



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTO DEL TAMAÑO DE ÁNGULO EN EL
COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE COLUMNAS DE
CONCRETO ENCAMISADAS CON ELEMENTOS
METÁLICOS**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Sara Palma Martínez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Con cariño para Esteban y Dulce, mis padres.

Su amor incondicional ha sido mi mayor fortaleza.

AGRADECIMIENTOS

A mis papás, por su amor y apoyo. Cada logro es suyo, porque les debo todo. Son mi más grande ejemplo, gracias por enseñarme la importancia del esfuerzo y el trabajo. Su dedicación y sacrificio son la base de lo que soy.

A mis abuelos Esteban e Irma, por ser el gran sostén de mi vida. Por ustedes hoy todo es posible.

A Moni y a Vale, mis grandes compañeras de vida. Sé que siempre estarán a mi lado.

A mis tías Vos y Gaby, mis pilares y confidentes, quienes llenan mi vida con un cariño inmenso.

A Mikel, por su amor y aliento incondicionales. Agradezco por recorrer juntos este camino y construir cada día algo especial.

A mi tío Ricardo, Ángeles, David y Ricardo, por siempre estar. Gracias por compartir conmigo cada momento importante.

Al Dr. Sergio Alcocer, mi gran mentor. Por su paciencia y comprensión, quien muestra día a día que el conocimiento se nutre de la pasión y la dedicación.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por brindarme la oportunidad de aprender y convertirme en mi segundo hogar, donde cada aula fue un espacio de crecimiento y desarrollo.

A mis sinodales de tesis, M.I. Octavio García, M.I. Miguel Figueroa, Dr. Gerardo Rodríguez y M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda por su invaluable orientación y conocimiento en este camino de aprendizaje.

A cada uno de mis profesores, quienes han sido inspiración y guía a lo largo de mi educación.

A mis amigas y amigos, quienes son la familia que yo elegí. Gracias por las risas más auténticas y las aventuras inolvidables.

A las asociaciones ACI, ASCE, ANEIC e IACES, por enseñarme que el trabajo en equipo es la clave para el éxito.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por ser el lugar de los grandes desafíos y valiosos conocimientos.

A mis compañeros del Instituto de Ingeniería, por su entusiasmo y colaboración.

RESUMEN

En esta tesis se presenta el estudio del efecto del tamaño de ángulos derivado de la participación de la autora en el proyecto experimental de columnas de concreto encamisadas con elementos metálicos realizado entre el Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México (ISC) y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM). Se diseñaron, construyeron y ensayaron cinco columnas. En esta tesis se describen la experimentación y el análisis de datos obtenidos en las pruebas. Se presentan conclusiones y recomendaciones para usar este tipo de encamisado metálico con las variantes estudiadas.

ABSTRACT

The study of the effect of angles size obtained through the experimental study of concrete columns jacketed with steel elements, conducted in collaboration between the Institute for Construction Safety in Mexico City (ISC) and the Engineering Institute of the National Autonomous University of Mexico (II-UNAM) are presented. Five full-scale columns were designed, built, and tested. Experimental data is analyzed. Conclusions and recommendations are provided for utilizing this type of steel jacketing with the studied variations.

