ACI-318.

Para las probetas con espaciado $s=150\text{mm}$ no se aprecia una gran diferencia en relación a la probeta con detallamiento estándar de estribos ACI-318 de espaciado $s=100\text{mm}$.

Las probetas sin confinamiento son aquellas donde se aprecia un mayor índice de degradación, hecho condicionado por la nula ductilidad que poseen luego de la carga máxima donde su resistencia cae bruscamente.

P20 escapa de lo comentado anteriormente ya que los ganchos de terminación de los estribos se abrieron pues estaban en 90° no anclándose al núcleo de hormigón, su velocidad de degradación es en promedio 1.5 veces más rápida que el mismo detallamiento pero con ganchos de terminación de estribos en 135° .

4.2.1.5. COMPORTAMIENTO PROBETAS EN RELACIÓN A DS60

A continuación se presenta el nivel de pérdida de carga para una alta deformación axial de compresión¹⁴. Dicha deformación es importante ya que desde la promulgación del DS60 (21.9.5.4, 2011) post 27F, es exigida como la deformación máxima en compresión de muros esbeltos tipo L, C, T y con la relación de aspecto >3. El fin de esta disposición es restringir el daño y entregarle al muro una capacidad mayor de deformación sin una gran pérdida de capacidad de carga.

Se adopta la misma metodología de la sección 4.2.1.4 para poder comparar las probetas con pre-tracción y sin pre-tracción, si bien la deformación no será de 0.008 si se tendrá una noción de la pérdida de carga para altas deformaciones luego de ecc.

Tabla 4.4. Pérdida de carga a una deformación axial de ecc+0.006

Probeta	Nomenclatura	ecc+0.006	P_ ecc+0.006/Pmax
P9	TH160T2C0W180	0.0034	0.85
P2	TH100T0C0W180	0.0084	0.82
P7	TH100T1C0W180	0.0078	0.82
P3	TH100T0C0W250	0.0083	0.66
P8	TH100T2C0W180	0.0070	0.58
P1	TH100T0C0W130	0.0086	0.54
P20	TH100T0CA2100W180	0.0080	0.49
P16	TH100T2CA150W180	0.0064	0.39
P13	TH100T0CA150W180	0.0081	0.35
P19	TH100T0CA100W180	0.0095	0.28
P5	TH100T0CA100W180	0.0082	0.27
P17	TH100T0CM150W180	0.0084	0.26
P4	TH100T0CA100W130	0.0079	0.25
P18	TH100T0CM100W180	0.0081	0.18
P6	TH100T0CA100W250	0.0082	0.13
P22	TH100T0CD2100W180	0.0080	0.13
P21	TH100T0CD1100W180	0.0079	0.09
P23	TH100T0CE1100W180	0.0080	0.07
P10	TH100T2CA100W180	0.0082	0.05
P11	TH160T2CA100W180	0.0040	0.05
P24	TH100T0CE2100W180	0.0085	0.04

¹⁴ Esta alta deformación axial de compresión es cercana a 0.008

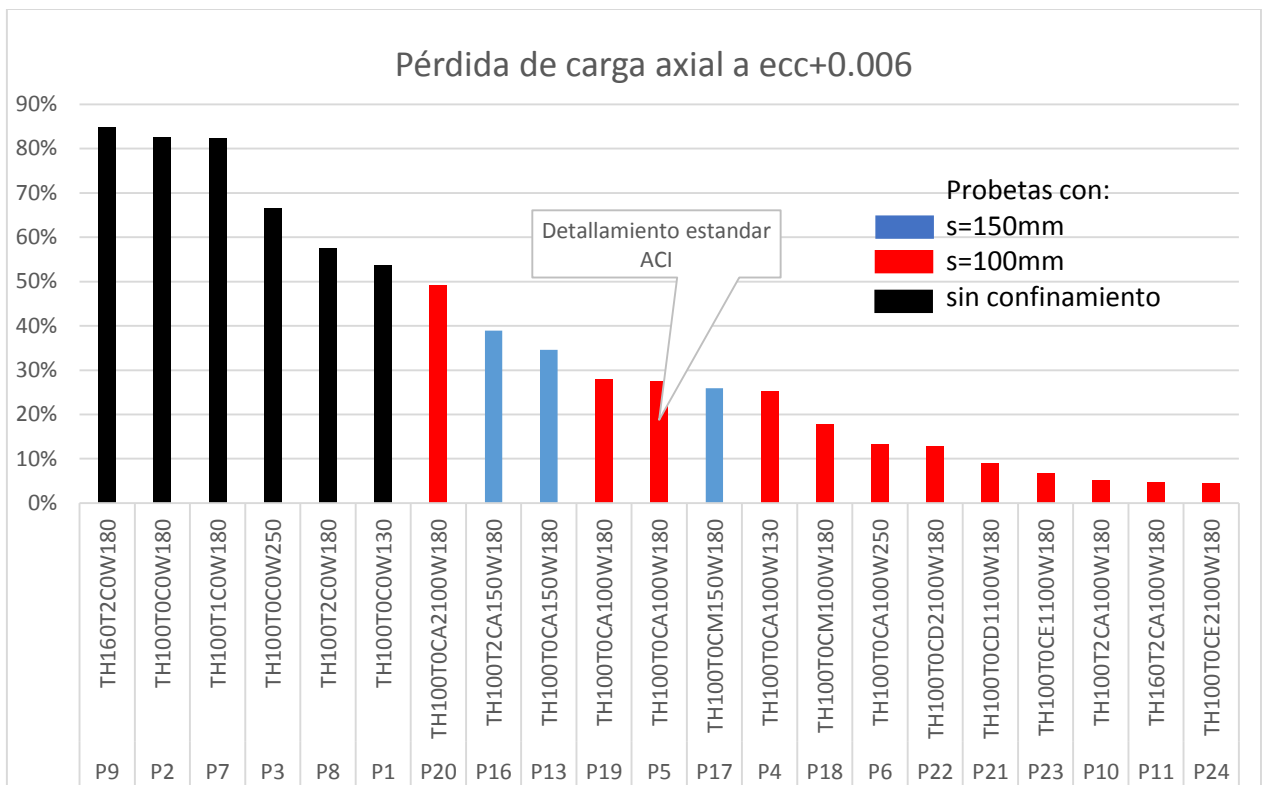


Figura 4.34. Pérdida de carga a una deformación axial al $\text{ecc}+0.006$

Se observa de la Figura 4.34 que para una deformación luego del máximo de carga de 0.006, las probetas que presentan un menor nivel de pérdida de capacidad en relación a su capacidad máxima son aquellas con espaciamiento $s=100\text{mm}$ aproximadamente perdiendo entre un 5%-25% de su capacidad máxima de carga.

Las probetas con espaciamiento $s=150\text{mm}$ pierden aproximadamente entre un 25%-30%, y las probetas sin confinamiento pierden entre un 55%-85% de su capacidad máxima de carga.

También se observa que las probetas más restrictivas en cuanto a pandeo de barras longitudinales presentan menores pérdidas (cerca de un 10%), el detallamiento ACI-318 presenta una pérdida en relación a su carga máxima de un 27%.

4.2.1.6.COMPORTAMIENTO TRANSVERSAL

En esta sección se describe el comportamiento transversal en la zona central de las probetas hasta el máximo de carga.

Al observar el comportamiento transversal de las probetas sin pre-tracción, se observa que algunas probetas presentaron un comportamiento anormal¹⁵ ya que se observa al comienzo contracción y no expansión como es esperable, esto puede apreciarse en la Figura 4.35.

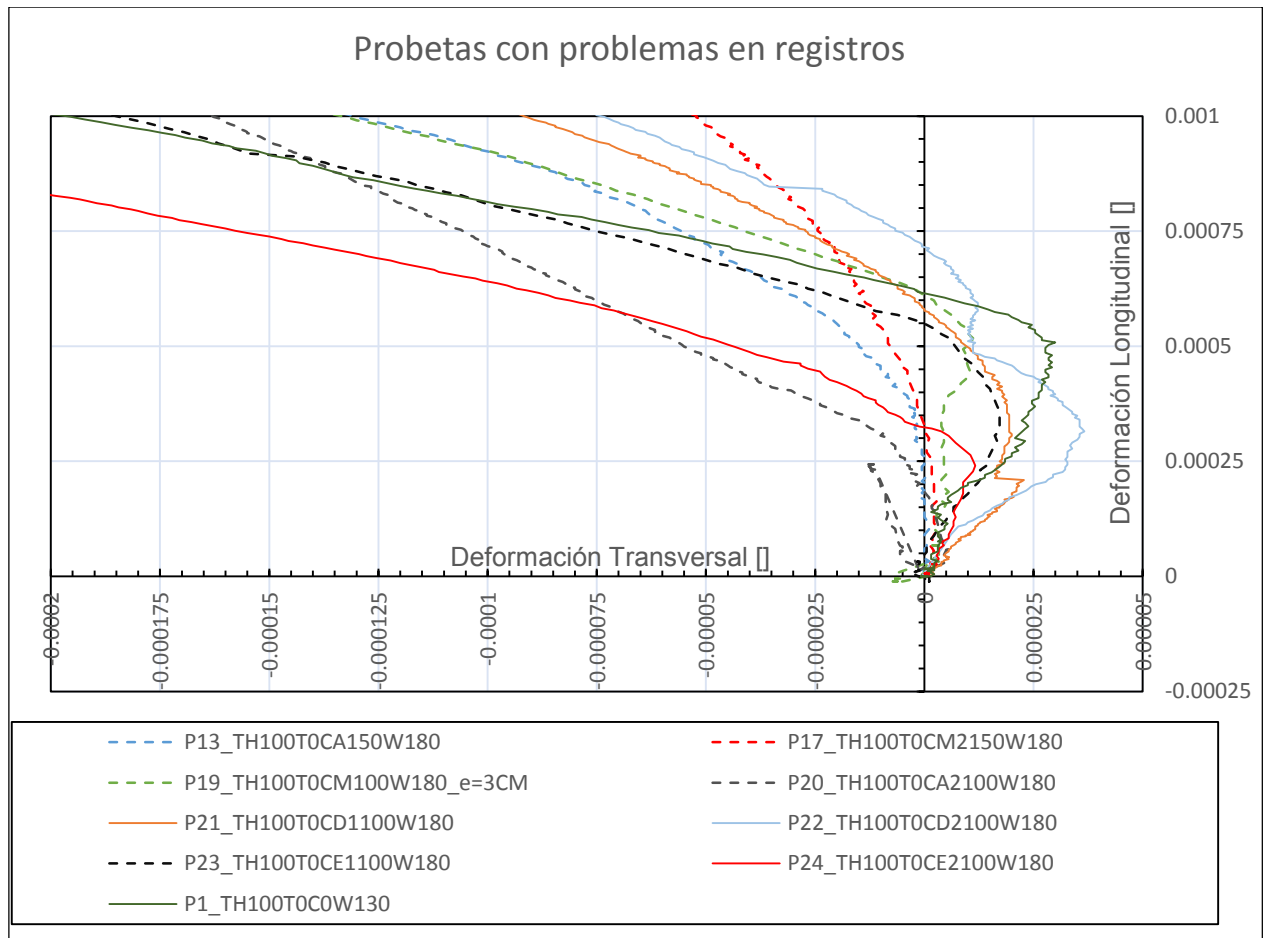


Figura 4.35. Probetas con problemas en registros de deformación transversal

Este comportamiento ocurre en todas las probetas que presentaron rigideces distintas a las teóricas (ver sección 4.2.1.2), por lo cual los registros transversales de los sensores podrían estar ligados a este comportamiento, en cuanto a que existen zonas comprimidas y otras traccionadas al inicio de los ensayos.

Para las probetas restantes (P1 y P22, P21, P24) posiblemente haya ocurrido lo mismo pero en menor proporción.

¹⁵ Anormal, ya que se esperaría dilatación en todas las caras de la probeta para el tipo de ensayo de carga axial concéntrica.

Las probetas que no presentaron el problema antes mencionado son presentadas en la siguiente figura

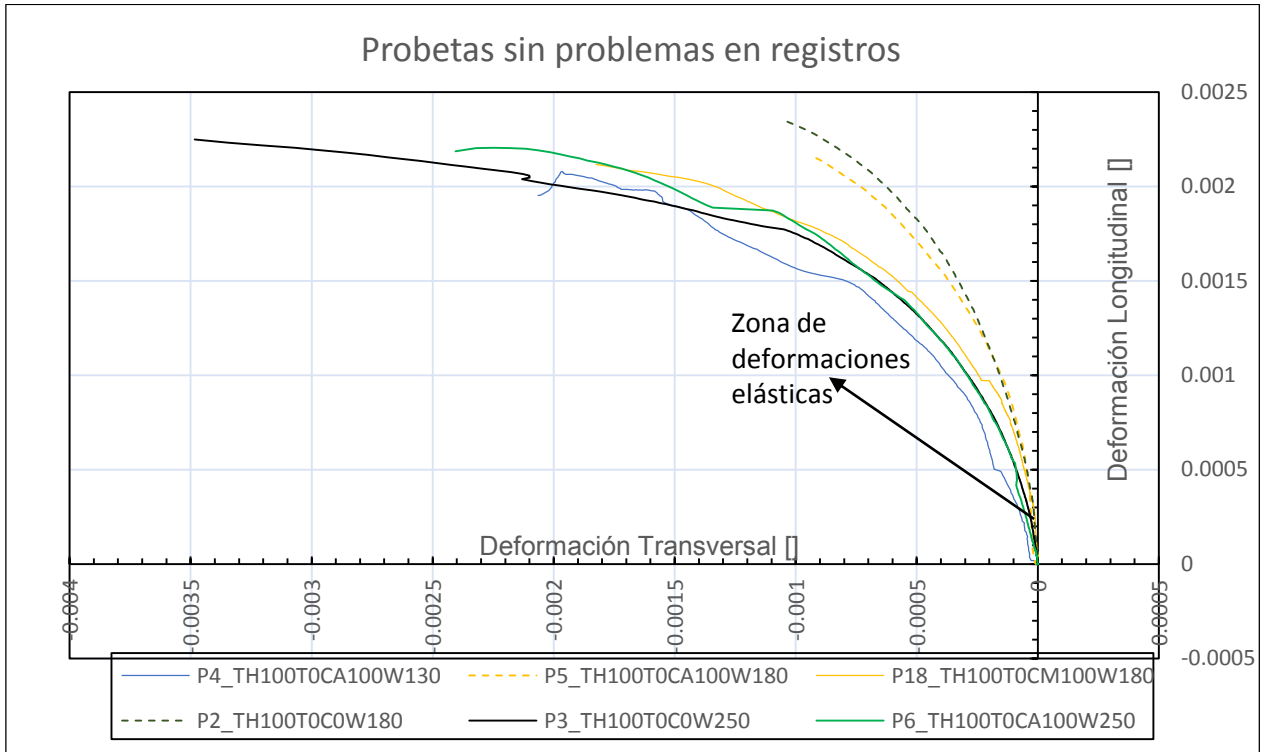


Figura 4.36. Probetas sin problemas en registros de deformación transversal

De la Figura 4.36 se observa que hasta una deformación axial promedio de 0.00125, el comportamiento es lineal para las probetas en cuanto a su deformación axial.

Posterior a esta deformación los gráficos comienzan a tener una pendiente diferente observándose una velocidad de deformación transversal mucho más rápida respecto al rango anterior. Esto se debe a que las probetas comienzan a presentar daño perimetral y comienza a existir una área agrietada.

A continuación se analiza la velocidad de expansión transversal en relación a la deformación longitudinal, esto es importante pues determina la deformación axial a la cual comienza la pérdida de hormigón perimetral.

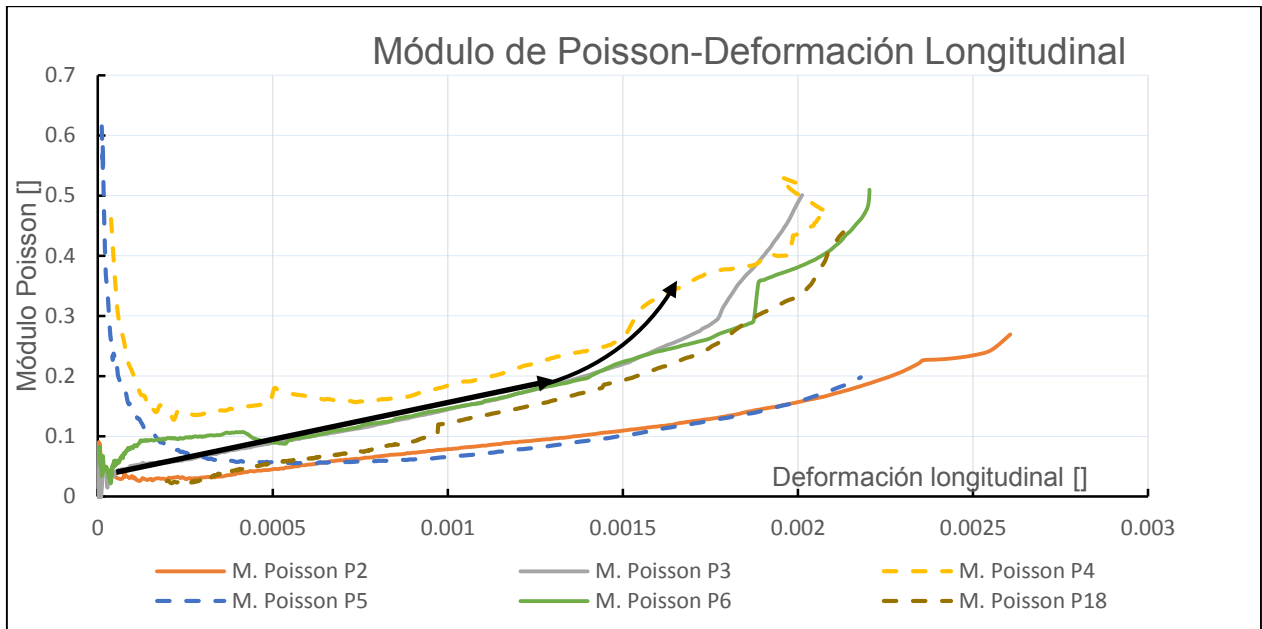


Figura 4.37. Velocidad de expansión transversal con respecto a deformación axial

Se aprecia de la Figura 4.37 que aproximadamente hasta una deformación axial de 0.00125 la expansión tienen una aceleración constante, posterior a esta deformación comienza un cambio en la aceleración de expansión, hecho atribuible a la pérdida de recubrimiento.

Es posible apreciar un comportamiento distinto para la Probeta P2 y P5, estas probetas alcanzaron una carga mayor que las probetas con las mismas características (Figura 4.15), por lo cual una menor expansión perimetral implicaría una pérdida del hormigón perimetral más lenta, lo que implicaría una leve ganancia de carga máxima. Se observa que para estas probetas la falla se concentró completamente en la zona central.

No se aprecia una explicación al fenómeno físico de la menor expansión.

De Las probetas restantes P3-P4-P6-P13-P18, se observa que para aproximadamente un módulo de Poisson entre 0.15 y 0.25 comienza a acelerarse la expansión, hecho explicado por la pérdida de recubrimiento, la deformación axial en este estado es de aproximadamente 0.00125. Aproximadamente en el máximo de la capacidad de carga el módulo de Poisson alcanza 0.45.

4.2.1.6.1. MODELO ANALÍTICO DEFORMACIÓN TRANSVERSAL PANTAZOPOULOU

Pantazopoulou (1996), propone un modelo analítico para explicar el comportamiento transversal del núcleo de hormigón confinado, sometido a cargas de compresión.

Dado que la instrumentación de las probetas para medir el comportamiento transversal se efectuó sobre las caras de las probetas, la validez de la comparación es solo hasta que son retirados los sensores LVDTs transversales, esto ocurre al igual que los sensores LVDTs longitudinales hasta el máximo de carga, pues, luego de este punto se produce un daño significativo en esta zona y dejan de ser válidas las mediciones en esta zona.

El modelo propuesto para determinar la deformación transversal del núcleo de hormigón es la siguiente:

$$\varepsilon_{trans} = -\nu * \varepsilon_{long_prom} + \frac{(1-2*\nu)*k_e*\rho_s*\sigma_{yt}}{E_c} - \varepsilon_{cc} * \frac{(1-2*\nu)*(\varepsilon_{long_prom} - 0.00015/\nu)^2}{2*(\varepsilon_{cc} - 0.00015/\nu)^2} \quad \text{Ecuación [4.14]}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_0 * \left(1 + \frac{24.6*k_e*\rho_s*\sigma_{yt}}{f_c'}\right) \quad \text{Ecuación [4.15]}$$

$$\varepsilon_0 = 0.00078 * (f_c')^{0.25} \quad \text{Ecuación [4.16]}$$

Donde:

ν =Módulo de Poisson inicial igual a 0.2.

k_e =Coeficiente de confinamiento propuesto por Mander et al (1984).

ρ_s =Cuantía volumétrica de armadura transversal.

ε_{long_prom} =Deformación longitudinal axial promedio en zona de daño.

E_c =Módulo de elasticidad de hormigón.

ε_{cc} =Deformación hormigón confinado en el máximo de carga.

f_c' =Tensión máxima hormigón no confinado.

σ_{yt} = Tensión de fluencia de armadura transversal.

A continuación se calcula las variables para determinar la respuesta del modelo propuesto por Pantazopoulou (1996).

El coeficiente de confinamiento propuesto por Mander et al (1984), se define como un coeficiente de efectividad de confinamiento transversal multiplicado por un coeficiente de efectividad de confinamiento longitudinal $k_e = K_h * K_v$, el cual representa el área efectivamente confinada.

Al confinar el núcleo de hormigón por estribos y trabas de amarre, estos producen un área confinada tanto transversalmente como longitudinalmente, tal como se aprecia en la Figura 4.38

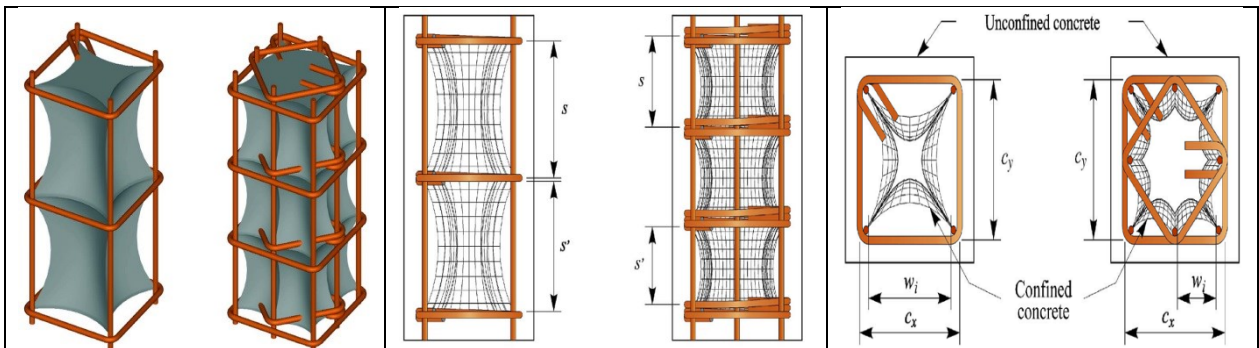


Figura 4.38. Efecto de confinamiento de armadura transversal dispuesta a lo largo de una columna, figura Paultre et al (2008)

Para efectos de cálculo se asume que el área de no confinamiento transversal es parabólica con flecha máxima $w_i/2$ (distribución rama inicial en 45°), lo cual al ser integrada con eje local en el centro de la parábola se obtiene:

$$A(w_i) = \int_{-w_i/2}^{w_i/2} \left(\frac{-2 * x^2}{w_i} + \frac{w_i}{2} \right) * dx = \frac{w_i^2}{6} \quad \text{Ecuación [4.17]}$$

Con lo cual es coeficiente de confinamiento transversal es:

$$K_h = \frac{A_{eTrans}}{A_{totalTrans}} = \frac{cx * cy - \sum \frac{w_i^2}{6}}{cx * cy} = 1 - \sum \frac{w_i^2}{6 * cx * cy} \quad \text{Ecuación [4.18]}$$

Siguiendo el mismo procedimiento, pero en el sentido vertical y despreciando los términos de tercer orden pues son pequeños comparados con los transversales se obtiene:

$$K_v = \frac{A_{efecLong}}{A_{totalLong}} = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2 * cx}\right) \left(1 - \frac{s'}{2 * cy}\right)}{cx * cy - As} = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2 * cx}\right) \left(1 - \frac{s'}{2 * cy}\right)}{1 - \rho_{cc}} \quad \text{Ecuación [4.19]}$$

Lo que finalmente deriva en el coeficiente de confinamiento efectivo:

$$K_e = K_h * K_v = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2 * cx}\right) \left(1 - \frac{s'}{2 * cy}\right) \left(1 - \sum \frac{wi^2}{6 * cx * cy}\right)}{1 - \rho_{cc}} \quad \text{Ecuación [4.20]}$$

Cabe destacar que el desarrollo antes citado, no toma en cuenta parámetros de detallamiento de la armadura transversal como es el ángulo de doblado de estribos o que las trabas amarren tanto al estribo como a la armadura longitudinal, efectos que no se aprecian en las respuestas analíticas expresada en la tesis de Herrera (2013), y que si tienen efectos en la respuesta experimental, predominantemente en la degradación pasado el máximo de carga.

Este parámetro (Ke) toma suposiciones como la existencia de anclaje del estribo al hormigón en todo momento, o una misma efectividad para distintos tipos de amarre de trabas y estribos. Efectos que claramente tienen diferencias, como los presentados en Figura 4.33

La cuantía volumétrica se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\rho_{s_trans} = \frac{A_{shx} + A_{shy}}{(cx + cy) * s} \quad \text{Ecuación [4.21]}$$

La ecuación [4.15] puede ser representada en términos del Índice de confinamiento efectivo definido como:

$$Ice = \frac{fle}{fc'} \quad \text{Ecuación [4.22]}$$

Donde

$$fle = \frac{\sigma_{sty} * A_{shy}}{s * (cx + cy)} + \frac{\sigma_{sty} * A_{shx}}{s * (cx + cy)} = \frac{\sigma_{sty} * (A_{shy} + A_{shx})}{s * (cx + cy)} = \rho_{s_trans} * \sigma_{sty} * K_e \quad \text{Ecuación [4.23]}$$

Por lo cual la ecuación [4.15] queda definida en términos del índice de confinamiento como:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_0 * (1 + 24.6Ice) \quad \text{Ecuación [4.24]}$$

A continuación se comparan aquellas probetas que no presentaron problemas en los registros al inicio del ensayo Figura 4.36 con el modelo propuesto por Pantazopoulou (1996) para probetas con y sin confinamiento.

Cabe destacar que el modelo propuesto asume la fluencia de los estribos en el máximo de carga hecho que no se corrobora para las probetas ensayadas (Figura 4.57).

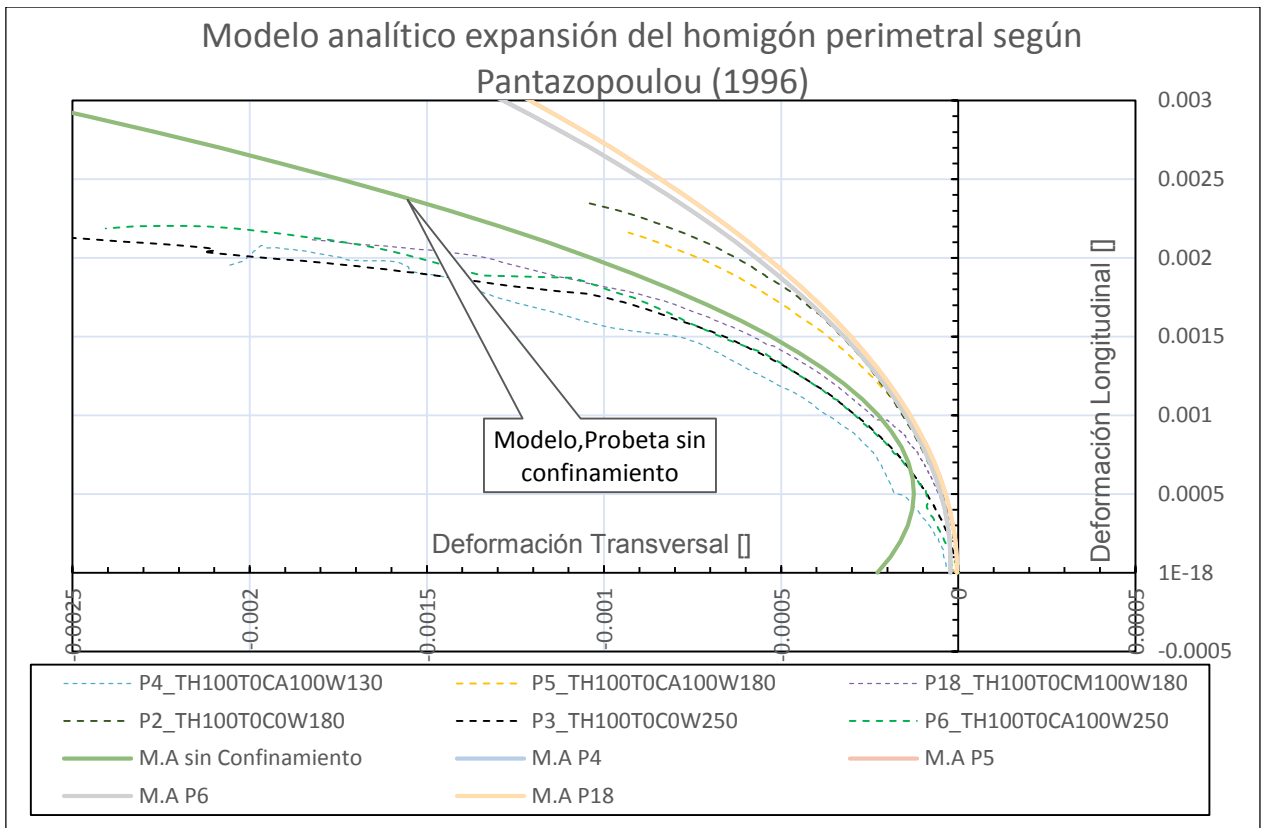


Figura 4.39. Modelo analítico expansión del hormigón Pantazopoulou

Donde

M.a= Modelo analítico

Se observa de la Figura 4.39 un buen acercamiento del modelo analítico para probetas con confinamiento, en la zona de deformaciones axiales elásticas (menores a 0.00125), un comportamiento casi similar para las probetas (P2 y P5) que presentaron un módulo de Poisson bajo (0.2 en máximo de carga), sin embargo para el resto de las probetas se ve una sobrestimación de las deformaciones transversales.

Para las probetas sin confinamiento se observa que el modelo se asemeja más para deformaciones axiales superiores a la deformación en el rango elástico.

Sin embargo este modelo sobre estima la deformación en el máximo de capacidad de carga, por lo cual estos resultados no son representativos.

Tabla 4.5. Error en la estimación de la deformación axial en el máximo de carga, modelo Pantazopoulou

Probeta	Nomenclatura	ecc_experimental []	ecc_análítico []	error %
P2	TH100T0C0W180	0.0024	0.00195	23.0
P3	TH100T0C0W250	0.0023	0.00195	17.94
P4	TH100T0CA100W130	0.00195	0.00337403	42.2
P5	TH100T0CA100W180	0.00218	0.00357207	38.9
P6	TH100T0CA100W250	0.00216	0.00344801	37.3
P18	TH100T0CM100W180	0.00213	0.00357207	40.3

Como se cuenta con los datos experimentales de la deformación axial en el máximo de carga, se puede validar el resto del modelo.

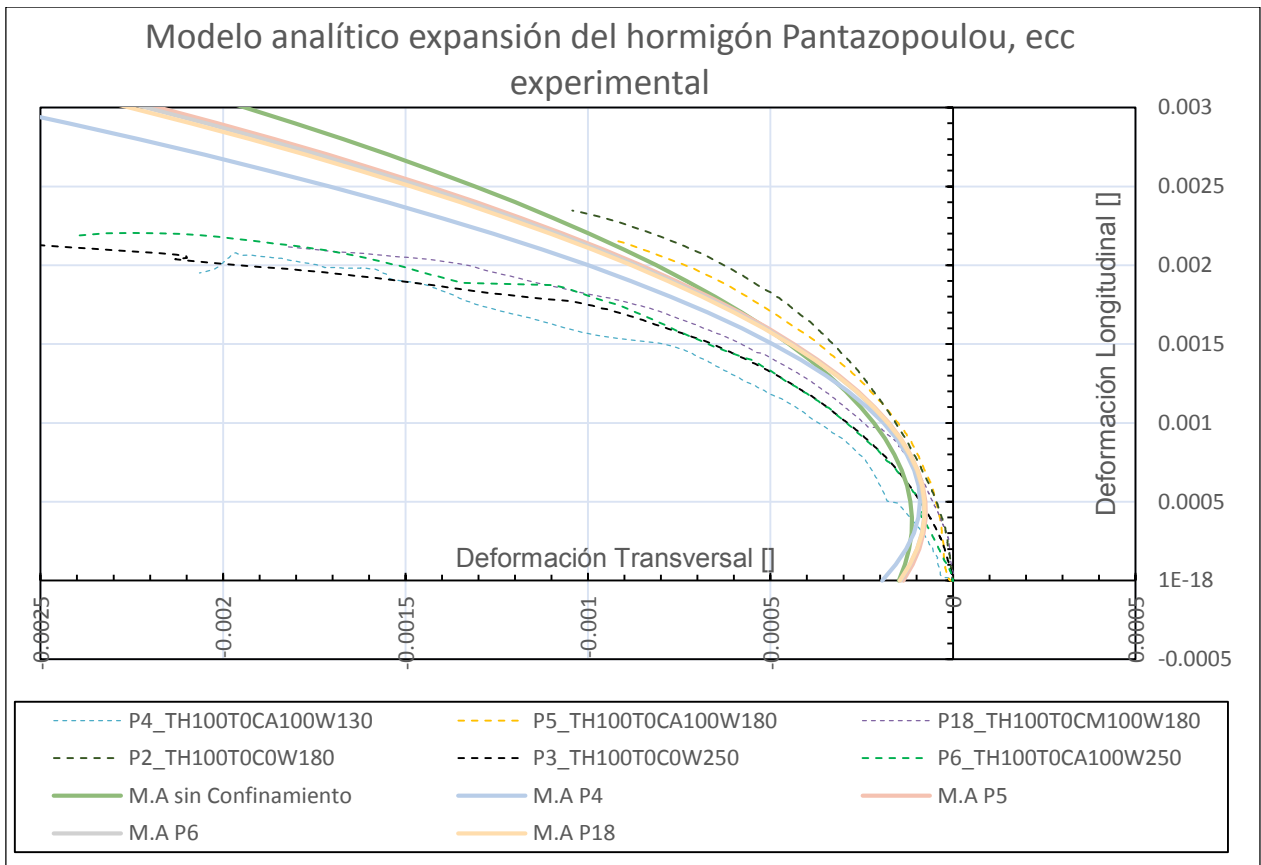


Figura 4.40. Modelo analítico expansión del hormigón Pantazopoulou, ecc experimental

De la Figura 4.40 se puede apreciar una mejor aproximación en el rango de deformaciones posteriores al agrietamiento perimetral, y un cambio de pendiente en el rango de deformaciones elásticas, este cambio del modelo se aproxima más a una probeta sin confinamiento, hecho debido a que el modelo sobrestimaba las deformaciones en el máximo de capacidad.

Al comparar la Figura 4.39 y la Figura 4.40 se aprecia que la forma de calcular ecc tiene gran impacto en la respuesta del modelo en el rango de deformaciones lineales.

El cambio de pendiente se puede analizar derivando la ecuación [4.14] con respecto a la deformación axial con lo que se obtiene:

$$\frac{d\varepsilon_{trans}}{d\varepsilon_{long_prom}} = -\nu - \varepsilon_{cc} * \frac{(1-2*\nu) * (\varepsilon_{long_prom} - 0.00015 / \nu)}{(\varepsilon_{cc} - 0.00015 / \nu)^2} \quad \text{Ecuación [4.25]}$$

Se observa que la pendiente es positiva para deformaciones axiales entre:

$$0 < e < \frac{-\nu * (e_{cc} - 0.00015 / \nu)^2}{e_{cc} - (1-2*\nu)} + \frac{0.00015}{\nu} \quad \text{Ecuación [4.26]}$$

El intervalo que se muestra en la inecuación [4.26] es un intervalo móvil pues depende de la deformación en el máximo de carga, a continuación se observa que para deformaciones sobre 0.000335 el intervalo se anula

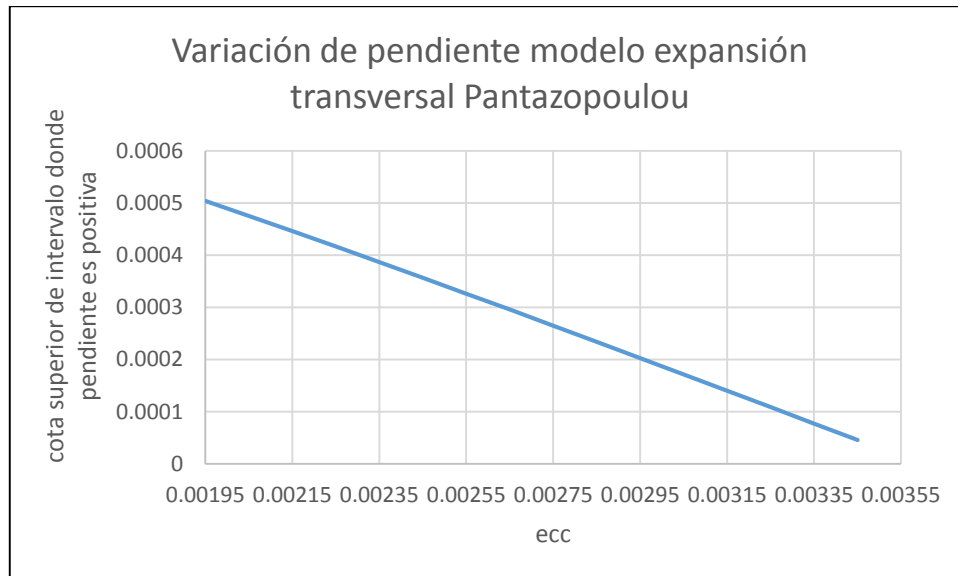


Figura 4.41. Comportamiento modelo de expansión transversal de Pantazopoulou

Se observa de la Figura 4.41 que el modelo claramente no está calibrado para probetas con bajo índice de confinamiento pues la deformación en la carga máxima depende de este parámetro.

Dado que el cálculo de ecc, tiene alto impacto en el modelo propuesto, a continuación se compara las diferencias de estimación de ecc bajo 2 modelos y supuestos de estado tensional de estribos.

En el trabajo de herrera (2013) se estudiaron distintos modelos analíticos para la respuesta tensión-deformación axial de la matriz de ensayos, se compara ecc, del modelo que mejor estimo este parámetro con el de la ecuación [4.24], además de 3 estados tensionales de los estribos en el máximo de carga.

De acuerdo al trabajo de Herrera (2013) el modelo que predice mejor los resultados de la matriz de ensayos es Cusson & Paultre cuyo modelo estima de la siguiente forma la deformación axial en el máximo de carga:

$$\varepsilon_{cc} = 0.21 * I_c e^{1.7} + \varepsilon_o \quad \text{Ecuación [4.27]}$$

Al comparar el modelo de la ecuación [4.24] con el estado tensional de estribos al 100% de fluencia y el de la ecuación [4.27] con el supuesto del estado tensional de los estribos al 100% de la fluencia, 50% de la fluencia y los valores experimentales, se obtiene lo siguiente :

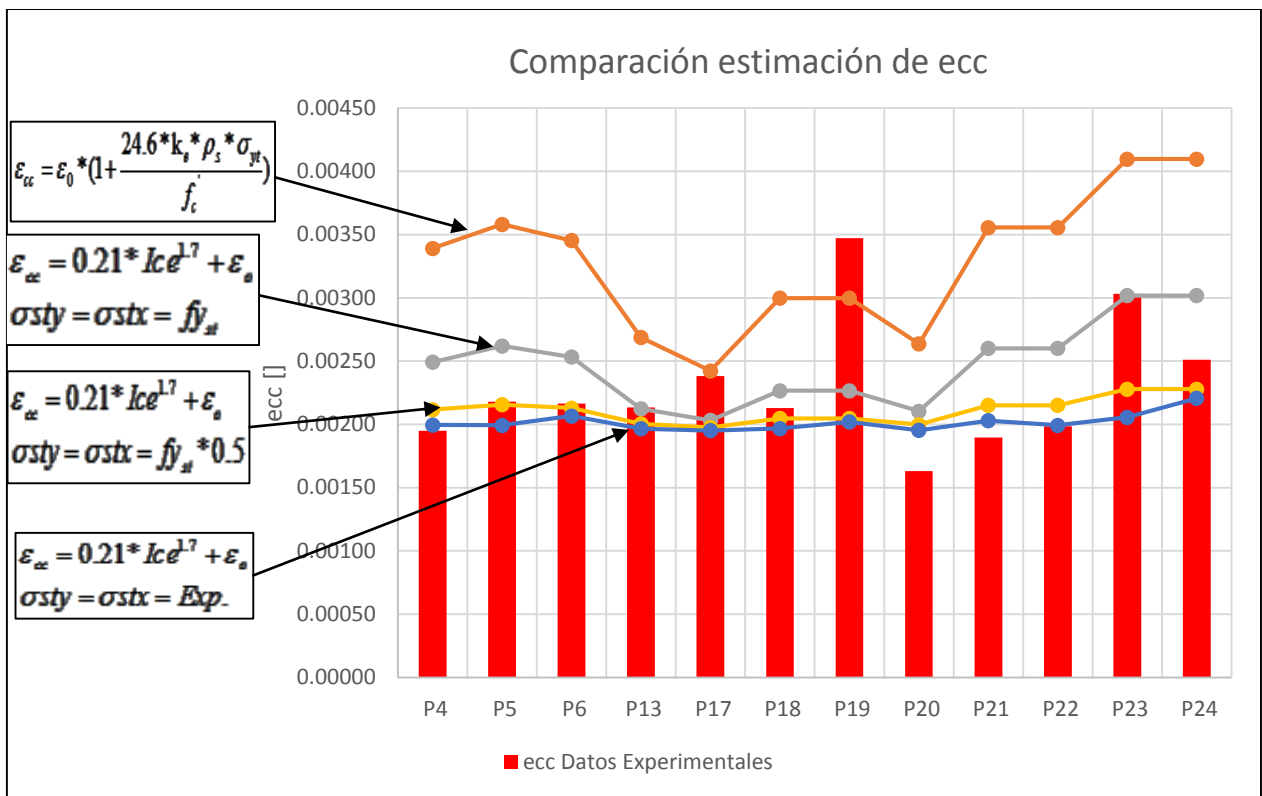


Figura 4.42. Comparación de estimación de ecc en base a diferentes modelos y tensiones de estribos en máximo de capacidad de carga.

De la Figura 4.42 se observa claramente que el modelo de la ecuación [4.24] sobreestima la deformaciones en el máximo de capacidad, el modelo de Cusson & Paultre también sobreestima esta deformación, pero si se considera un 50% de la fluencia de los estribos en el máximo de carga el modelo se acerca mucho a los datos experimentales, más aún si se toman los valores experimentales en relación a la tensión de estribos.

Por lo tanto una mejor aproximación del modelo ocupado por Pantazopoulou (1996), sería estimar ecc con la ecuación [4.27], considerando el 50% de la fluencia de los estribos en el máximo de carga, aunque de igual forma existirá una zona donde la pendiente de la curva sea positiva pues la matriz de ensayos presenta un bajo índice de confinamiento, que deriva en un leve aumento de la deformación en el máximo de carga.

En Anexo C se encuentran los gráficos deformación axial-deformación transversal para las probetas sin pre-tracción. Se muestra la deformación axial promedio de los sensores internos longitudinales y se muestran los sensores LVDTs individuales Oriente y Poniente según figura 3.3.

4.2.1.7. ANÁLISIS DE INESTABILIDAD

En esta sección se describe el fenómeno de inestabilidad global¹⁶, para este propósito se analizan los sensores (SDP). Estos sensores entregan su deformación en base a la deformación de la probeta, tal como se observa en la siguiente figura:

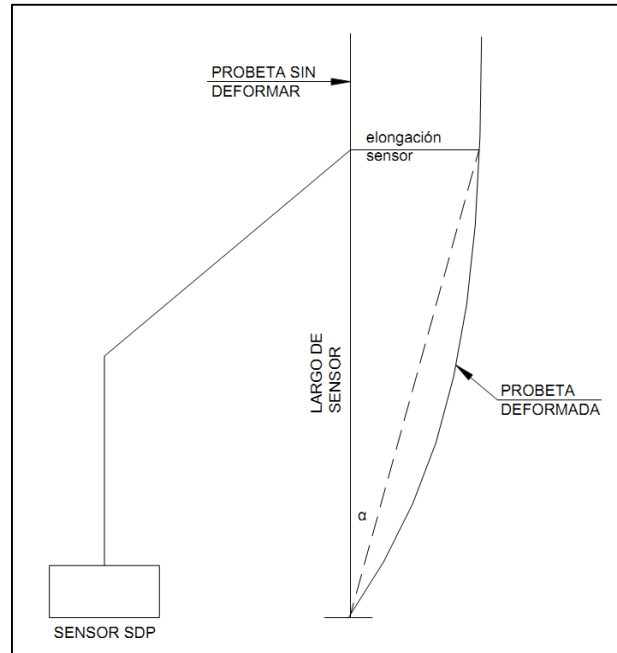


Figura 4.43. Funcionamiento sensor SDP

La instrumentación de los sensores SDPs en las probetas fue en la zona externa sobre el lado largo (300mm), tal como se detalló en la Figura 3.4. Para pequeñas deformaciones el giro de la probeta será $\theta = \text{elongación sensor} / \text{largo de sensor}$.