Contenido

| | |
|--|----|
| RESUMEN..... | I |
| ABSTRACT..... | I |
| INTRODUCCIÓN | II |
| OBJETIVOS | IV |
| ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO..... | V |
| 1 ANTECEDENTES | 1 |
| 1.1 Columnas de concreto no dúctiles..... | 1 |
| 1.1.1 Definición de ductilidad | 1 |
| 1.1.1.1 Ductilidad del concreto | 3 |
| 1.1.1.2 Columnas de concreto armado | 3 |
| 1.1.2 Investigación nacional | 5 |
| 1.1.2.1 Columnas con encamisados de concreto..... | 5 |
| 1.1.2.2 Proyecto: “Resistencia a fuerza cortante de columnas de concreto reforzadas con camisas de acero” | 7 |
| 1.1.3 Investigación en el extranjero | 10 |
| 1.1.3.1 Tesis por Riyadh Said Aboutaha | 10 |
| 1.1.3.2 India | 15 |
| 1.1.3.3 Egipto | 17 |
| 1.1.3.4 Japón | 20 |
| 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL | 22 |
| 2.1 Introducción | 22 |
| 2.2 Generalidades | 23 |
| 2.3 Descripción de los especímenes | 24 |
| 2.3.1 Materiales..... | 28 |
| 2.3.1.1 Concreto..... | 29 |
| 2.3.1.2 Mortero tipo grout..... | 30 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.3.1.3 | Barras del acero de refuerzo | 31 |
| 2.3.1.4 | Acero del encamisado metálico | 32 |
| 2.4 | Diseño de los especímenes | 34 |
| 2.4.1 | Diseño de la zapata de cimentación..... | 36 |
| 2.4.1.1 | Diseño por flexión..... | 36 |
| 2.4.1.2 | Diseño por fuerza cortante | 45 |
| 2.4.2 | Diseño de resistencia a corte de la columna | 48 |
| 2.4.3 | Longitud de desarrollo | 52 |
| 2.4.4 | Diseño de la cimbra | 53 |
| 2.4.4.1 | Cimbra de la zapata | 55 |
| 2.4.4.2 | Cimbra de la columna | 58 |
| 2.4.5 | Diseño de camisas metálicas | 61 |
| 2.4.6 | Diseño unión concreto-acero..... | 62 |
| 2.5 | Proceso constructivo..... | 62 |
| 2.5.1 | Instrumentación interna..... | 62 |
| 2.5.2 | Columnas y zapatas | 68 |
| 2.5.2.1 | Armado de columnas y zapatas..... | 68 |
| 2.5.2.2 | Elaboración de cimbra | 71 |
| 2.5.2.3 | Colocación del concreto de las zapatas y las columnas | 73 |
| 2.5.2.4 | Curado del concreto | 75 |
| 2.5.3 | Encamisado metálico..... | 76 |
| 2.5.3.1 | Construcción de encamisados metálicos | 76 |
| 2.5.3.2 | Unión concreto-acero..... | 80 |
| 2.5.4 | Instrumentación externa | 82 |
| 2.5.5 | Preparación previa a la prueba experimental..... | 84 |
| 2.6 | Pruebas de laboratorio de los materiales: Caracterización de propiedades del concreto y acero en el programa experimental | 85 |
| 2.6.1 | Ensayes de concreto | 85 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 2.6.1.1 | Ensayes de concreto en estado fresco..... | 85 |
| 2.6.1.2 | Ensayes de concreto en estado endurecido | 90 |
| 2.6.2 | Ensayes de acero | 93 |
| 2.6.2.1 | Ensayes de acero en barras | 93 |
| 2.7 | Dispositivo de carga..... | 98 |
| 2.8 | Historia de carga | 100 |
| 2.9 | Captura de datos..... | 103 |
| 2.9.1 | Instrumentación externa | 104 |
| 2.9.2 | Instrumentación interna..... | 104 |
| 3 | COMPORTAMIENTO GENERAL | 106 |
| 3.1 | Introducción | 106 |
| 3.2 | Definición de parámetros | 106 |
| 3.2.1 | Distorsión..... | 107 |
| 3.2.2 | Curva carga lateral-distorsión | 108 |
| 3.2.3 | Deformación angular | 109 |
| 3.2.4 | Rotación y curvatura | 111 |
| 3.2.5 | Rotación y deslizamiento de la cimentación | 112 |
| 3.3 | Comportamiento general de los modelos ensayados | 112 |
| 3.3.1 | COLUMNA O | 112 |
| 3.3.1.1 | Evolución del daño | 113 |
| 3.3.1.2 | Estado final del daño..... | 121 |
| 3.3.1.3 | Comportamiento histerético | 123 |