De los resultados experimentales se logra apreciar que las probetas que no poseen confinamiento son más estables que las probetas que si poseen confinamiento en la zona central, esto se debería al tipo de mecanismo de falla.

En las probetas que presentan confinamiento, los estribos ejercen una fuerza lateral que produce la falla de corte la que favorece el giro del bloque superior en relación al inferior o viceversa, por lo cual se observa mayor desplazamiento lateral en este tipo de probetas para altas deformaciones axiales.

¹⁶ Se entiende inestabilidad global al giro que afecta a la probeta en su conjunto.

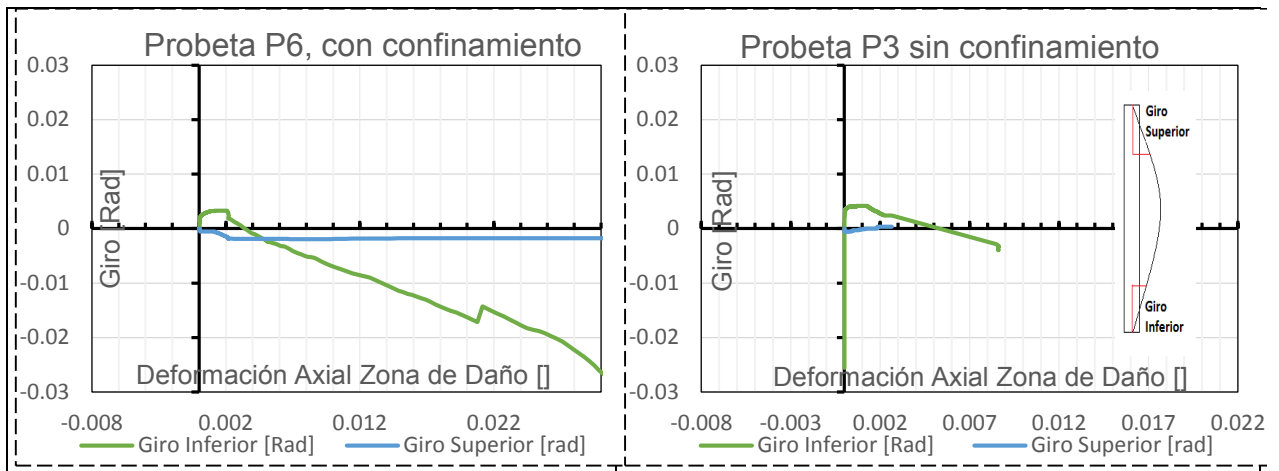


Figura 4.44. Inestabilidad global , variable confinamiento

Se observa de la Figura 4.44, que la inestabilidad para probetas con y sin confinamiento es similar en el proceso de carga, posterior al máximo de carga, para altas deformaciones se ve que la probeta con confinamiento muestra un alto giro en la parte inferior, hecho que se debe al mecanismo de falla donde la cuña de corte hace que la parte superior se mantenga estable y la parte inferior gire.

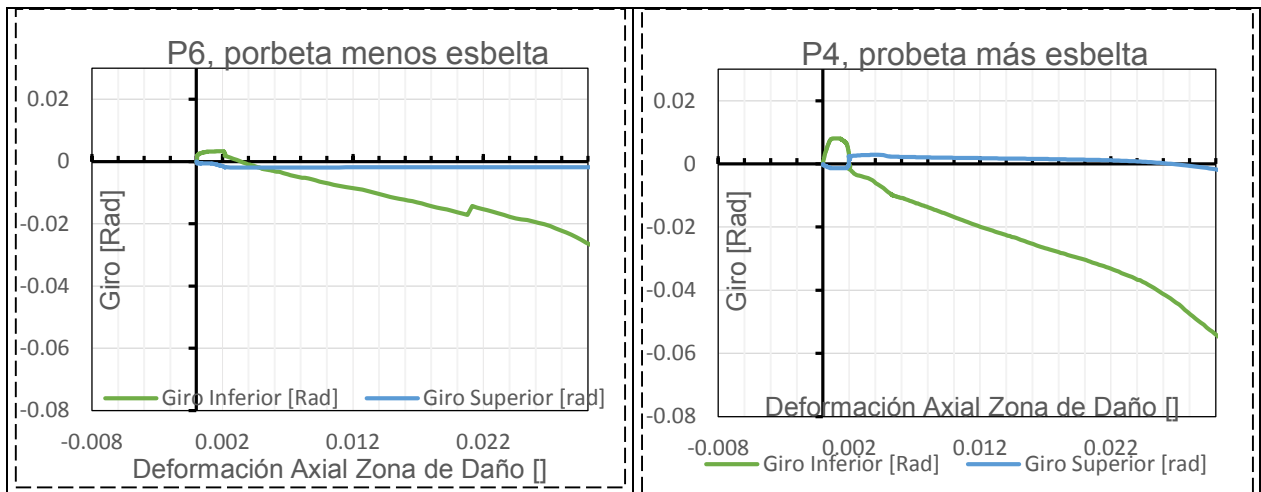


Figura 4.45. Variable relación esbeltez en relación inestabilidad global

Al comparar probetas con distinta relación de aspecto no se logra apreciar una diferencia significativa para aquellas probetas más esbeltas¹⁷ hasta el máximo de carga, posterior a este punto se aprecia un aumento del giro para la probeta más esbelta, notándose esta descripción para altas deformaciones (sobre el 1%).

Se observa que aquella probeta con menos área transversal gira casi el doble que aquella probeta con mayor área transversal para grandes deformaciones axiales.

¹⁷ Esbeltas en base a la variación de la sección transversal (inercia y área), estas comparaciones son en base a columnas de misma altura.

De la Figura 4.46 se observa que la variable confinamiento, no disminuye el giro antes del máximo de carga, tampoco para grandes deformaciones, esto se debe a que el mecanismo de falla para las probetas con confinamiento es similar y los estribos no tienen gran relevancia en contener el deslizamiento del bloque superior sobre el inferior o viceversa.

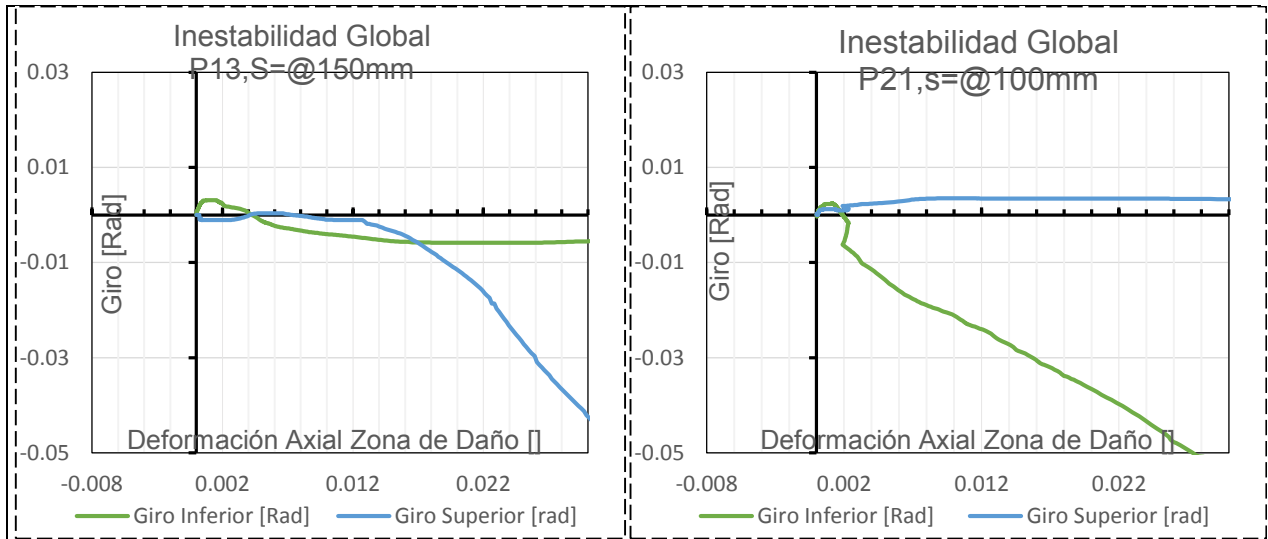


Figura 4.46. Variable confinamiento en relación a inestabilidad

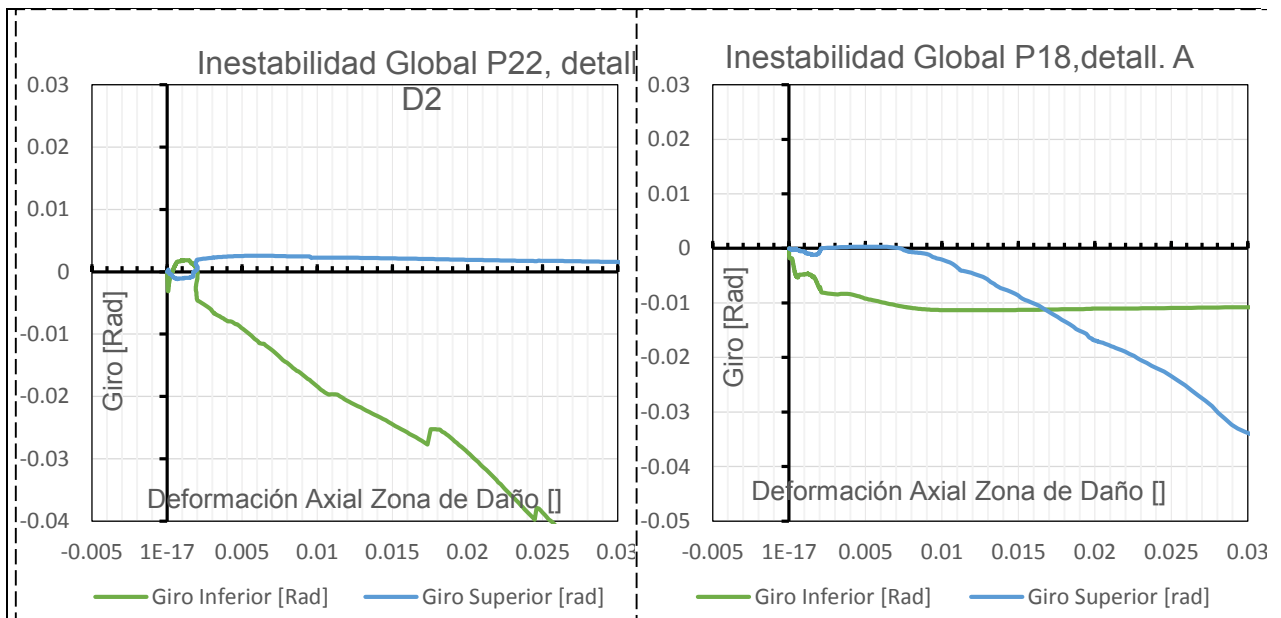


Figura 4.47. Variable, tipo de detallamiento en relación a inestabilidad

De la Figura 4.47 es posible apreciar que el tipo de detallamiento no tiene relevancia en el comportamiento antes y después de la carga máxima, observando como en todas las probetas que una de las 2 zonas en relación a la cuña de corte se mantiene fija y la otra gira en mayor proporción.

En anexo C se incluye el resto de los comportamientos giro–desplazamiento axial para las probetas sin pre-tracción.

Se observa que aunque exista un giro o deslizamiento para altas deformaciones la degradación no se ve afectada o no existe una relación de esta con el giro o inestabilidad.

En relación a la magnitud de los desplazamientos¹⁸ laterales de la probeta antes del máximo de carga, se aprecian los siguientes resultados:

Tabla 4.6. Desplazamientos laterales en máximo de carga, sensores SDPs

Probeta	Nomenclatura	Desplazamientos máximos en máximo de carga [mm]		Carga máxima [Tonf]
		Negativos	Positivos	
P1	TH100T0C0W130	0,87	1,18	188,2
P4	TH100T0CA100W130	-0,53	2,65	191,8
P2	TH100T0C0W180	-0,10	1,25	272,6
P17	TH100T0CM150W180	0,00	2,43	247,4
P13	TH100T0CA150W180	-0,35	1,03	241,0
P20	TH100T0CA2100W180	-1,65	0,26	215,3
P18	TH100T0CM100W180	-2,67	0,02	243,7
P19	TH100T0CM100W180	-0,69	0,18	242,9
P5	TH100T0CA100W180	-0,09	0,45	264,0
P21	TH100T0CD1100W180	-2,87	0,82	279,8
P22	TH100T0CD2100W180	-1,65	0,69	253,0
P23	TH100T0CE1100W180	-2,98	2,20	256,5
P24	TH100T0CE2100W180	-0,30	0,16	270,3
P3	TH100T0C0W250	-0,20	1,37	334,8
P6	TH100T0CA100W250	-0,61	1,09	357,8

De la Tabla 4.6 se aprecia un orden de magnitud similar para todas las probetas comparadas, el cual varía de los -3mm a los 3mm aproximadamente, no observándose una diferencia significativa, en relación a la capacidad de carga de las probetas y el desplazamiento lateral en el máximo de carga.

¹⁸ Se muestran los desplazamientos laterales para un mejor entendimiento del orden de magnitud de la inestabilidad, el desplazamiento del sensor SDP, tal como se observa en la Funcionamiento sensor SDP.

4.2.1.8.SENSORES INTERNOS

En esta sección se describe el comportamiento local de los sensores ubicados en la armadura transversal y longitudinal.

En términos generales el comportamiento de los estribos responde al tipo de falla (de corte o por compresión), y a la zona donde aparece y se propaga la falla.

Para las probetas con confinamiento y en las que el daño se localizó exclusivamente en la zona central el comportamiento es el mostrado en la Figura 4.48

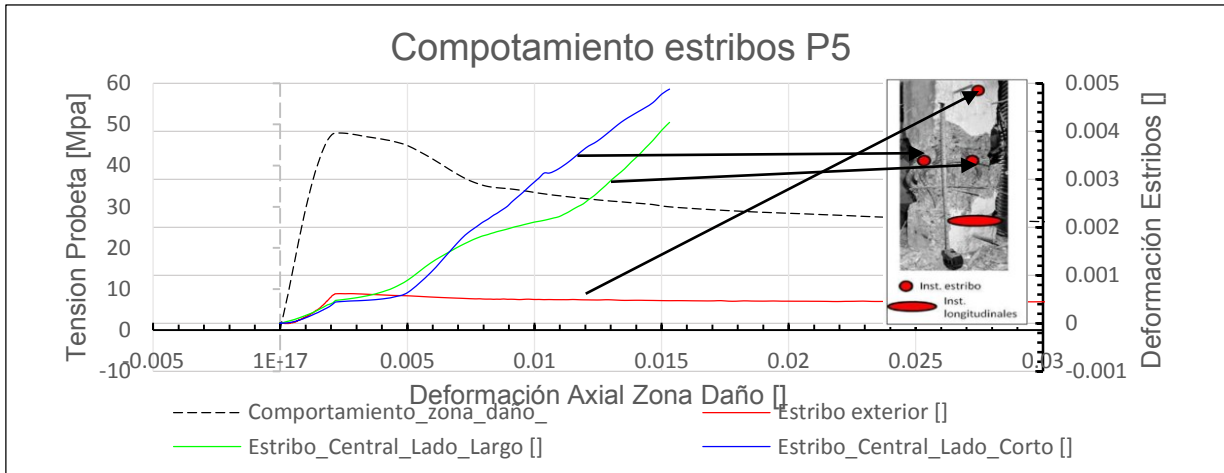


Figura 4.48. Comportamiento de estribos falla localizada en zona central con confinamiento central, P5

Se observa que al tener la falla concentrada totalmente en la zona central, el estribo exterior tiende a descargarse luego del máximo de carga y los estribos centrales se siguen deformando debido a que la falla se concentra en la zona central, este comportamiento se vio reflejado en la probeta P5.

Para las probetas sin confinamiento en la zona central y donde la falla se localizó en la zona central o comenzó en la zona inferior, el comportamiento del estribo en la zona exterior es el siguiente:

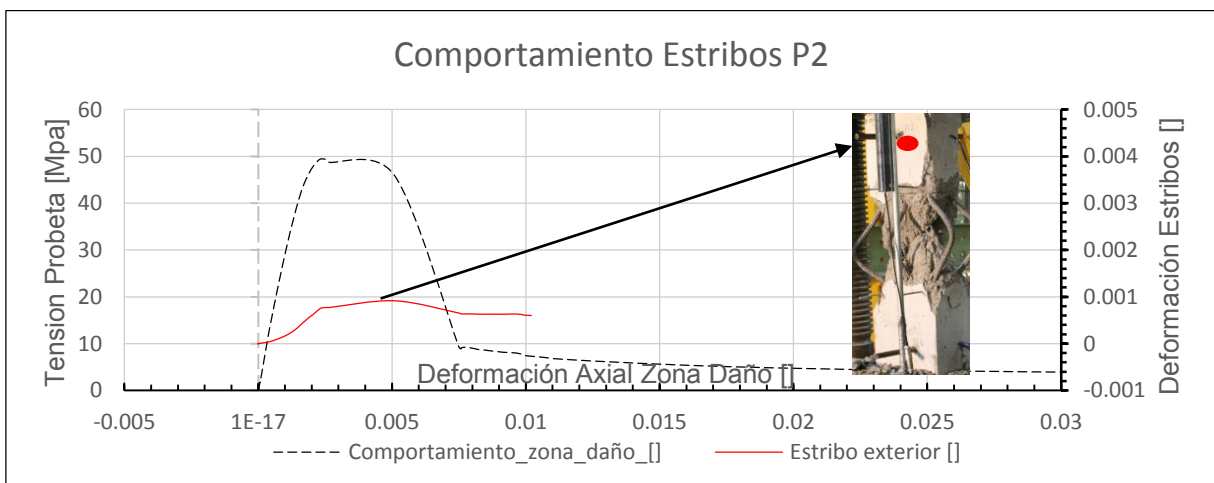


Figura 4.49. Comportamiento de estribos falla localizada en zona central con confinamiento central, P2, P3

El tipo de comportamiento visto en la Figura 4.49 se presentó en las probetas P2, P3. En la probeta P1, la falla si bien se localizó en la zona central, también alcanzó la zona externa donde se ubicaba el sensor del estribo.

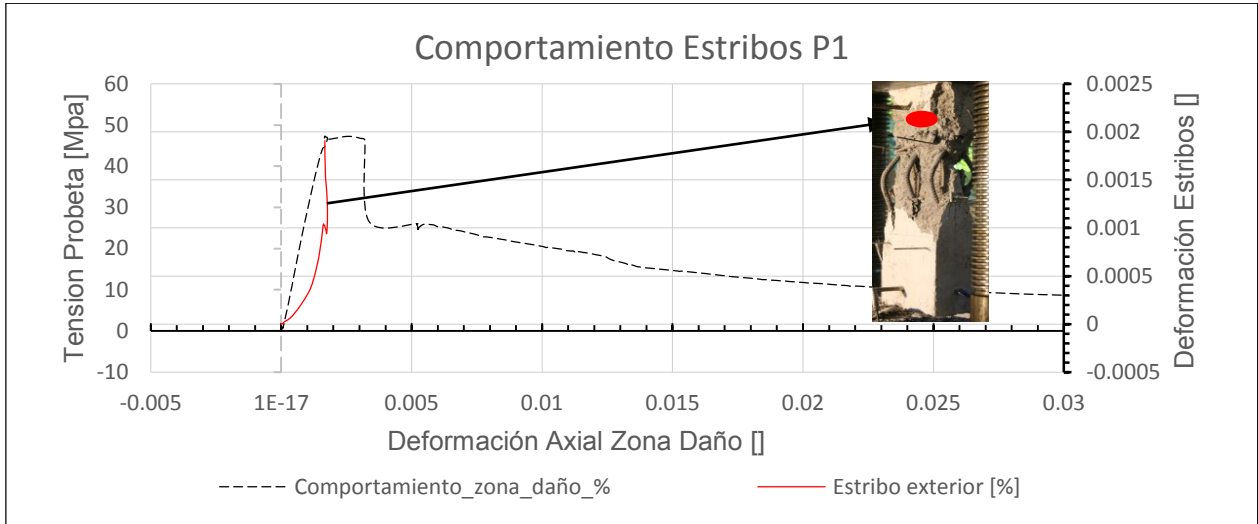


Figura 4.50. Comportamiento estribos falla localizada en zona central-externa, sin confinamiento, P1

Se observa de la Figura 4.50 como el estribo externo sigue deformándose y no se descarga, debido a que la zona de falla también afecta la zona externa.

Cuando la zona de falla afecta en mayor proporción la zona externa se aprecia como el estribo externo es el que sigue deformando y los centrales presentan una deformación relativamente constante.

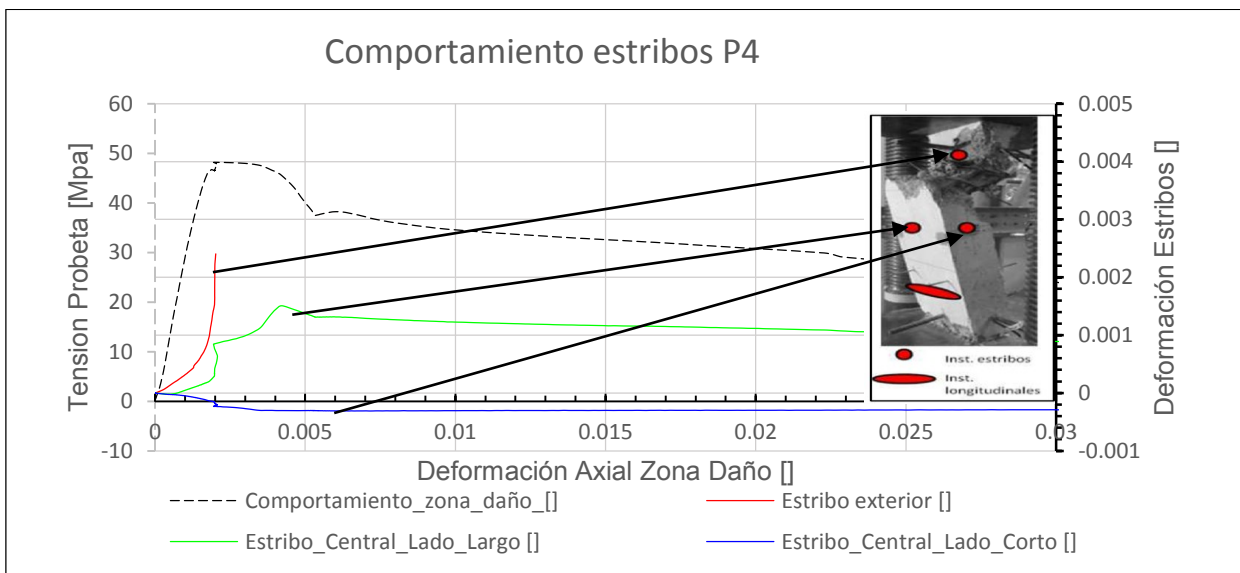


Figura 4.51. Comportamiento estribos falla zona central-externa con confinamiento, P4

Se observa de la figura 4.51 que al presentarse la falla en la transición central-externa los estribos en el lado largo son aquellos que se deforman más, observándose que la falla se concentra más en la zona exterior pues el estribo central es aquel que se descarga.

Cuando la falla se inicia con la pérdida de recubrimiento en la zona superior o inferior se ve reflejado un aumento de deformación en el estribo exterior, si se inicia en la zona superior o un bajo trabajo si se inicia en la zona inferior, luego cuando la falla se propaga a la zona central se observa como los estribos centrales comienzan a deformarse alcanzando la fluencia para deformaciones axiales cerca del 1%, mientras que no se siguen deformando los estribos externos.

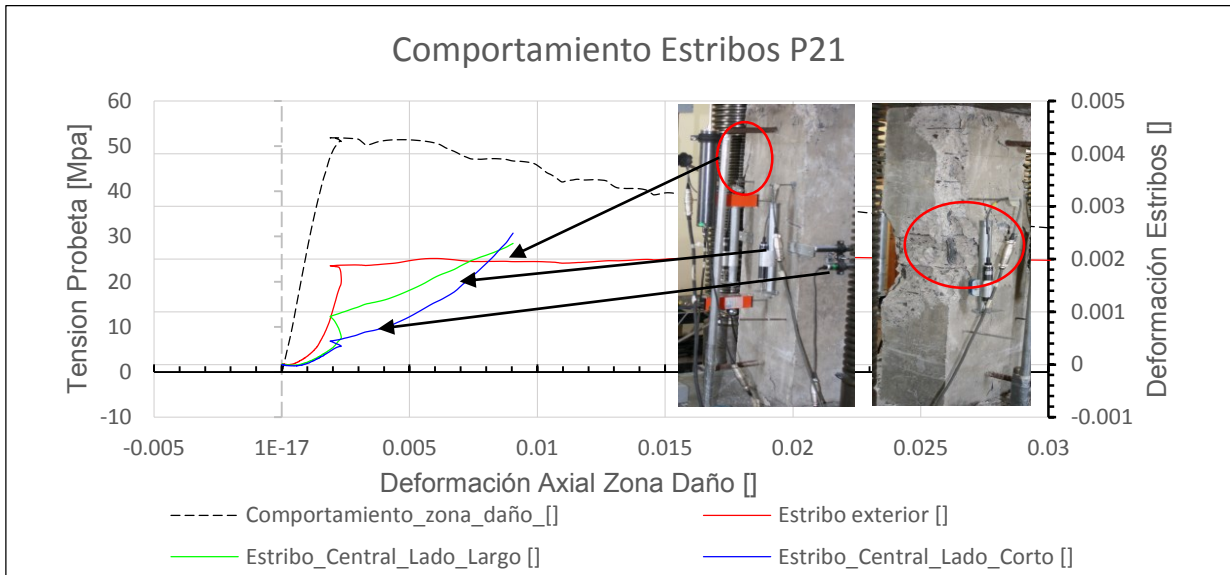


Figura 4.52. Inicio de falla en zona superior probetas con confinamiento, P6, P18, P21, P22, P24

Este tipo de comportamiento es observable en las probetas P6, P18, P21, P22, P24, P20 y P23.

Cuando la falla se inicia en la zona inferior se observa el siguiente comportamiento:

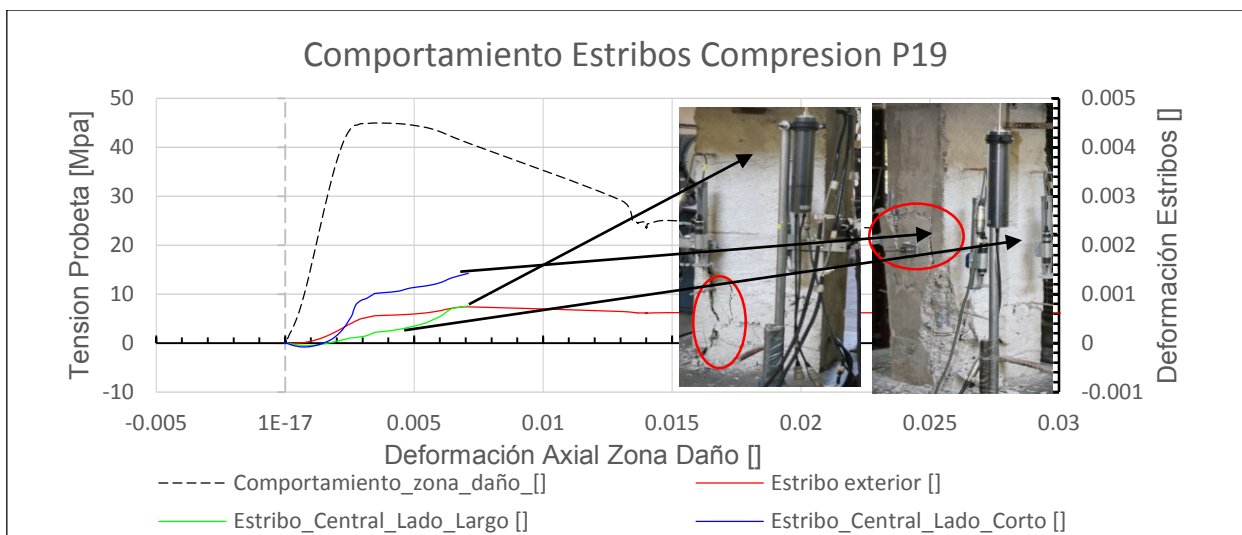


Figura 4.53. Inicio de falla en zona inferior probetas con confinamiento P13, P17, P19

Se observa de la Figura 4.53, que al iniciarse la falla en la zona inferior, el estribo superior se descarga normalmente, pues no siente ninguna degradación en su zona, y los estribos centrales se deforman en mayor proporción.

En las probetas P13, P19, P17, se observa este comportamiento y el bajo nivel de deformación de los estribos, no alcanzando la fluencia durante todo el ensayo, lo cual correspondería a un acentuado¹⁹ deslizamiento del bloque inferior debido a la falla de corte, el cual hizo probablemente desplazar los estribos.

En términos cuantitativos las deformaciones de los estribos en el máximo de carga son los siguientes:

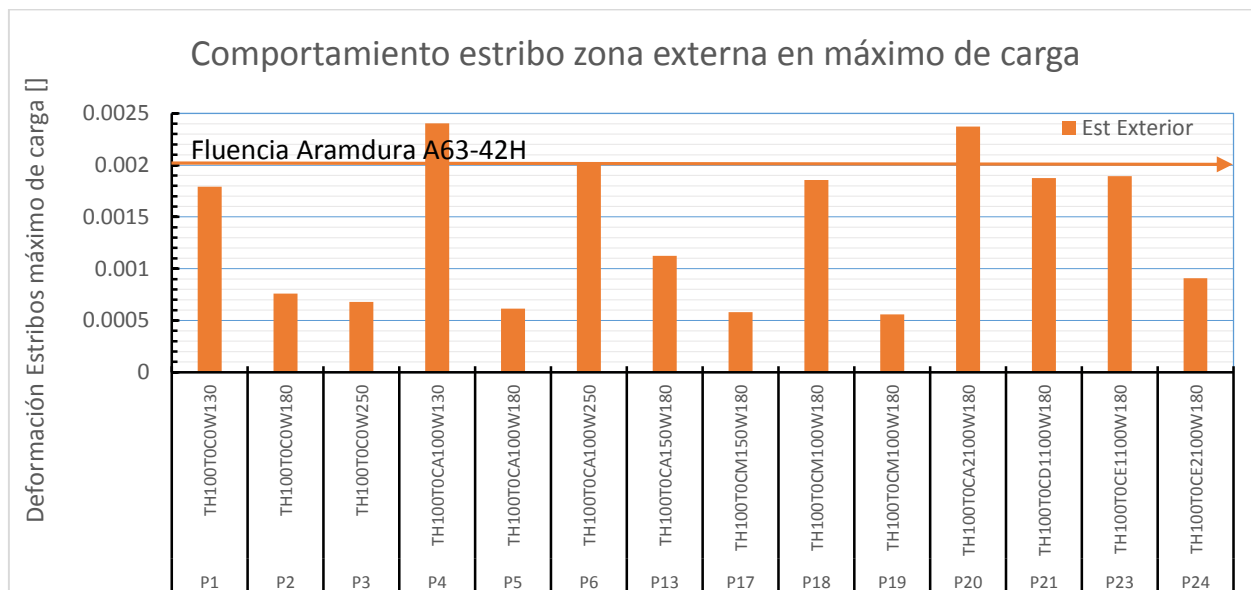


Figura 4.54. Deformación de estribos externos en máximo de carga

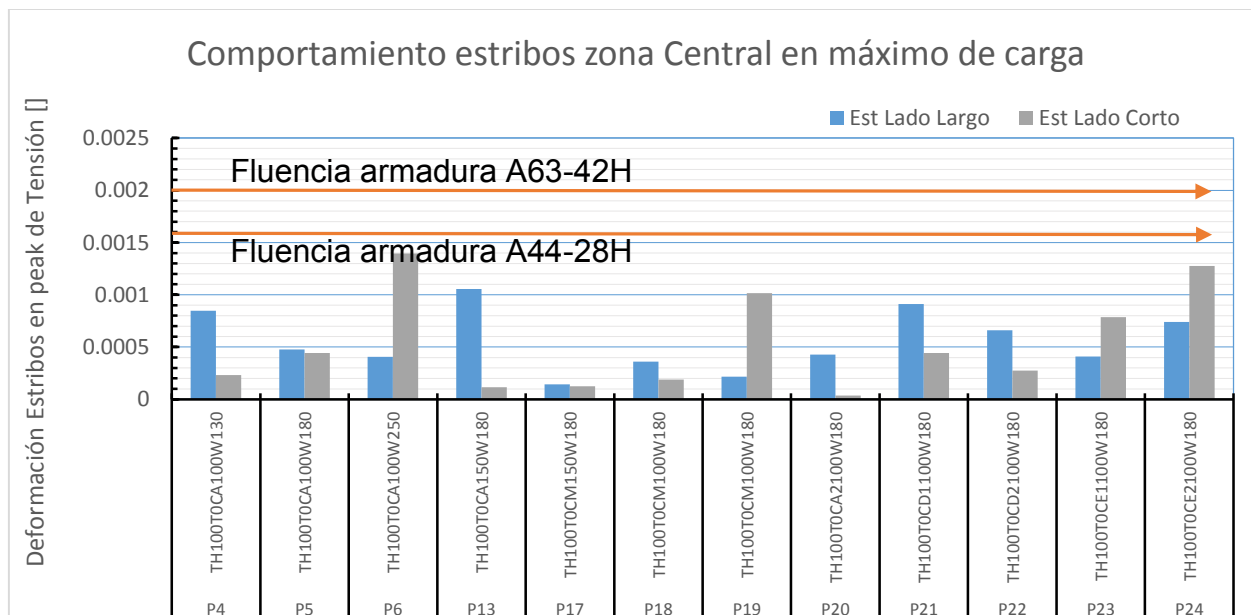


Figura 4.55. Deformación de estribos centrales en máximo de carga

De la Figura 4.54 y Figura 4.55 se observa que en el máximo de carga ningún estribo central alcanzó la fluencia y solo los estribos externos de las probetas P20 y P4

¹⁹ Acentuado en relación a que el deslizamiento predomina, sin el trabajo de la armadura de confinamiento pasado el máximo de carga.

superaron la fluencia, debiéndose principalmente a la concentración de la falla en este sector para P4 y posiblemente la abertura de estribos para P20.

En términos generales el comportamiento de los estribos depende del mecanismo de falla, la propagación de ésta, y cómo evoluciona para altas deformaciones axiales, observándose que los estribos no se deforman en mayor cantidad cuando se presentan la falla de corte, posiblemente por el deslizamiento de la cuña superior o inferior, donde se desplazan y no deforman (estribos).

Se observa en términos generales que las deformaciones de los estribos en la zona externa son mayores, la explicación de este fenómeno se debería a que principalmente el comienzo de la pérdida de recubrimiento ocurre en la zona externa para luego propagarse a la zona central.

Otra posible causa de la diferencia de deformaciones es que la zona externa posee un mayor nivel de confinamiento lo que podría implicar una mayor deformación de este estribo, también en las probetas sin confinamiento donde el doble empotramiento ocurre en los estribos externos, su mayor deformación podría deberse a que estos tratan de impedir el desplazamiento lateral de las barras longitudinales en esta zona.

A continuación se presenta el estado tensional de los estribos en el máximo de carga:

Tabla 4.7. Estado tensional de estribos en el máximo de carga.

Probeta	Nomenclatura	Tensión estribos [MPa]		
		Est Exterior	Est Lado Largo	Est Lado Corto
P1	TH100TOCOW130	358	Sin registro	Sin registro
P2	TH100TOCOW180	152	Sin registro	Sin registro
P3	TH100TOCOW250	136	Sin registro	Sin registro
P4	TH100TOCA100W130	481	169	46
P5	TH100TOCA100W180	123	96	89
P6	TH100TOCA100W250	401	81	279
P13	TH100TOCA150W180	225	211	23
P17	TH100TOCM150W180	116	29	25
P18	TH100TOCM100W180	371	72	38
P19	TH100TOCM100W180	112	43	203
P20	TH100TOCA2100W180	474	85	7
P21	TH100TOCD1100W180	375	182	89
P22	TH100TOCD2100W180	Sin registro	132	55
P23	TH100TOCE1100W180	379	82	157
P24	TH100TOCE2100W180	181	148	255
	promedios	277	111	106

Se observa de la Tabla 4.7 una gran dispersión en los resultados, pero en promedio se observa que los estribos de la zona central alcanzan una tensión similar de aproximadamente 110 MPa, siendo casi la mitad de la tensión alcanzada por el estribo

de la zona externa 280 MPa, todo esto teniendo en cuenta que el mecanismo de falla afecto la deformaciones de muchos de los estribos centrales.

Muchos modelos de comportamiento de hormigón confinado, asumen que en el máximo de carga los estribos están fluyendo, para el caso de estas probetas no se cumple esta hipótesis tal como se observa en la Tabla 4.8

A continuación se comparan los resultados experimentales con los efectuados por Cusson & Paultre (1995).

Tabla 4.8. Índice de confinamiento, calculada de acuerdo a ecuación [4.22]

Probeta	Nomenclatura	flx [MPa]	fly [MPa]	ICE []	fhcc/fy []	
P4	TH100T0CA100W130	0.630	0.699	0.007	0.218	
P5	TH100T0CA100W180	0.356	0.890	0.007	0.186	
P6	TH100T0CA100W250	0.302	1.914	0.012	0.364	
P13	TH100T0CA150W180	0.524	0.154	0.004	0.237	
P17	TH100T0CM150W180	0.071	0.169	0.001	0.082	
P18	TH100T0CM100W180	0.269	0.380	0.004	0.167	
P19	TH100T0CM100W180	0.162	2.040	0.009	0.373	
P20	TH100T0CA2100W180	0.318	0.048	0.003	0.094	
P21	TH100T0CD1100W180	0.678	0.892	0.011	0.274	
P22	TH100T0CD2100W180	0.490	0.555	0.007	0.189	
P23	TH100T0CE1100W180	0.304	2.109	0.011	0.241	
P24	TH100T0CE2100W180	0.551	3.422	0.019	0.407	
				Promedios	0.008	0.227

La Tabla 4.8 muestra que en promedio se obtuvo un 23% de la tensión de fluencia en el máximo de carga para los estribos, con un índice de confinamiento efectivo de un 0.8%.

El modelo de Cusson & Paultre utilizado en el trabajo de tesis de Herrera (2013) calcula la tensión de los estribos en el máximo de carga, este modelo no asume la fluencia de los estribos y propone una fórmula para el cálculo de la deformación de los estribos en este estado de carga.

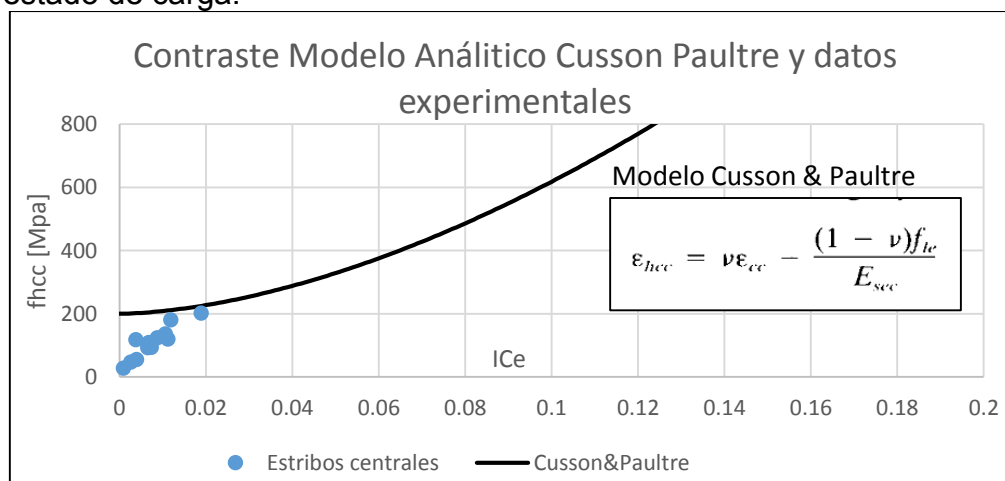


Figura 4.56. Contraste modelo Cusson & Paultre y datos experimentales para tensión de estribos en máximo de carga.

Donde:

ecc : deformación en el máximo de carga, tomada de ecuación [4.27]

$Esec$: rigidez secante tomada como f_{cc}/ecc , $l_{ce}=f_{le}/f_c'$

Se aprecia de la Figura 4.56 que el modelo propuesto no captura las tensiones de los estribos para índices de confinamiento < al 2%.

En el trabajo de Cusson y Paultre (1995) se apreciaron resultados distintos según el nivel de confinamiento²⁰ y el nivel de tensión de los estribos alcanzados en el máximo de carga, los que se expresan en la siguiente figura.

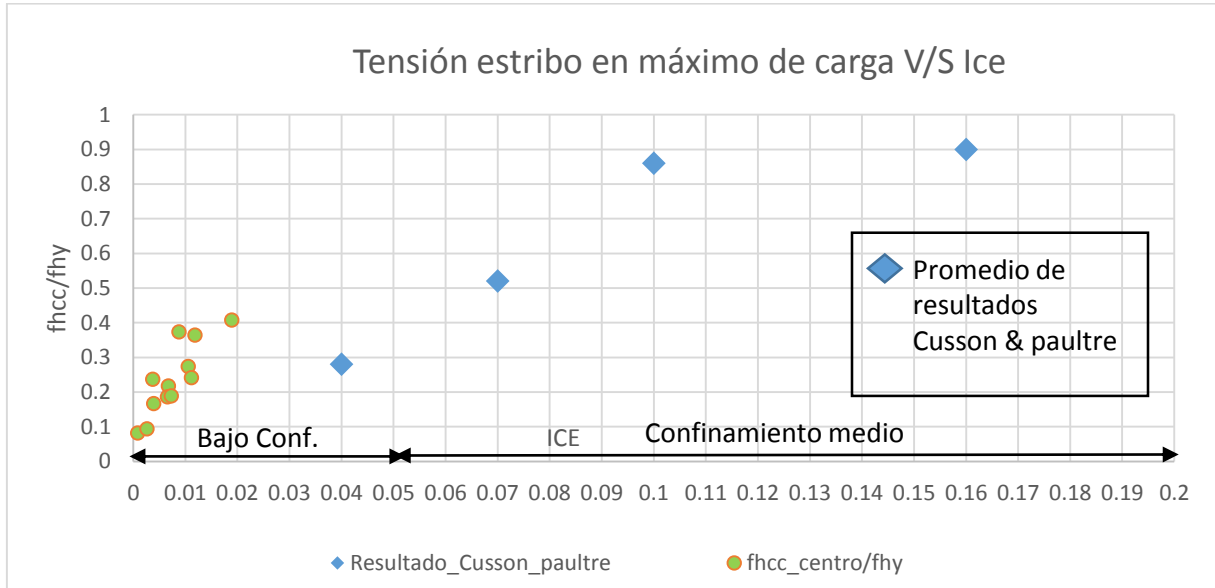


Figura 4.57. Comparación de tensiones de estribos con resultados de Cusson & Paultre

De la Figura 4.57 se observa que para los estribos centrales estos llegan en el máximo de carga a un promedio del 23% de la tensión de fluencia, lo cual es acorde a los resultados expuesto por Cusson & Paultre en el cual para probetas con bajos índices de confinamiento se alcanzó tensiones cerca del 28% de la tensión de fluencia. Cercano al 10% de índice de confinamiento se logra apreciar que los estribos tienen un 86% de la tensión de fluencia, según el estudio de Cusson & Paultre.

Físicamente este resultado se fundamenta en que al tener un bajo índice de confinamiento la deformación axial en el máximo de capacidad es baja lo cual hace que los estribos no alcancen a desarrollar suficiente deformación para poder fluir, (la probeta alcanza el máximo de capacidad antes de que los estribos comiencen a trabajar).

²⁰ Nivel de confinamiento según Cusson & Paultre (1995), Bajo índice de confinamiento <5%, 5%<medio índice de confinamiento<20%, alto confinamiento >20%

4.2.1.8.1. MODELO DEFORMACIÓN ESTRIBOS MASSONE & LOPEZ (2013)

Massone & López (2013) proponen un ajuste a la expresión de Pantazopoulou (1996) en la cual se elimina el término constante $\frac{(1-2*\nu)*k_e*\rho_s*f_{yt}}{E_c}$ de la ecuación [4.14] y se agrega una calibración al término parabólico $K\nu$, llamado “factor de expansión volumétrica” el cual es ajustado en base a los ensayos experimentales de Bayrak & Sheikh (1980).

Esta expresión fue calibrada para la deformación a nivel de estribos la cual es presentada a continuación:

$$\varepsilon_{estribos} = -\nu * \varepsilon_{axial} - K\nu * \varepsilon_{cc} * \frac{(1-2*\nu) * (\varepsilon_{axial} - 0.00015 / \nu)^2}{2 * (\varepsilon_{cc} - 0.00015 / \nu)^2} \quad \text{Ecuación [4.28]}$$

Donde:

$K\nu$ es tomado como 0.33

ν es tomado como 0.2

A continuación se compara el comportamiento de los estribos centrales con el modelo propuesto por Massone & López (2013), para algunas probetas.

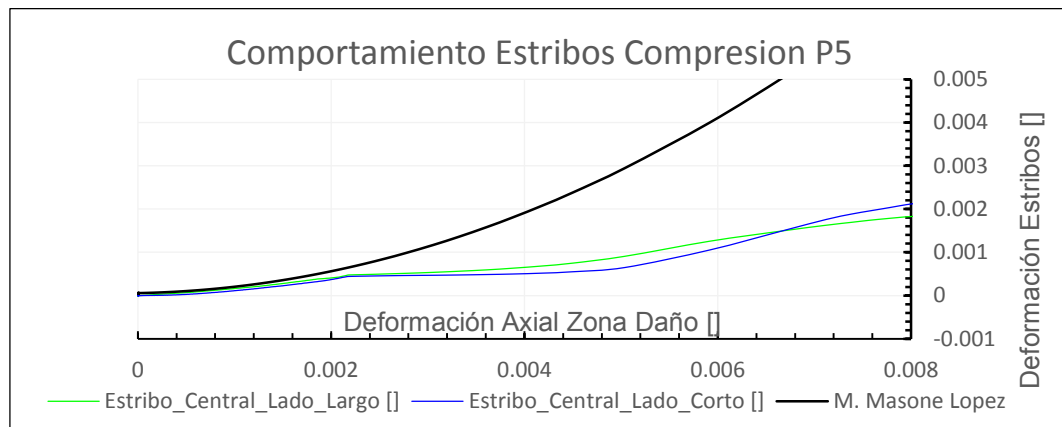


Figura 4.58. Modelo Massone López deformación estribos probeta 5

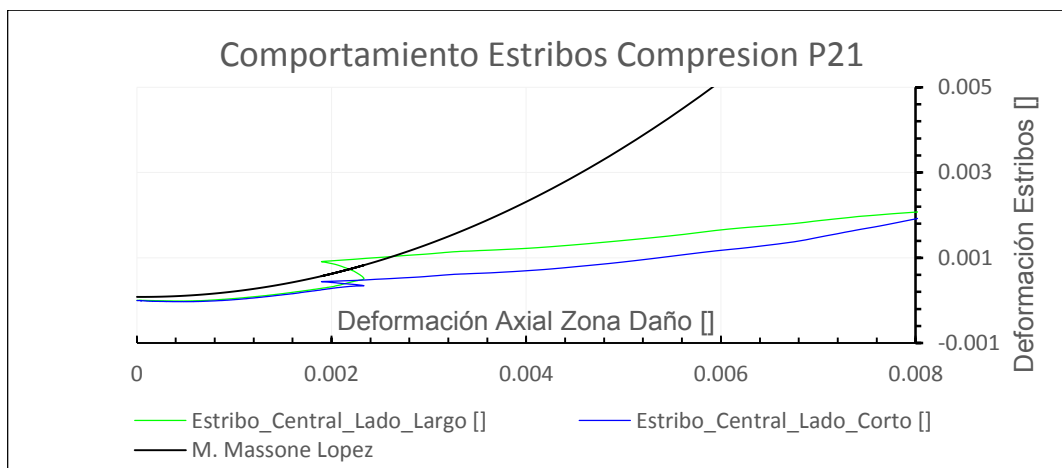


Figura 4.59. Modelo Massone López deformación estribos probeta 21

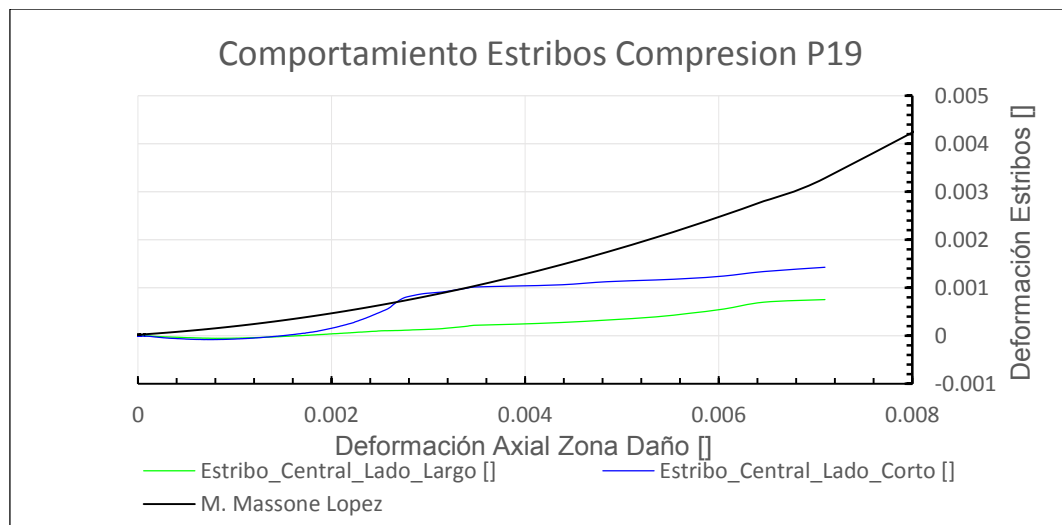


Figura 4.60. Modelo Massone López deformación estribos probeta 19

Se observa de la Figura 4.58 a la Figura 4.60 en términos generales un buen ajuste del modelo para las probetas P5 y P21 hasta el máximo de carga, posterior a este punto el modelo sobre estima las deformaciones para todas las probetas comparadas, posiblemente porque el modelo analítico asume que los estribos presentan fluencia luego del máximo de carga, lo que implicaría un mayor nivel de deformaciones.

Para la probeta P5 se observa el mejor ajuste, esta probeta fue la que falló en la zona central, sin presentar descascaramiento prematuro en las zonas externas, aumentando las deformaciones de los estribos en la zona central. En relación a la probeta P19, esta probeta aparentemente deslizó en mayor proporción debido a la falla de corte y los estribos no trabajaron, se observa que el modelo se aleja de los resultados experimentales, sobre estimando la deformación de estribos en mayor proporción que P5 y P21.

El resto de las probetas se encuentra en Anexo E, donde se muestra la deformación de estribos-deformación longitudinal y el resto de las comparaciones del modelo propuesto por Massone & López.

En relación a la armadura longitudinal, su comportamiento al igual que los estribos, depende del tipo de falla y su localización, apreciándose descarga de las barras longitudinales para las probetas donde la falla comenzó en la zona superior y se extendió a la zona central, o si solo se concentró en la zona central, pues los sensores están ubicados en la zona inferior, y no registran deformaciones pasado el máximo de carga si la falla ocurrió en la parte superior o central.

Al no existir simetría en las deformaciones de las barras longitudinales la compresión no se está distribuyendo simétricamente sobre el área transversal.

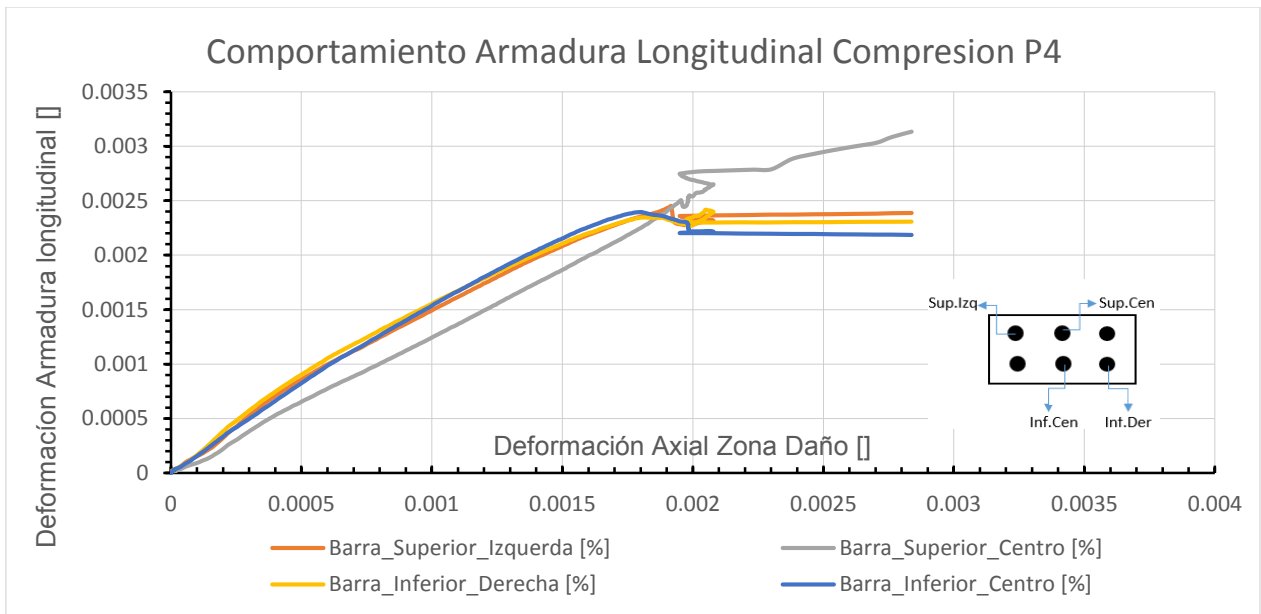


Figura 4.61. Comportamiento armadura longitudinal, concentración de falla en zona central-externa.

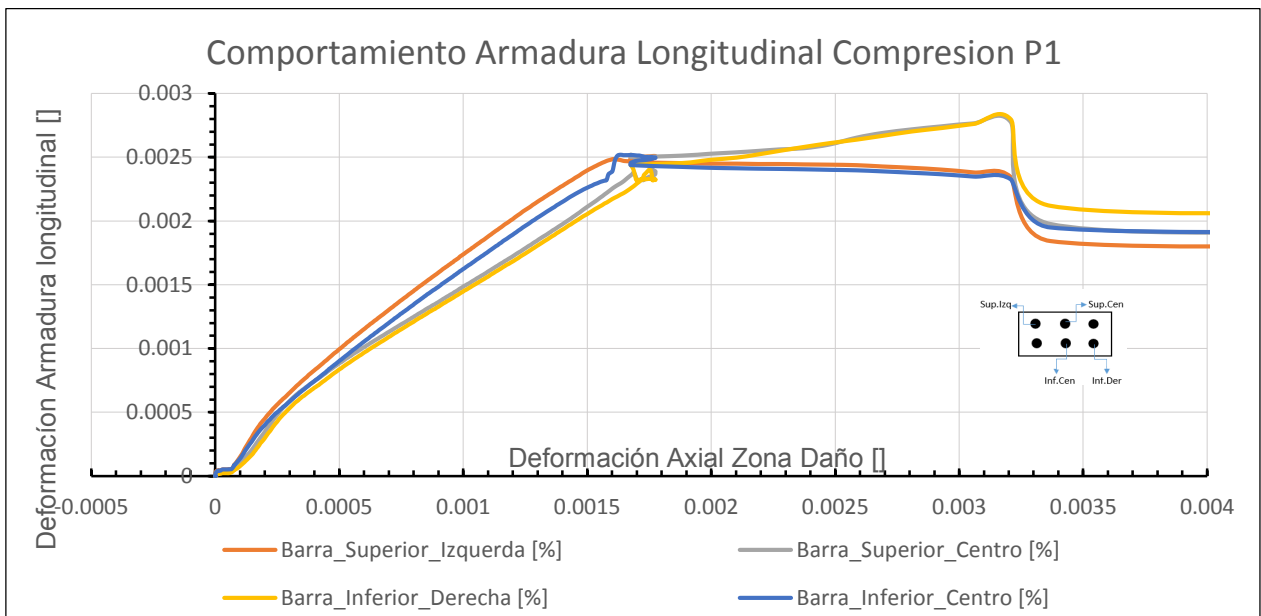


Figura 4.62. Comportamiento armadura longitudinal, concentración de falla en zona central

Se observa de la Figura 4.63 que las probetas en que la falla comenzó en la zona inferior o superior y se propagó a la zona central, la deformación de las barras longitudinales no es simétrica descargándose en un lado y trabajando en el otro.

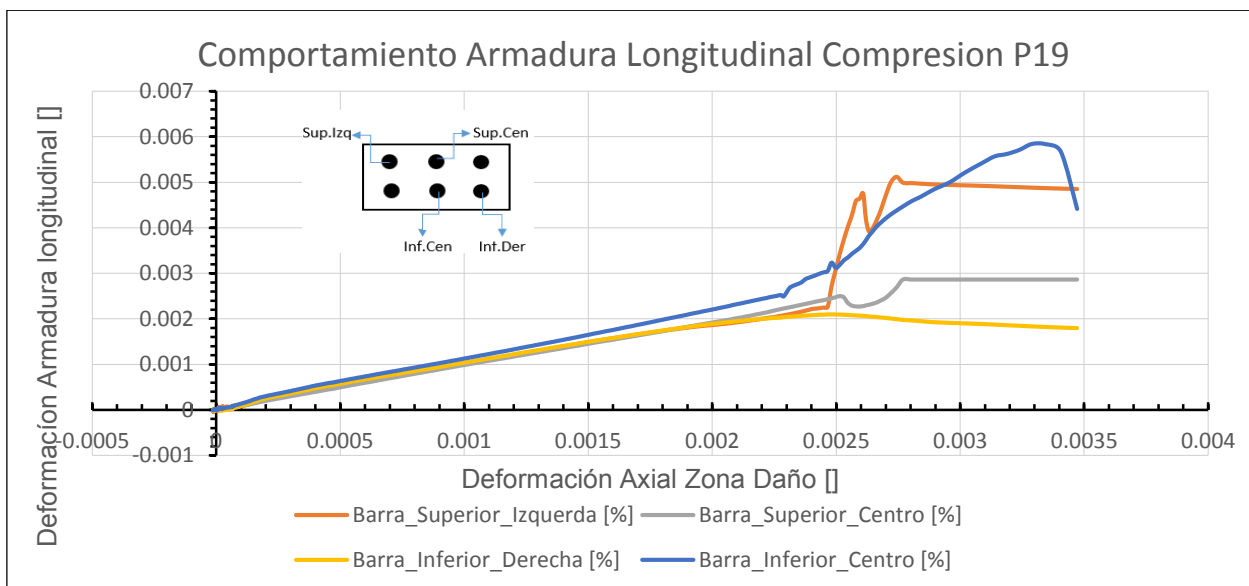


Figura 4.63. Armadura longitudinal, propagación de falla desde zona externa-inferior a zona central

El resto de las probetas es presentado en anexo F.

A continuación se presenta en Tabla 4.9 las deformaciones en el máximo de carga.

Tabla 4.9. Deformaciones en el máximo de carga armadura longitudinales.

Probeta	Nomenclatura	Carga Max [Tonf]	Deformación en máximo de Carga []				
			Zona central	Barra_Superior_Izquierda	Barra_Superior_Centro	Barra_Inferior_Derecha	Barra_Inferior_Centro
P1	TH100T0C0W130	255.4	0.0017	0.0025	0.0025	0.0024	0.0025
P2	TH100T0C0W180	267.1	0.0024	0.0110	0.0091	0.0023	0.0020
P3	TH100T0C0W250	335.2	0.0023	0.0047	0.0019	0.0021	0.0037
P4	TH100T0CA100W130	188.0	0.0019	0.0024	0.0027	0.0023	0.0022
P5	TH100T0CA100W180	258.7	0.0022	0.0021	0.0049	0.0020	0.0039
P6	TH100T0CA100W250	350.7	0.0022	0.0062	0.0072	0.0021	0.0083
P13	TH100T0CA150W180	241.0	0.0021	0.0034	0.0019	0.0020	0.0021
P17	TH100T0CM150W180	247.4	0.0024	0.002	0.002	0.006	0.004
P18	TH100T0CM100W180	243.7	0.0021	0.003	0.003	0.002	0.006
P19	TH100T0CM100W180	242.9	0.0035	0.005	0.003	0.002	0.004
P20	TH100T0CA2100W180	215.3	0.0016	0.002	0.002	0.002	0.002
P21	TH100T0CD1100W180	279.8	0.0019	0.002	0.005	0.002	0.006
P22	TH100T0CD2100W180	253.0	0.0020	0.002	0.007	0.002	0.002
P23	TH100T0CE1100W180	256.5	0.0030	0.002	0.002	0.003	0.002
P24	TH100T0CE2100W180	270.3	0.0025	0.002	0.002	0.002	0.009

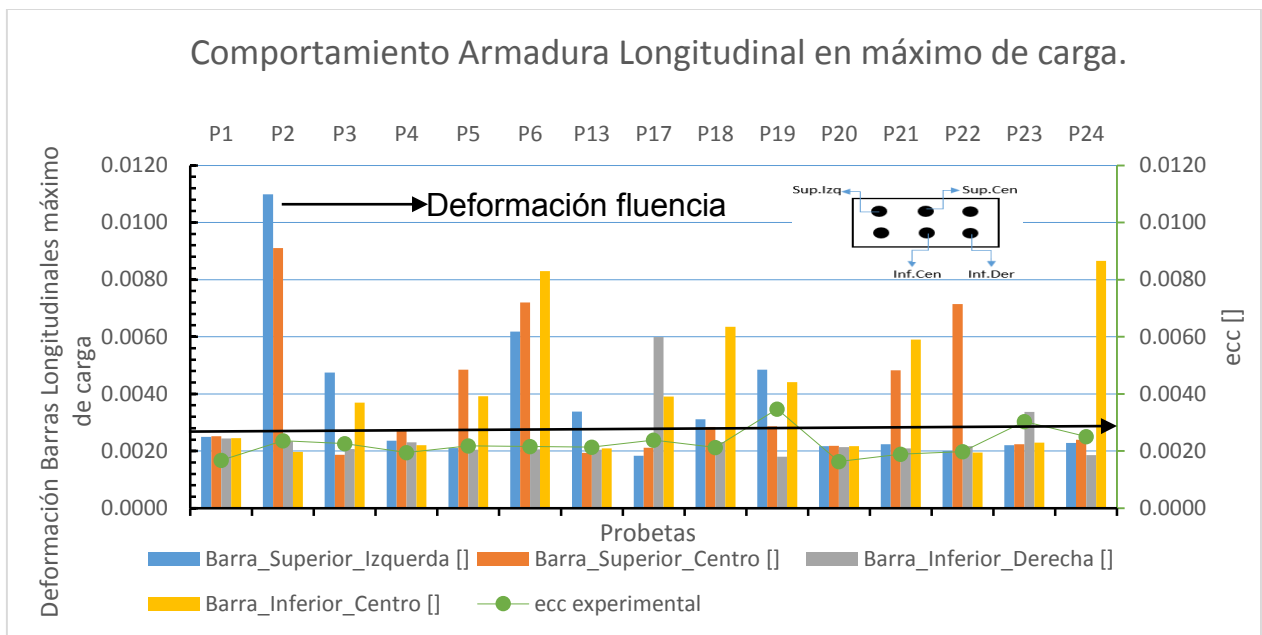


Figura 4.64. Deformación en máximo de carga armadura longitudinal

De la Figura 4.64 se desprende que la deformación en el máximo de capacidad de carga de la probeta está ligada a la deformación máxima de las barras longitudinales para la mayoría de las probetas, como es de esperar, pues el pandeo de las barras longitudinales define el estado máximo de carga.

Se esperaría que los 4 sensores presentaran simetría en sus deformaciones en la carga máxima, esto se podría deber a muchos factores entre los cuales se puede destacar al mecanismo de falla, presentando algunos sensores mayor deformación en relación a la zona donde comienza la falla, a una compresión no uniforme de las caras de la probeta (ver sección 4.2.1.2), o a una posición de las barras longitudinales no perfectamente simétrica lo cual indujo diferencias en sus deformaciones.

Se observa que cuando ocurre la aparición prematura de la falla en la zona inferior o superior²¹ y dependiendo de la magnitud, hace que las barras afectadas alcancen la fluencia más rápidamente que las barras que no están afectadas por este fenómeno. Esto se explica porque las barras están menos impedidas de pandearse una vez que se ha perdido el hormigón de recubrimiento

²¹ Es una hipótesis ya que los sensores de las barras longitudinales se ubican solo en la zona inferior.

4.2.2. PROBETAS CON PRE-TRACCIÓN

A continuación se presenta el análisis del comportamiento de las probetas sometidas a pre-tracción, abordando los puntos más relevantes.

En la Figura 4.65 se describe el comportamiento general carga axial-deformación axial de las probetas sometidas a pre-tracción de la armadura longitudinal.

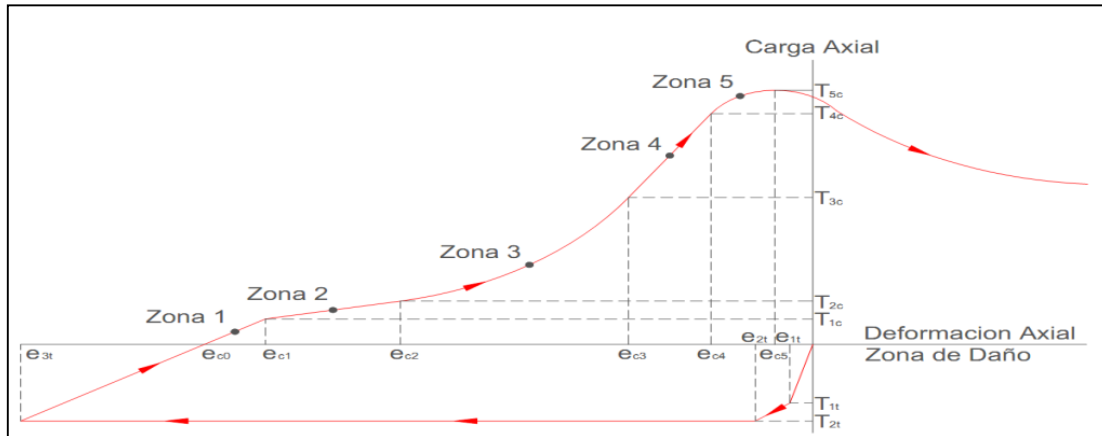


Figura 4.65. Descripción general probetas con pre-tracción

A-Ensayo de tracción

En el comienzo del ensayo, tanto el hormigón como las barras longitudinales trabajan a tracción, posterior a esta fase, el hormigón alcanza su máxima resistencia a tracción, dejando sólo a la armadura longitudinal aportando resistencia. (T_{1t} , e_{1t}).

Aproximadamente a los 15Mpa las barras longitudinales alcanzan la fluencia, pues, se observa una deformación constante a una misma carga y porque asumiendo el hormigón agrietado, la tensión en las barras sería de 530MPa, tensión superior a la de fluencia. Posteriormente se controla esta deformación para lograr la deformación (pre-tracción) de diseño. (15Mpa, e_{2t}).

Luego de alcanzar la deformación de diseño se observa la descarga de los gatos hidráulicos sobre la armadura longitudinal, la cual finalizado el ensayo, las probetas presentan una deformación remanente. (0MPa, e_{c0}).

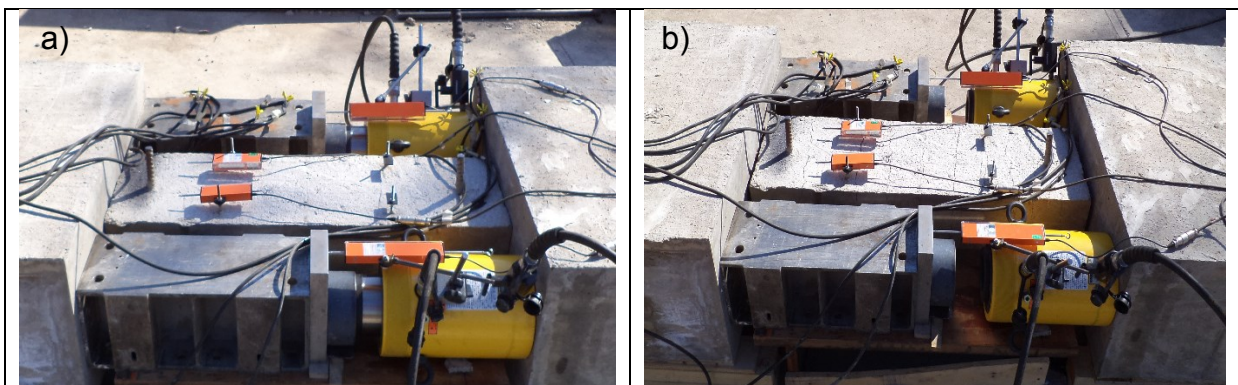


Figura 4.66. a) Comienzo ensayo a tracción, b) Término de ensayo a tracción, se observan grietas.

B-Descripción ensayo a compresión²²:

Zona 1: En esta zona las grietas están totalmente abiertas, sólo las barras longitudinales toman carga a compresión, se observa que las barras longitudinales tienen la misma rigidez que cuando se descargaron en el ensayo de tracción.

Zona 2: En esta zona aún las grietas están abiertas, hecho que lo corrobora la no expansión transversal del hormigón y la leve deformación de los estribos. En esta zona se observa una disminución de la rigidez, hecho que se puede deber a la inestabilidad de la armadura longitudinal (máximo de capacidad en compresión). Se aprecia que esta zona en cuanto a tensiones está delimitada entre un intervalo de 6MPa a 13MPa aproximadamente (límite superior) para 2% de tracción y 9 MPa para 1% de tracción (Figura 4.77), cuya tensión es propia del inicio de expansión del hormigón perimetral y de la deformación mayor de los estribos.

Zona 3: En esta zona comienza el cierre de grietas, se observa además que el hormigón comienza a aportar rigidez a la probeta en forma no lineal, quedando esta zona delimitada hasta que la probeta ha cerrado completamente las grietas, y comienza a deformarse aproximadamente en forma lineal.

Zona 4: En esta zona la probeta tiene deformaciones aproximadas lineales, observadas en la Figura 4.68 a la Figura 4.70. Ya que el núcleo de hormigón aporta resistencia a compresión.

Zona 5: En esta zona se alcanza el máximo de capacidad de carga y comienza la degradación pasado este punto.

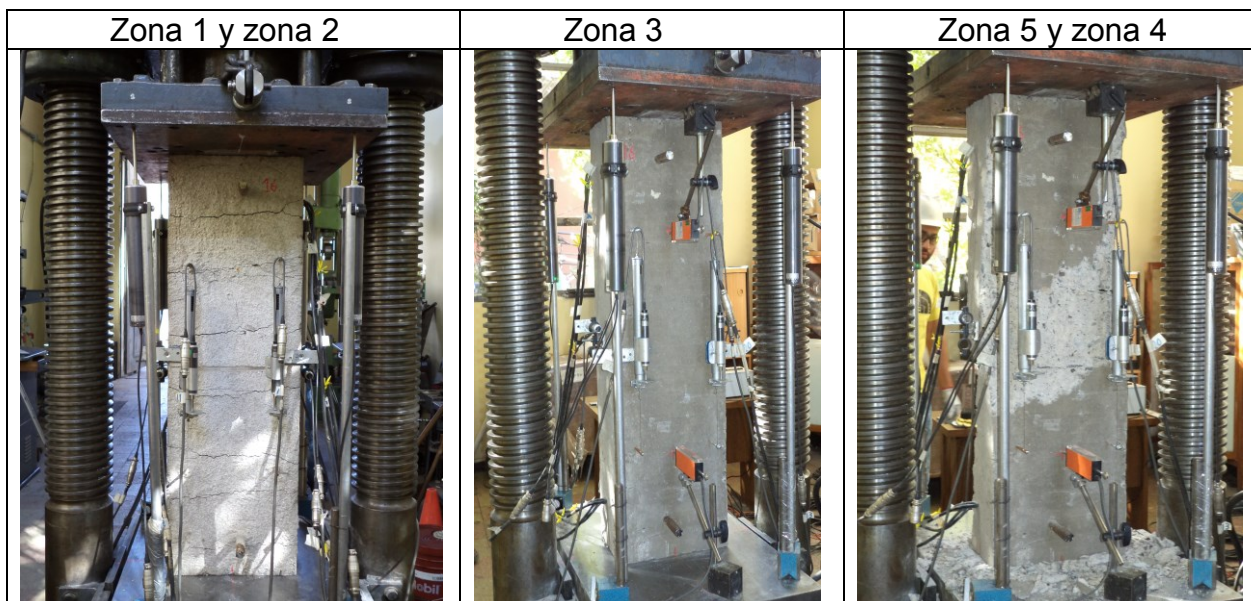


Figura 4.67. Descripción general ensayo a compresión probetas con pre-tracción

²² Esta descripción se realiza luego de analizar todos los sensores de las probetas con pre-tracción.

A continuación se describen algunas comparaciones de las probetas con pre-tracción:

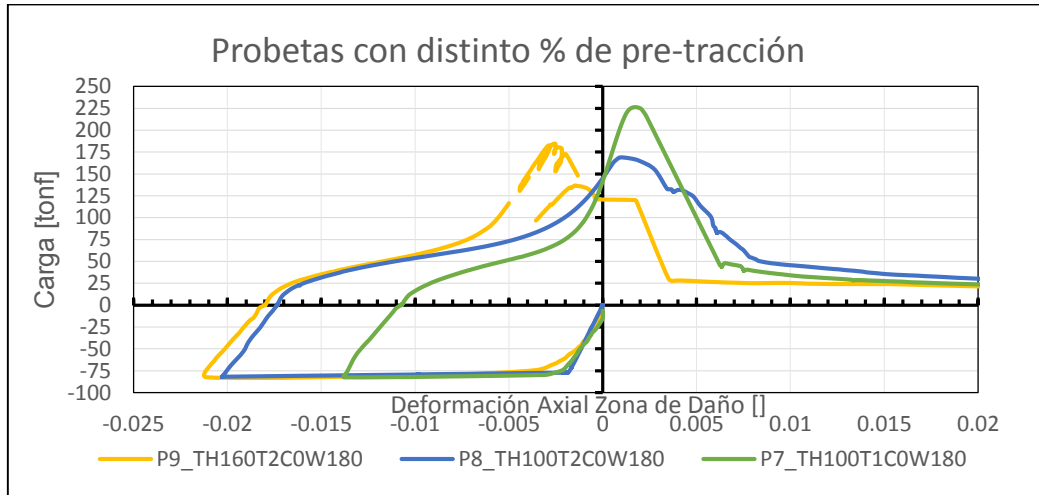


Figura 4.68. Probeta P7, 1% de pre-tracción y probeta P8, 2% pre-tracción.

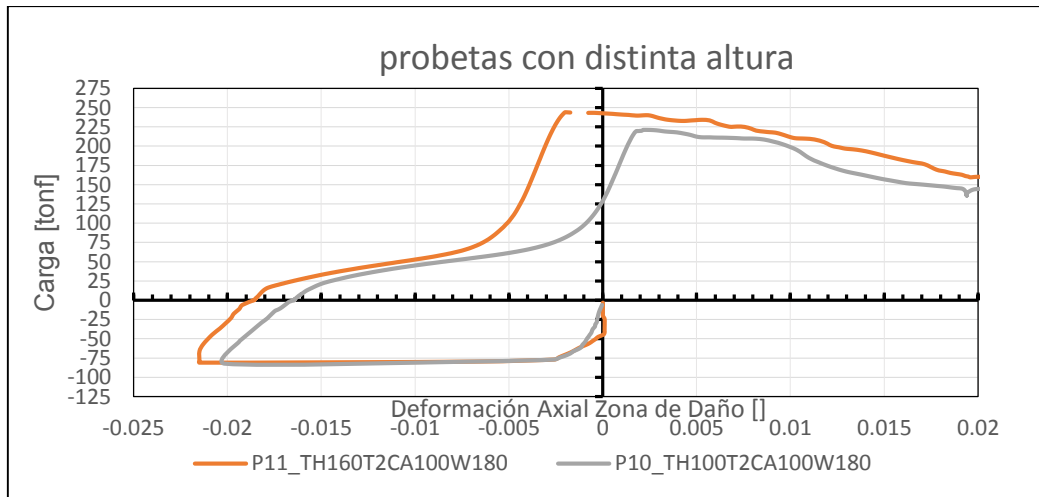


Figura 4.69. Probetas con distinta altura, L=1.6m y L=1m

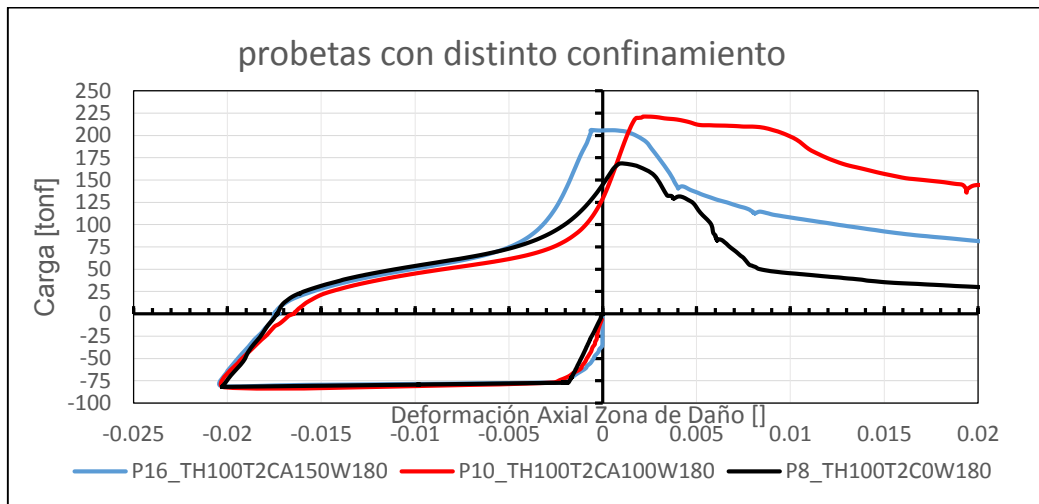


Figura 4.70. Probetas L=1m s@150mm, s@100mm, sin confinamiento

De la Figura 4.68 se observa que el % de pre-tracción influye en la carga máxima, observándose un aumento de capacidad en relación a las probetas con 2% de pre-tracción, también se observa de esta figura, que el espaciamiento de estribos da un leve aumento de capacidad. Se observa que la probeta con altura 1.6m la deformación en el máximo de carga se encuentra en la zona en la cual la probeta aún no ha recobrado su longitud inicial.

De la Figura 4.69 se aprecia lo relacionado al corrimiento de la deformación en el máximo de carga (probeta P11), se observa que pasado el máximo de carga el comportamiento es similar para ambas probetas.

De la Figura 4.70 es posible observar que el espaciamiento de estribos está ligado tanto al máximo de capacidad de carga como a la respuesta en degradación, observándose que un aumento de carga y una menor velocidad de degradación con una disminución de espaciamiento de estribos.

A diferencia de las probetas sin pre-tracción, el espaciamiento de los estribos tiene relevancia en los resultados antes del máximo de carga observándose que un mayor nivel de confinamiento aumenta la capacidad de carga para un mismo nivel de pre-tracción. Hecho que podría deberse a que el confinamiento impide la inestabilidad de la armadura longitudinal.

En relación al comportamiento en degradación pasado el máximo de carga se observa un comportamiento similar a las probetas sin pre-tracción, donde un mayor nivel de confinamiento otorga mayor ductilidad a la probeta, retrasando la pérdida de carga para grandes deformaciones.

A continuación se muestran los valores característicos en el máximo de carga para cada probeta.

Tabla 4.10. Valores característicos en máximo de carga , probetas con pre-tracción

Probeta	Nomenclatura	Carga máx. [Tonf]	ecc []
P7	TH100T1COW180	225.9	0.0016
P8	TH100T2COW180	168.7	0.001
P9	TH160T2COW180	198.2	-0.00269
P10	TH100T2CA100W180	221.1	0.0018
P11	TH160T2CA100W180	243.8	-0.00205
P16	TH100T2CA150W180	206.3	-0.0005

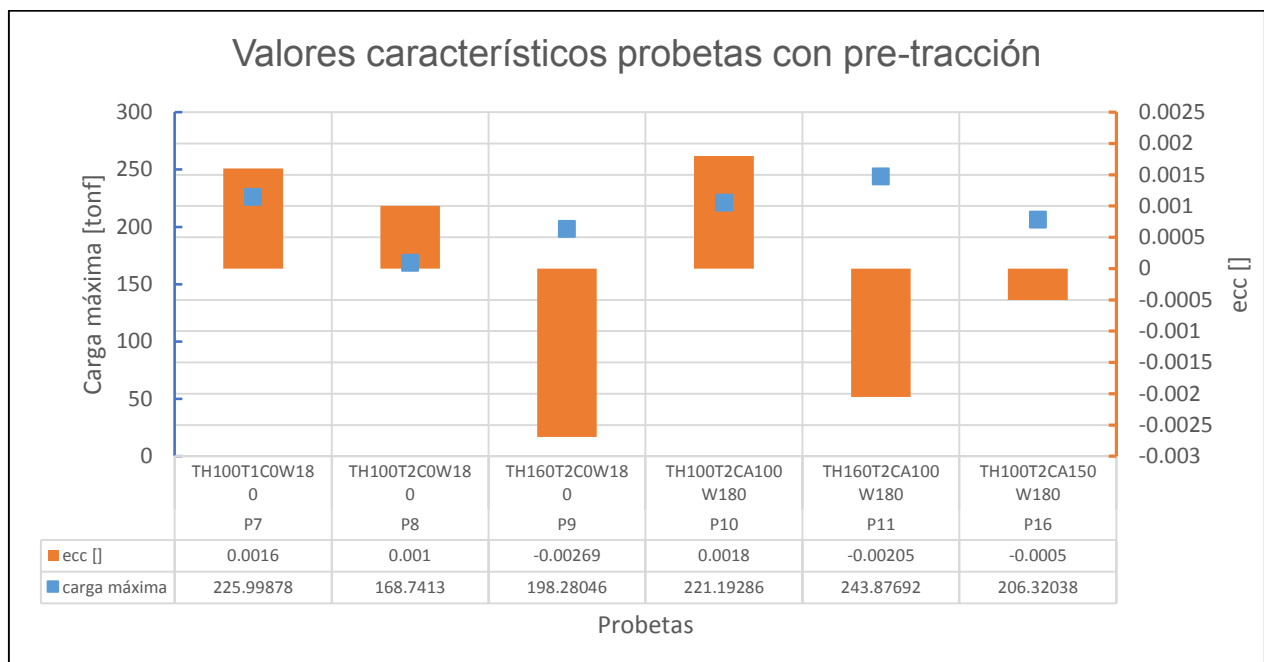


Figura 4.71. valores característicos en máximo de carga, probetas con pre-tracción

De la Figura 4.71 se aprecia que el nivel de deformación en el máximo de carga no está relacionado con la capacidad de carga, a diferencia de las probetas sin pre-tracción, donde un aumento de carga máxima generalmente lleva consigo un aumento de deformación en ese estado de carga.

En relación a lo comentado anteriormente, la probeta P11, muestra un corrimiento de su deformación en el máximo de carga, sin embargo es una de las probetas con mayor capacidad de carga, en cambio la probeta P8, muestra la menor capacidad de carga y sin embargo posee una deformación en el máximo de carga positiva.

Para poder definir las zonas en la Figura 4.65 se analizan los sensores con los que se instrumentaron las probetas.

Un hecho importante es el cierre de grietas²³, a continuación se analiza el nivel de expansión transversal (Modulo de Poisson) en relación a la deformación axial de las probetas en la parte del ensayo a compresión, pues no se instrumentó transversalmente las probetas en el ensayo a tracción.

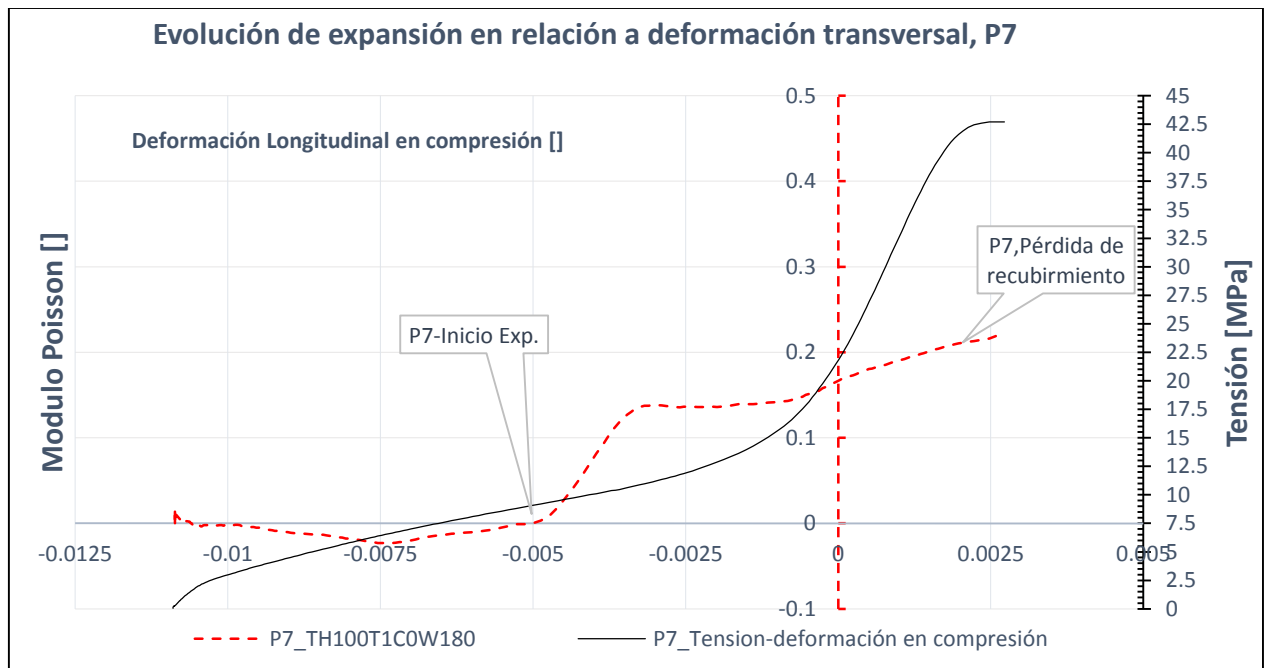


Figura 4.72. Evolución de la expansión perimetral, probetas con pre-tracción.

De la Figura 4.72 se puede caracterizar el comportamiento de las probetas con pre-tracción en relación al comienzo de la expansión perimetral, ya que el comportamiento es similar en general para las probetas con pre-tracción.

Se observa que no existe expansión perimetral hasta cuando el módulo de Poisson aumenta en un intervalo corto de deformaciones, hecho que se debe posiblemente al comienzo del cierre de grietas, posterior a ese punto se observa una aceleración de la deformación transversal posiblemente debido a cuando las grietas ya han cerrado, sin embargo también podría deberse a la pérdida de hormigón perimetral o a una combinación de estos factores.

²³ Se asume que el cierre de grietas ocurre cuando el hormigón toma contacto, es decir existe expansión del hormigón perimetral.

A continuación se realizan comparaciones entre las distintas variables de las probetas con pre-tracción.

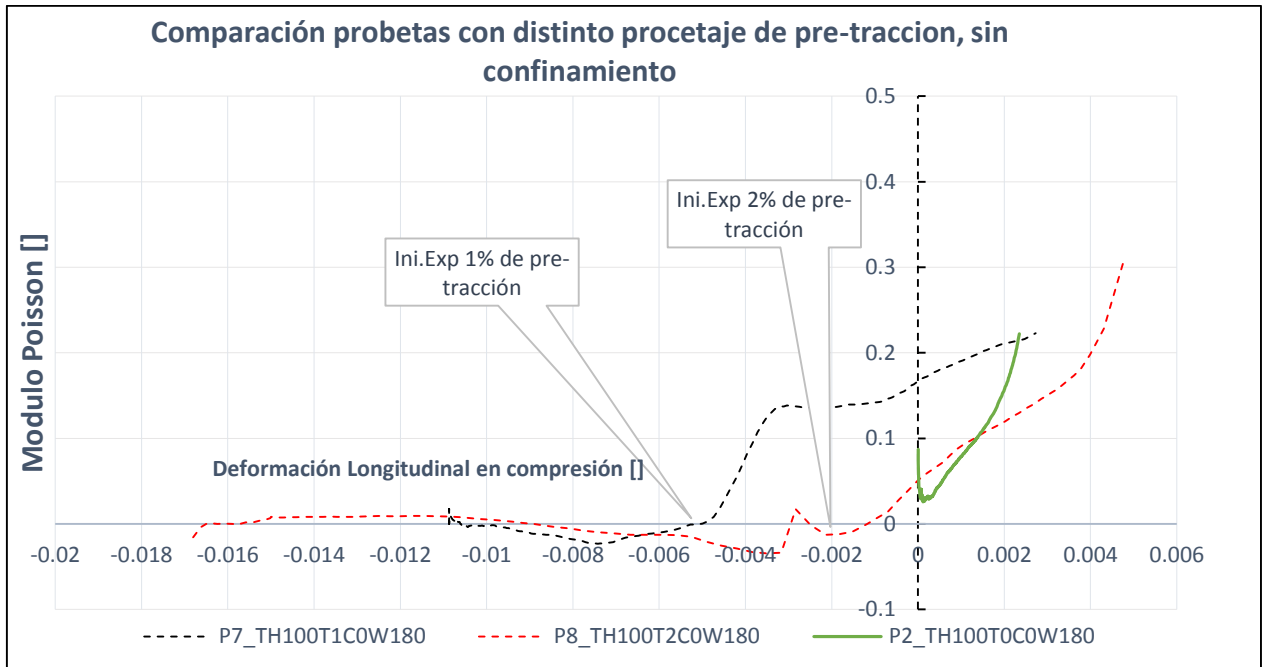


Figura 4.73. Evolución de la expansión perimetral, probetas con 0%, 1% y 2% de pre-tracción, sin confinamiento

De la Figura 4.73 se observa que la expansión del hormigón perimetral está ligada con el % de pre-tracción, observándose que la probeta con 0% de pre-tracción casi instantáneamente comienza a expandirse, la probeta con 1% de pre-tracción la expansión comienza alrededor del 45% de su deformación en el máximo de capacidad y la probeta con 2% de pre-tracción comienza a expandirse cerca del 65% de su deformación en el máximo de capacidad.

Se observa también del gráfico que existe una mayor expansión para la probeta P8 en relación a la probeta P7, lo cual podría incidir en una pérdida anticipada de recubrimiento, hecho que disminuiría la pérdida de capacidad.