| 3.3.1.4 | Rotación y curvatura | 124 |
| 3.3.1.5 | Deformación angular | 128 |
| 3.3.1.6 | Rotación y deslizamiento de la cimentación | 128 |
| 3.3.2 | COLUMNA OR | 130 |
| 3.3.2.1 | Evolución del daño | 134 |
| 3.3.2.2 | Estado final del daño..... | 145 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.3.2.3 | Comportamiento histerético | 148 |
| 3.3.2.4 | Rotación y curvatura | 149 |
| 3.3.2.5 | Deformación angular | 153 |
| 3.3.2.6 | Rotación y deslizamiento de la cimentación | 156 |
| 3.3.3 | Columna O* | 158 |
| 3.3.3.1 | Evolución del daño | 158 |
| 3.3.3.2 | Estado final de daño | 175 |
| 3.3.3.3 | Comportamiento histerético | 177 |
| 3.3.3.4 | Rotación y curvatura | 179 |
| 3.3.3.5 | Deformación angular | 183 |
| 3.3.3.6 | Rotación y deslizamiento de la cimentación | 185 |
| 3.3.4 | Columna C-2..... | 186 |
| 3.3.4.1 | Evolución del daño | 187 |
| 3.3.4.2 | Estado final de daño | 221 |
| 3.3.4.3 | Comportamiento histerético | 224 |
| 3.3.4.4 | Rotación y curvatura | 225 |
| 3.3.4.5 | Deformación angular | 229 |
| 3.3.4.6 | Rotación y deslizamiento de la cimentación | 232 |
| 3.3.5 | Columna C-4..... | 234 |
| 3.3.5.1 | Evolución del daño | 235 |
| 3.3.5.2 | Estado final de daño | 248 |
| 3.3.5.3 | Comportamiento histerético | 250 |
| 3.3.5.4 | Rotación y curvatura | 252 |
| 3.3.5.5 | Deformación angular | 256 |
| 3.3.5.6 | Rotación y deslizamiento de la cimentación | 259 |
| 3.3.6 | Resumen | 261 |
| 4 | COMPORTAMIENTO DETALLADO | 263 |
| 4.1 | Introducción | 263 |
| 4.2 | Consideraciones sobre el análisis de deformímetros | 263 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.3 | Columna O | 266 |
| 4.3.1 | Análisis de deformímetros internos | 267 |
| 4.3.2 | Comportamiento de grietas | 272 |
| 4.4 | COLUMNA OR | 273 |
| 4.4.1 | Análisis de deformímetros internos | 275 |
| 4.4.2 | Comportamiento de grietas | 280 |
| 4.5 | COLUMNA O* | 281 |
| 4.5.1 | Análisis de deformímetros internos | 282 |
| 4.5.2 | Comportamiento de grietas | 288 |
| 4.6 | Columna C-2..... | 290 |
| 4.6.1 | Análisis de deformímetros internos | 292 |
| 4.6.2 | Análisis de deformímetros en encamisado metálico..... | 298 |
| 4.6.3 | Comportamiento de grietas | 307 |
| 4.7 | Columna C-4..... | 308 |
| 4.7.1 | Análisis de deformímetros internos | 311 |
| 4.7.2 | Análisis de deformímetros en encamisado metálico..... | 317 |
| 4.7.3 | Comportamiento de grietas | 326 |
| 5 | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 329 |
| 5.1 | Introducción | 329 |
| 5.2 | Resistencia | 330 |
| 5.2.1 | Envoltentes de respuesta..... | 330 |
| 5.2.2 | Evolución de la resistencia en los especímenes..... | 332 |
| 5.3 | Rigidez..... | 342 |
| 5.3.1 | Degradación de la rigidez | 343 |
| 5.3.1.1 | Rigidez de ciclo | 343 |
| 5.4 | Disipación de energía | 345 |
| 5.5 | Curvas idealizadas carga – distorsión | 354 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 5.6 | Análisis del tipo de falla en los especímenes | 360 |
| 6 | EVALUACIÓN DE ENCAMISADOS METÁLICOS..... | 367 |
| 6.1 | Efecto del tamaño de los ángulos | 367 |
| 6.2 | Efecto de las soleras..... | 372 |
| 6.3 | Comportamiento de especímenes con encamisados metálicos..... | 376 |
| 6.4 | Tabla comparativa/resumen | 380 |
| 6.5 | Análisis costo – beneficio de los encamisados metálicos | 381 |
| 7 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 383 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 386 |

Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Matriz de Columnas, Estudio Experimental..... | III |
| Tabla 2. Descripción de los especímenes | IV |
| Tabla 3. Nombres de columnas para tesis | IV |
| Tabla 4. Características generales especímenes (Alcocer y otros, 2023) | 24 |
| Tabla 5. Tabla Especímenes..... | 26 |
| Tabla 6. Explicación denominación de columnas encamisadas | 26 |
| Tabla 7. Concreto en las zapatas | 29 |
| Tabla 8. Concreto en las columnas | 30 |
| Tabla 9. Composición química de los elementos metálicos de las camisas .. | 32 |
| Tabla 10. Propiedades mecánicas del acero de los ángulos..... | 33 |
| Tabla 11. Propiedades mecánicas del acero de las soleras | 34 |
| Tabla 12. Resumen materiales zapata de cimentación..... | 36 |
| Tabla 13. Resumen materiales de la columna..... | 48 |
| Tabla 14. Acero de refuerzo en la columna | 48 |
| Tabla 15. Dimensiones de elementos de madera (cimbra)..... | 54 |
| Tabla 16. Factores NTC - Madera..... | 54 |
| Tabla 17. Dimensiones apoyos (cimbra)..... | 55 |
| Tabla 18. Dimensiones de la base (cimbra) | 56 |
| Tabla 19. Factores para la base de la zapata (cimbra)..... | 56 |
| Tabla 20. Valores considerados para la cimbra de la columna | 58 |
| Tabla 21. Factores de las abrazaderas de la cimbra en la columna | 59 |
| Tabla 22. Descripción de la instrumentación externa | 82 |
| Tabla 23. Resultados de revenimiento | 87 |
| Tabla 24. Resumen de las pruebas de compresión en el concreto..... | 91 |
| Tabla 25. Resumen pruebas a tensión en acero de refuerzo | 94 |
| Tabla 26. Numeración de los semiciclos a cada distorsión..... | 102 |
| Tabla 27. Rotación - Columna O | 125 |
| Tabla 28. Curvatura - Columna O | 127 |
| Tabla 29. Rotación - Columna OR..... | 150 |
| Tabla 30. Curvatura - Columna OR..... | 152 |
| Tabla 31. Deformación angular - Columna OR | 153 |
| Tabla 32. Rotación - Columna O* | 179 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 33. Curvatura - Columna O* | 182 |
| Tabla 34. Deformación angular – Columna O* | 183 |
| Tabla 35. Rotación - Columna C-2 | 225 |
| Tabla 36. Curvatura - Columna C-2 | 228 |
| Tabla 37. Deformación angular - Columna C-2 | 229 |
| Tabla 38. Rotación - C-4 | 252 |
| Tabla 39. Curvatura - Columna C-4 | 255 |
| Tabla 40. Deformación angular - Columna C-4 | 256 |
| Tabla 41. Resumen de las rotaciones máximas | 261 |
| Tabla 42. Resumen de las curvaturas máximas | 261 |
| Tabla 43. Resumen de las deformaciones angulares máximas..... | 261 |
| Tabla 44. Resumen de las rotaciones en la zapata | 262 |
| Tabla 45. Resumen del deslizamiento en la base de las columnas | 262 |
| Tabla 46. Nomenclatura - Deformímetros Internos (Alcocer y otros, 2023) ... | 264 |
| Tabla 47. Funcionamiento deformímetros internos - Columna O | 268 |
| Tabla 48. Resumen de la primera fluencia - Columna O | 271 |
| Tabla 49. Funcionamiento deformímetros internos - Columna OR..... | 275 |
| Tabla 50. Resumen de la primera fluencia - Columna OR | 279 |
| Tabla 51. Funcionamiento deformímetros internos - Columna O* | 282 |
| Tabla 52. Resumen de la primera fluencia - Columna O* | 287 |
| Tabla 53. Funcionamiento deformímetros internos - C-2 | 292 |
| Tabla 54. Resumen de la primera fluencia deformímetros internos - Columna C-2..... | 297 |
| Tabla 55. Funcionamiento deformímetros externos - Columna C-2..... | 298 |
| Tabla 56. Resumen de la primera fluencia deformímetros externos - Columna C-2..... | 306 |
| Tabla 57. Funcionamiento deformímetros internos - Columna C-4..... | 311 |
| Tabla 58. Resumen de la primera fluencia - Columna C-4 | 316 |
| Tabla 59. Funcionamiento de deformímetros externos - Columna C-4..... | 317 |