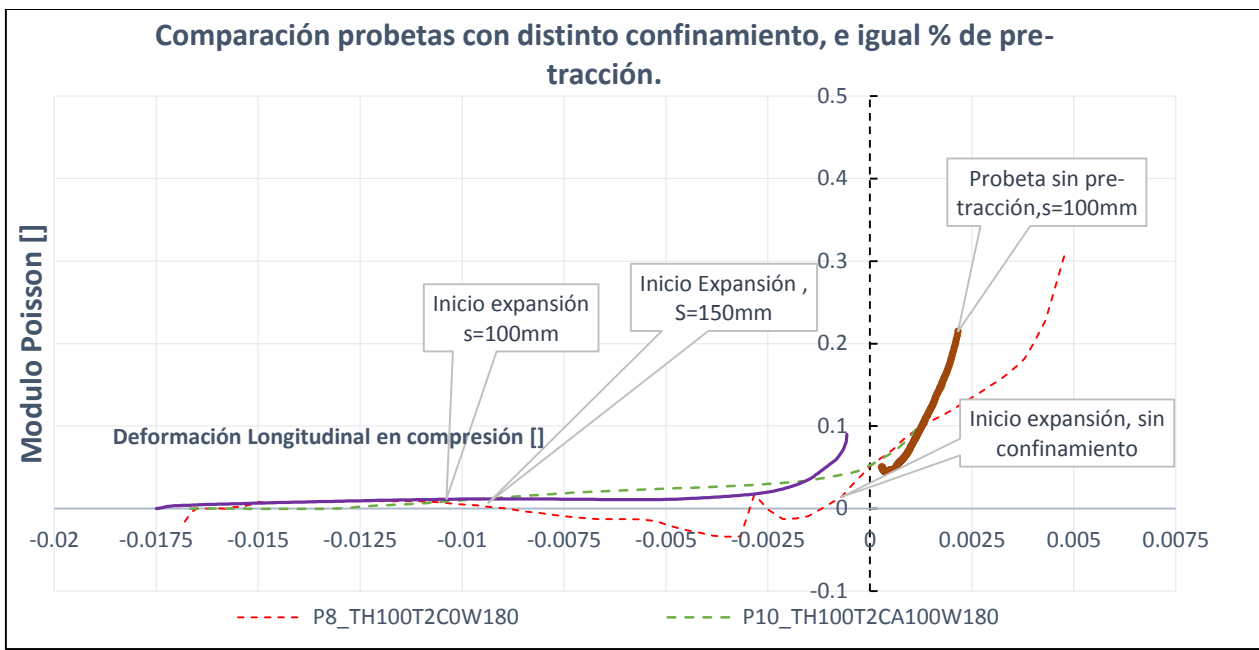


Figura 4.74. Evolución de la expansión perimetral, probetas con distinto confinamiento y 2% de pre-tracción.

De la Figura 4.74 no se aprecia una diferencia relevante entre las probetas con espaciamiento $s=100\text{mm}$ y $s=150\text{mm}$, en relación al inicio de la expansión, si se puede observar una disminución del nivel de expansión con un mayor confinamiento para las probetas con pre-tracción.

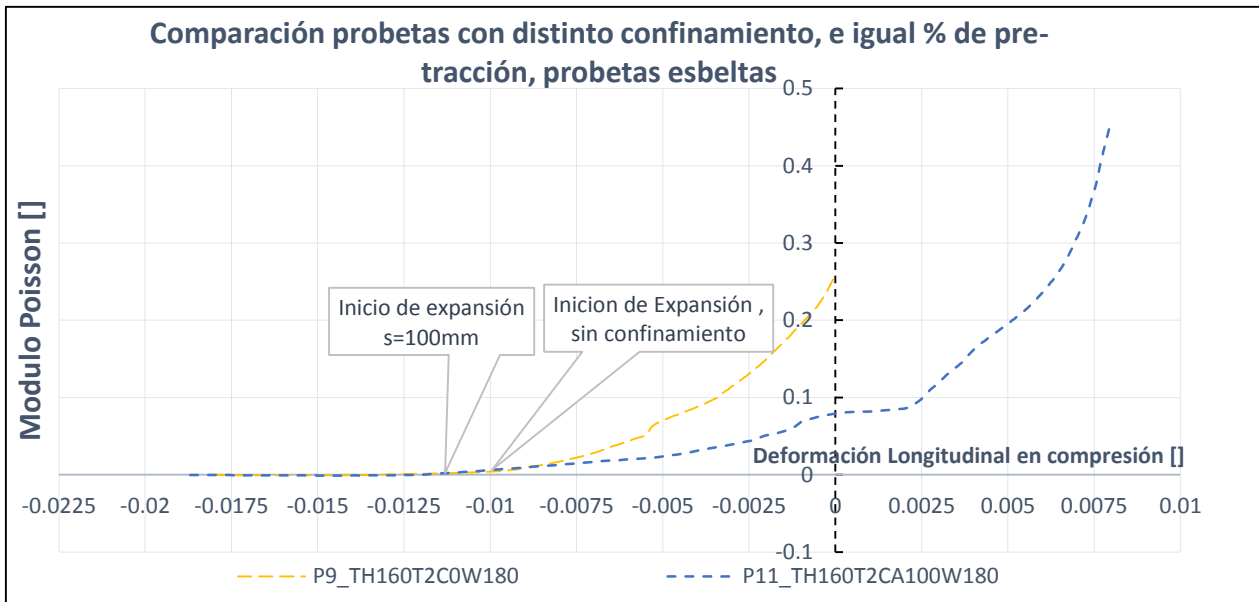


Figura 4.75. Evolución de la expansión perimetral, probetas con distinto confinamiento, 2% de pre-tracción probetas esbeltas,

De la Figura 4.745 no se observa una gran diferencia en el comienzo de la expansión para las probetas esbeltas, si se observa un mayor nivel de expansión en relación al confinamiento, apreciándose que la probeta sin confinamiento se expande en mayor grado luego de haber comenzado la expansión.

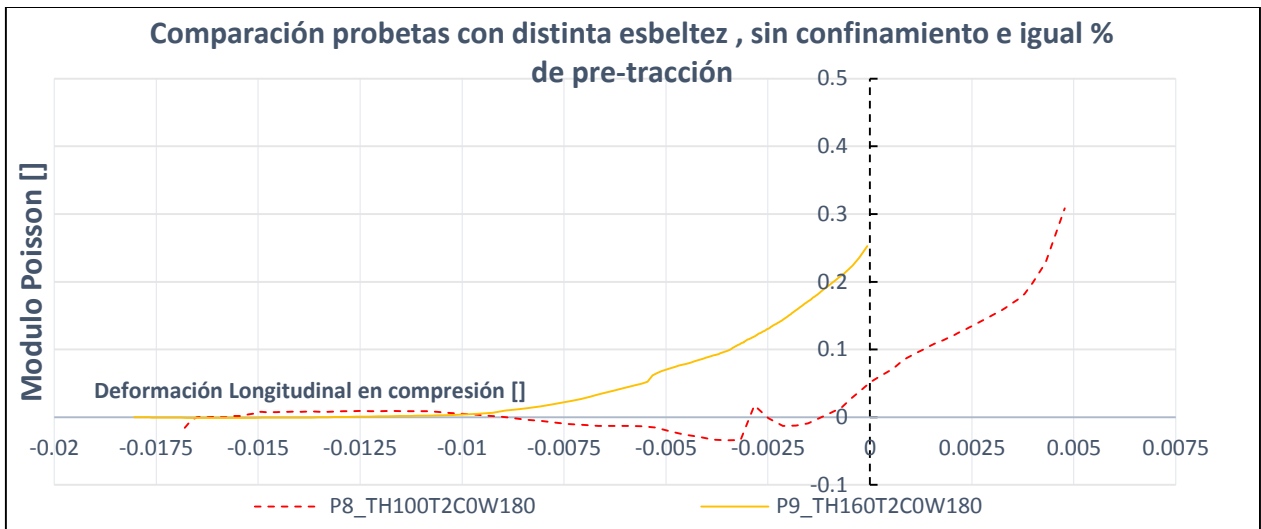


Figura 4.76. Evolución de la expansión perimetral, probetas con distinta esbeltez, 2% de pre-tracción probetas esbeltas.

De la Figura 4.76 se observa que una mayor esbeltez anticipa la expansión del hormigón perimetral, ambas probetas presentan un nivel de expansión similar.

En relación al nivel tensional y al cierre de grietas se puede destacar:

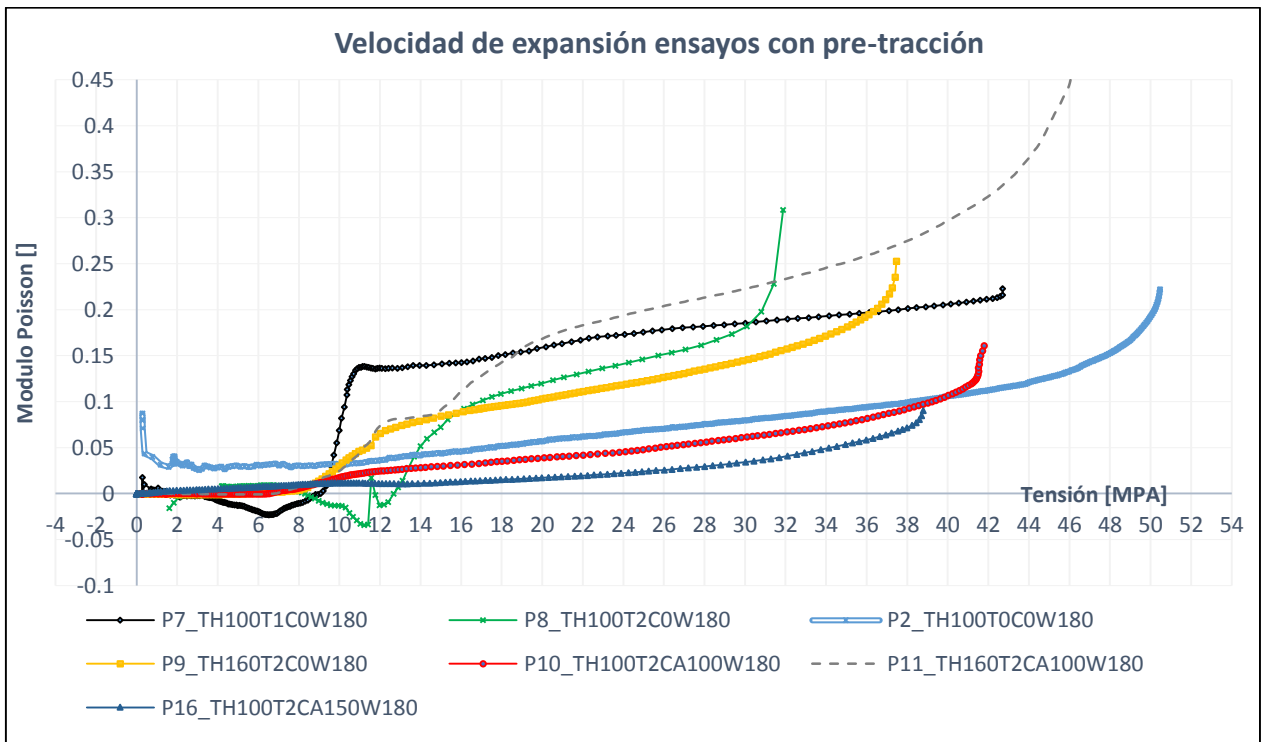


Figura 4.77. Velocidad de expansión transversal en toma de carga , probetas con pre-tracción

De la Figura 4.77 se observa que dentro de un intervalo de 7MPa a 13MPa ocurre la expansión del hormigón perimetral, observándose un aumento del módulo de Poisson para una pequeña diferencia de tensiones podría implicar la expansión, este cambio es más acentuado para la probeta con 1 % de pre-tracción siendo más gradual para las probetas con 2% de pre-tracción.

El comportamiento antes del cierre de grietas se puede ver reflejado con los sensores SDPs en relación a la inestabilidad de la probeta, los cuales se observan a continuación.

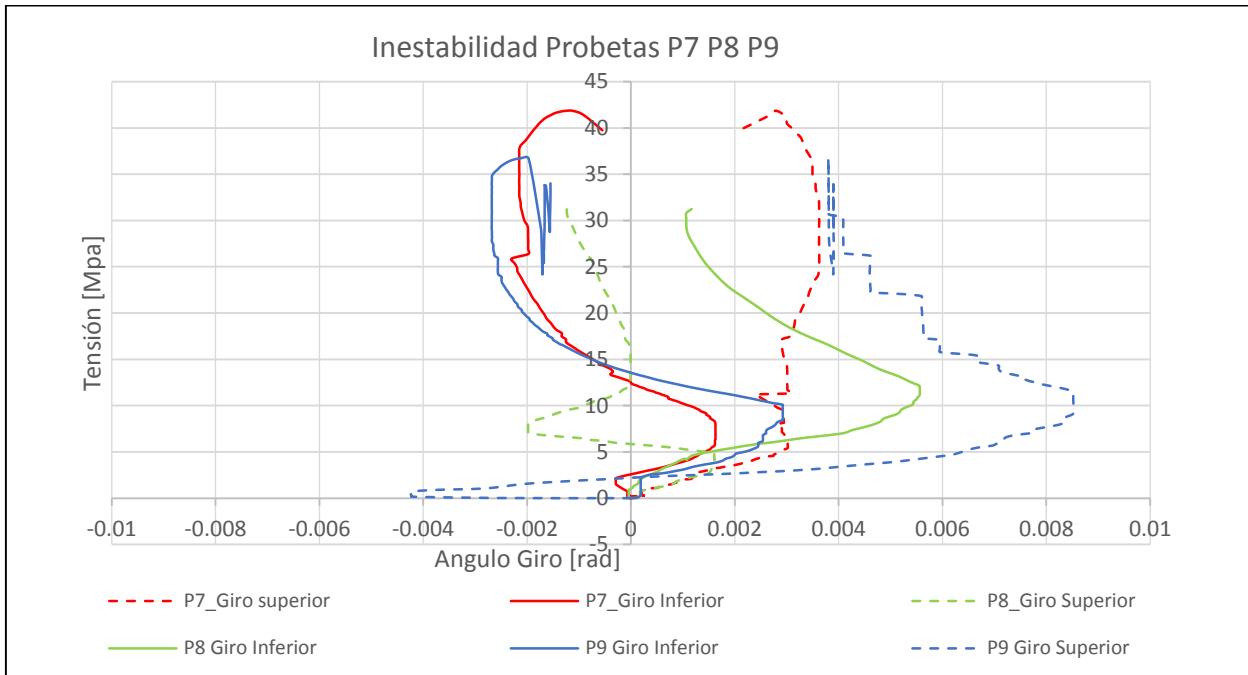


Figura 4.78. Inestabilidad probetas P7, P8, P9, probetas con pre-tracción, sin confinamiento

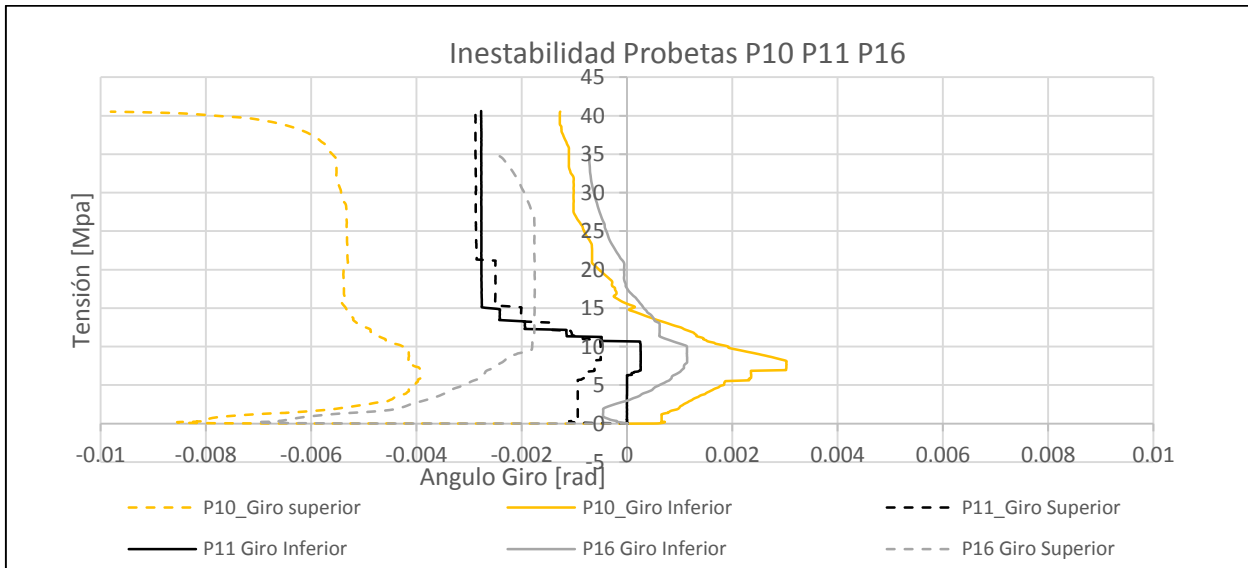


Figura 4.79. Inestabilidad probetas P10, P11, 16, probetas con pre-tracción, con confinamiento

De la Figura 4.78 y Figura 4.79 se observa que para tensiones bajo los 13MPa, se observa gran inestabilidad en cuanto al giro, lo que representaría un movimiento fuera del plano de la probeta. Una posible causa de esta inestabilidad es que sea causada por las barras longitudinales las cuales están siendo comprimidas y tratando de pandearse pues el hormigón no aportaría resistencia, ya que para este estado de tensiones la expansión transversal aún no ocurriría.

Se observa que las probetas con menos inestabilidad en esta zona presentan una capacidad de carga máxima mayor, se observa que la probeta P11, es aquella que presenta la menor inestabilidad y la mayor ganancia de carga, mientras que la probeta P8 es una de que presenta mayor inestabilidad y la carga máxima menor. En el máximo de carga no se aprecia grandes diferencias en relación a la inestabilidad para las probetas más esbeltas P11 y P9 en relación a las otras probetas.

El análisis de los sensores locales en los estribos también entrega información importante para poder caracterizar el comportamiento de las probetas con pre-tracción.

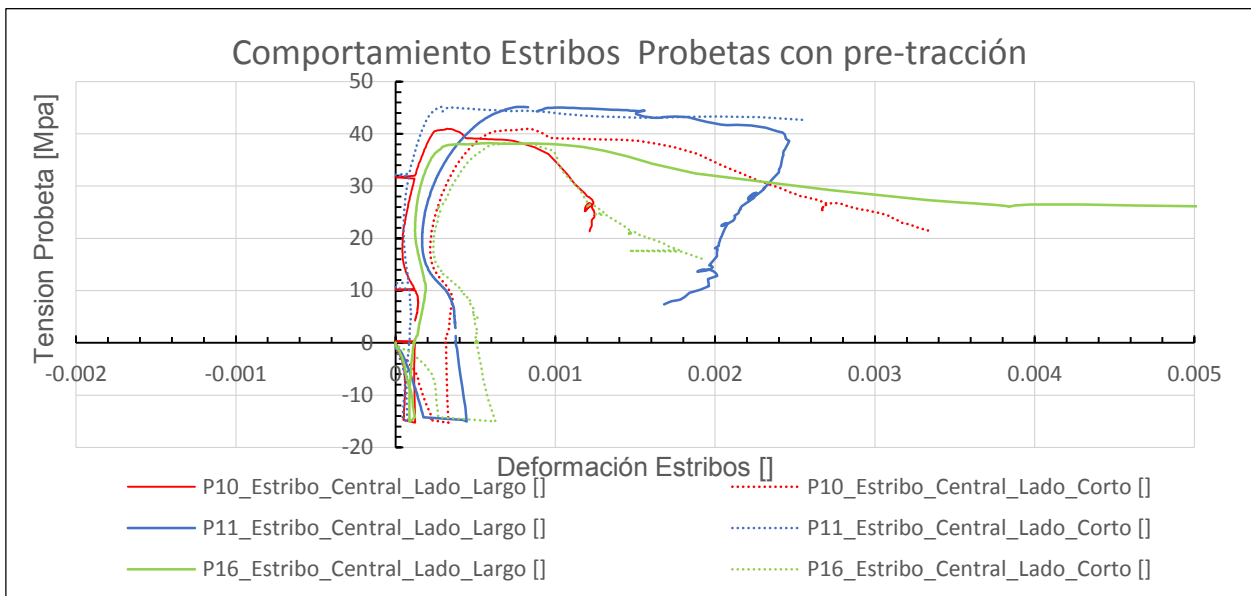


Figura 4.80. Comportamiento estribos probetas con pre-tracción y con confinamiento.

En la Figura 4.80 es posible apreciar que en la etapa de tracción de las barras longitudinales, los estribos presentan una pequeña expansión, posiblemente porque los resaltes de las barras longitudinales trabaron a éstos haciendo que se expandieran.

Posterior a la tensión donde comienzan la expansión transversal (Figura 4.77) se observa una pequeña contracción de los estribos, posiblemente explicada por la transferencia de tensiones de las barras longitudinales al hormigón que está ya en contacto pues se está expandiendo (13MPa), presentando una pequeña descarga la armadura transversal, posterior a este hecho comienza la expansión de los estribos, ya se ha traspasado la tensión hacia el hormigón el cual ya está aportando presión lateral hacia los estribos tratando de deformarlos.

Se debería esperar una mayor deformación de los estribos en la zona antes del comienzo del cierre de grietas, posiblemente no se observe esta condición porque tal vez son además otros los estribos que están conteniendo la inestabilidad de las barras longitudinales. Recordar que solo son 3 estribos los instrumentados, y las grietas están sobre todo el largo de la probeta, por lo cual debiesen contener la tendencia al pandeo todos los estribos.

En el trabajo de Herrera (2013) se postula como hipótesis para explicar la pérdida de capacidad de carga máxima, al agrietamiento del hormigón perimetral por nivel de pre-tracción, el cual perdería resistencia al ser comprimido, según la siguiente relación:

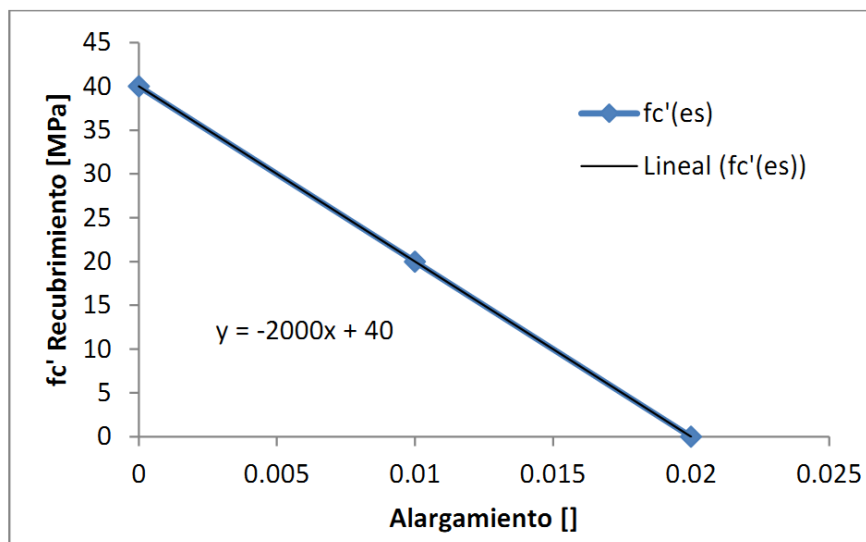


Figura 4.81. Modelo propuesto para determinar la pérdida de resistencia del hormigón perimetral por nivel de pre-tracción Herrera (2013).

El modelo planteado por Herrera (2013) implícitamente traduce la pérdida del área perimetral traducido a una pérdida de resistencia de esta zona.

Este modelo no indica cuando se produce esta pérdida de recubrimiento por lo cual si se analiza después de la expansión del hormigón de acuerdo a las Figuras 4.73 a 4.76 sería correcto pues se observa que las probetas con 2% de pre-tracción se expanden más aceleradamente que la probeta con 1% de pre-tracción, hecho que se traduciría en una pérdida de recubrimiento anticipada y por consiguiente una pérdida en la capacidad. Se observa que la aceleración de la expansión también depende del nivel de confinamiento, por lo cual esto también sería una variable en relación a la pérdida de capacidad lo que el modelo de Herrera (2013) lo captura.

Si se analiza el modelo antes de la expansión del hormigón, se podría asumir que para que se pierda el recubrimiento anticipadamente, el contacto del hormigón debería ser antes (inicio de expansión perimetral) hecho que no se observa en la Figura 4.73, por lo cual visto desde el punto de vista del inicio de la expansión del hormigón no sería correcta esta hipótesis. Se observa que el inicio de la expansión perimetral depende de la esbeltez de la probeta.

Del modelo planteado por Herrera (2013) si observa un buen acercamiento a los resultados experimentales, por lo cual un mayor nivel de expansión luego que está en contacto el hormigón si podría traducirse en una pérdida de resistencia del hormigón perimetral.

Figura N° 4.28 - Variable Confinamiento (Conf.A@10[cm] v/s Sin Confinamiento)

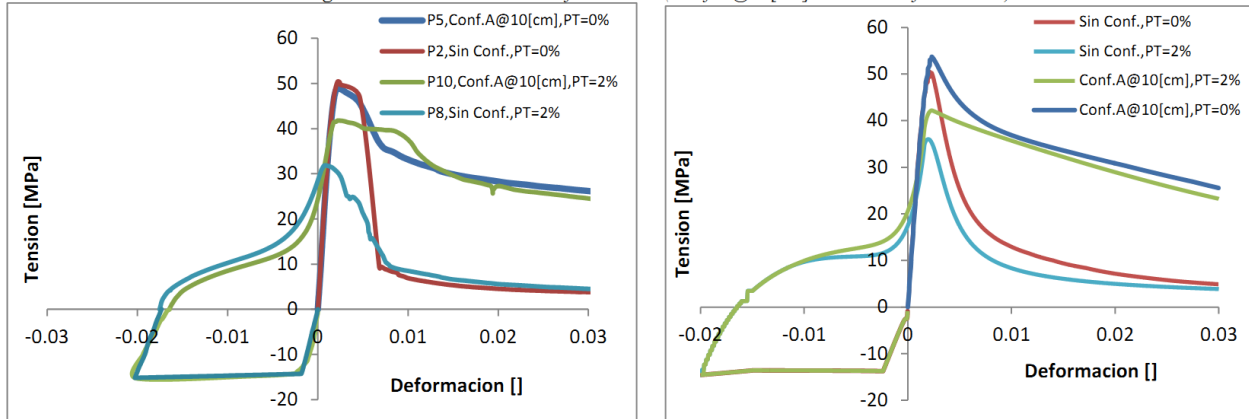


Figura 4.82. Modelo para probetas con diferencia de confinamiento Herrera (2013)

De la Figura 4.82 se observa un buen acercamiento a los datos experimentales planteando la pérdida de carga máxima por pérdida de recubrimiento, sin embargo se observan pequeñas diferencias, las cuales podrían ser capturadas tomando en cuenta el proceso de inicio de la expansión del hormigón perimetral (aporte o pérdida de resistencia). Ya que aparentemente P8 (2% de pre-tracción) inicia la expansión para una deformación posterior a P7 (1% de pre-tracción), por lo cual el hormigón aportaría aún menos resistencia considerando solo la variable de pérdida de recubrimiento.

Se debe analizar con mayor profundidad un modelo que traduzca la pérdida de resistencia por nivel de pre-tracción ya que es posible analizarlo desde 2 puntos de vista:

- a) El comienzo de la expansión del hormigón perimetral: a un anticipado contacto del hormigón se traduciría en un aporte de resistencia a compresión.
- b) La aceleración de expansión luego que el hormigón está en contacto: a una mayor velocidad de expansión se traduciría en una pérdida de recubrimiento anticipada perdiendo resistencia la probeta.

Estos 2 puntos de vista están ligados pues si no ocurre a) nunca ocurrirá b), por lo cual la pérdida de capacidad debería estar ligada a estos 2 hechos. Por lo cual el modelo de Herrera (2013) no es contradictorio a los datos experimentales mirados desde el punto de vista de b).

Si se caracteriza las zonas descritas en la Figura 4.67, por medio de rectas²⁴, es posible analizar de manera cuantitativa las zonas de las probetas sin pre-tracción. Mirando la pérdida de capacidad desde el punto de vista del cierre de grietas, asumiendo que la expansión del hormigón se traduce en el cierre de grietas.

En base a la metodología antes descrita se obtienen los siguientes resultados:

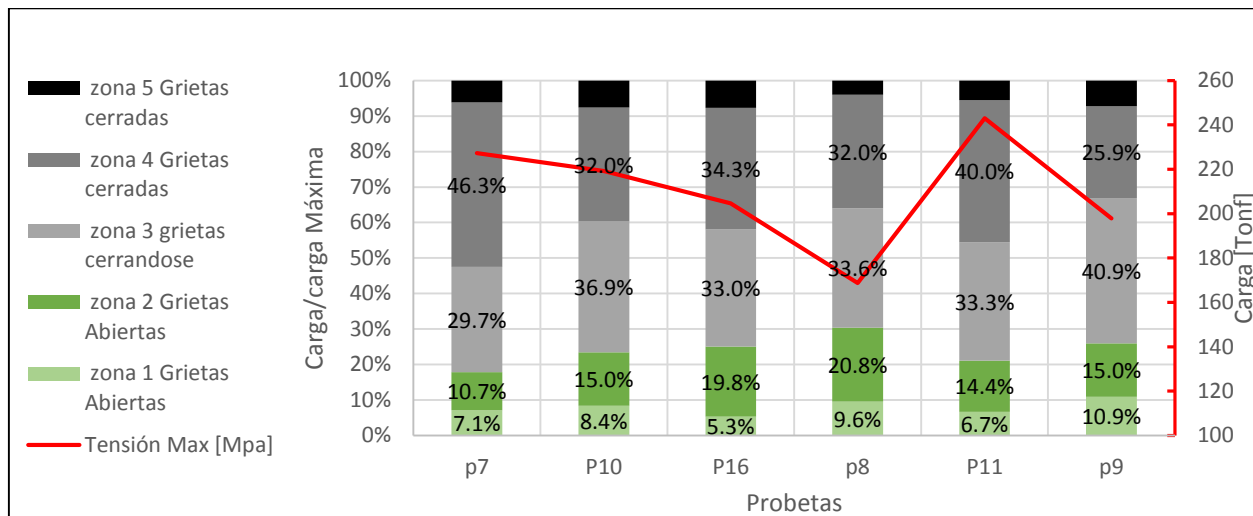


Figura 4.83. Caracterización de curva tensión-deformación por medio de rectas, probetas con pre-tracción

De la Figura 4.83 se observa que la carga máxima tiene relación con el cierre de grietas, se observa que aquellas probetas que tienen un % acumulado mayor donde las grietas están abiertas, tienen una menor capacidad de carga.

En relación al corrimiento de la deformación en el máximo de carga se observa diferencias en la medición de los sensores LVDTs en la zona central tal como se observa en las siguientes figuras:

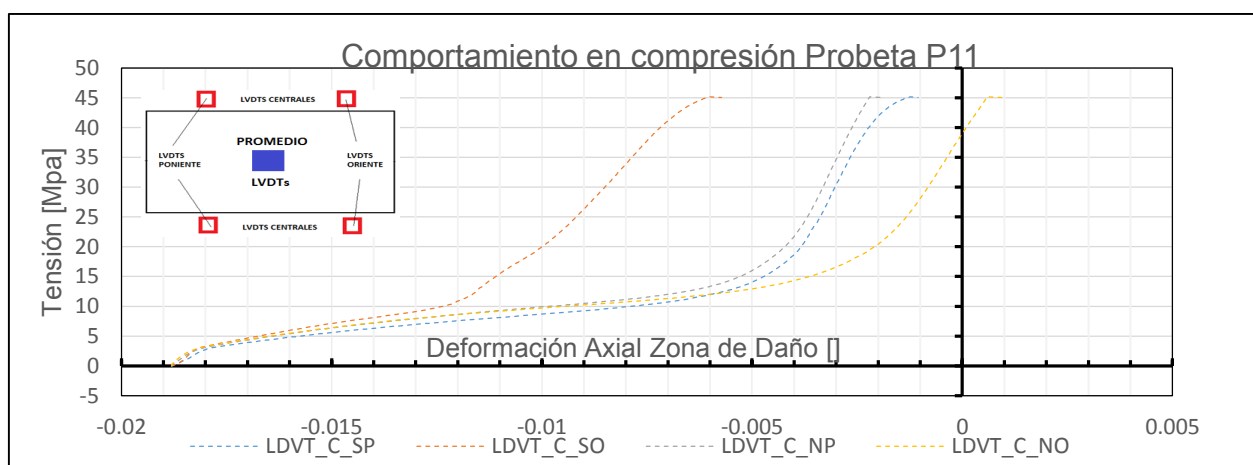


Figura 4.84. Comportamiento LVDTs individuales durante ensayo de compresión probeta P11

²⁴ Estas rectas representan las variaciones de la rigidez a lo largo del ensayo de compresión axial, cabe destacar que es solo una aproximación pues los puntos que conforman estas rectas, son solo valores aproximados por rectas.

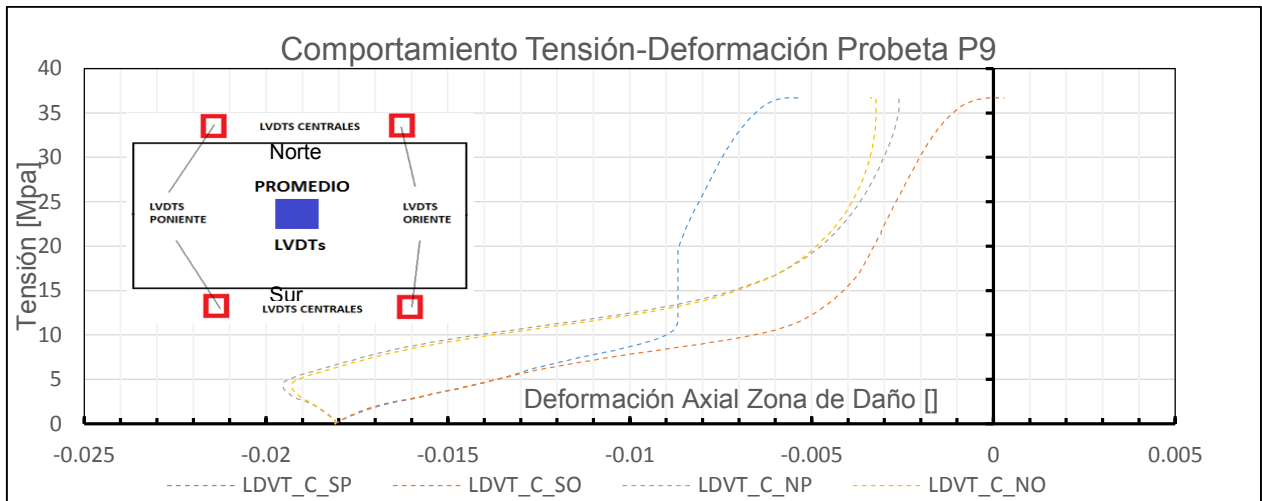


Figura 4.85. Comportamiento LVDTs individuales durante ensayo de compresión probeta P9

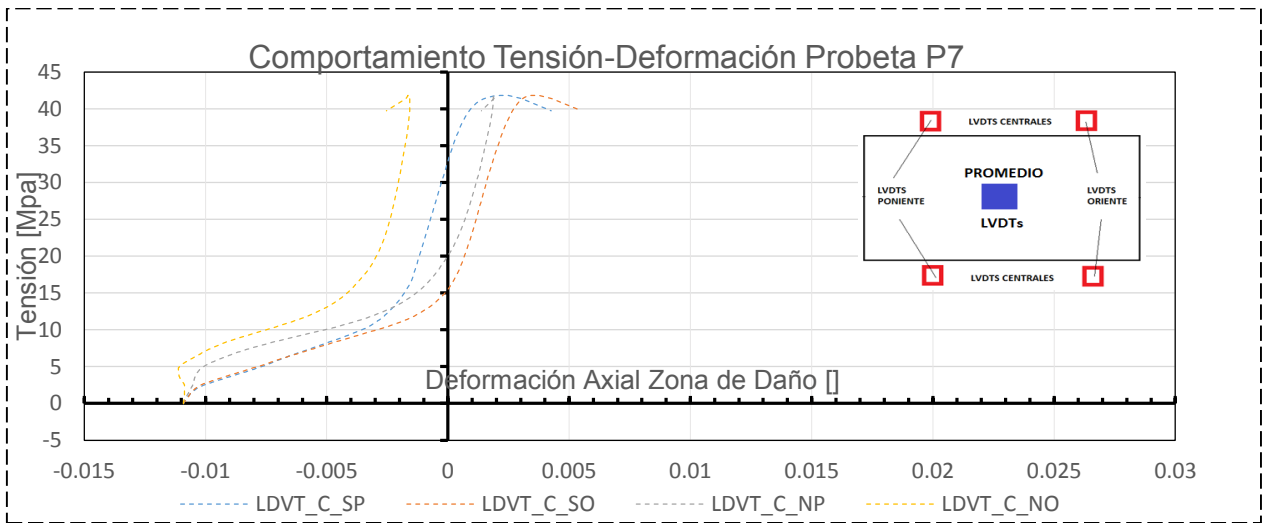


Figura 4.86. Comportamiento LVDTs individuales durante ensayo de compresión probeta P7

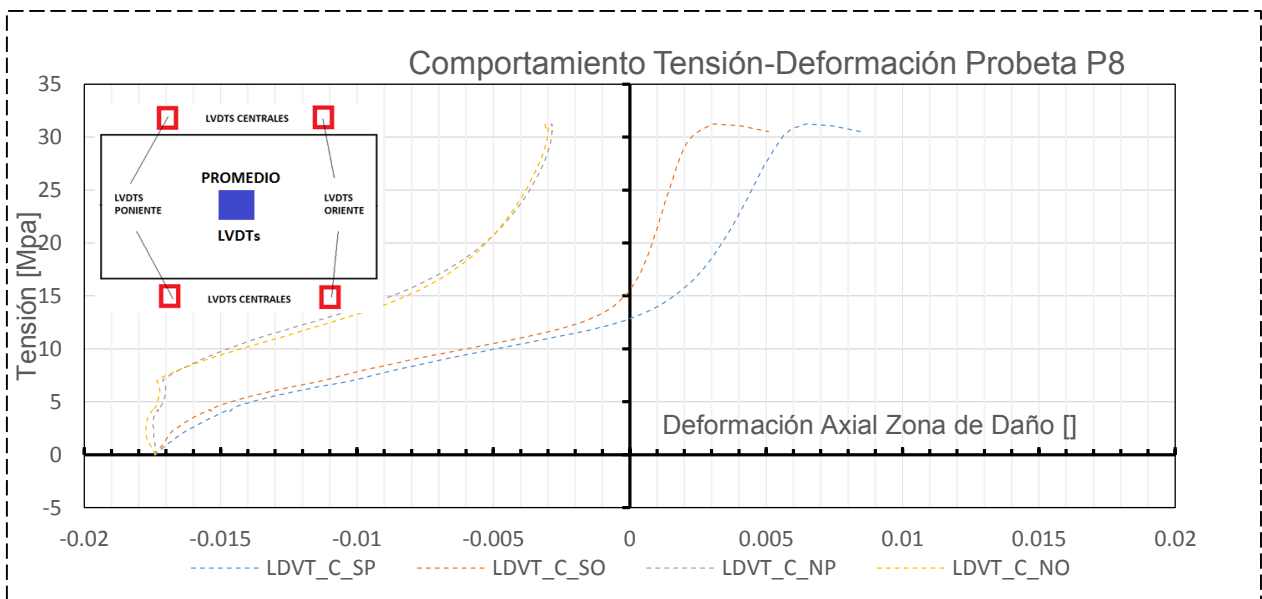


Figura 4.87. Comportamiento LVDTs individuales durante ensayo de compresión probeta P8

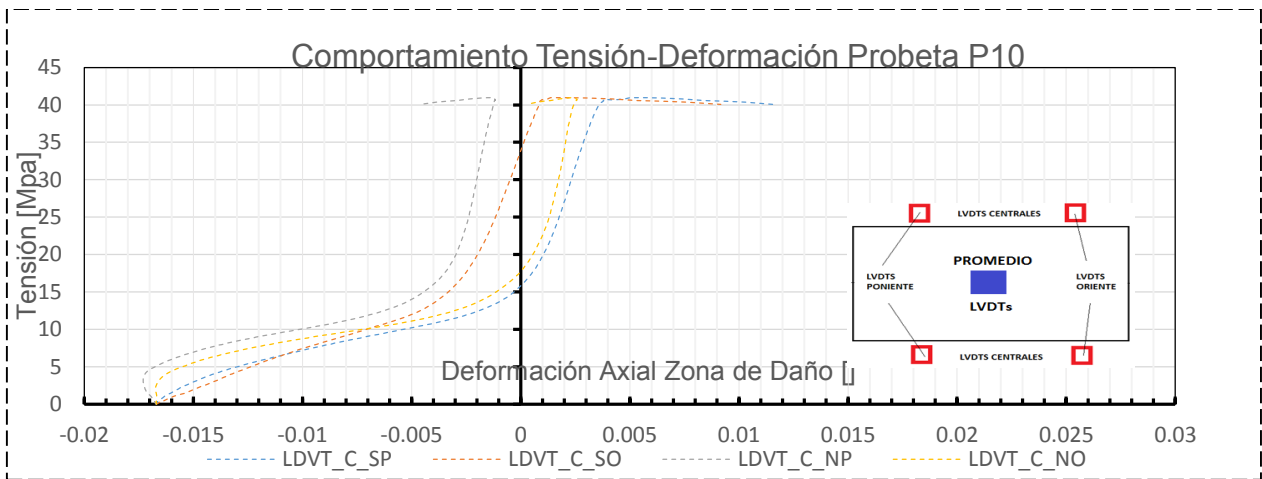


Figura 4.88. Comportamiento LVDTs individuales durante ensayo de compresión probeta P10

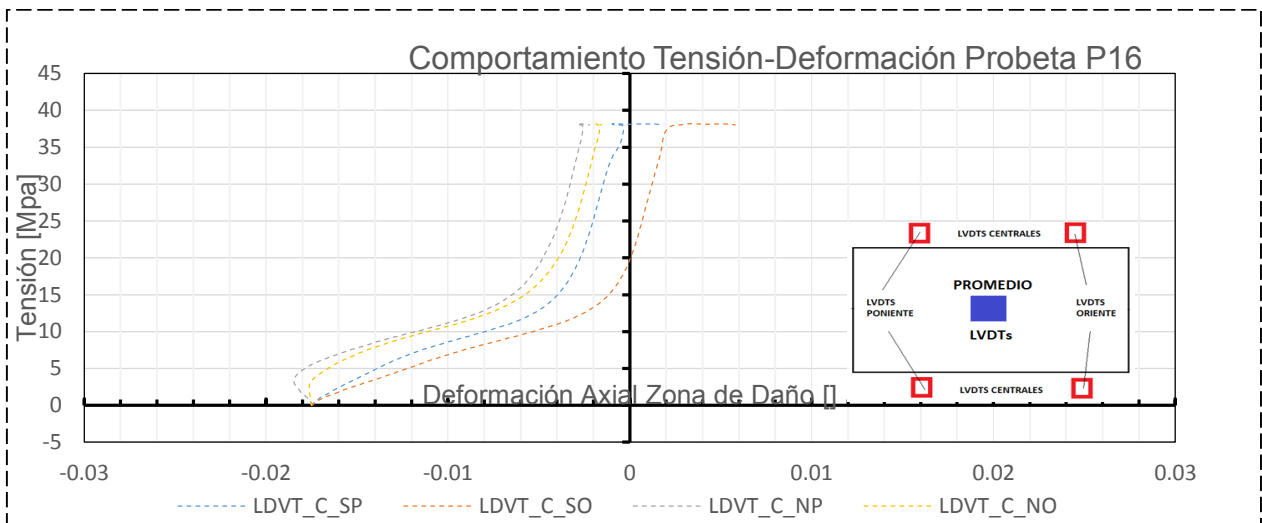


Figura 4.89. Comportamiento LVDTs individuales durante ensayo de compresión probeta P16

De la Figura 4.84 a la Figura 4.89 se observan diferencias en los sensores individuales, por lo cual un corrimiento de la deformación en el máximo de carga podría deberse simplemente a que la deformación promedio ponderó aquel sensor con mayores diferencias haciendo que esta deformación se corriese.

Se observa en todas las probetas con pre-tracción que al comienzo del ensayo algunas zonas son traccionadas (presentan rigidez negativa), hecho que podría ser explicado por inestabilidad fuera del plano (Figura 4.78 y Figura 4.79)

El análisis efectuado en cuanto a la expansión del hormigón perimetral se hizo en base a LVDTs transversales, este análisis podría no ser 100% correcto ya que estos sensores son susceptibles a errores pues solo están montados sobre el hormigón perimetral, por lo cual un agrietamiento donde están apoyados estos sensores podría implicar registros que no se condicen a la expansión total de la zona de estudio.

Se debe mencionar que una vez que las barras longitudinales alcanzaron la fluencia en el ensayo de tracción, los strain gauges se despegaron por lo cual no entregaron registros ciertos del comportamiento de la armadura longitudinal a compresión.

CAPÍTULO 5 :CONCLUSIONES

En este capítulo se dan a conocer las principales conclusiones respondiendo a los objetivos planteados en este trabajo de tesis y en base a los resultados obtenidos en el capítulo 4 del presente trabajo.

En este trabajo de tesis se estudiaron 2 grupos de elementos de borde de muro; el primero solo presentó una carga axial de compresión y el segundo previamente a al ensayo de compresión, su armadura longitudinal presentó una tracción. Ambos grupos de probetas presentaron diversos parámetros de confinamiento y de geometría. A continuación se describen algunos de los resultados relevantes luego de analizar su comportamiento.

1.Comentarios generales:

- Se aprecia que el largo de la zona de daño depende se la separación de los estribos. Para aquellas probetas que presentan confinamiento en la zona central, corresponde a 2 veces el espaciamiento de los estribos.
- Para aquellas probetas que no presentan confinamiento el largo de la zona de daño se extiende por toda la zona donde no existe confinamiento.
- El mecanismo de falla principal para las probetas sin confinamiento es el pandeo de barras longitudinales en toda la zona donde no existe confinamiento y el aplastamiento del núcleo de hormigón.
- Para las probetas con confinamiento el mecanismo de falla es el pandeo de las barras longitudinales entre estribos junto con la aparición de una cuña de corte. Los tipos de falla antes descritos no dependen del nivel de pre-tracción de las probetas, ya que luego de que las grietas han cerrado, la pre-tracción deja de ser un factor preponderante en el mecanismo de falla.

2.Comportamiento específico probetas sin pre-tracción y probetas con pre-tracción:

- La armadura de confinamiento en relación a su espaciamiento y detallamiento tiene significativa relevancia en la degradación posterior a la de capacidad de carga máxima, donde el confinamiento está ligado a la velocidad de degradación. Aquellas probetas con menor espaciamiento de estribos logran una pérdida de carga más lenta que aquellas que poseen espaciamiento menor o no poseen.
- Para altas deformaciones axiales (cerca de 0.008) no tener confinamiento significa tener una pérdida de carga entre el 65% y 90% con respecto a su máximo. Tener un confinamiento $s=150\text{mm}$ implica un descenso de cerca del 50% y para espaciamientos de $s=100\text{mm}$ implica tener un descenso de entre el 28% y 10% de su carga máxima dependiendo de cuan conservador es el detallamiento de la armadura transversal.

- La velocidad de degradación está ligada al tipo de detallamiento de la armadura de confinamiento transversal, observándose que aquellos detallamientos que restringe más el pandeo de las barras longitudinales logran una menor velocidad de degradación. El detallamiento estándar ACI-318 tiene una velocidad de degradación mayor que aquellos detallamientos más conservadores en cuanto a pandeo de barras longitudinales y una velocidad de degradación menor que el detallamiento que presenta ganchos de terminación de estribos de 90° (65% más lenta su degradación).
- Tener un detallamiento con terminaciones en 90° no provee un real confinamiento, pues el gancho no logra anclarse al núcleo de hormigón y se abre, evidenciando un confinamiento prácticamente nulo.
- Se observa que al presentar un índice de confinamiento bajo, los estribos alcanzan aproximadamente un 25% de su tensión de fluencia en el máximo de capacidad de carga. Luego de grandes deformaciones mayores al 1% se logra evidenciar fluencia en estos. Por lo cual no estarían entregando el 100% de su capacidad para prevenir la degradación posterior al máximo de capacidad.
- La inestabilidad no tiene gran relevancia en cuanto a la pérdida de capacidad de carga y mayor degradación posterior al máximo de carga.

3. Comentarios específicos probetas con pre-tracción:

- Es posible observar mediante los datos experimentales 5 zonas características en el comportamiento carga deformación axial para las probetas con pre-tracción: a)- zona donde las grietas están totalmente abiertas, b): zona con grietas abiertas pero con cambio de rigidez, c): zona donde las grietas están cerrándose, d): zona donde las grietas estas cerradas, e): zona donde comienza la degradación.
- Se observa una disminución de la carga axial para las probetas con pre-tracción, hecho posiblemente atribuido a la velocidad del cierre de grietas. Se observa que un menor % de pre-tracción agiliza el proceso de cerrado de grietas. Lo cual implica un contacto anticipado del hormigón entregando mayor capacidad de carga.
- En el trabajo de Herrera (2013) se postula una hipótesis para explicar la pérdida de capacidad de carga, según la evidencia experimental esta hipótesis estaría correcta luego que el hormigón toma contacto (cierre de grietas), observándose un mayor nivel de expansión a medida que aumenta el nivel de pre-tracción, hecho que explicaría la pérdida de recubrimiento.
- Un modelo que posiblemente capture mejor la pérdida de carga máxima, sería uno que tomará en cuenta tanto el proceso de cierre de grietas y de pérdida de recubrimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Massone, L. y Moroder, D. “Buckling modeling of reinforcing bars with imperfections”, Engineering Structures V.31, No. 3, 2009, pp 758-769.
- Massone, L. y Lopez, “Modeling of reinforcement global buckling in RC elements”. Engineering Structures 59 (2014), 484-494.
- Massone, L. “Fundamental principles of the reinforced concrete desing code changes in chile following the Mw 8.8 earthquake in 2010”. Engineering Structures 56 (2013), 1335-1345.
- Pantazopoulou, “Detailing for reinforcement stability in Rc members”. Journal of Structural Engineering, 623-632, June, 1988.
- Mander, Presley, Park, Fellow “Observed Stress-Strain Behavior Of Confined Concrete”. Journal of Structural Engineering, Vol 114, No.8, August, 1988.
- Saatcioglu, M. y Razvi, S. “Strength and ductility of confined concrete”, Journal of Structural Engineering, V. 118, No. 6, 1992, Paper No 26631.
- Cusson, D. y Paultre, P. “Stress-strain model for confined high-strength concrete”, Journal of Structural Engineering, V. 121, No. 3, 1995, Paper No 7257.
- Polanco, P. “Estudio experimental de elementos de borde de muro”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2013
- Herrera, P. “Estudio analítico de elementos de borde de muro sometido a distintas configuraciones de confinamiento y pre-tracción”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2013