| Tabla 60. Resumen de la primera fluencia deformímetros externos - Columna C-4..... | 326 |
| Tabla 61. Resumen de la resistencia de las columnas ensayadas..... | 331 |
| Tabla 62. Evolución de la resistencia – Columna O | 332 |
| Tabla 63. Evolución de la resistencia - Columna OR..... | 334 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 64. Evolución de la resistencia - Columna O* | 335 |
| Tabla 65. Evolución de la resistencia - Columna C-2 | 337 |
| Tabla 66. Evolución de la resistencia - Columna C-4 | 340 |
| Tabla 67. Resumen de la degradación de rigideces | 345 |
| Tabla 68. Tabla resumen de las curvas idealizadas contra las experimentales | 357 |
| Tabla 69. Comparación de la resistencia - Efecto del tamaño de los ángulos | 368 |
| Tabla 70. Comparación de la fluencia en cada espécimen | 370 |
| Tabla 71. Evolución de la caída de la pintura a base de cal en las soleras – Columna C-2..... | 374 |
| Tabla 72. Evolución de la caída de la pintura a base de cal en las soleras – Columna C-4..... | 375 |
| Tabla 73. Valores tomados para la construcción de la ecuación tendencia del programa experimental..... | 378 |
| Tabla 74. Comparación de las resistencias máximas | 379 |
| Tabla 75. Tabla comparativa/resumen general | 380 |
| Tabla 76. Costo de la columna C-2 | 382 |
| Tabla 77. Costo de la columna C-4 | 382 |
| Tabla 78. Resultado costo por tonelada resistida en las columnas encamisadas | 382 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Fig. 1.1.1 Curva característica esfuerzo-deformación (Beer y otros, 2017) | 1 |
| Fig. 1.1.2 Columna encamisada con concreto reforzado (INIFED, 2021) | 5 |
| Fig. 1.1.3 Espécimen Tipo (González y otros, 2007) | 8 |
| Fig. 1.1.4 Modelo y falla típica (González, 2007) | 9 |
| Fig. 1.1.5 Configuración del marco de carga (Aboutaha, 1994) | 13 |
| Fig. 1.1.6 Detalle de los especímenes (Hosny y otros, 2018) | 18 |
| Fig. 1.1.7 Marco de carga, Egipto (Hosny y otros, 2018) | 19 |
| Fig. 1.1.8 Comparación entre los resultados experimentales y los derivados del modelo propuesto (Sakino, 2000) | 21 |
| Fig. 2.3.1. Dimensiones de las columnas de concreto, vista lateral | 27 |
| Fig. 2.3.2 Dimensiones de las columnas de concreto, vista aérea | 28 |
| Fig. 2.3.3 Figura representativa de olla CEMEX, (CEMEX, 2022) | 29 |
| Fig. 2.3.4 Mortero tipo Grout usado, (SikaGrout, 2014) | 30 |
| Fig. 2.3.5 Distribución del acero de refuerzo de los modelos | 31 |
| Fig. 2.4.1 Vista 1 acero de refuerzo del espécimen | 35 |
| Fig. 2.4.2 Vista 2 acero de refuerzo del espécimen | 35 |
| Fig. 2.4.3 Vista frontal del espécimen | 37 |
| Fig. 2.4.4 Vista en planta de la distribución del acero en la zapata | 41 |
| Fig. 2.4.5 Vista en planta de la aplicación de carga y ubicación de las barras postensadas en las pruebas | 45 |
| Fig. 2.4.6 Vista en planta del acero de refuerzo en la columna | 49 |
| Fig. 2.4.7 Isométrico de la cimbra correspondiente a la zapata | 57 |
| Fig. 2.4.8 Vista lateral de la cimbra correspondiente a la zapata | 58 |
| Fig. 2.4.9 Vista frontal de la cimbra de la columna | 60 |
| Fig. 2.4.10 Vista en planta de la cimbra de la columna | 61 |
| Fig. 2.4.11 Isométrico de la cimbra de la columna | 61 |
| Fig. 2.5.1 Barras de acero sobre caballetes metálicos (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 63 |
| Fig. 2.5.2 Desbaste de la corrugación de una barra (Palma, 2022 - 2023) | 64 |
| Fig. 2.5.3 Acabado de la barra después del desbaste (Palma, 2022 - 2023) | 64 |
| Fig. 2.5.4 Acabado tipo espejo (Alcocer, y otros, 2022) | 65 |
| Fig. 2.5.5 Pegado de strain gauge (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 66 |