ANEXOS
ANEXO A MECANISMO DE FALLA

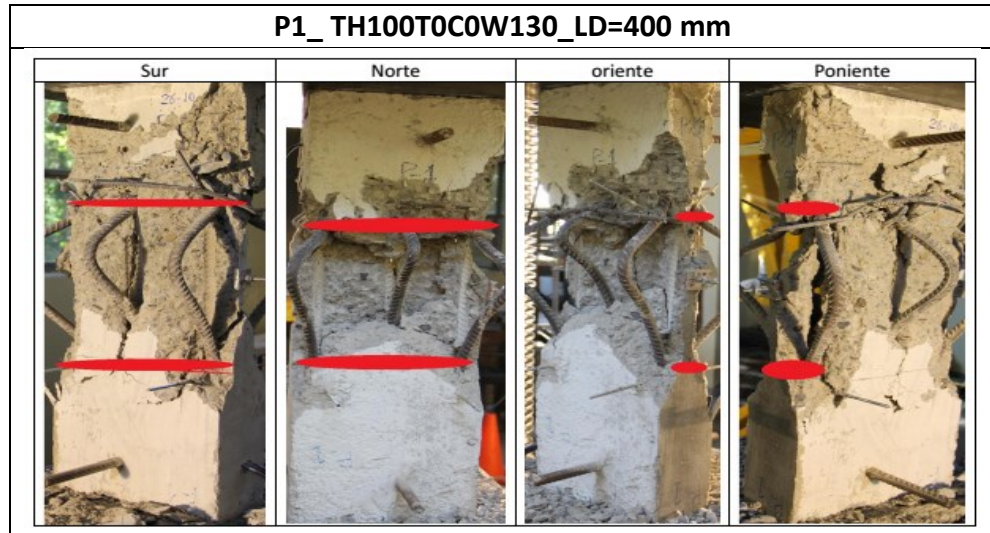


Figura 4.90. Anexo A Mecanismo de falla probeta 1

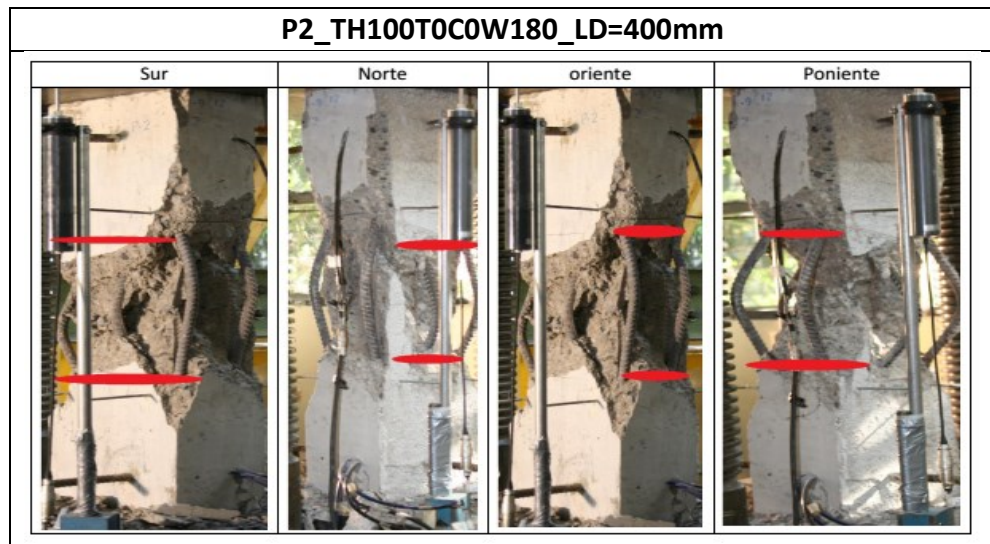


Figura 4.91. Anexo A Mecanismo de falla probeta 2

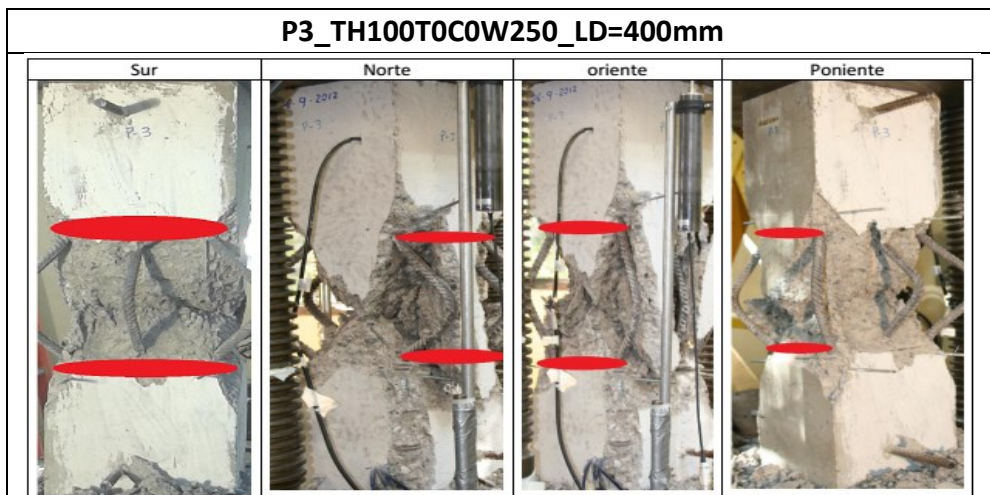


Figura 4.92. Anexo A Mecanismo de falla probeta 3



Figura 4.93. Anexo A Mecanismo de falla probeta 4

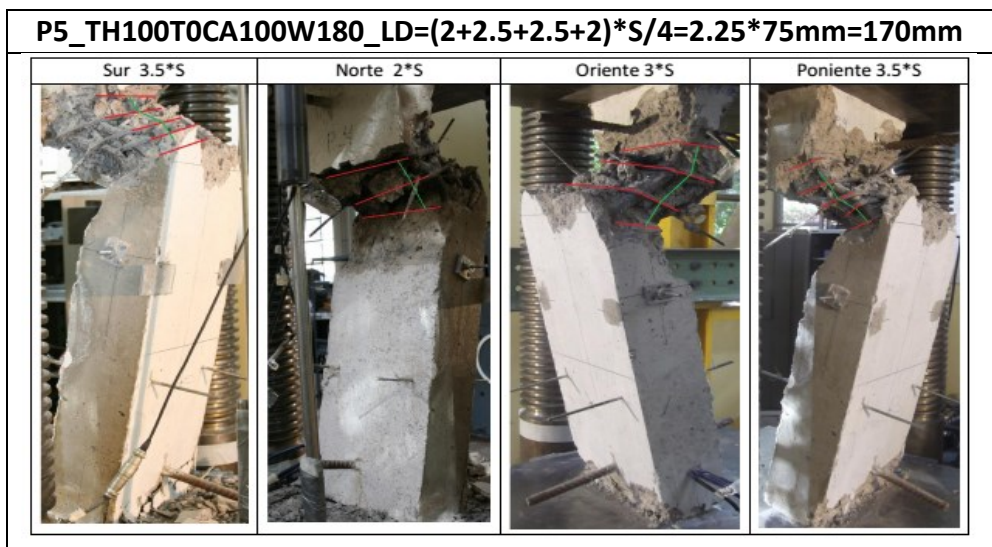


Figura 4.94. Anexo A Mecanismo de falla probeta 5

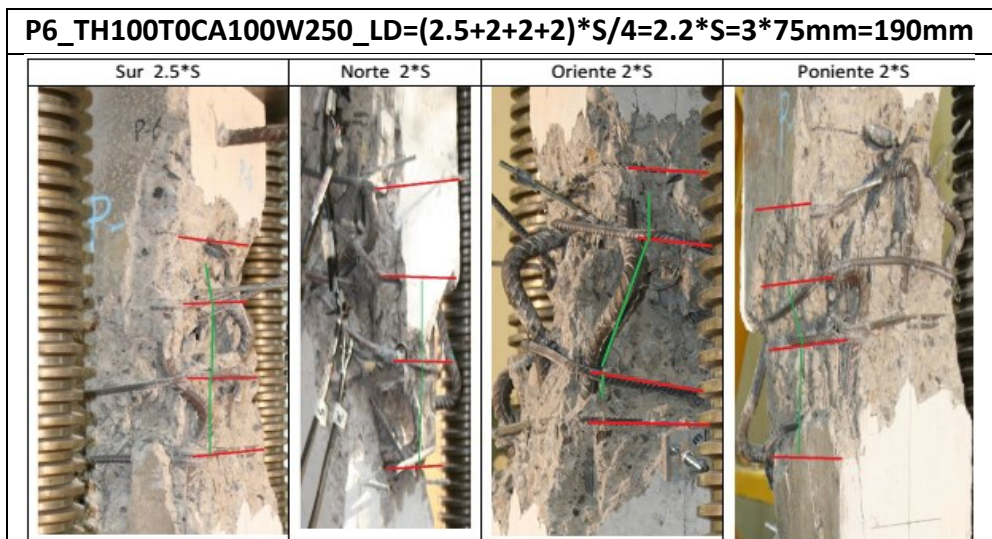


Figura 4.95. Anexo A Mecanismo de falla probeta 6

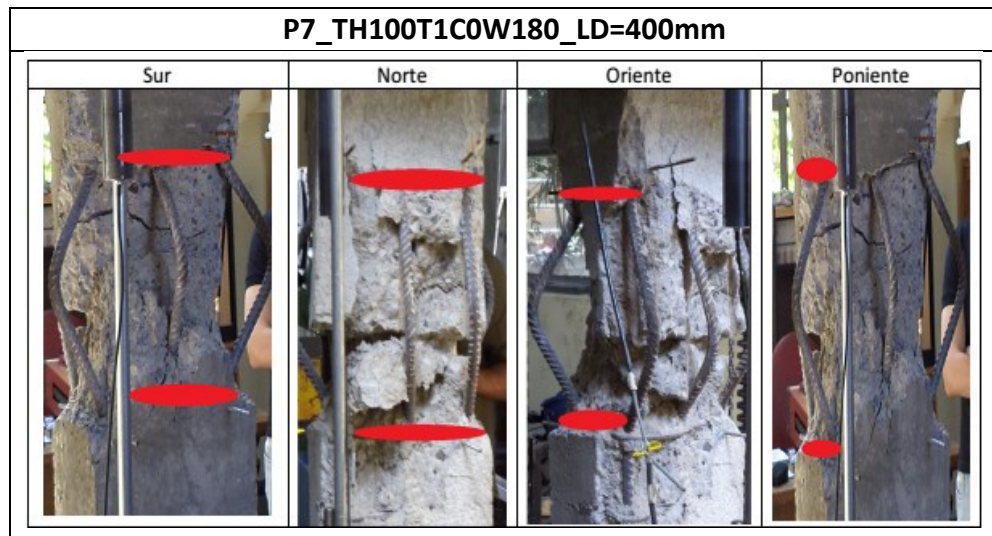


Figura 4.96. Anexo A Mecanismo de falla probeta 7

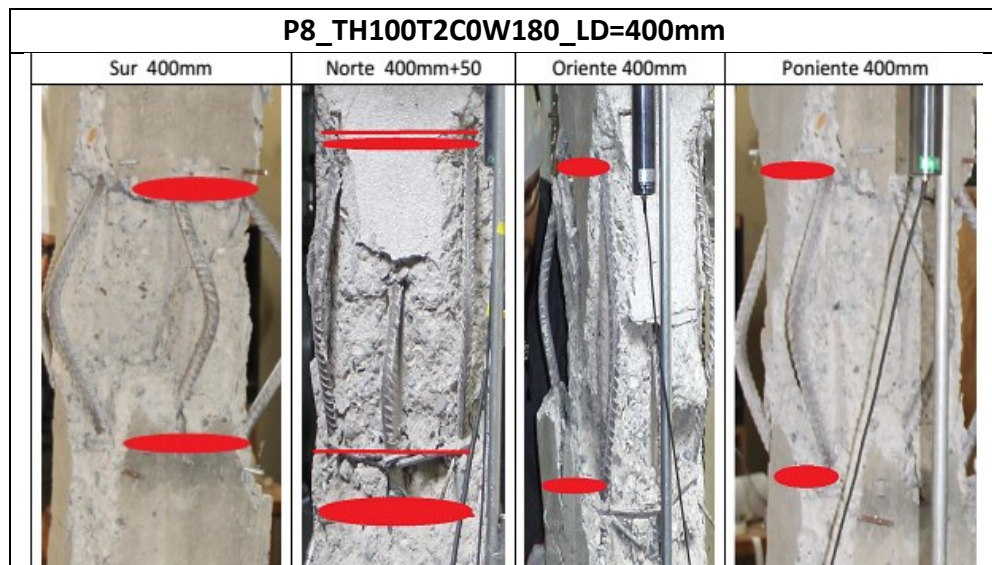


Figura 4.97. Anexo A Mecanismo de falla probeta 8

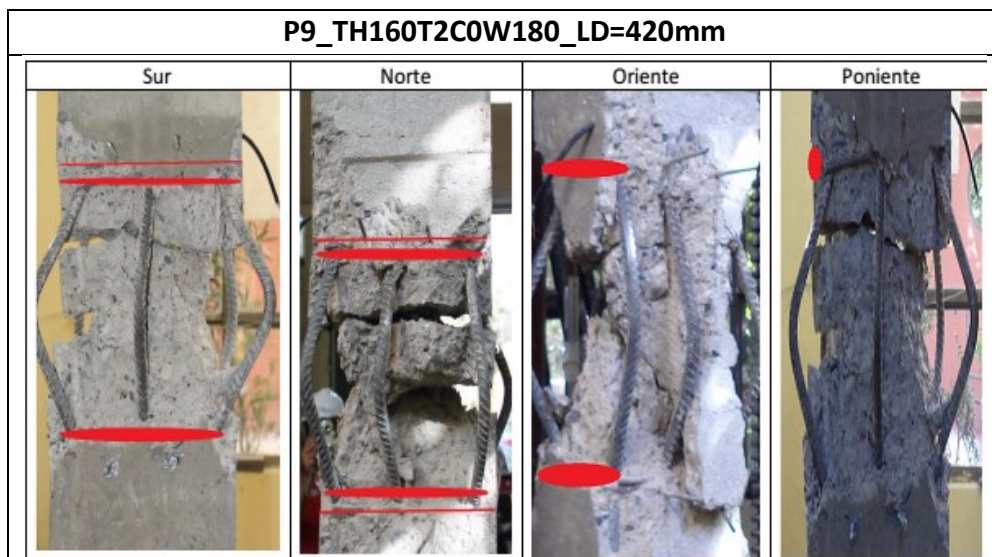


Figura 4.98. Anexo A Mecanismo de falla probeta 9

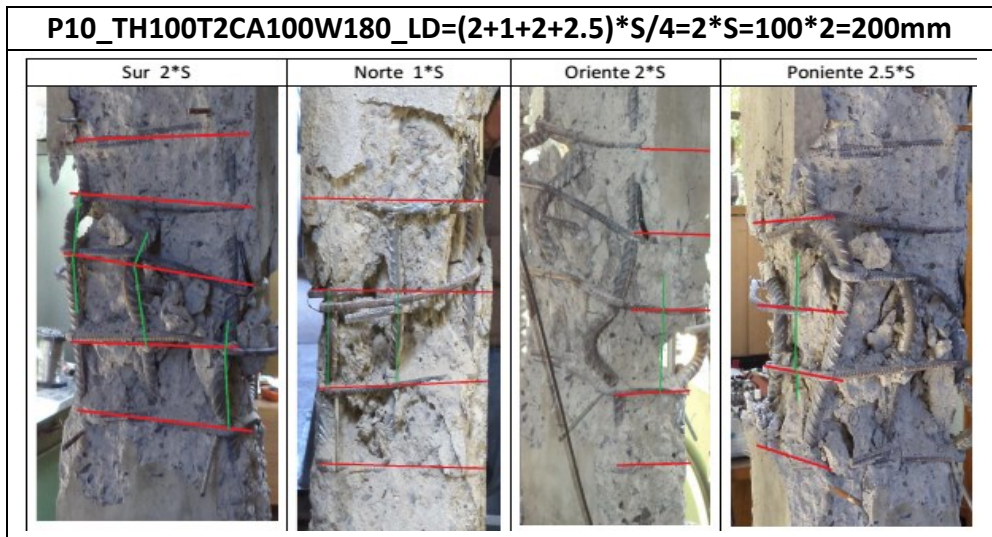


Figura 4.99. Anexo A Mecanismo de falla probeta 10

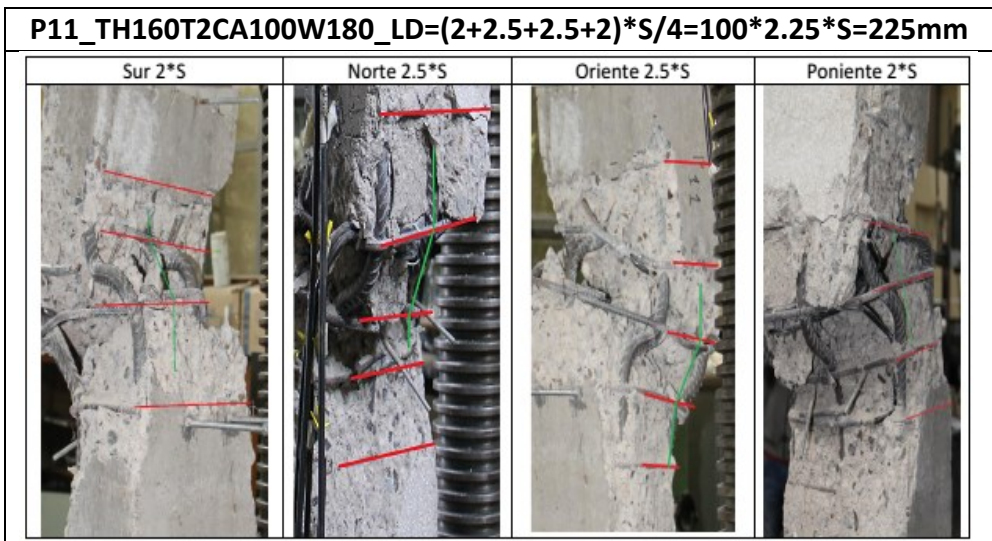


Figura 4.100. Anexo A Mecanismo de falla probeta 11

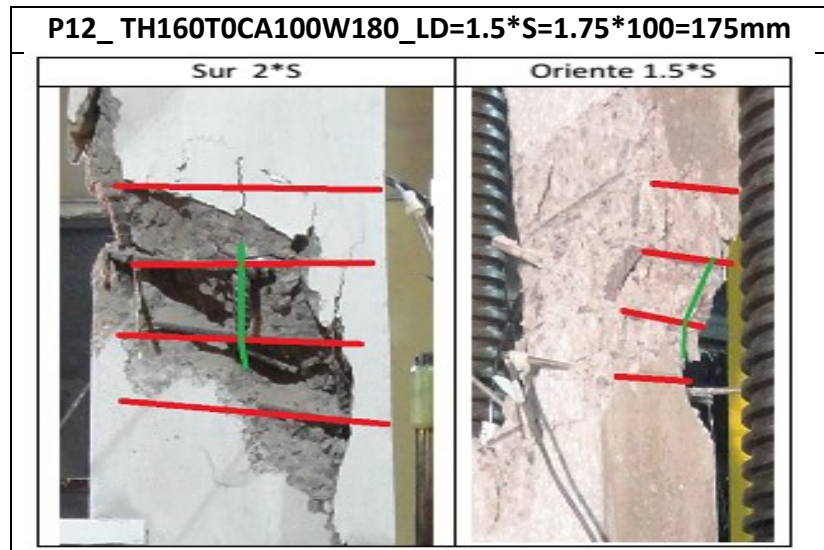


Figura 4.101. Anexo A Mecanismo de falla probeta 12

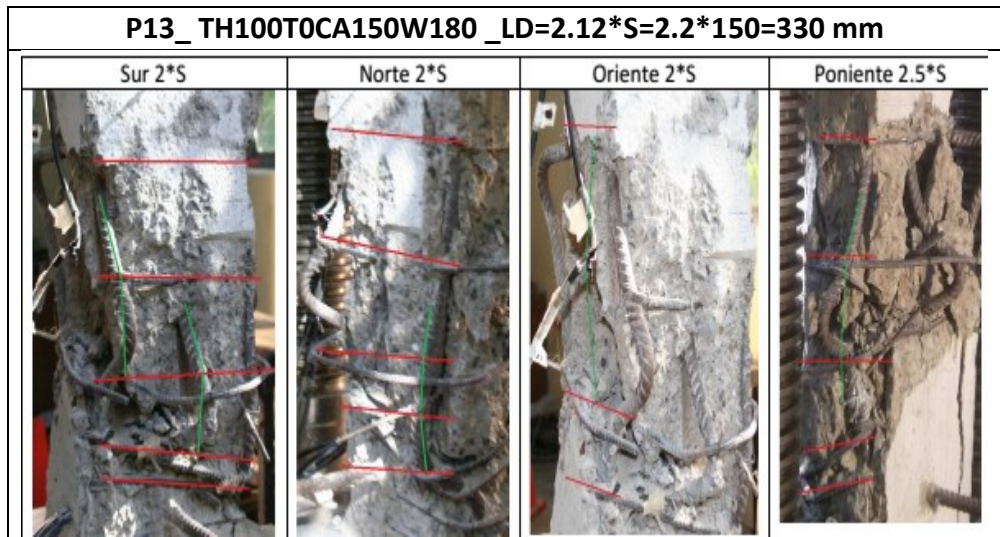


Figura 4.102.Anexo A Mecanismo de falla probeta 13

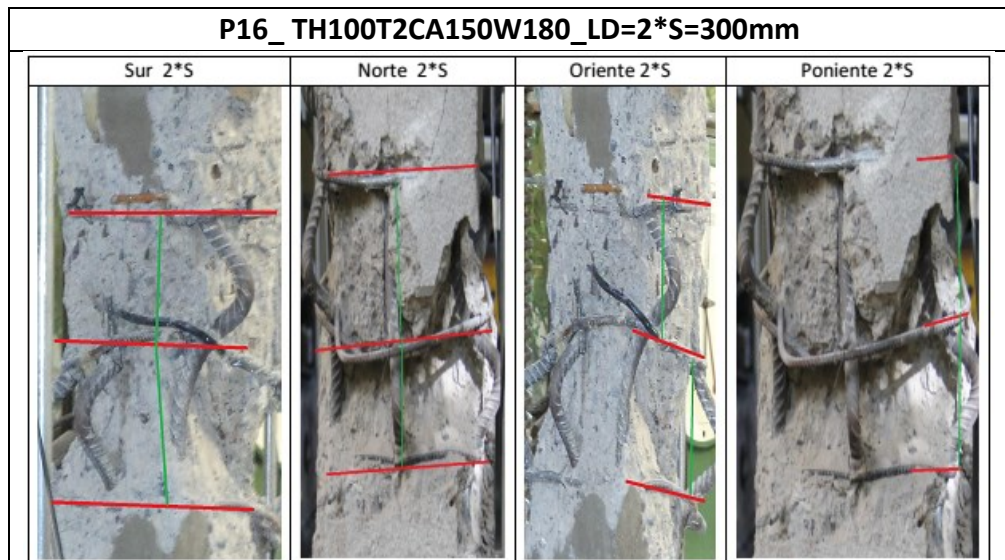


Figura 4.103.Anexo A Mecanismo de falla probeta 16



Figura 4.104.Anexo A Mecanismo de falla probeta 17

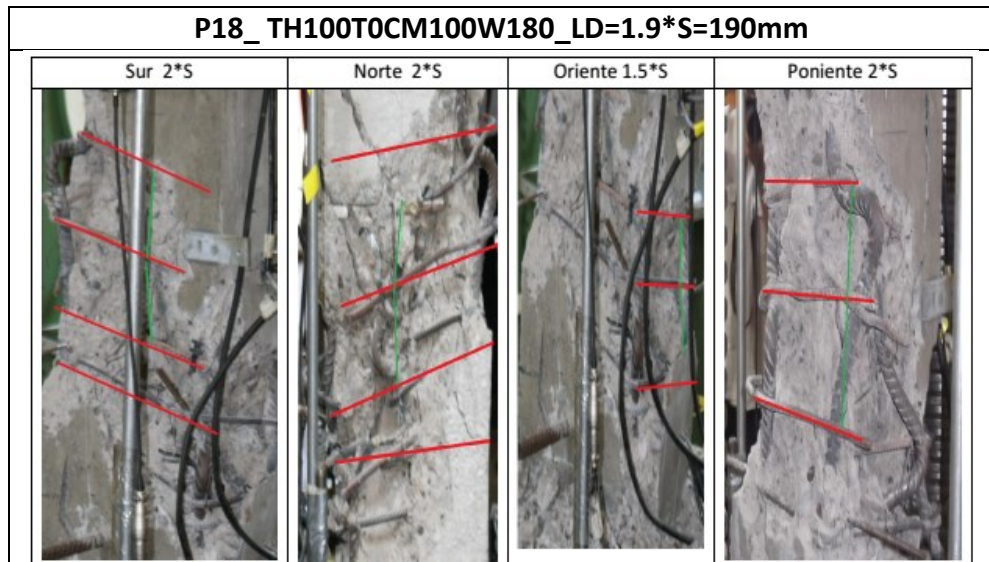


Figura 4.105. Anexo A Mecanismo de falla probeta 18



Figura 4.106. Anexo A Mecanismo de falla probeta 19

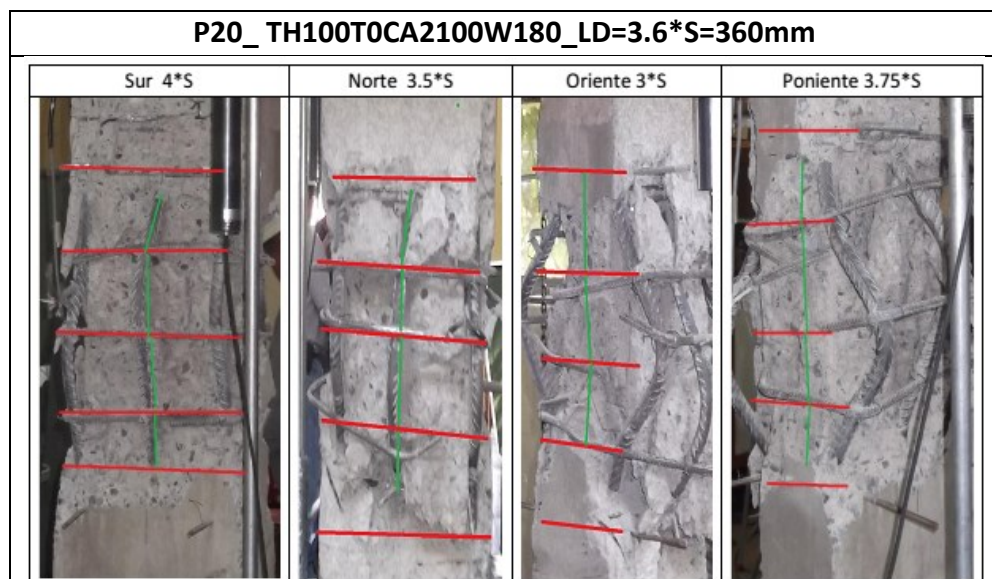


Figura 4.107. Anexo A Mecanismo de falla probeta 20

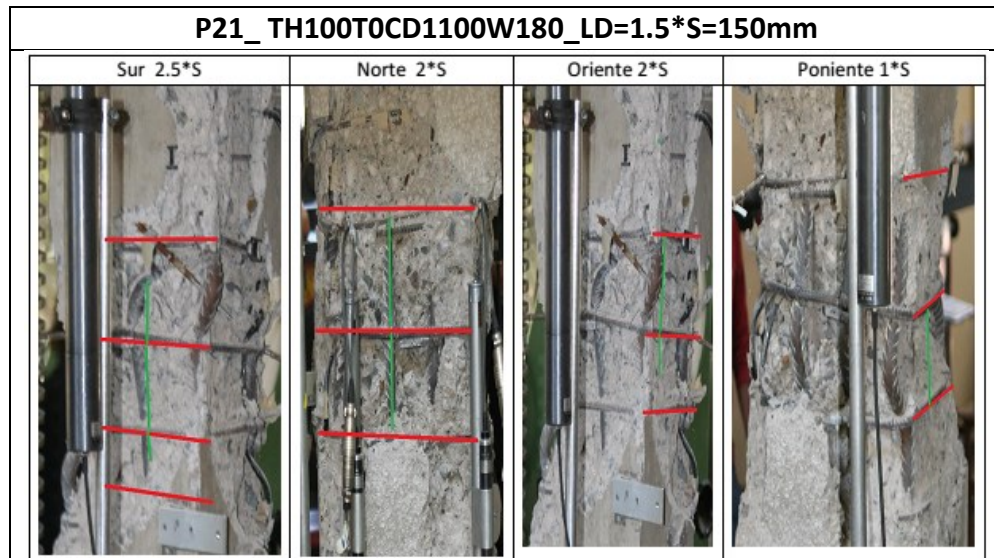


Figura 4.108.Anexo A Mecanismo de falla probeta 21



Figura 4.109.Anexo A Mecanismo de falla probeta 22

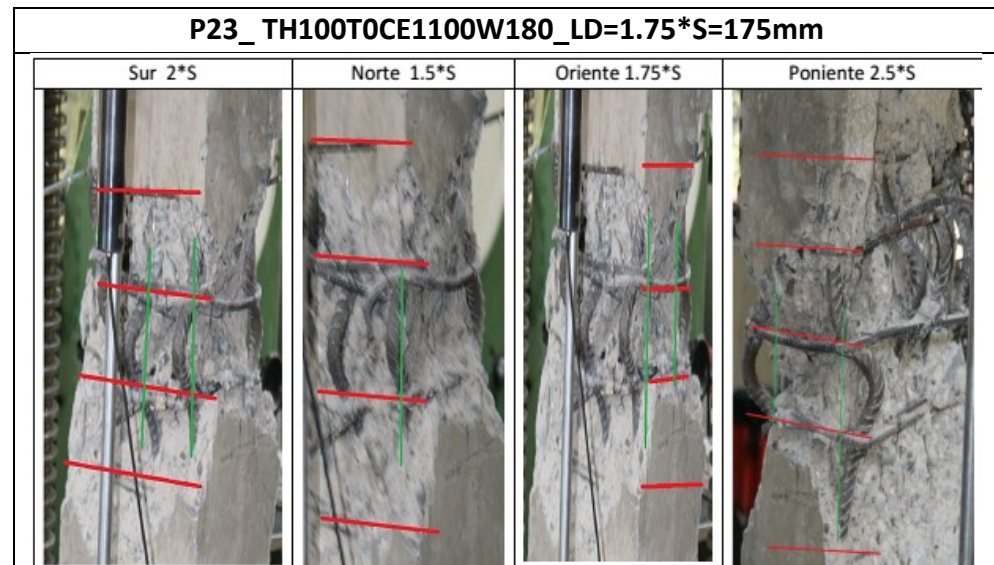


Figura 4.110.Anexo A Mecanismo de falla probeta 23

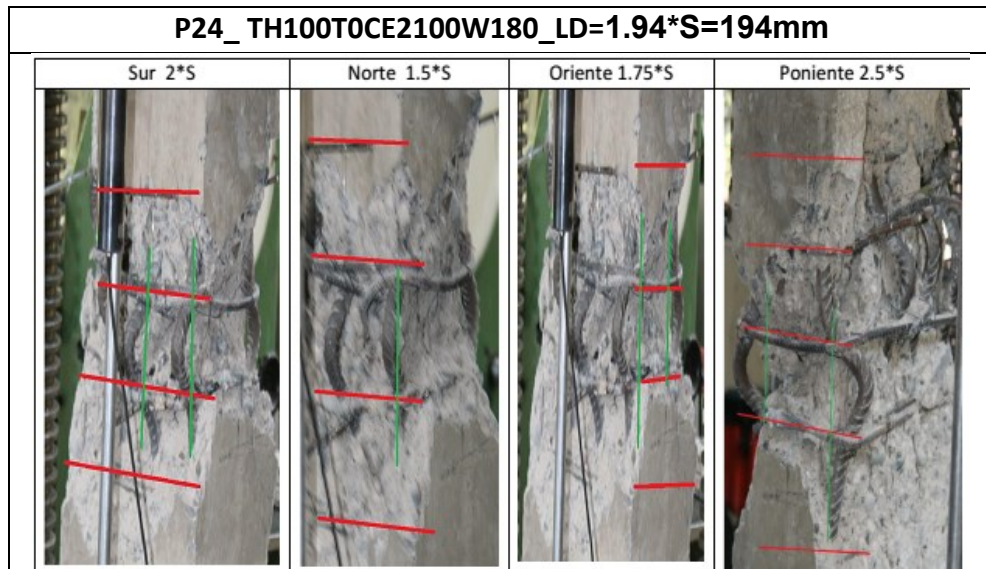


Figura 4.111. Anexo A Mecanismo de falla probeta 24

ANEXO B : LVDTs CENTRALES INTERNOS

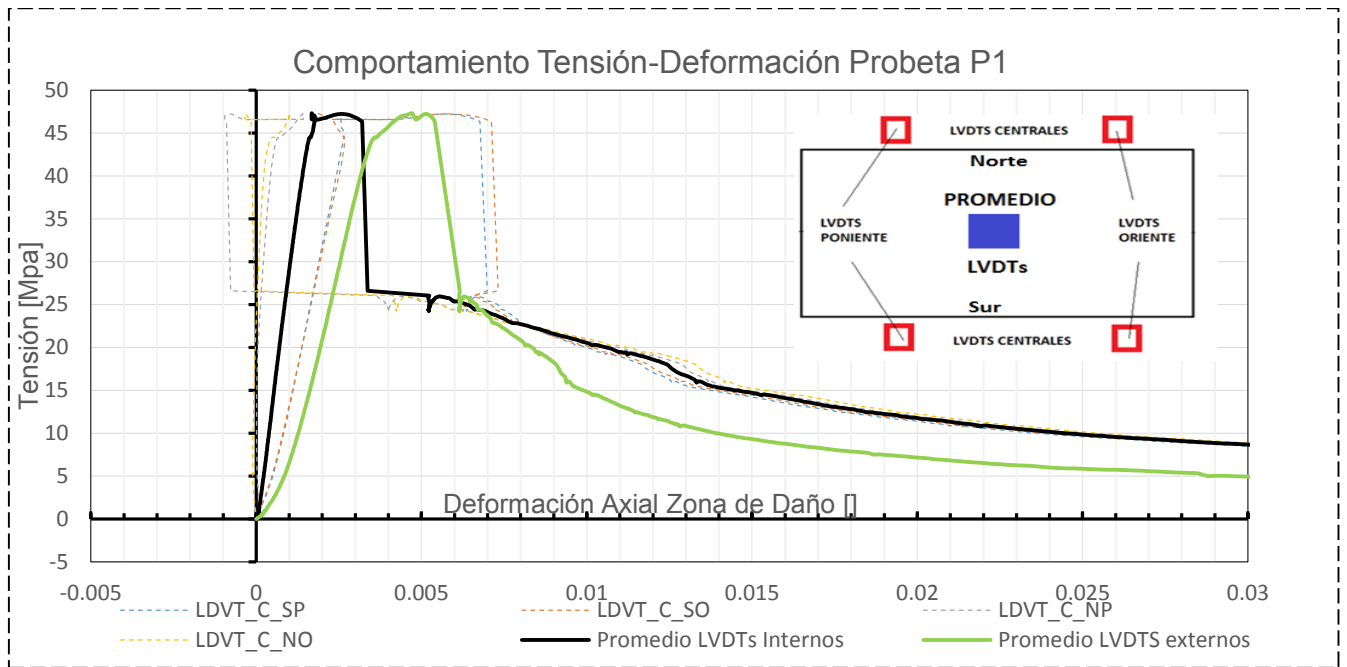


Figura 4.112. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 1

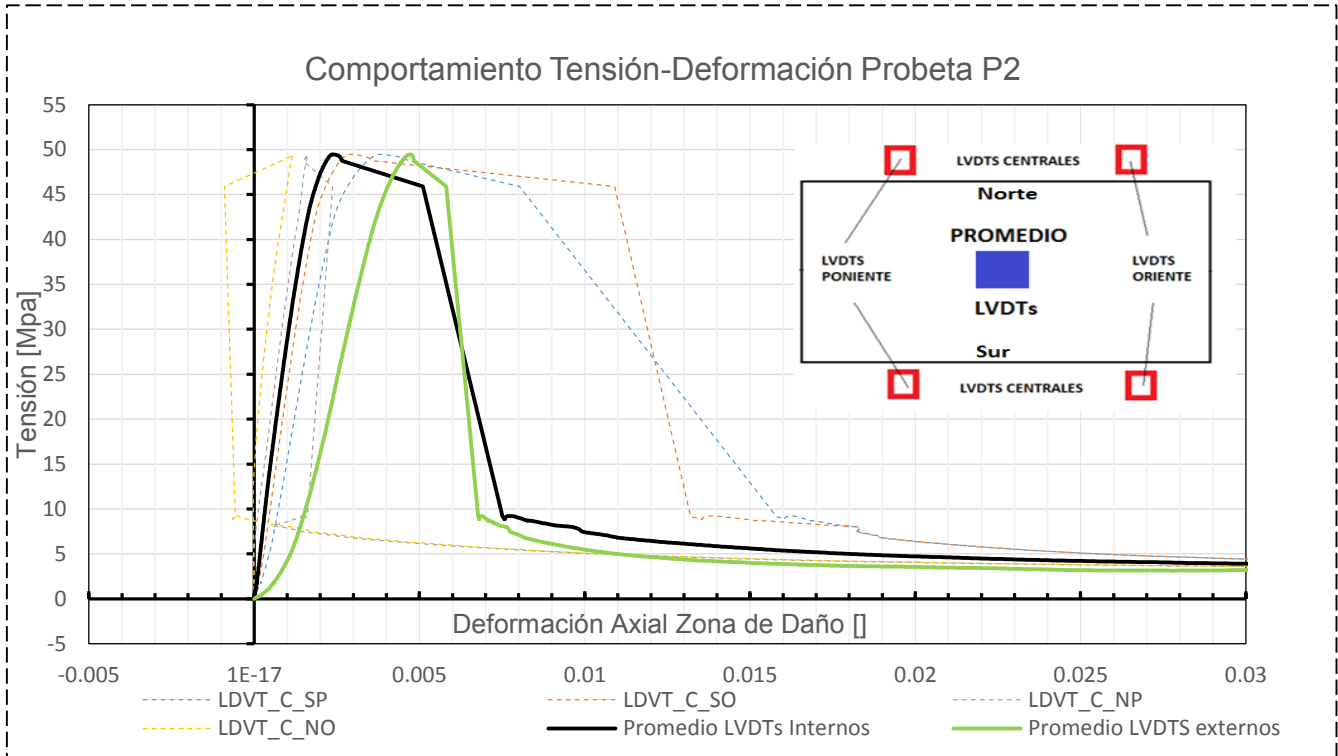


Figura 4.113. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 2

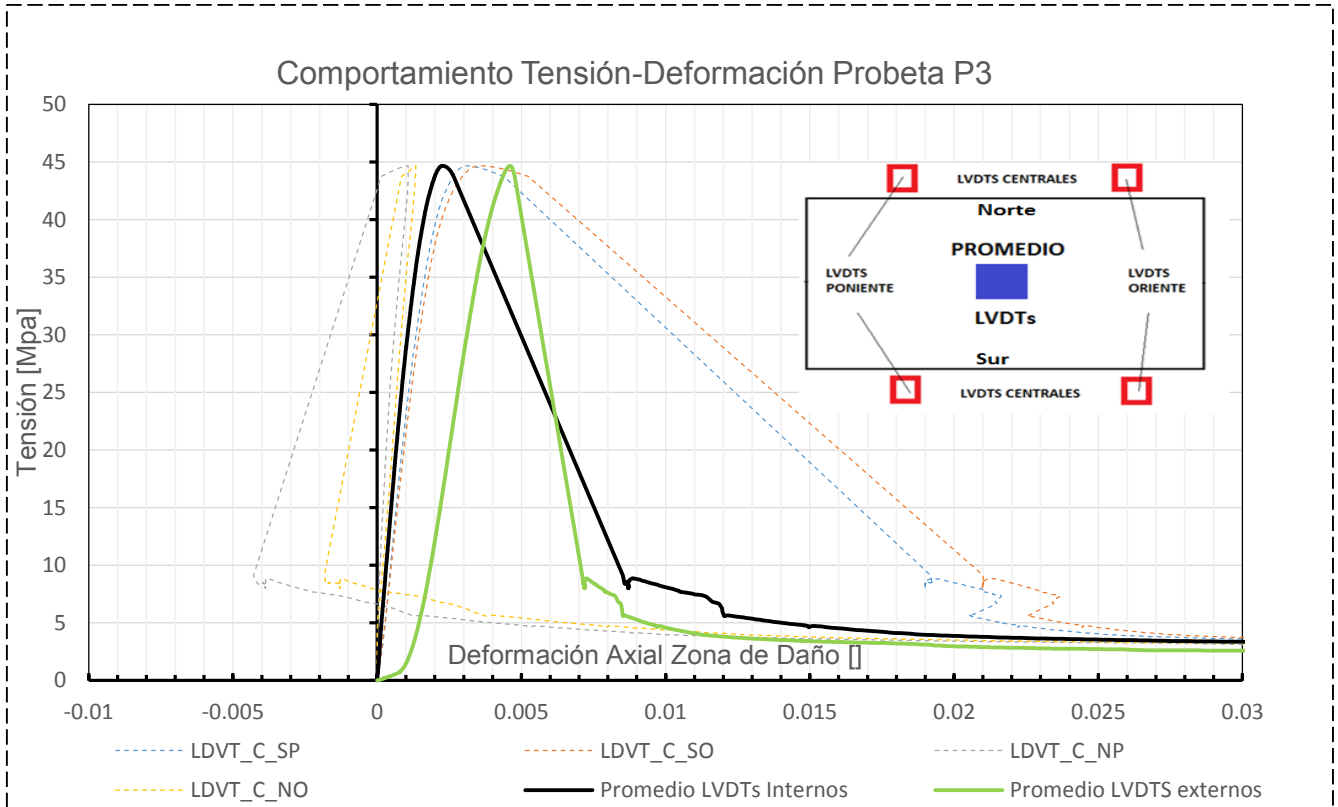


Figura 4.114. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 3

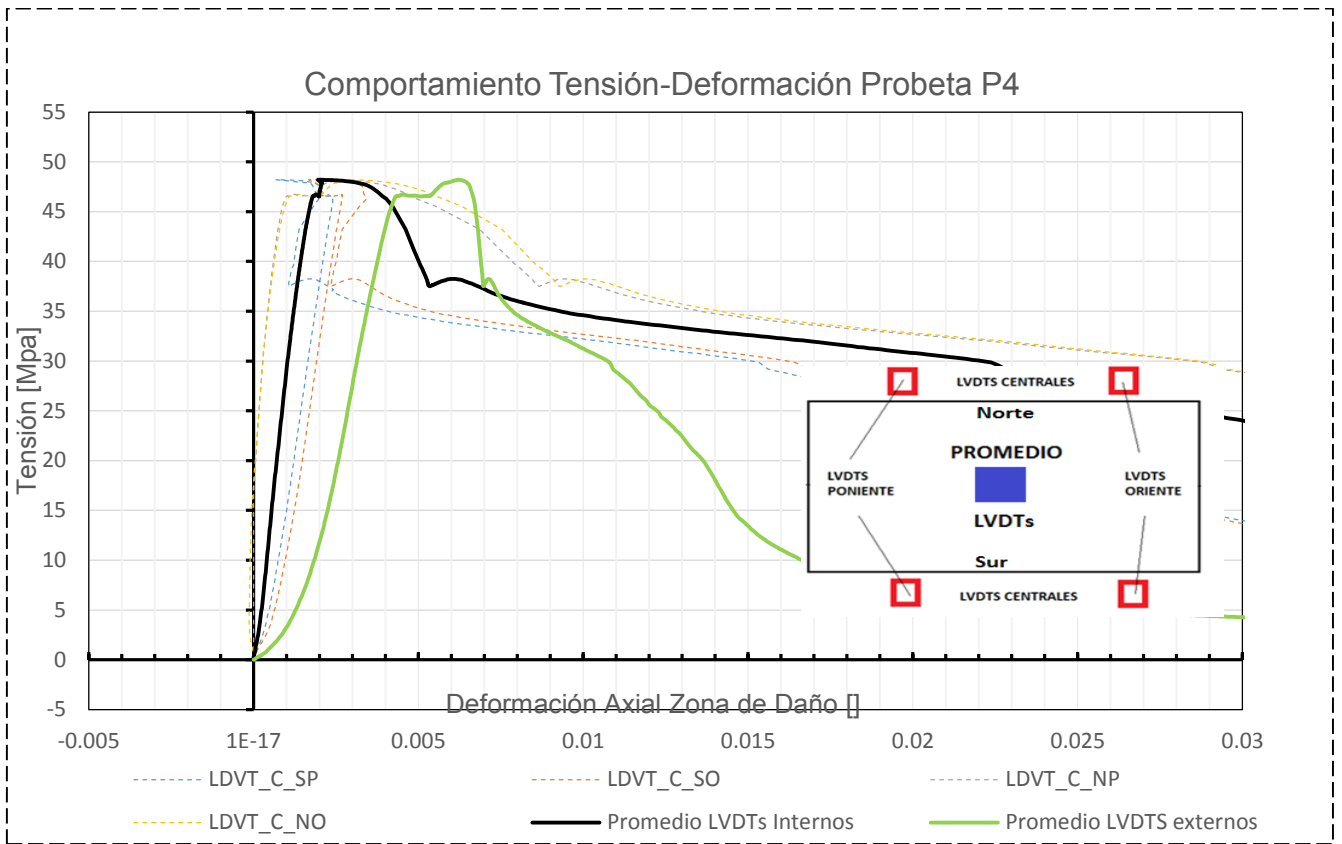


Figura 4.115. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 4

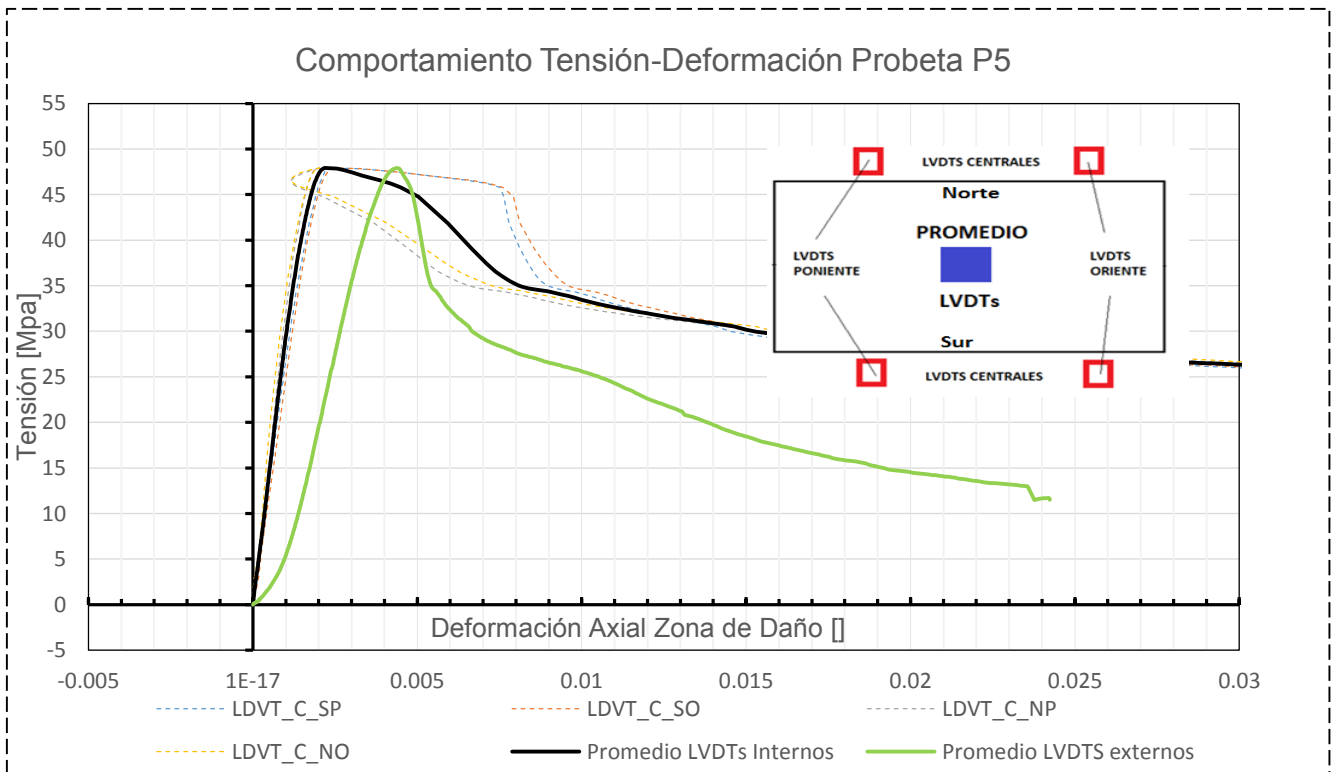


Figura 4.116. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 5

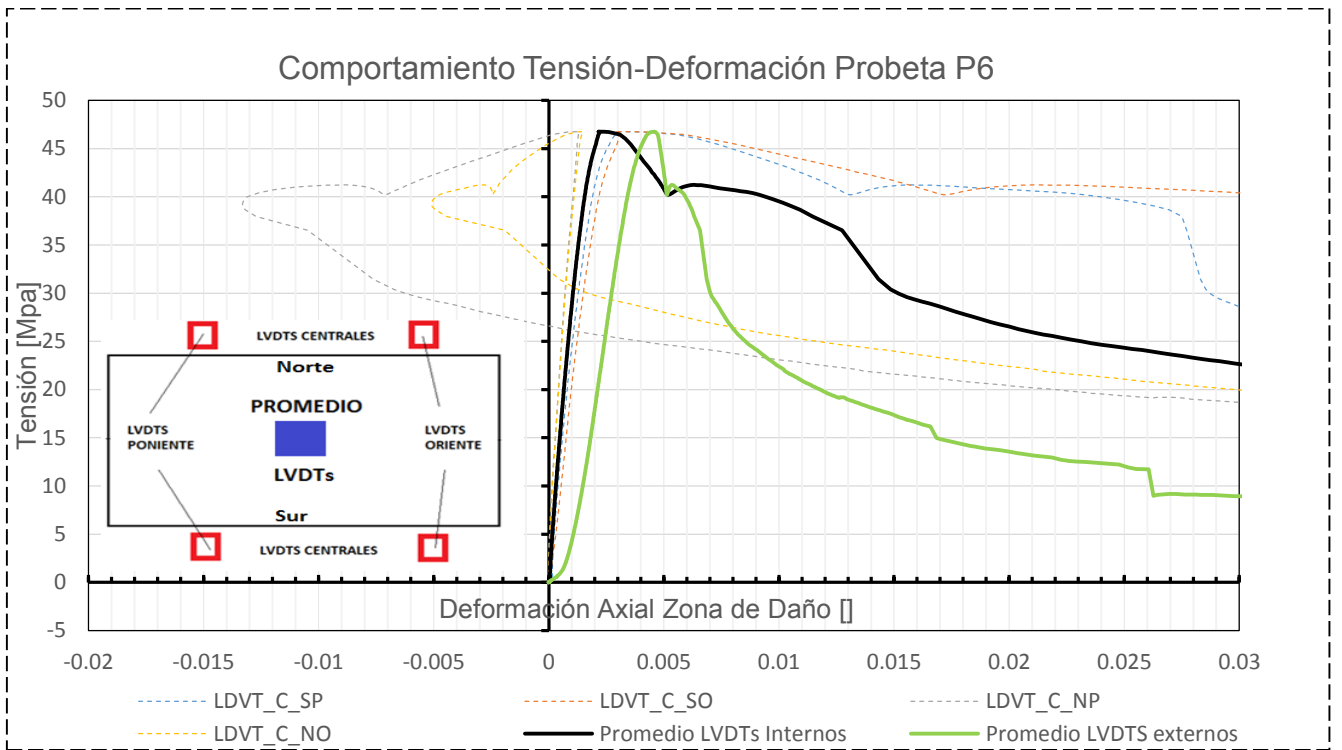


Figura 4.117. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 6

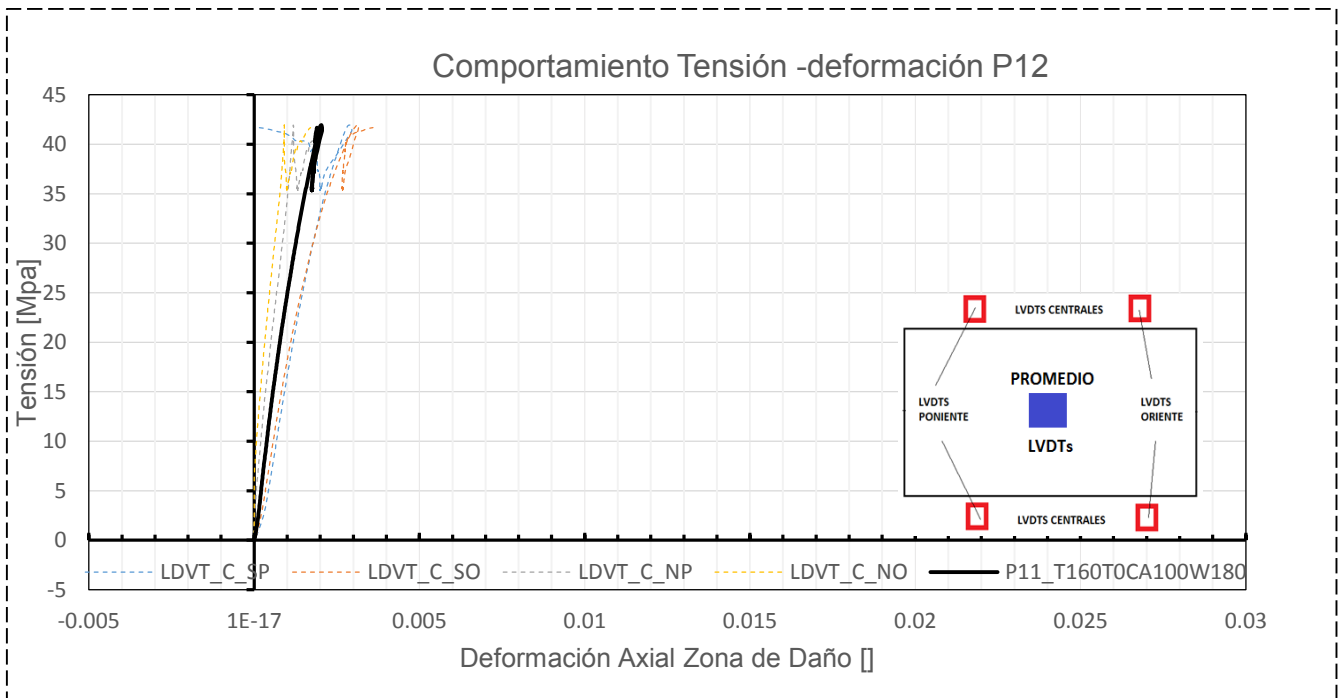


Figura 4.118. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 12

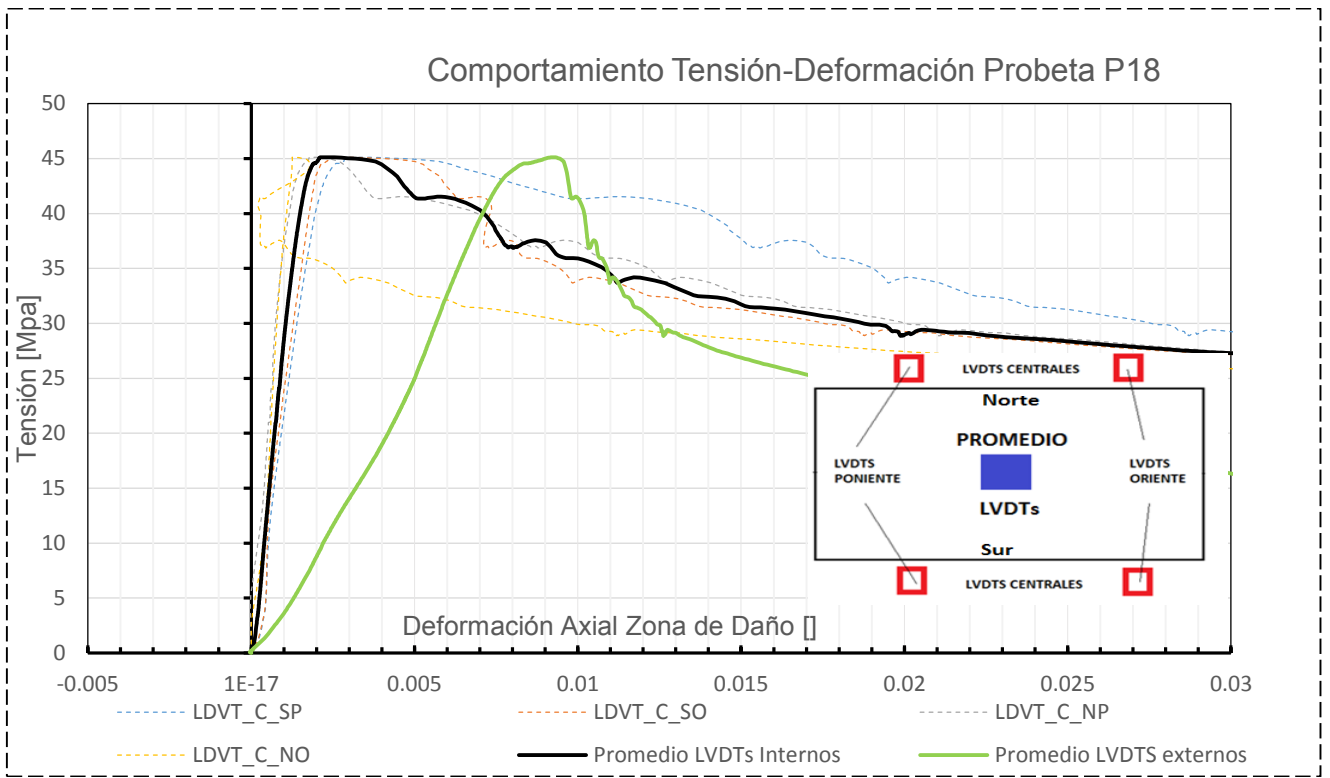


Figura 4.119. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 18

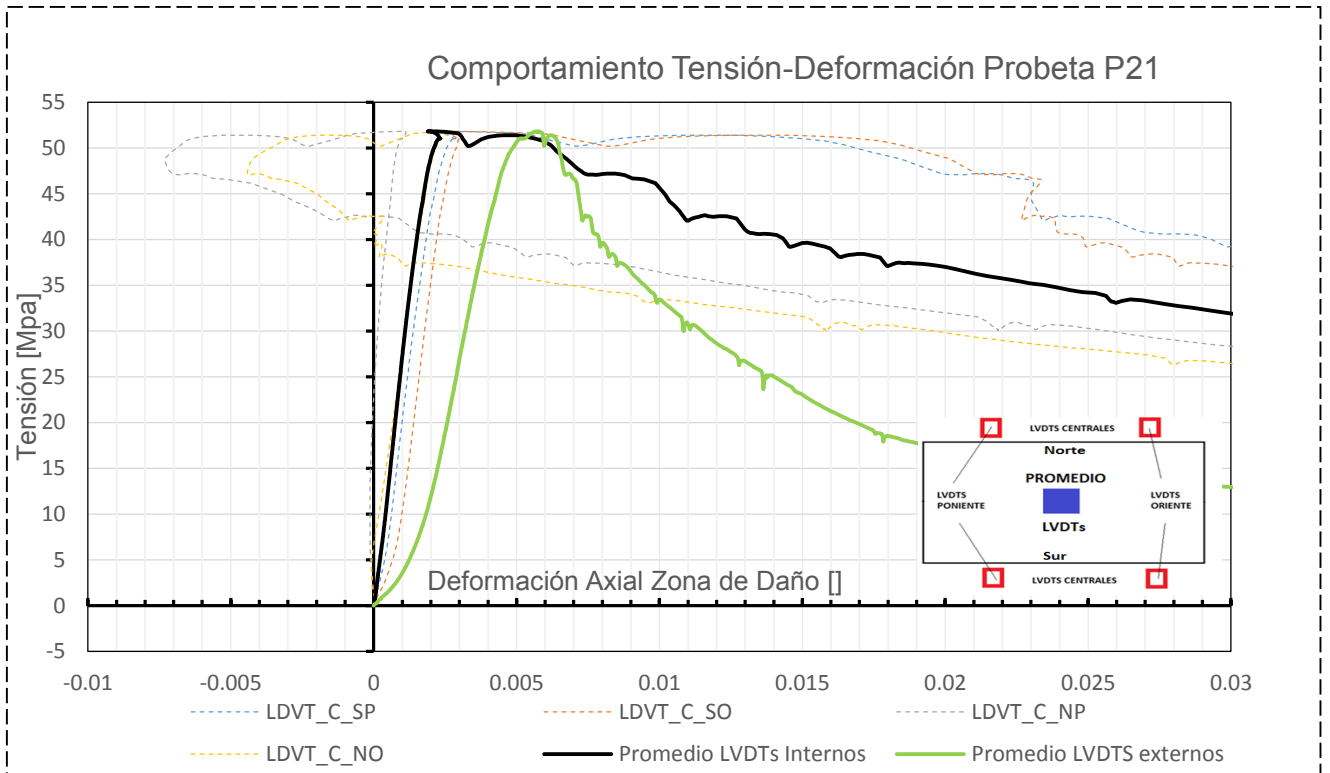


Figura 4.120. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 21

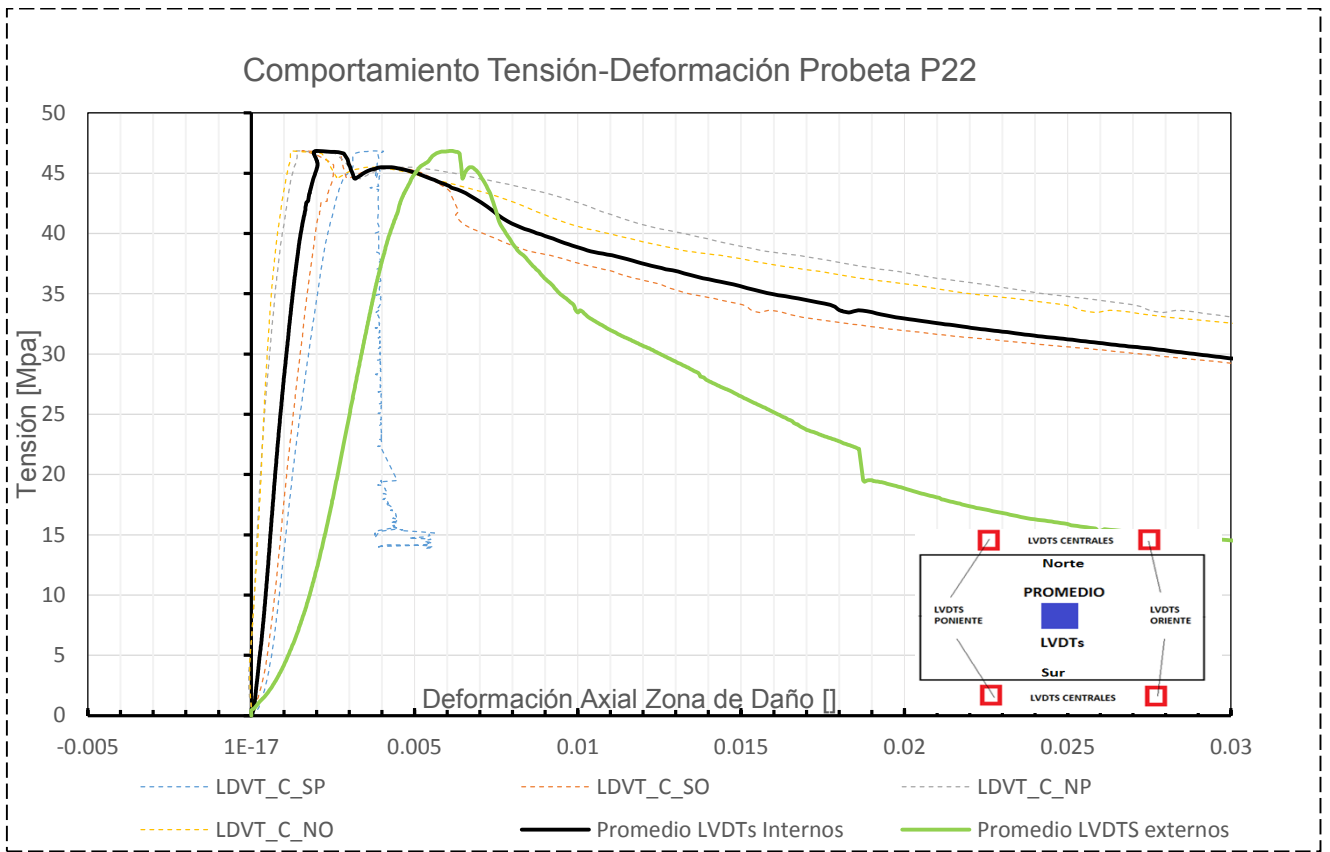


Figura 4.121. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 22

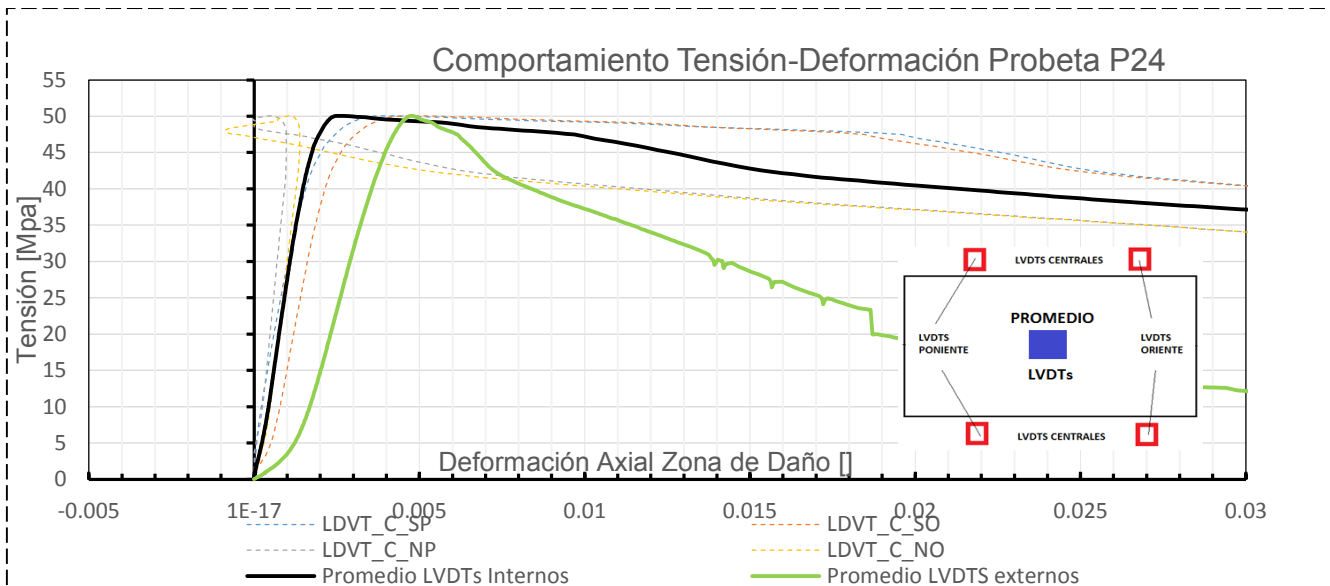


Figura 4.122. Anexo B Comportamiento tensión deformación axial probeta 24

ANEXO C: INESTABILIDAD GLOBAL

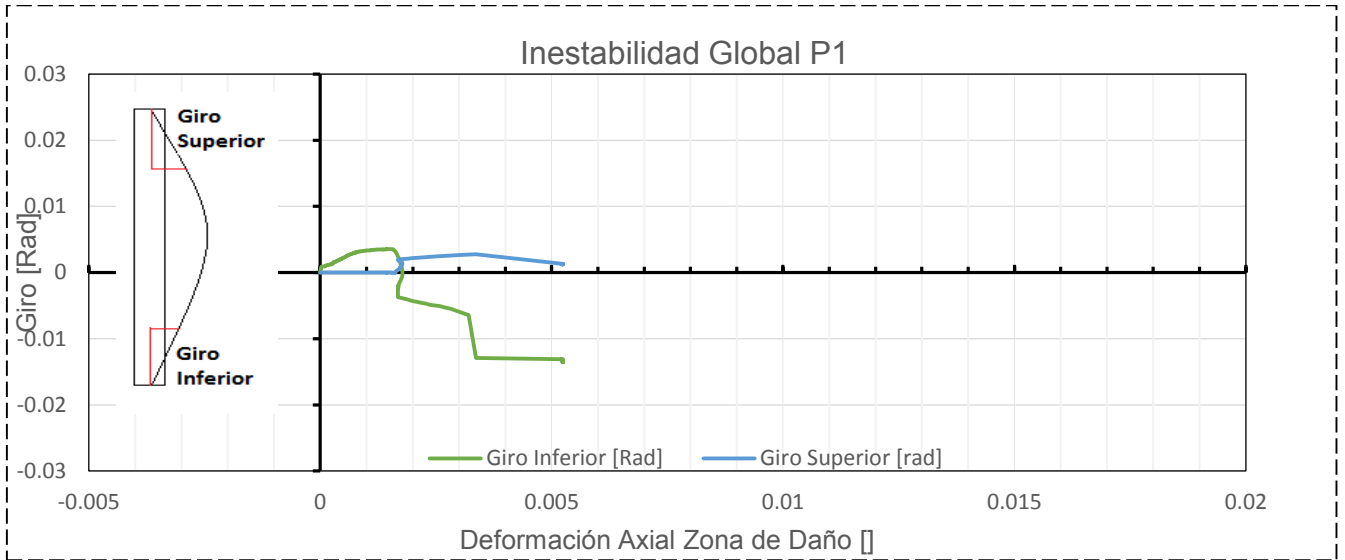


Figura 4.123. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P1

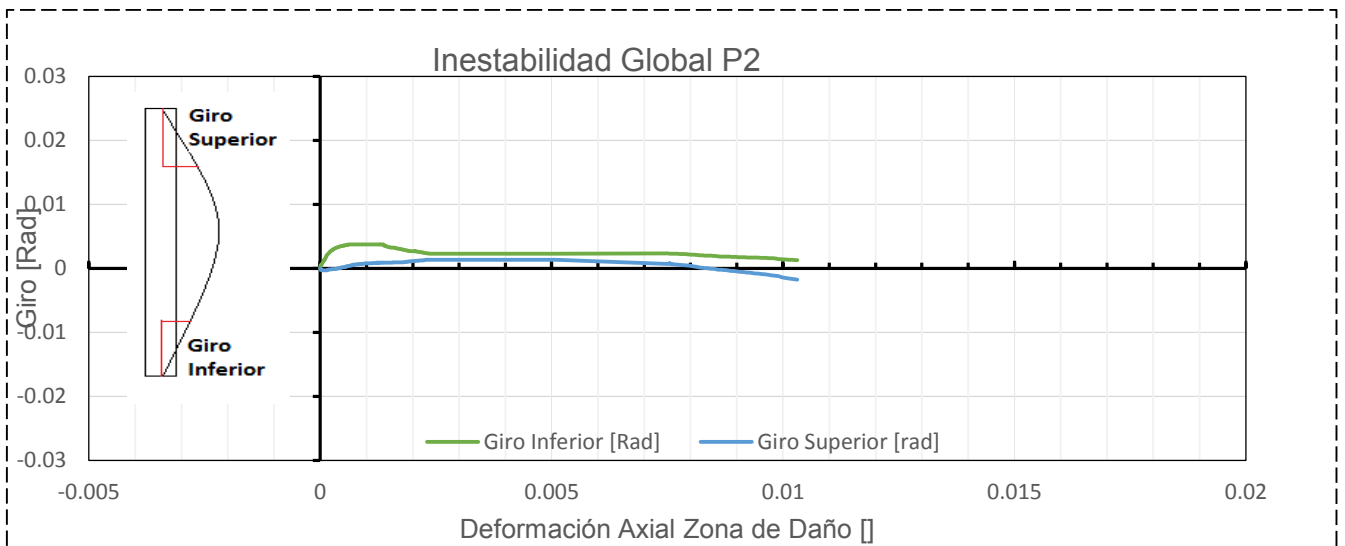


Figura 4.124. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P2

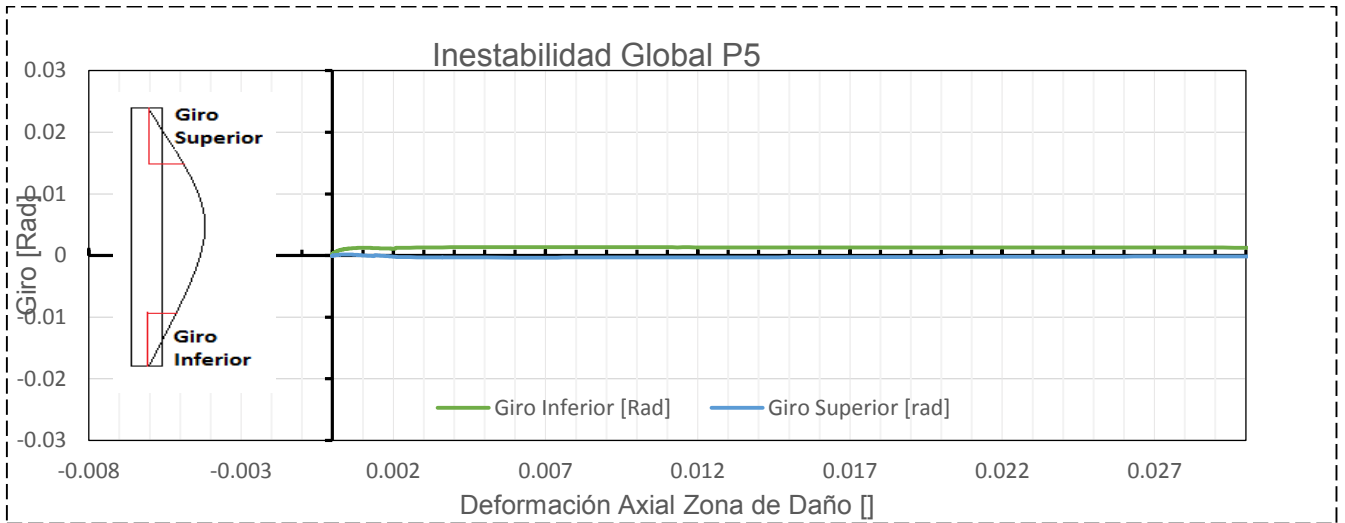


Figura 4.125. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P5

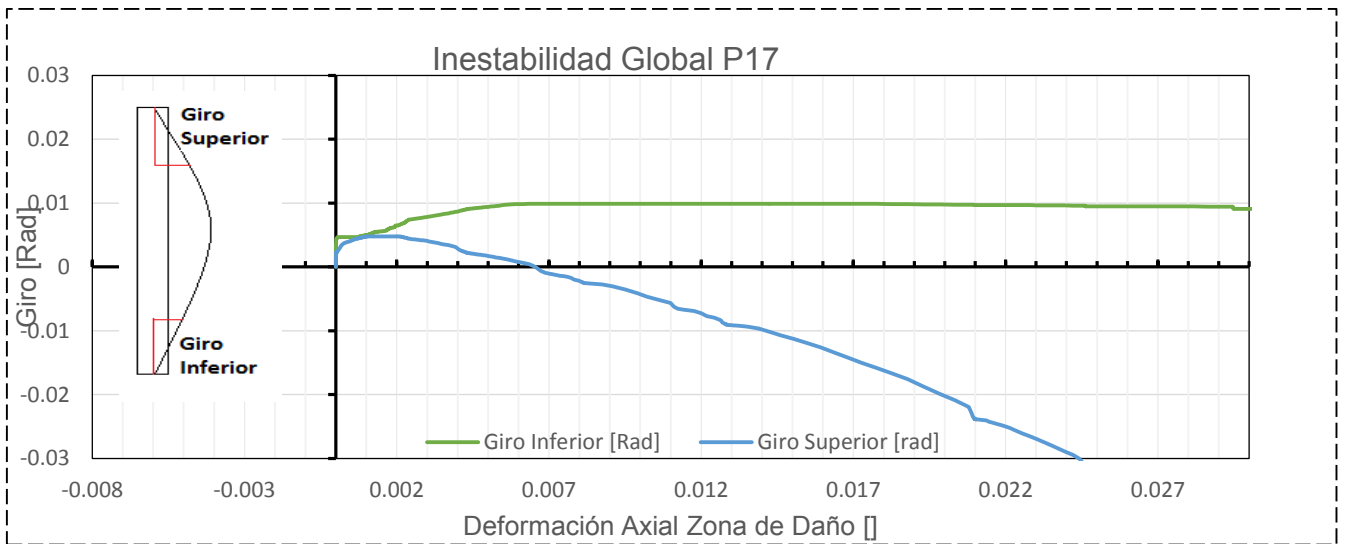


Figura 4.126. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P17

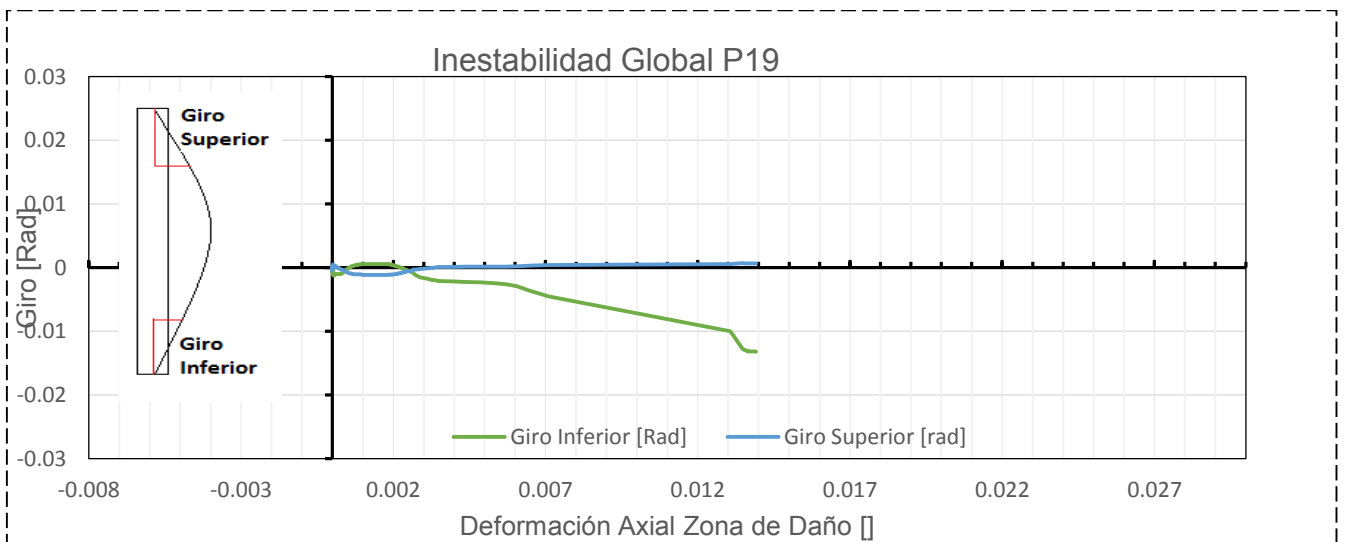


Figura 4.127. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P19

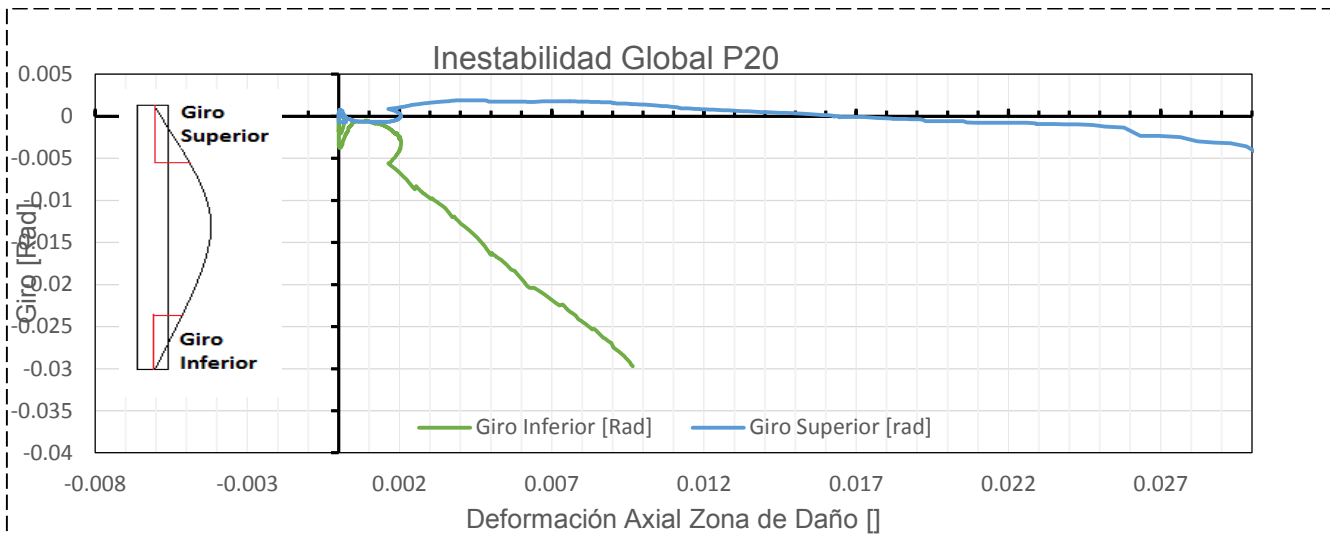


Figura 4.128. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P20

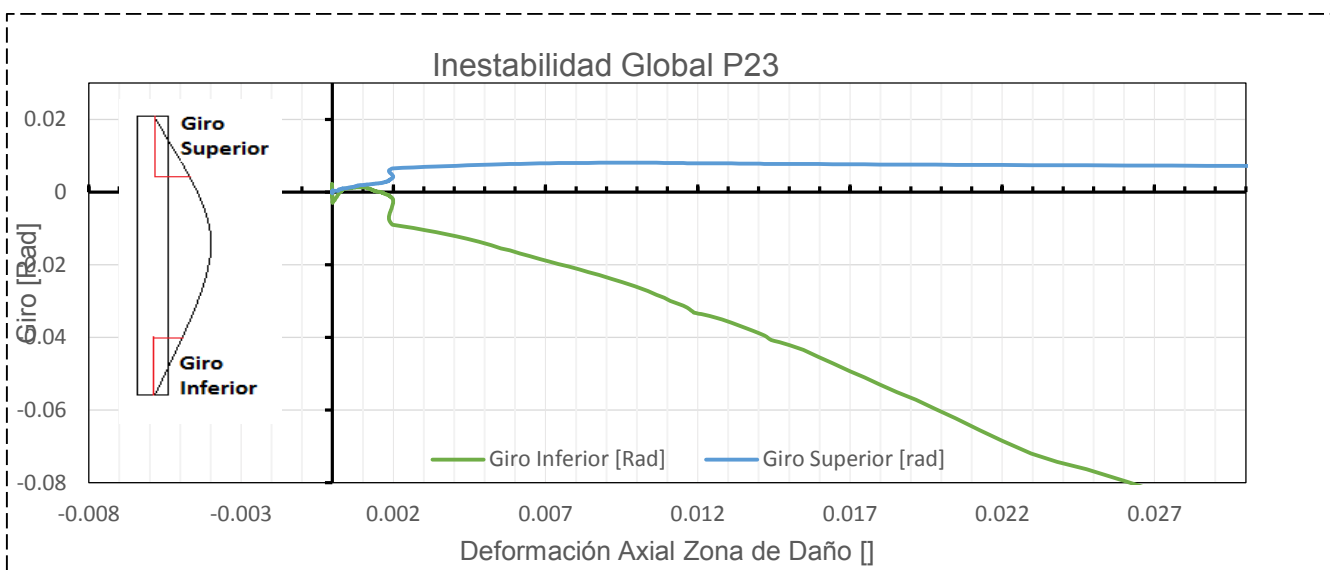


Figura 4.129. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P23

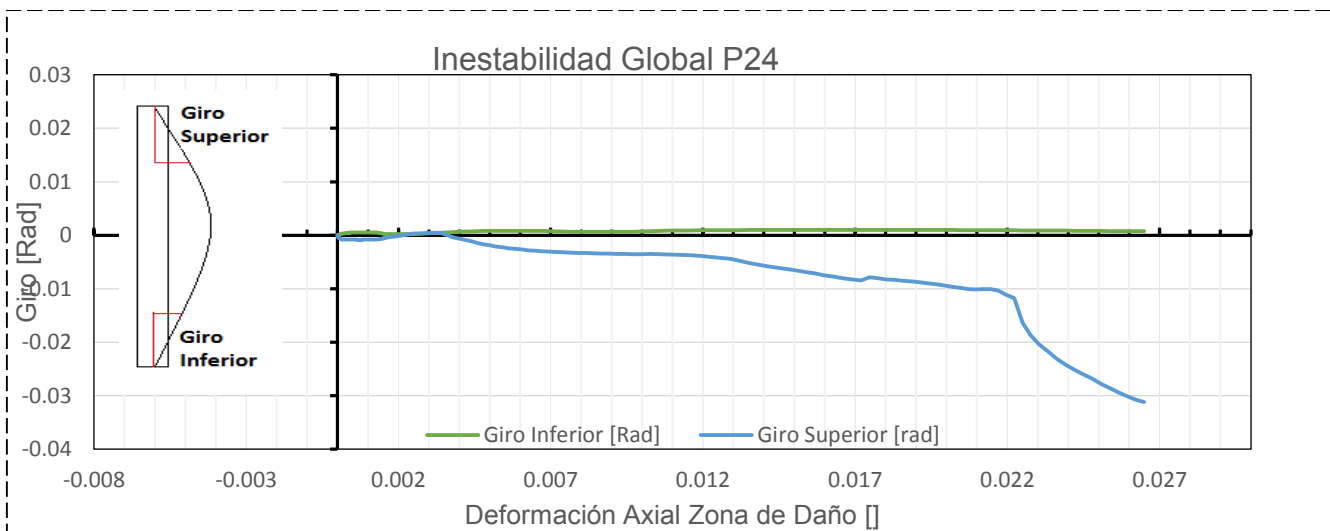


Figura 4.130. Anexo C Inestabilidad Global Probeta P23

ANEXO D COMPORTAMIENTO TRANSVERSAL

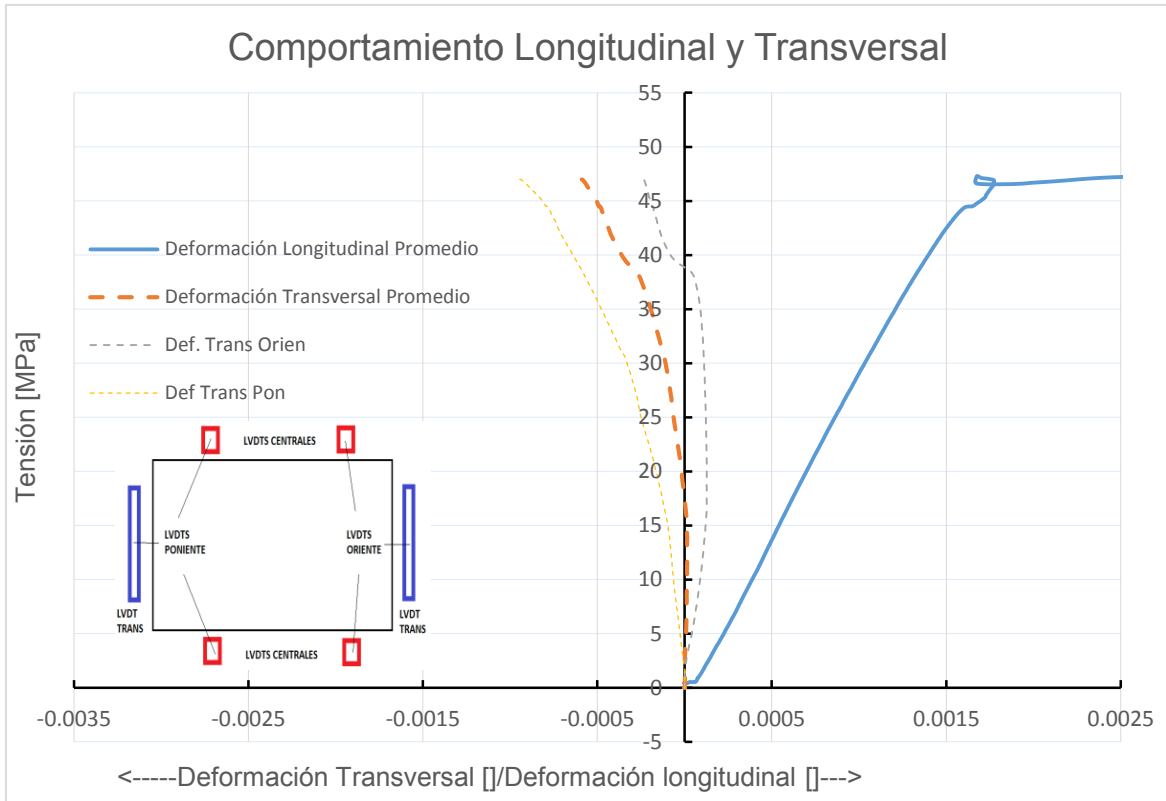


Figura 4.131. Anexo D Comportamiento transversal P1

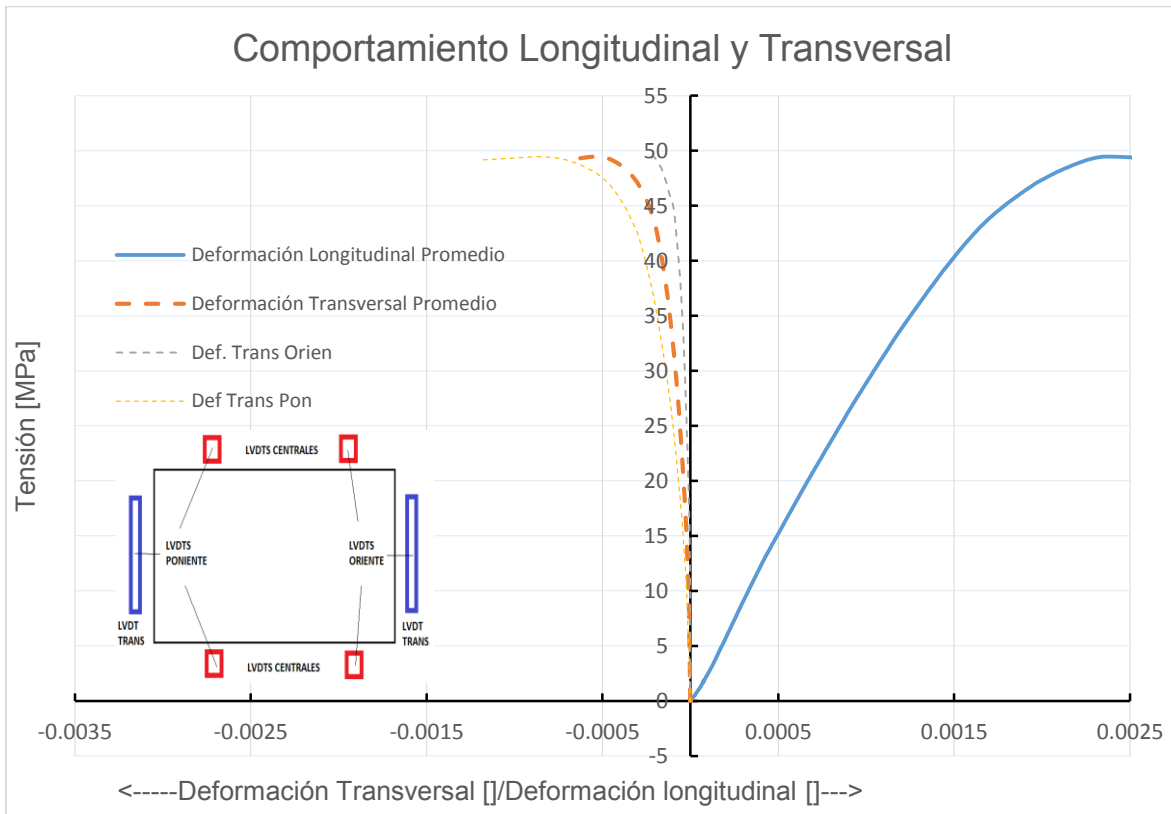


Figura 4.132. Anexo D Comportamiento transversal P2

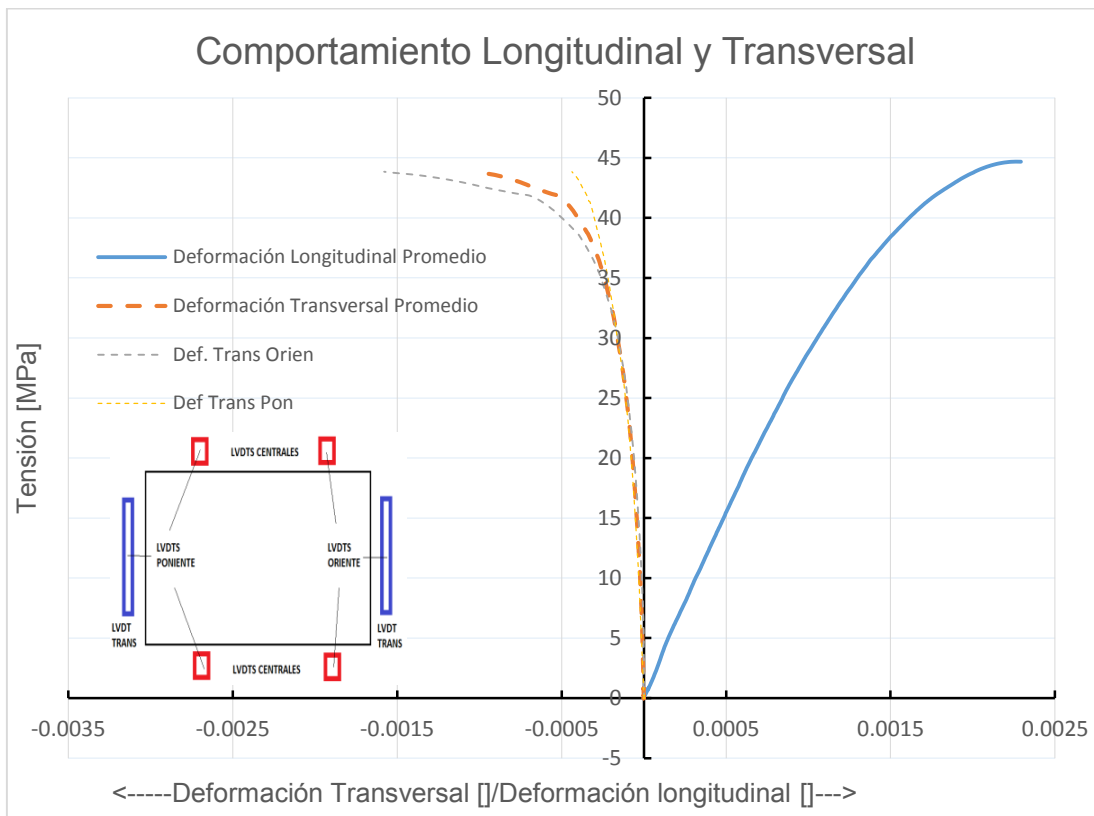


Figura 4.133. Anexo D Comportamiento transversal P3

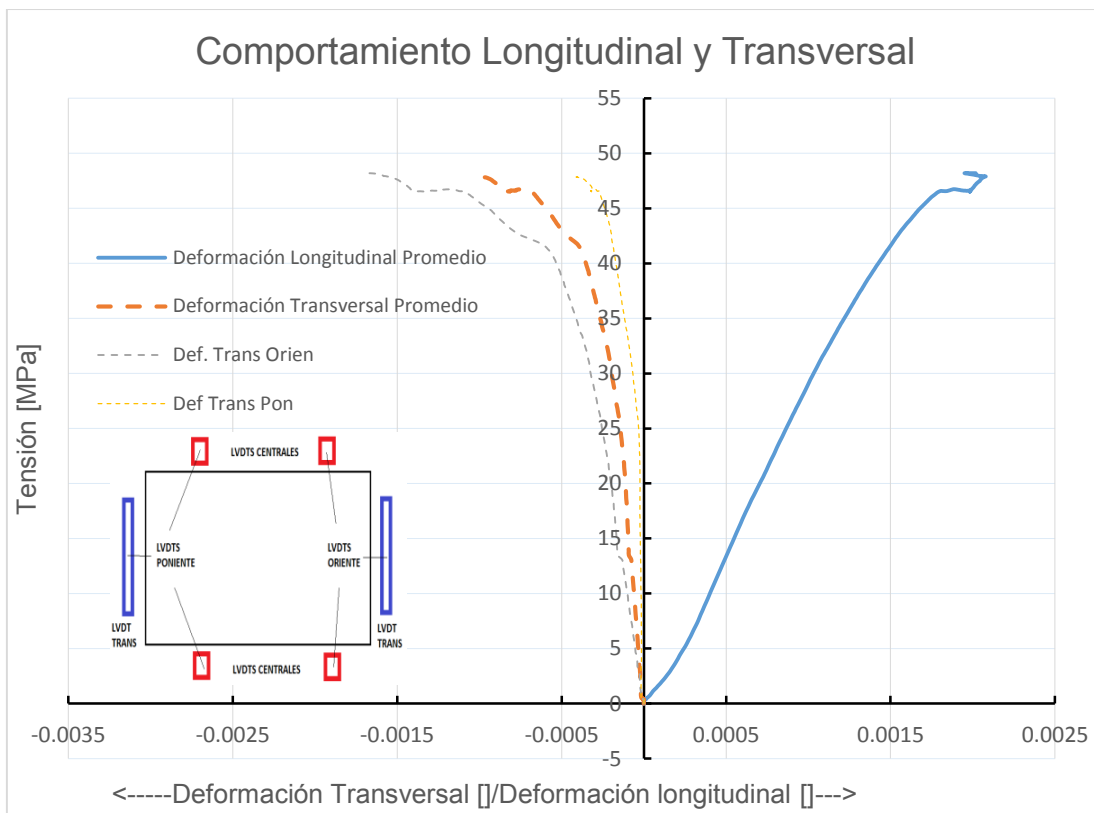


Figura 4.134. Anexo D Comportamiento transversal P4

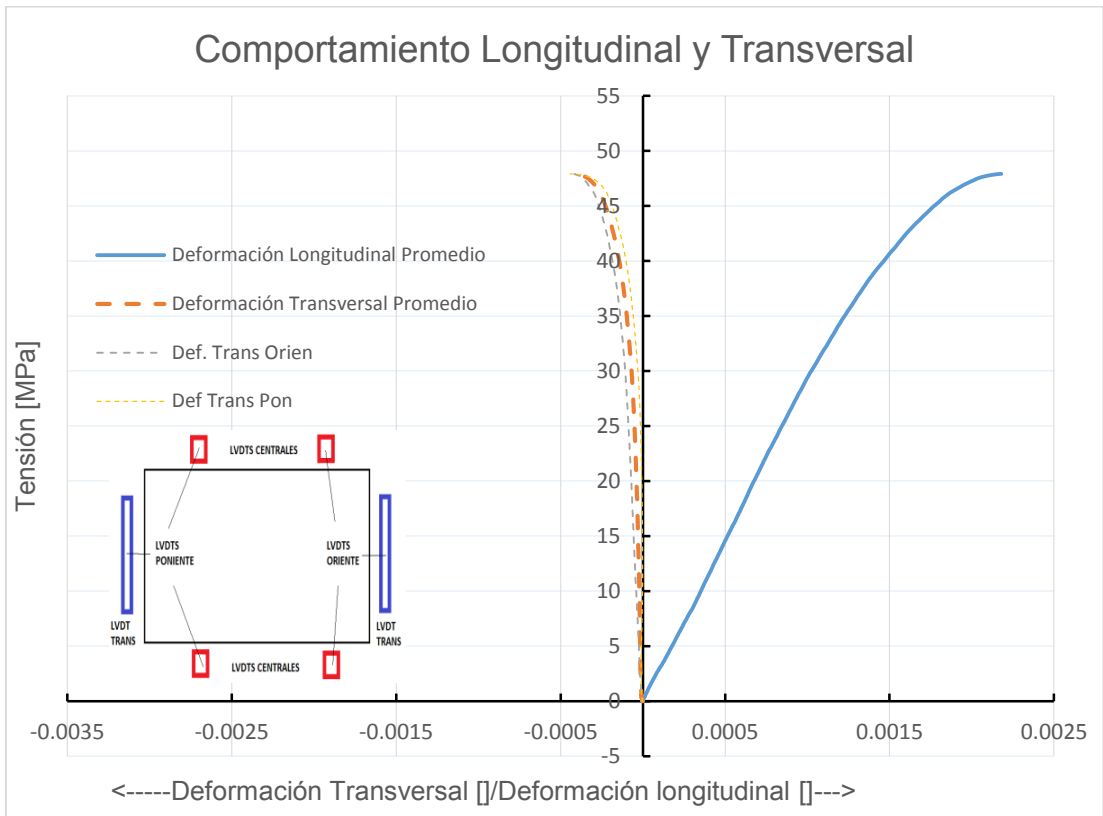


Figura 4.135. Anexo D Comportamiento transversal P5

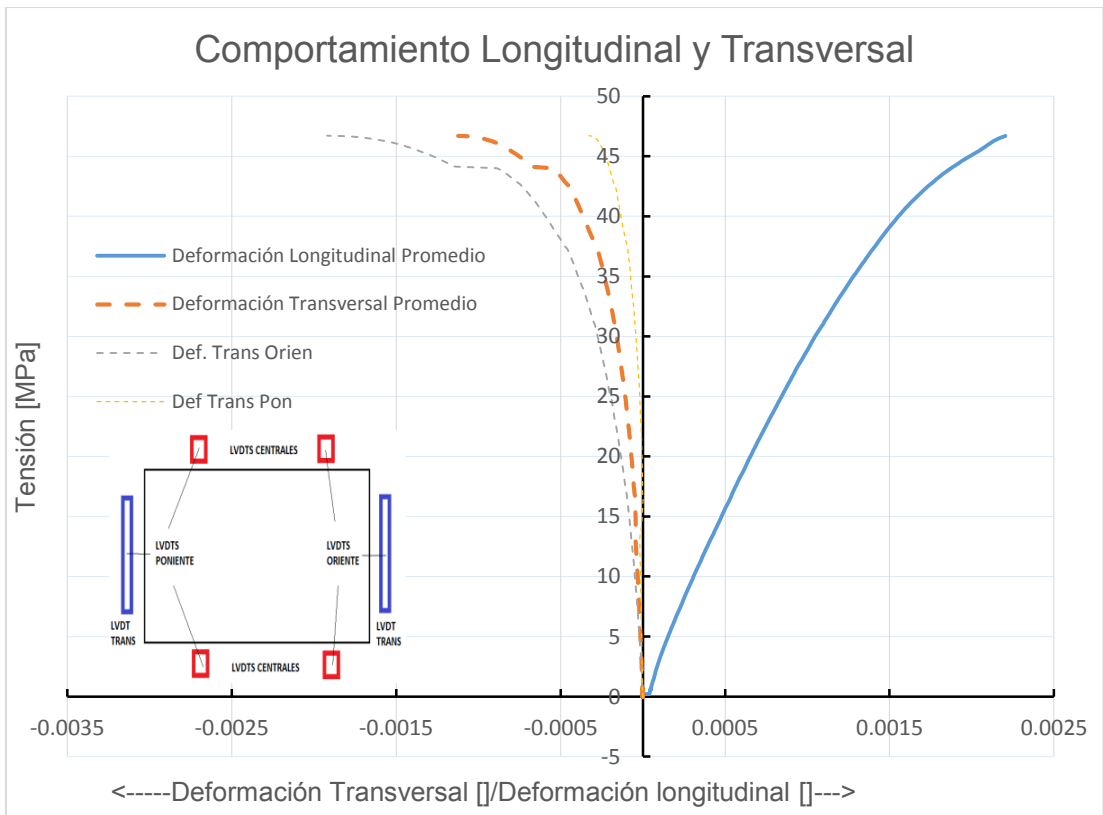


Figura 4.136. Anexo D Comportamiento transversal P6

Comportamiento Longitudinal y Transversal

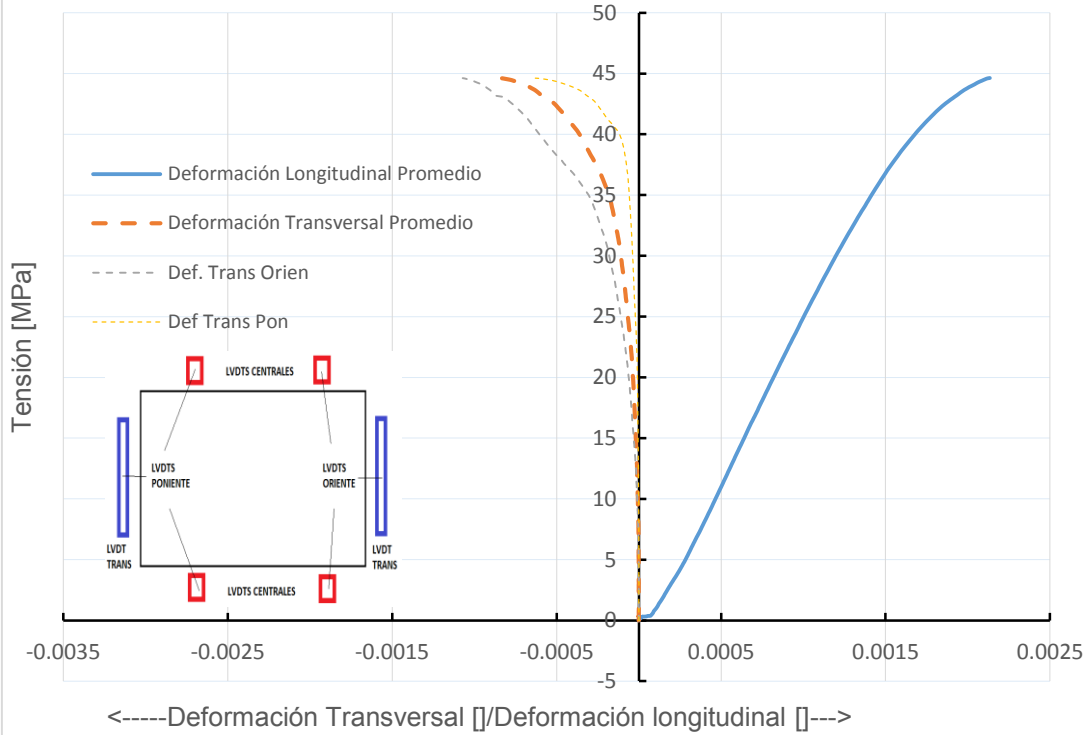


Figura 4.137. Anexo D Comportamiento transversal P13

Comportamiento Longitudinal y Transversal

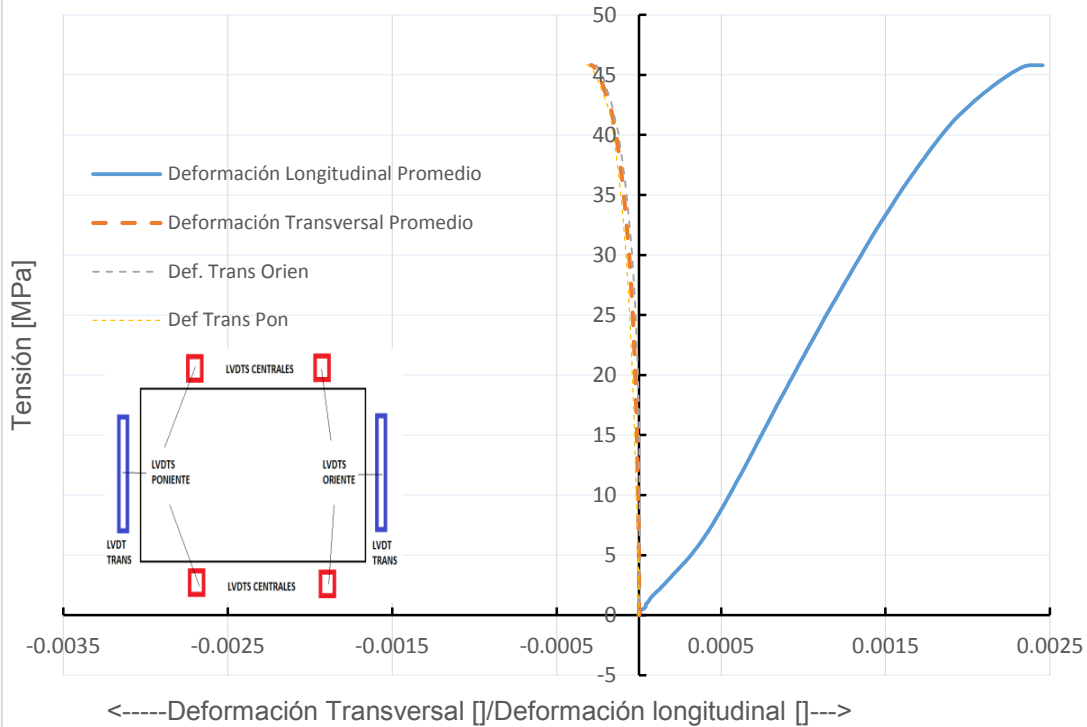


Figura 4.138. Anexo D Comportamiento transversal P17

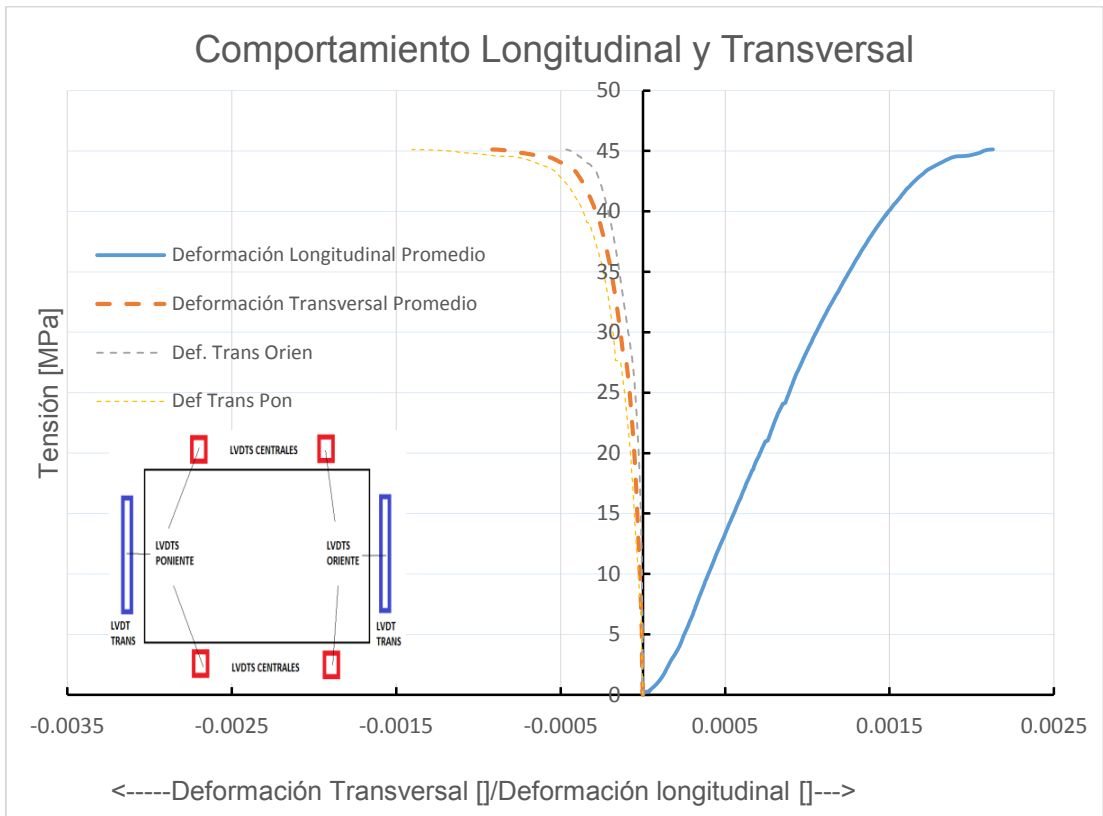


Figura 4.139. Anexo D Comportamiento transversal P18

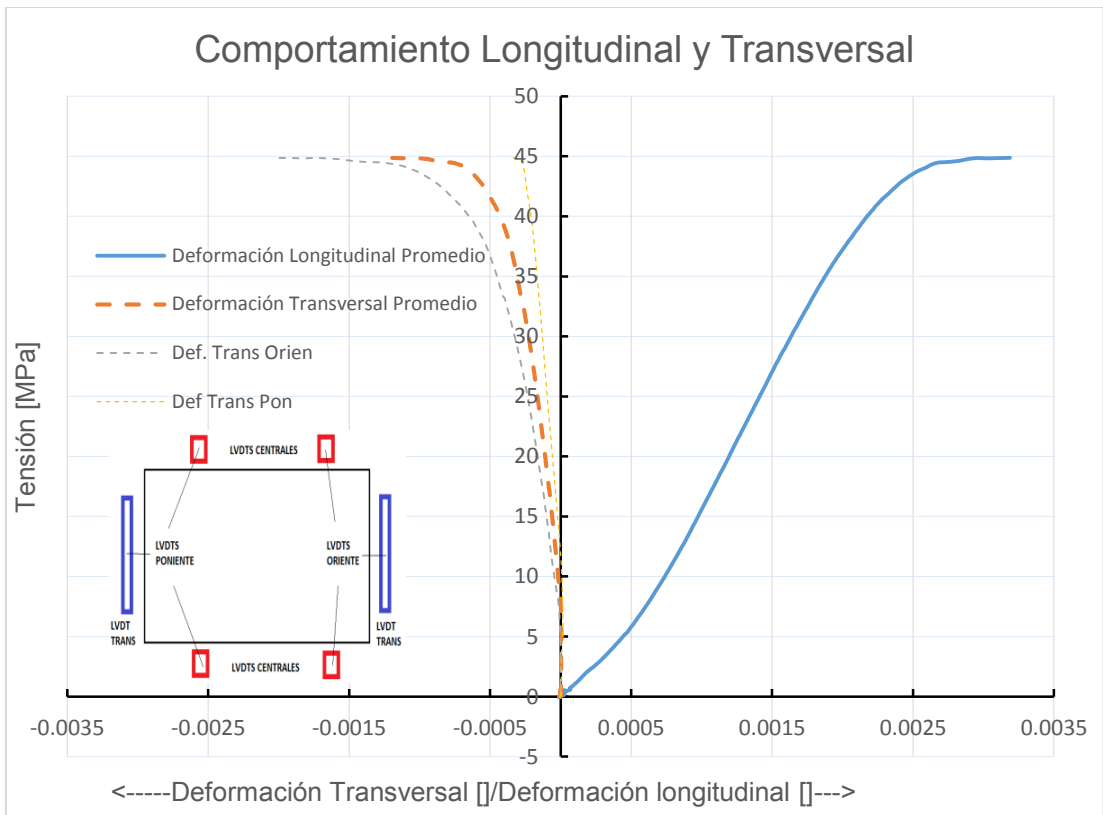


Figura 4.140. Anexo D Comportamiento transversal P19

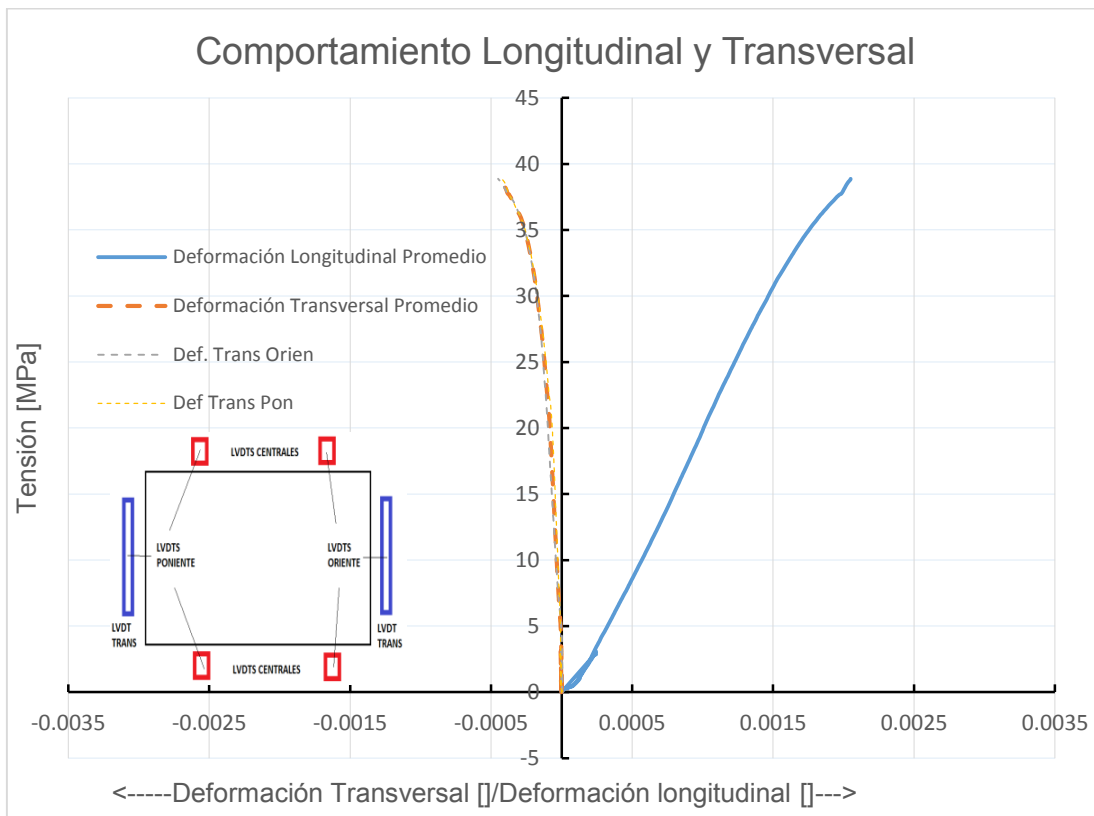


Figura 4.141. Anexo D Comportamiento transversal P20

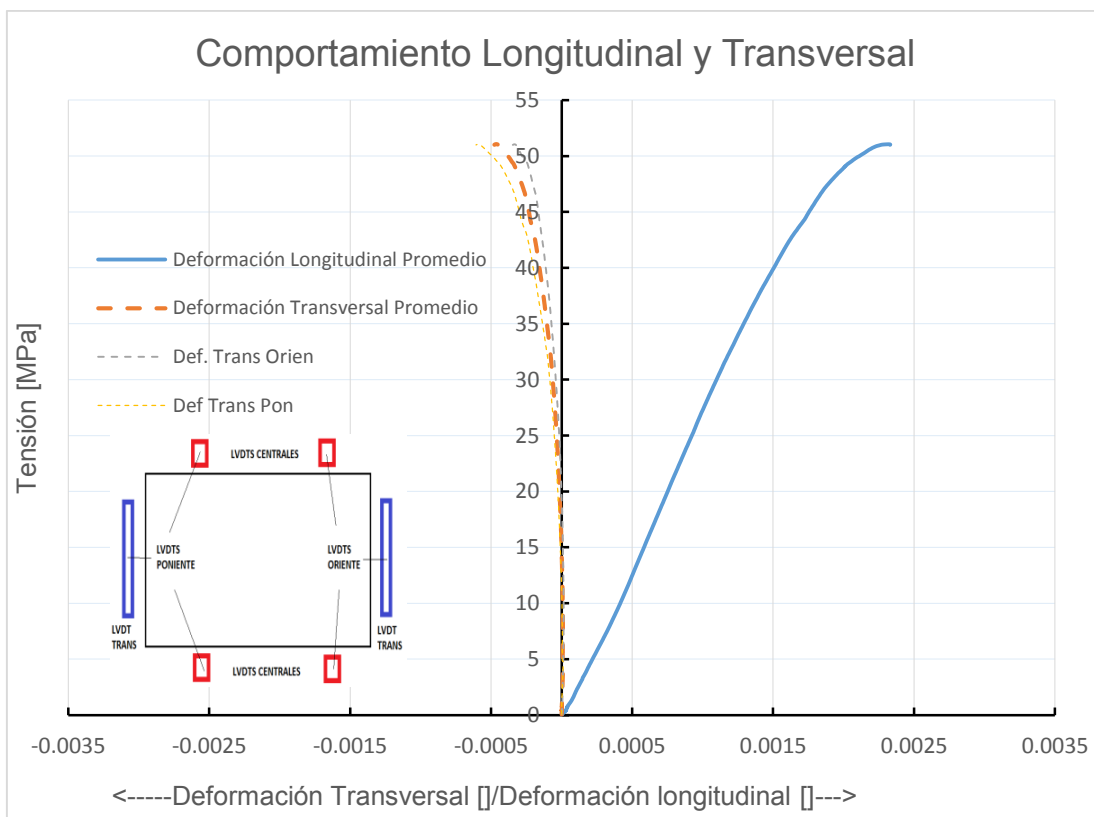


Figura 4.142. Anexo D Comportamiento transversal P21

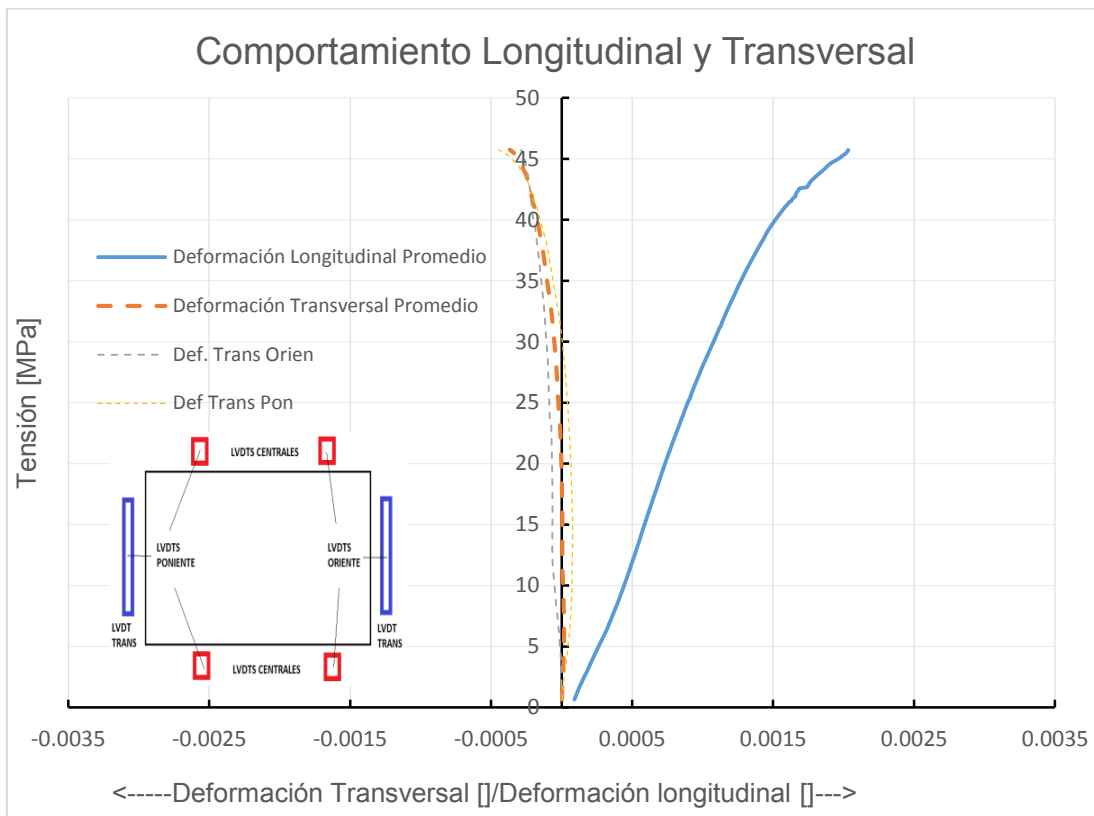


Figura 4.143. Anexo D Comportamiento transversal P22

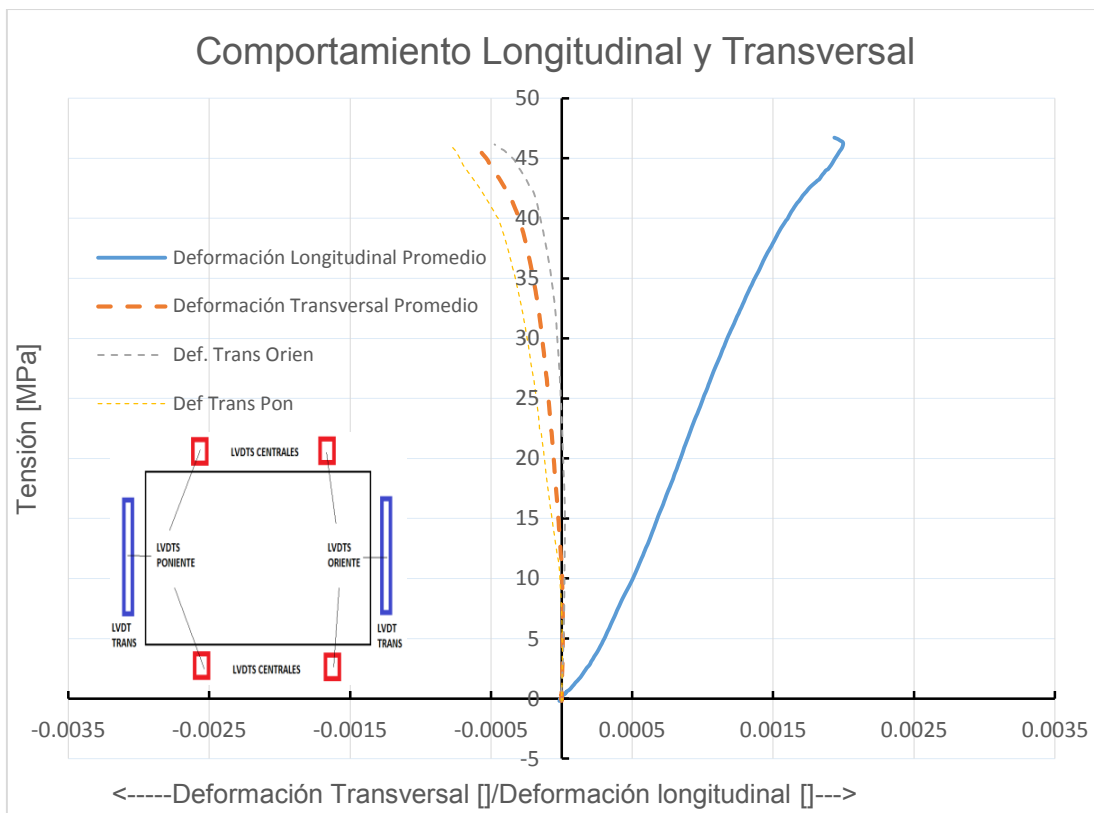


Figura 4.144. Anexo D Comportamiento transversal P23

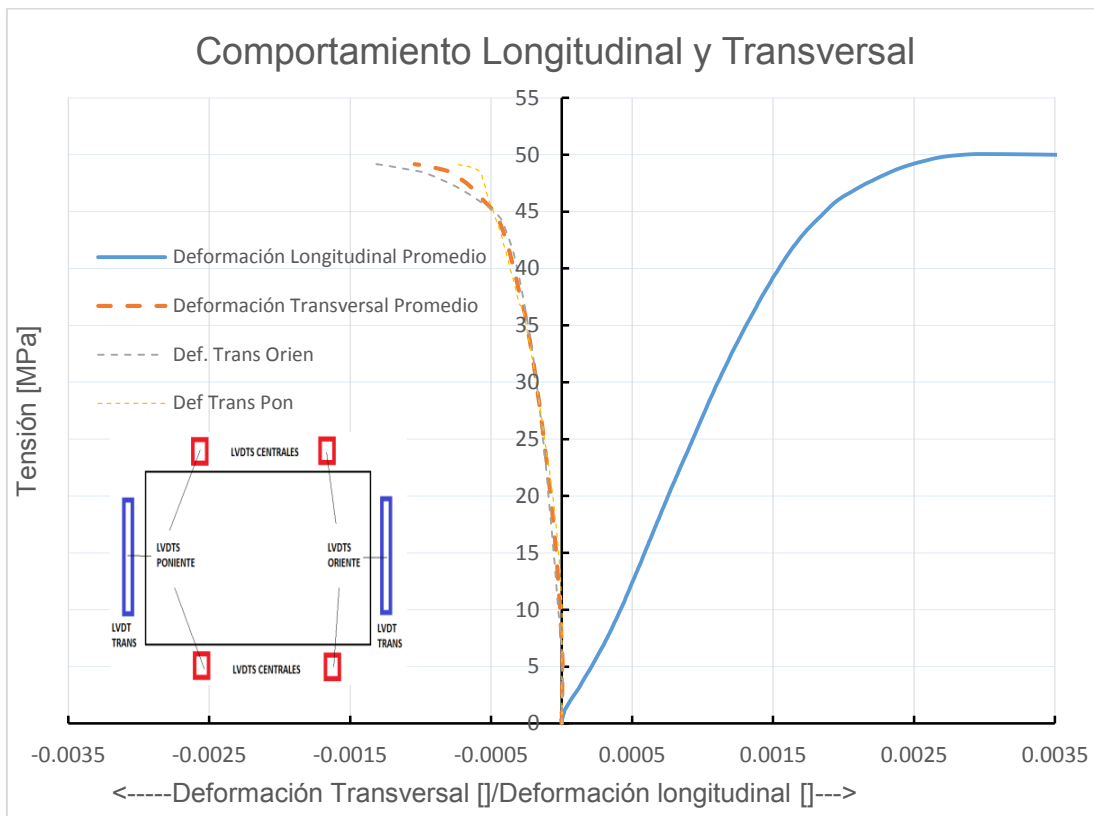


Figura 4.145. Anexo D Comportamiento transversal P24

ANEXO E COMPORTAMIENTO DE ESTRIBOS

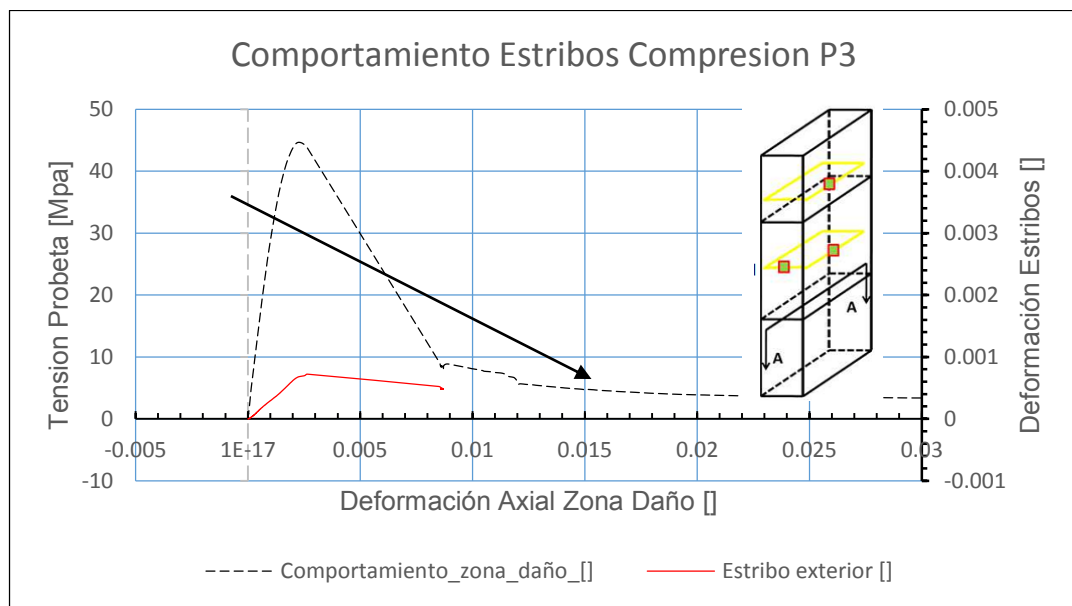


Figura 4.146. Anexo E Comportamiento estribos P3

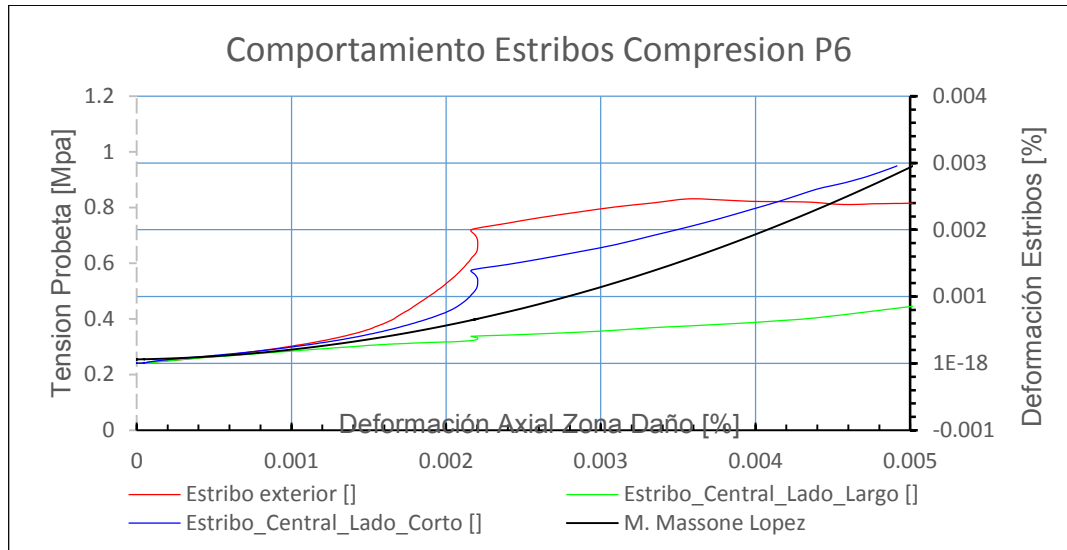


Figura 4.147. Anexo E Comportamiento estribos P6 y Modelo Massone-López

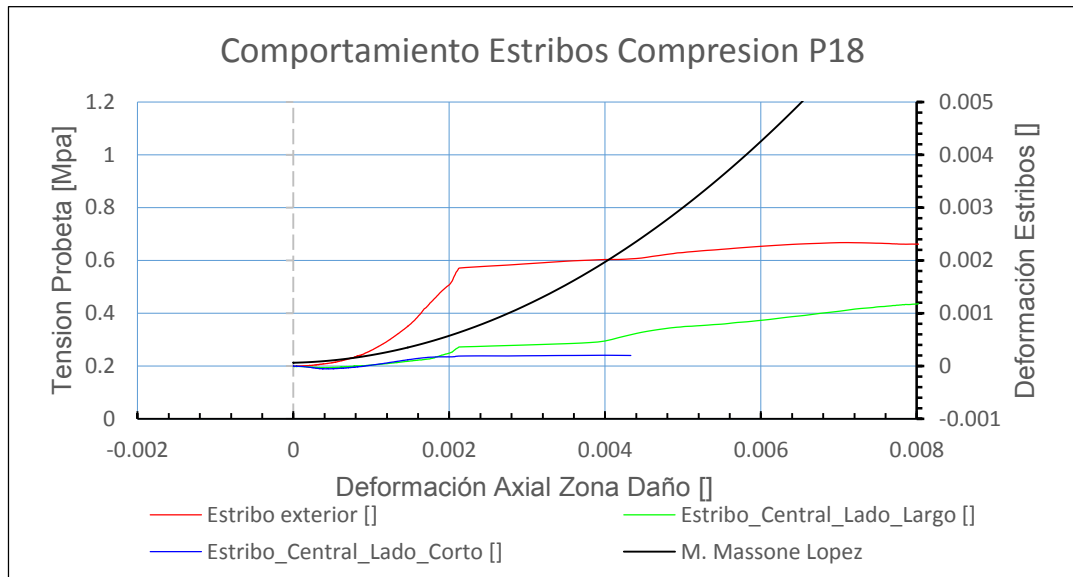


Figura 4.148. Anexo E Comportamiento estribos P18 y Modelo Massone-López

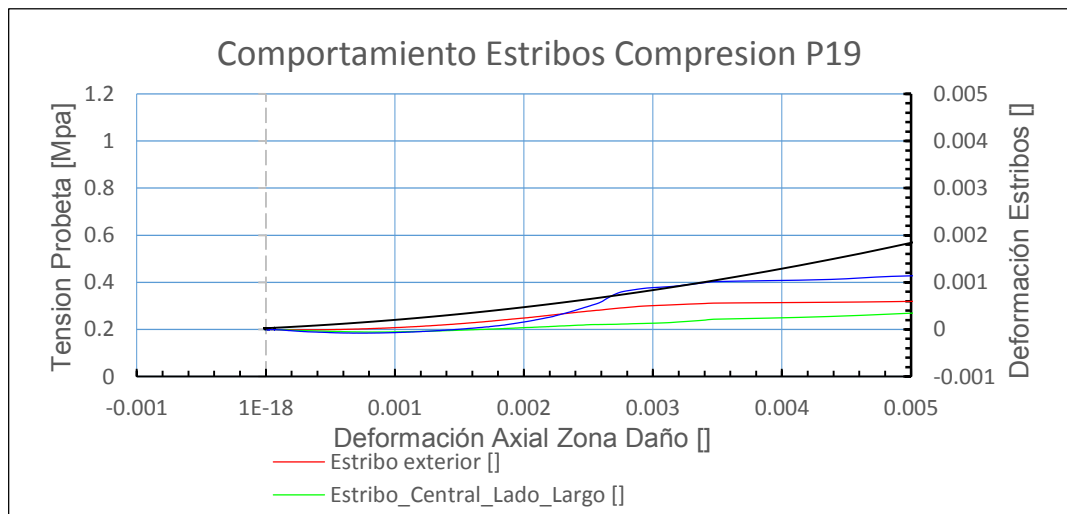


Figura 4.149. Anexo E Comportamiento estribos P19 y Modelo Massone-López

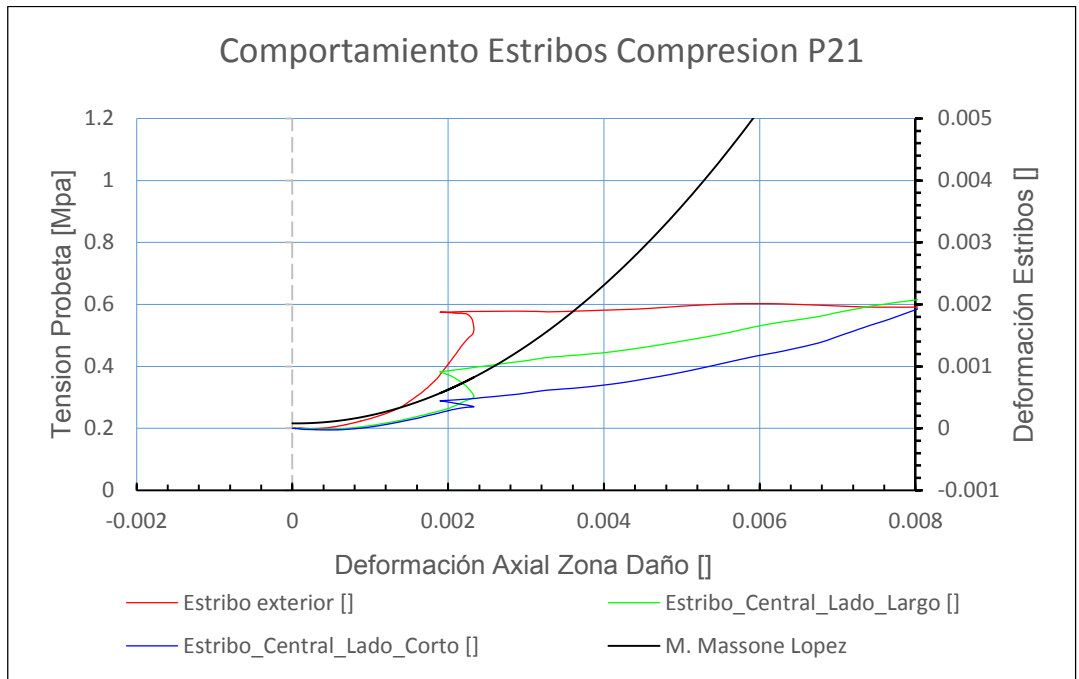


Figura 4.150. Anexo E Comportamiento estribos P21 y Modelo Massone-López

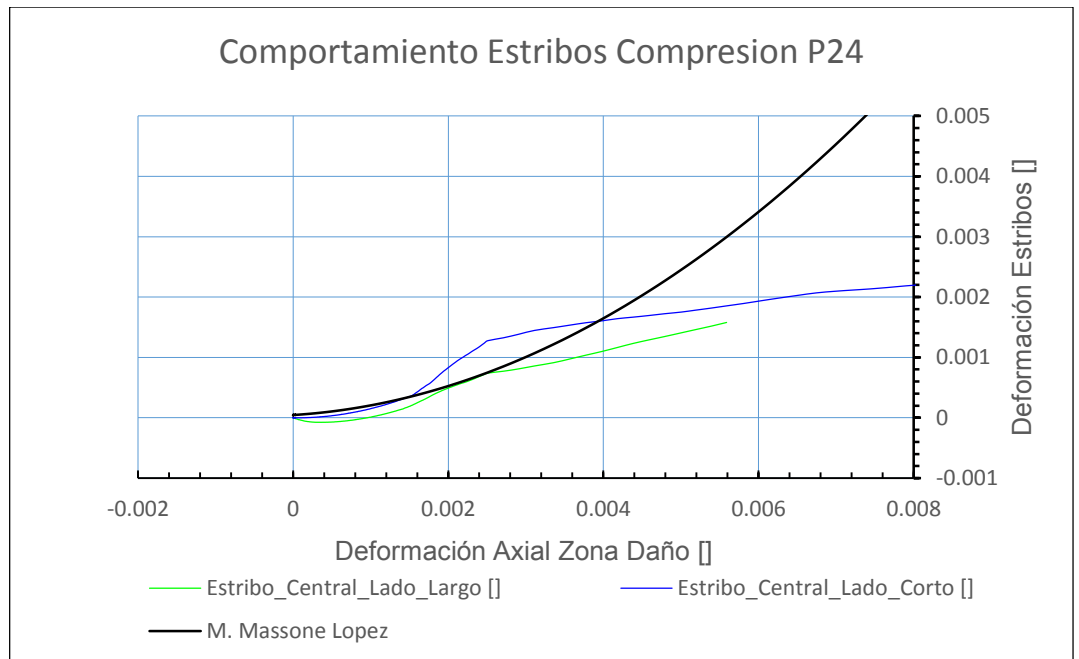


Figura 4.151. Anexo E Comportamiento estribos P24 y Modelo Massone-López

ANEXO F COMPORTAMIENTO BARRAS LONGITUDINALES

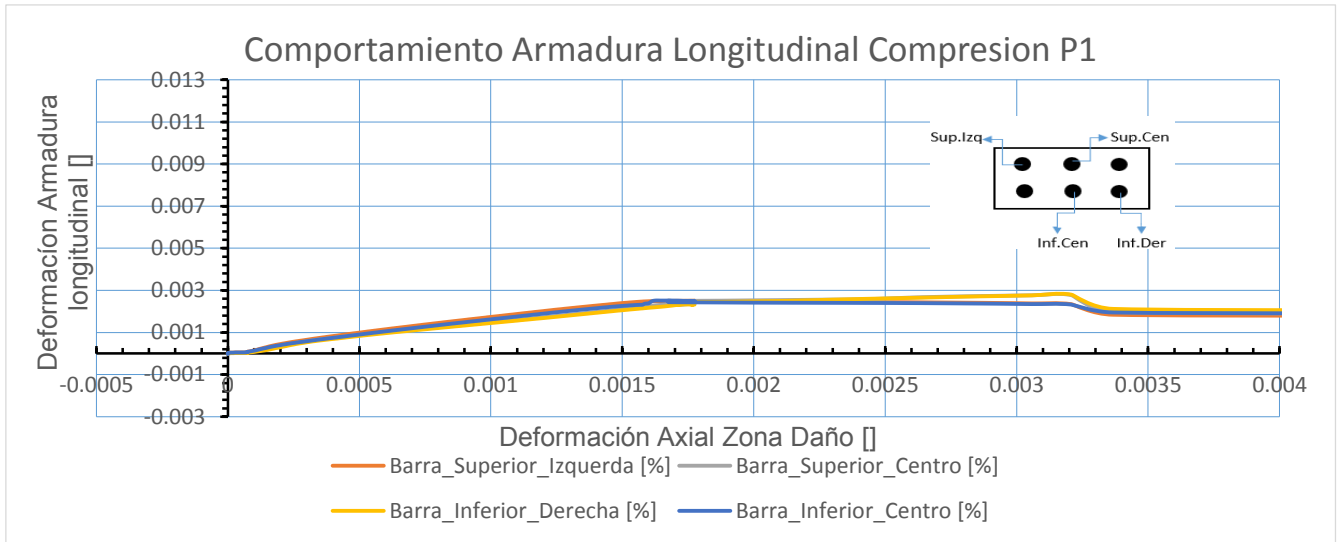


Figura 4.152. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 1

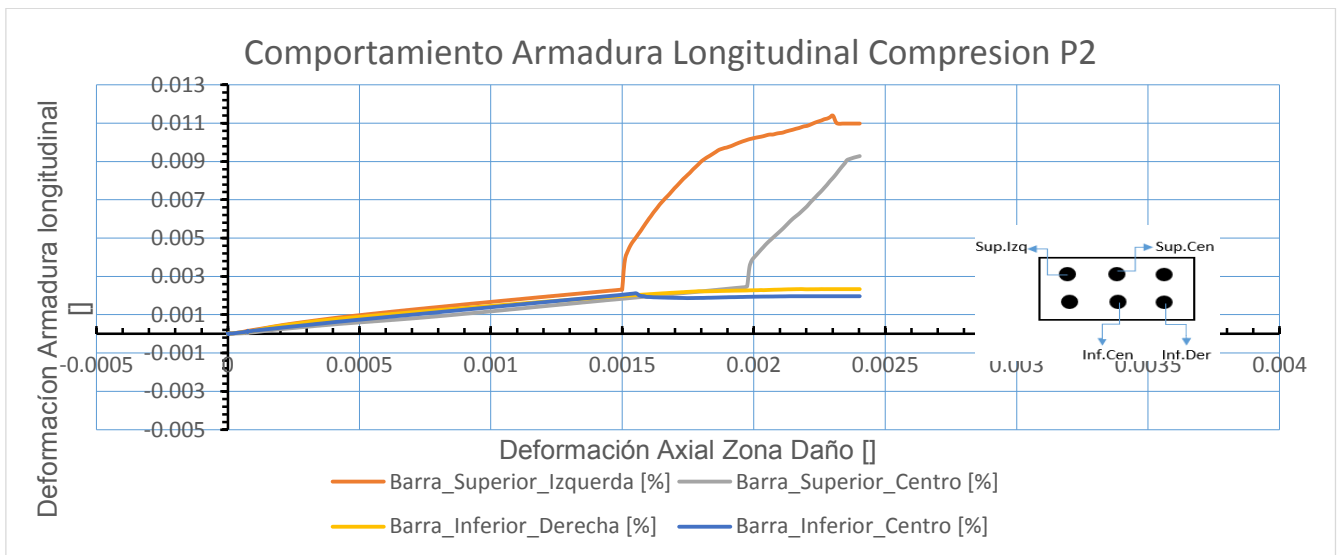


Figura 4.153. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 2

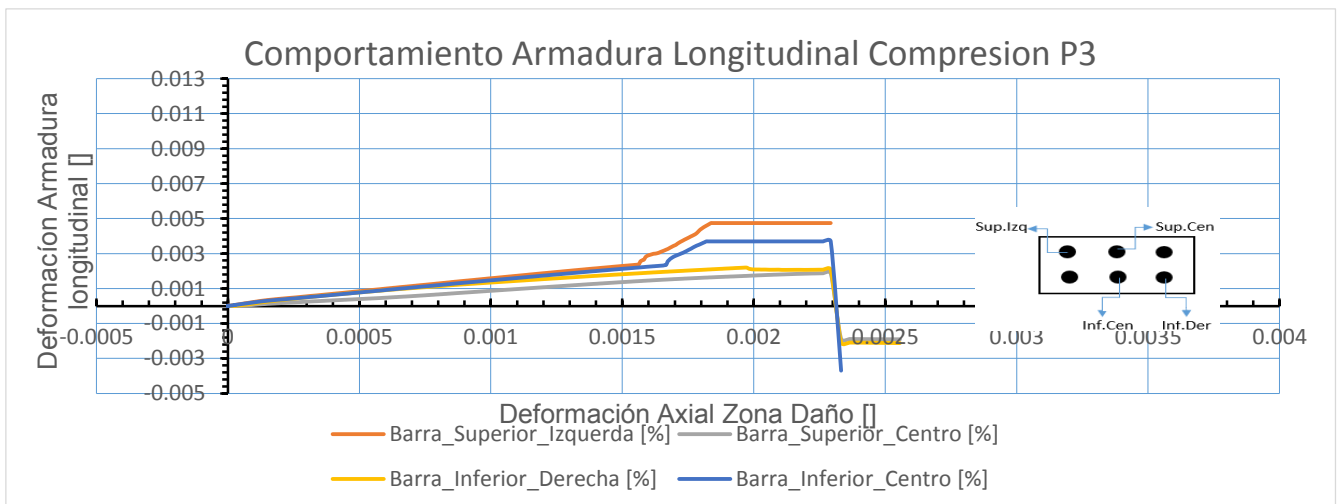


Figura 4.154. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 3

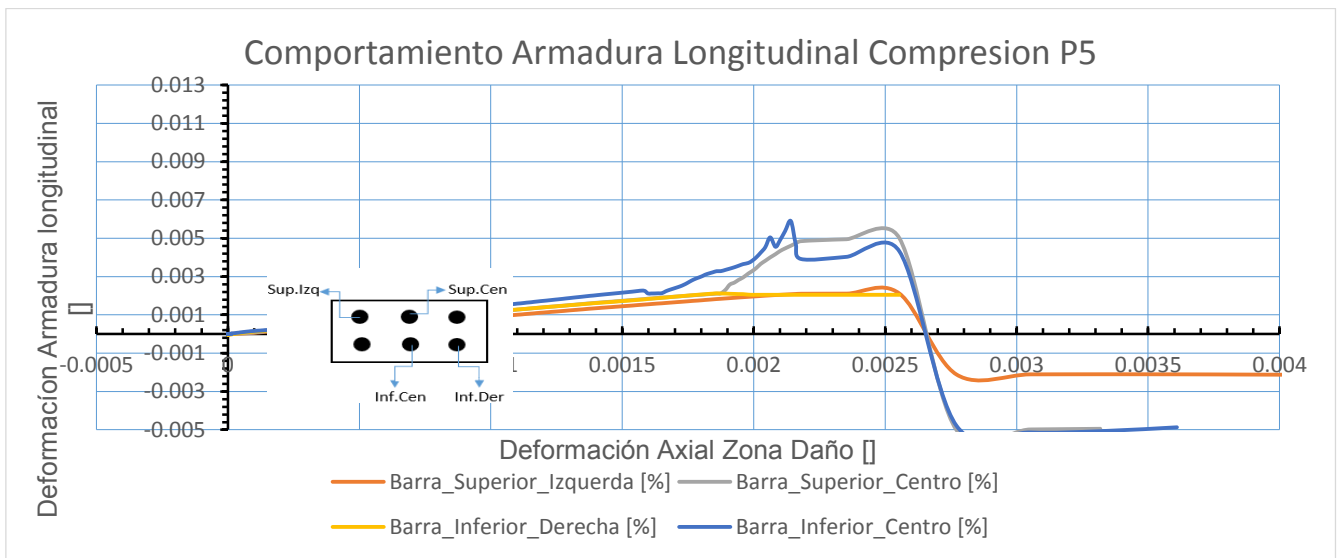


Figura 4.155. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 5

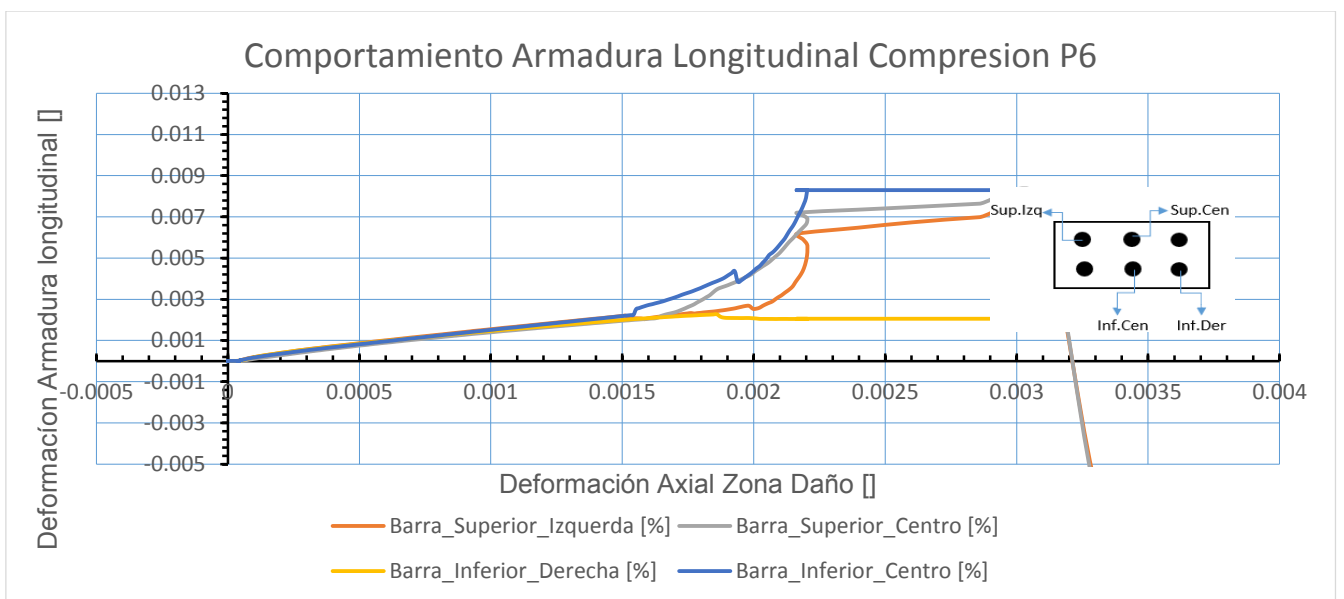


Figura 4.156. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 6

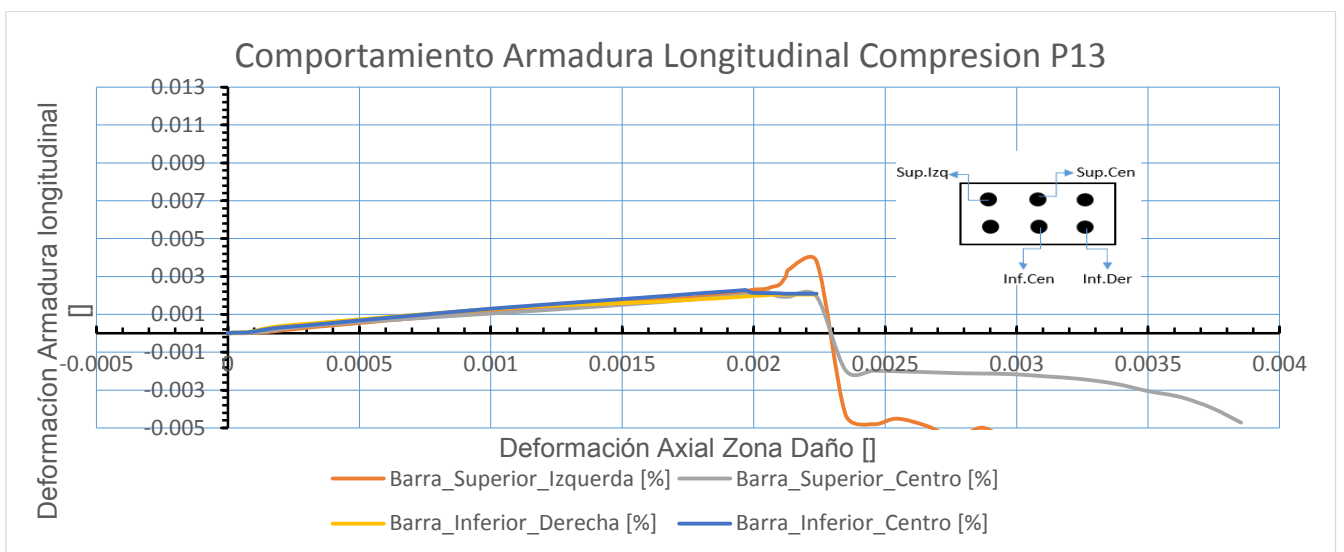


Figura 4.157. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 13

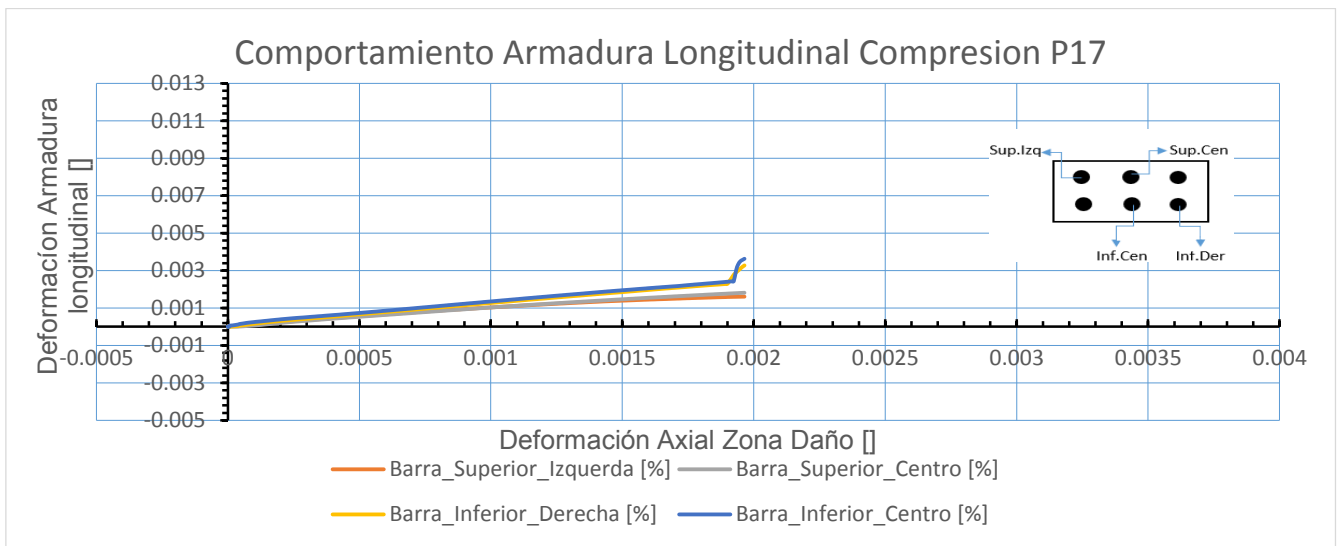


Figura 4.158. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 17

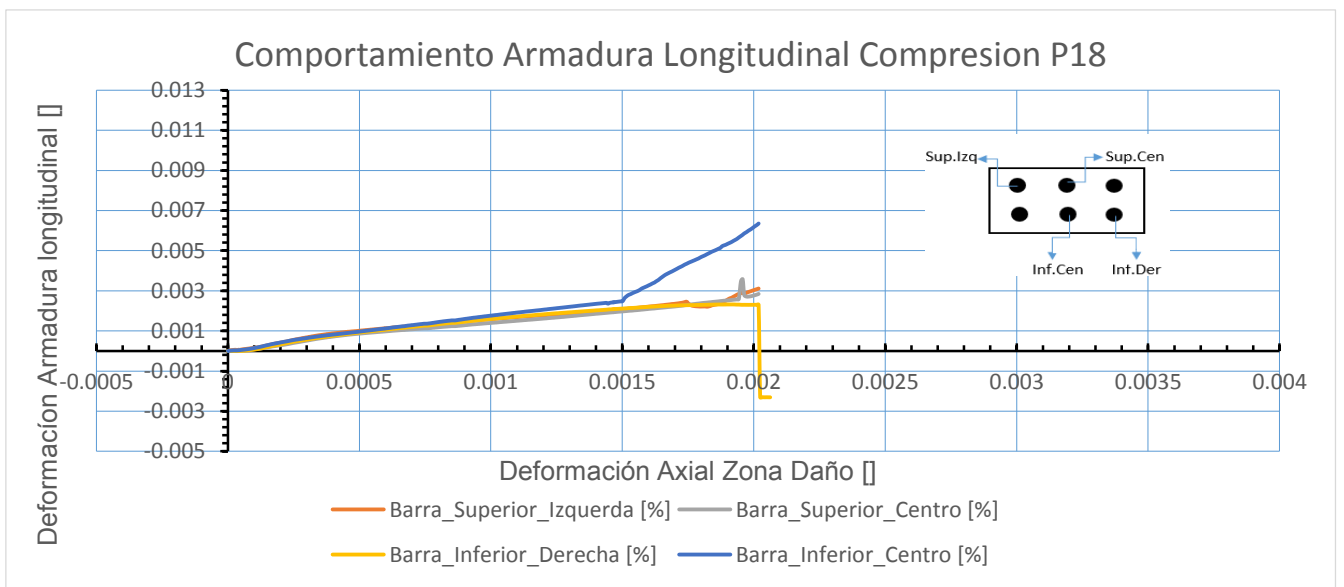