| | |
|---|----|
| Fig. 2.5.6 Cables de deformímetros (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 66 |
| Fig. 2.5.7 Barras envueltas en gasas (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 67 |
| Fig. 2.5.8 Barra envuelta en gasa y con resina aplicada (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 67 |
| Fig. 2.5.9 Estribos instrumentados (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 68 |
| Fig. 2.5.10 Armado de la zapata (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 69 |
| Fig. 2.5.11 Detalle de los estribos en el armado de la columna (Palma, 2022 - 2023)..... | 70 |
| Fig. 2.5.12 Armado de refuerzo de la columna y zapata (Palma, 2022 - 2023) | 70 |
| Fig. 2.5.13 Aplicación de aceite desmoldante en la cimbra (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 71 |
| Fig. 2.5.14 Cajón de cimbra de la zapata (Palma, 2022 - 2023) | 72 |
| Fig. 2.5.15 Cimbra de la columna (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 72 |
| Fig. 2.5.16 Colado del concreto en las zapatas (Palma, 2022 - 2023) | 74 |
| Fig. 2.5.17 Acabado del concreto en la zapata (Palma, 2022 - 2023) | 74 |
| Fig. 2.5.18 Colado de las columnas (Palma, 2022 - 2023)..... | 75 |
| Fig. 2.5.19 Especímenes curados y fraguados (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 76 |
| Fig. 2.5.20 Disposición del encamisado metálico C-2..... | 77 |
| Fig. 2.5.21 Disposición del encamisado metálico C-4..... | 78 |
| Fig. 2.5.22 Proceso constructivo del encamisado metálico (Palma, 2022 - 2023) | 79 |
| Fig. 2.5.23 Detalle de la soldadura en los encamisados..... | 80 |
| Fig. 2.5.24 Vista en planta de la camisa de acero en C-2 y disposición del grout en cm..... | 81 |
| Fig. 2.5.25 Vista en planta de la camisa de acero en C-4 y disposición del grout en cm..... | 81 |
| Fig. 2.5.26 Proceso constructivo de la colocación del grout (Palma, 2022 - 2023)..... | 82 |
| Fig. 2.5.27 Instrumentación externa cara sur con deformímetro de desplazamiento DHL-3..... | 83 |
| Fig. 2.5.28 Instrumentación externa cara sur con deformímetros de carátula en la zapata | 84 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 2.6.1 Prueba de revenimiento (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 88 |
| Fig. 2.6.2 Elaboración de cilindros de concreto (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 90 |
| Fig. 2.6.3 Cilindro colocado para ser probado a compresión (Palma, 2022 - 2023)..... | 92 |
| Fig. 2.6.4 Cilindro al final de la prueba de compresión (Palma, 2022 - 2023) . | 92 |
| Fig. 2.6.5 Probeta cilíndrica con conos formados en ambos sentidos (Palma, 2022 - 2023) | 93 |
| Fig. 2.6.6 Curva esfuerzo-deformación Probeta 1 - Barra #8 | 95 |
| Fig. 2.6.7 Curva esfuerzo-deformación Probeta 2 - Barra #8 | 95 |
| Fig. 2.6.8 Curva esfuerzo-deformación Probeta 3 - Barra #8 | 96 |
| Fig. 2.6.9 Curva esfuerzo-deformación Probeta 1 - Barra #3 | 96 |
| Fig. 2.6.10 Curva esfuerzo-deformación Probeta 2 - Barra #3 | 97 |
| Fig. 2.6.11 Falla en la probeta a tensión (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 98 |
| Fig. 2.7.1 Marco de carga | 99 |
| Fig. 2.8.1 Control por carga (Palma, 2022 - 2023)..... | 101 |
| Fig. 2.8.2 Control por desplazamiento (Palma, 2022 - 2023) | 101 |
| Fig. 3.2.1 Desplazamiento por flexión (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)... | 107 |
| Fig. 3.2.2 Desplazamiento por corte (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 108 |
| Fig. 3.2.3 Resultado de los desplazamiento por corte y flexión (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 108 |
| Fig. 3.2.4 Instrumentación externa - Deformación angular | 110 |
| Fig. 3.2.5 Ubicación de transductores de carátula en caras laterales (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 111 |
| Fig. 3.3.1 Columna O en el inicio de la prueba (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 113 |
| Fig. 3.3.2 Columna O (R=0.5%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 114 |
| Fig. 3.3.3 Columna O vista lateral (R=-0.5%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 115 |
| Fig. 3.3.4 Columna O (R=-0.5%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 115 |
| Fig. 3.3.5 Columna O (R=0.5% (2)) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 116 |
| Fig. 3.3.6 Columna O cara norte (R=1%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 116 |
| Fig. 3.3.7 Columna O cara sur (R=1%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) .. | 117 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 3.3.8 Columna O vista lateral (R=-1%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 117 |