Figura 4.159. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 18

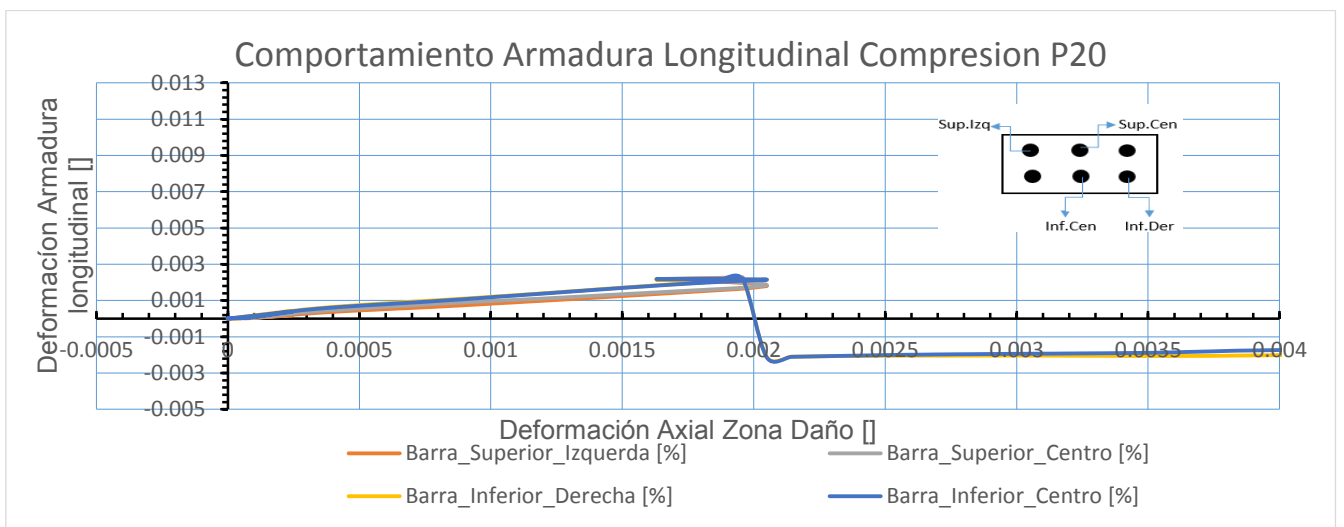


Figura 4.160. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 20

Comportamiento Armadura Longitudinal Compresion P21

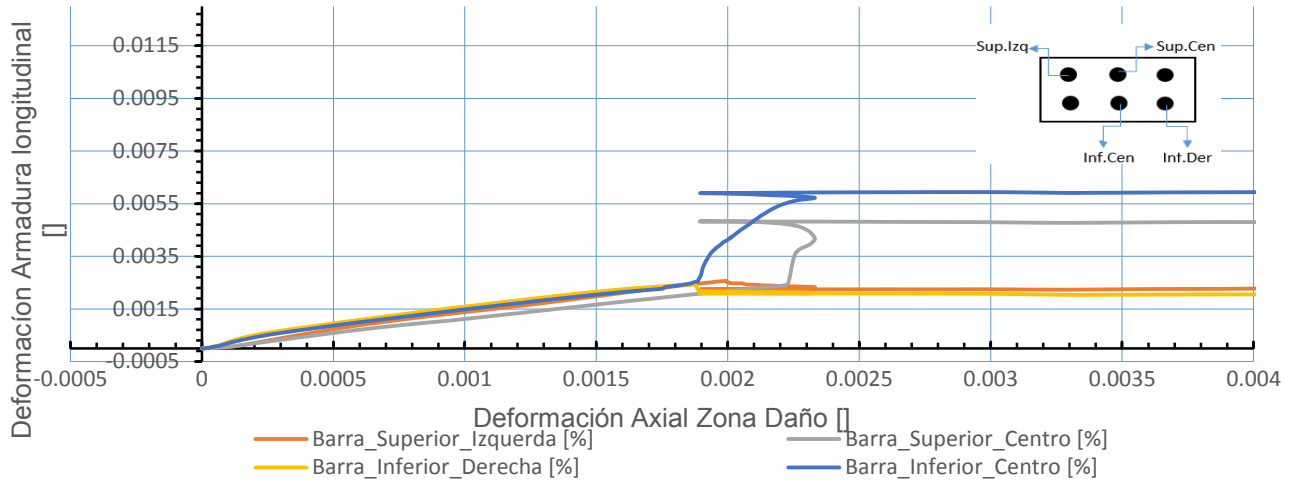


Figura 4.161. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 21

Comportamiento Armadura Longitudinal Compresion P22

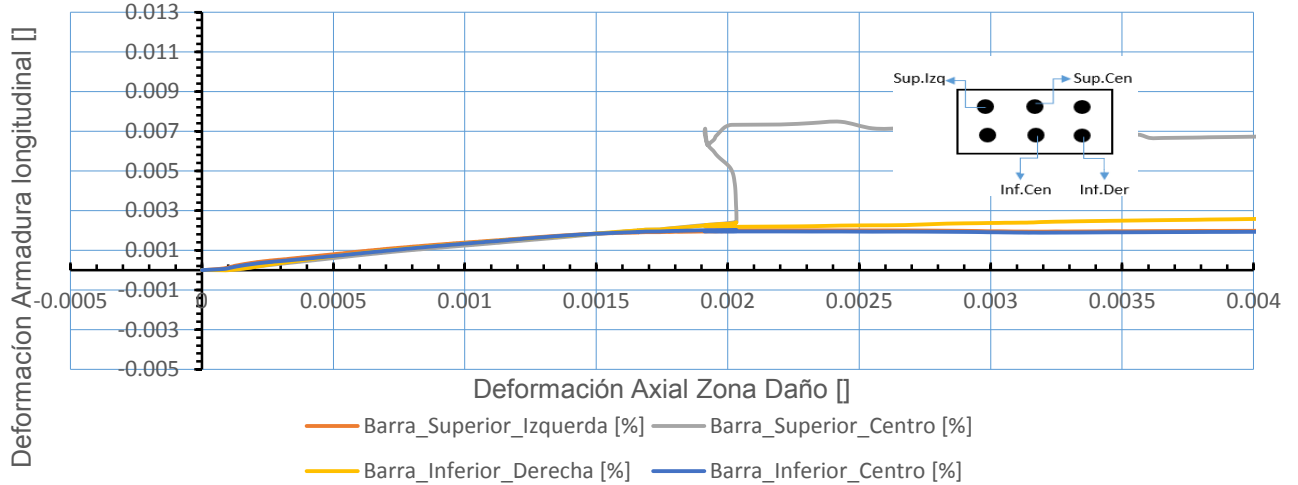


Figura 4.162. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 22

Comportamiento Armadura Longitudinal Compresion P23

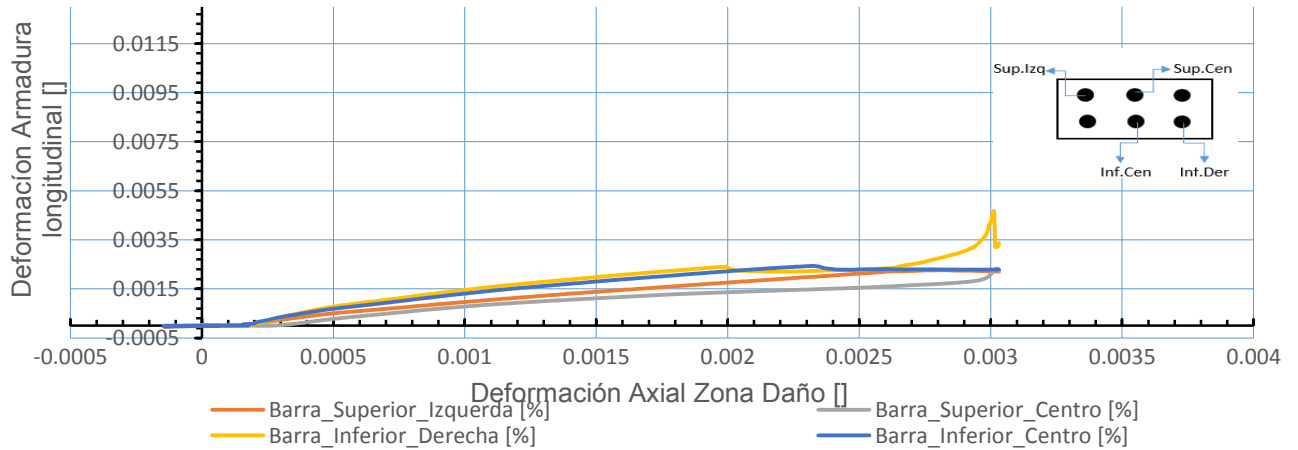


Figura 4.163. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 23

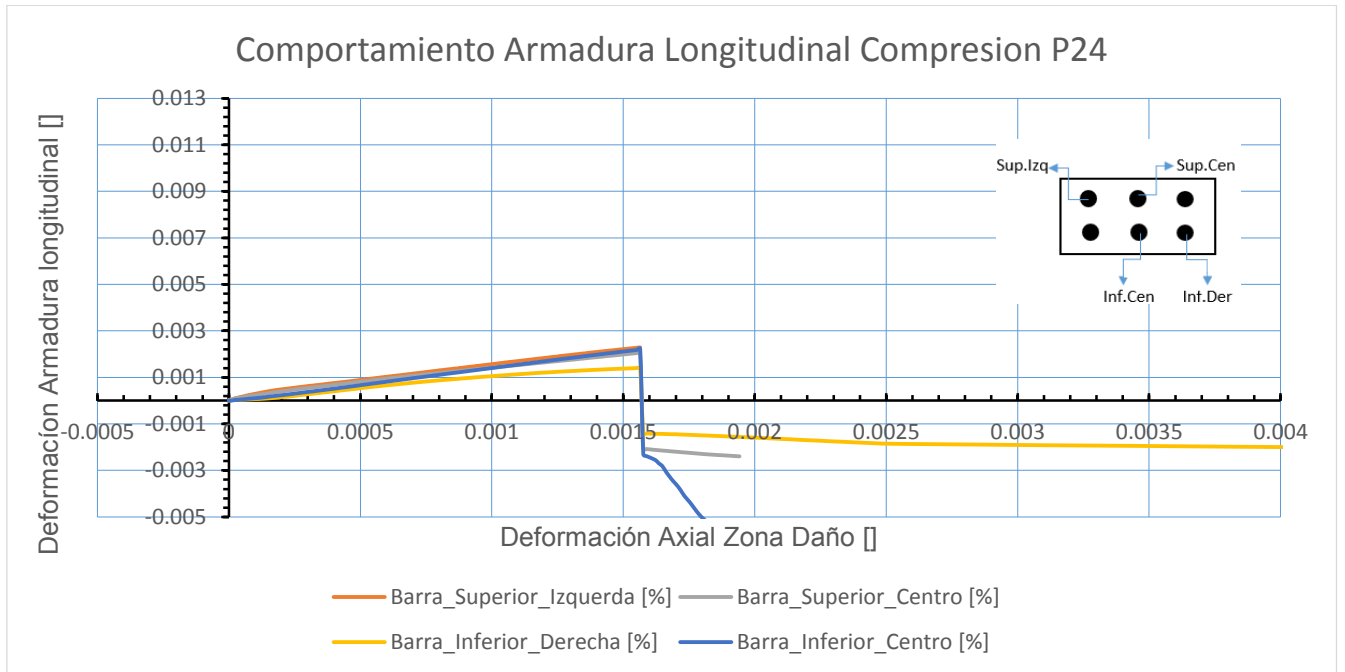


Figura 4.164. Anexo F Comportamiento Barras Longitudinales Pobreta 24

ANEXO G ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MAQUINAS DE ENSAYOS

FICHA TÉCNICA	
Marca	Losenhausenwerk
Año de fabricación / N°	1949 / 13613
Capacidad	500 tonf
Tipo de máquina	Ensayos compresión - flexión hidráulica
Objetivo	Tracción - compresión
Escala de carga	500 tonf - 250 tonf - 100 tonf
Sensibilidad	1000 kgf - 500 kgf - 200 kgf
Luz entre platos	0 m - 6,4 m
Luz entre apoyos de flexión	30 cm - 400 cm
Luz entre columnas	58 cm
Diámetro de apoyos de flexión	50 mm
Ancho de apoyos de flexión	40 cm
Carrera del émbolo	16 cm
Diámetro del émbolo	42,2 cm
Presión máxima de trabajo	374,48 kgf/cm ²
Carrera cabezal inferior	28 cm
Dimensión plato superior	50 x 80 cm
Dimensión plato inferior	50 x 80 cm
Velocidad de desplazamiento cabezal	1,39 a 13,65 mm/min
Control de velocidad	Manual - automático
Motor principal / motor cabeza mobil	2,2 kv / 5 HP
Aceite hidráulico	Mobil DTE EXTRA HEAVY

Figura 4.165. Anexo G Especificaciones Técnicas Prensa Hidráulica.

Especificaciones de producto

vista lateral del conector

Designación de Barra de refuerzo				Conector Numero de parte	Largo (L)		Diámetro Exterior (d)		Diámetro Interno		Peso		Tamaño del Tornillo		Promedio de apriete para todos los Tornillos		Número de Tornillos
Inch- Lb*	Métrico*	Canada	Soft Métrico		in	mm	in (a)	mm (b)	in	mm	lb (a)	kg (b)	in	mm	ft-lb	N-m	
-	10	-	10	LL12B1	5.0	127	1.25	29	0.6	15	1.5	0.6	1/2	13	150	205	6
#4	12	10 M	13	LL12B1	5.0	127	1.25	29	0.6	15	1.5	0.6	1/2	13	150	205	6
-	14	-	-	LL16B1	6.3	159	1.38	35	0.7	19	2.0	0.9	1/2	13	150	205	6
#5	16	15 M	16	LL16B1	6.3	159	1.38	35	0.7	19	2.0	0.9	1/2	13	150	205	6
-	18	-	-	LL20B1	7.5	191	1.75	44	0.9	24	3.8	1.7	1/2	13	150	205	8
#6	20	20 M	19	LL20B1	7.5	191	1.75	44	0.9	24	3.8	1.7	1/2	13	150	205	8
#7	22	-	22	LL22B1	8.7	222	1.88	48	1.1	28	4.9	2.3	5/8	16	250	340	8
#8	25	25 M	25	LL25B1	10.0	254	2.13	54	1.2	30	7.4	3.4	5/8	16	350	475	8
#9	28	30 M	29	LL28B1	11.3	287	2.38	60	1.3	34	10.2	4.6	5/8	16	350	475	10
-	30	-	-	LL28B1	11.3	287	2.38	60	1.3	34	10.2	4.6	5/8	16	350	475	10
#10	32	-	32	LL32B1	12.7	323	2.50	65	1.5	38	12.2	5.9	13/16	21	500	680	8
-	34	-	-	LL36B1	14.1	358	2.75	72	1.7	43	15.8	7.9	13/16	21	550	750	10
#11	36	35 M	36	LL36B1	14.1	358	2.75	72	1.7	43	15.8	7.9	13/16	21	550	750	10
-	38	-	-	LL40B1	15.7	400	3.25	80	1.9	47	26.1	10.9	13/16	21	580	790	12
-	40	-	-	LL40B1	15.7	400	3.25	80	1.9	47	26.1	10.9	13/16	21	580	790	12

Figura 4.166. Anexo G Especificaciones Técnicas Pernos Lentok Lock.

Serie ZE



Capacidad del depósito:

4 - 40 litros

Caudal a presión nominal:

0,55 - 2,73 l/min

Potencia del motor:

0,75 - 5,60 kW

Presión máxima:

700 bar

Figura 4.167. Anexo G Especificaciones Técnicas Bomba Hidráulica, para pre-tracción de barras.

Serie RRH



Fuerza:

30 - 145 ton.

Carrera:

38 - 258 mm

Diámetro orificio del centro:

33,3 - 79,2 mm

Presión máxima:

700 bar

Figura 4.168. Anexo G Especificaciones Técnicas Gatos Hidráulicos, para pre-tracción de barras.