| Fig. 3.3.9 Columna O pausa en 0 t posterior a R=-1% (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 118 |
| Fig. 3.3.10 Columna O (R=1.5%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 118 |
| Fig. 3.3.11 Columna O (R=2%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 119 |
| Fig. 3.3.12 Columna O cara norte (R=-2%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 120 |
| Fig. 3.3.13 Columna O cara oeste (R=-2%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 120 |
| Fig. 3.3.14 Columna O (R=2% (2)) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 121 |
| Fig. 3.3.15 Estado final del daño Columna O cara norte (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 122 |
| Fig. 3.3.16 Estado final del daño Columna O cara este (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 122 |
| Fig. 3.3.17 Curva histerética general - Columna O | 123 |
| Fig. 3.3.18 Curva histerética detallada - Columna O | 124 |
| Fig. 3.3.19 Rotación de la región 1 - Columna O | 125 |
| Fig. 3.3.20 Rotación de la región 2 - Columna O | 126 |
| Fig. 3.3.21 Rotación de la región 3 - Columna O | 127 |
| Fig. 3.3.22 Rotación en la zapata - Columna O | 129 |
| Fig. 3.3.23 Deslizamiento en la base de la columna - Columna O | 129 |
| Fig. 3.3.24 Columna OR previo a la rehabilitación (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 130 |
| Fig. 3.3.25 Inicio del procedimiento de rehabilitación - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 130 |
| Fig. 3.3.26 Primeros pasos de la rehabilitación - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 131 |
| Fig. 3.3.27 Inyección de grietas - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 131 |
| Fig. 3.3.28 Proceso de la inyección de grietas - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 132 |
| Fig. 3.3.29 Colado del espécimen - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 132 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 3.3.30 Columna después del colado - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 133 |
| Fig. 3.3.31 Resultado de la rehabilitación - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 133 |
| Fig. 3.3.32 Modelo previo a la prueba - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 134 |
| Fig. 3.3.33 Control por carga (10 t) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 135 |
| Fig. 3.3.34 Repetición del control por carga (10 t) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 135 |
| Fig. 3.3.35 Cara lateral (10 t) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 136 |
| Fig. 3.3.36 Extensión de grietas cara norte - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 136 |
| Fig. 3.3.37 Aparición de grietas cara oeste - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 137 |
| Fig. 3.3.38 Carga lateral (20 t) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 137 |
| Fig. 3.3.39 Cara norte ciclo negativo (20 t) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 138 |
| Fig. 3.3.40 Último pico en el control por carga - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 138 |
| Fig. 3.3.41 Columna OR (R=0.5%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 139 |
| Fig. 3.3.42 Grietas en cara norte (R=-0.5%) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 140 |
| Fig. 3.3.43 Cara norte (R=0.5%(2)) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 140 |
| Fig. 3.3.44 Cara este (R=0.5%(2)) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 141 |
| Fig. 3.3.45 Aplastamiento del espécimen (R=-1%) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 141 |
| Fig. 3.3.46 Extensión de agrietamiento (R=1%) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 142 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 3.3.47 Cara norte (R=1.5%) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 142 |
| Fig. 3.3.48 Estado cara sur (R=1.5%) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 143 |
| Fig. 3.3.49 Semiciclo (R=-1.5%) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 143 |
| Fig. 3.3.50 Daño en el espécimen (R=1.5%(2)) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 144 |
| Fig. 3.3.51 Acero de refuerzo expuesto (R=-2%) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 144 |
| Fig. 3.3.52 Cara norte (R=-2% (2)) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 145 |
| Fig. 3.3.53 Estado final cara norte - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 146 |
| Fig. 3.3.54 Estado final cara sur - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 146 |
| Fig. 3.3.55 Estado final cara este - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 147 |
| Fig. 3.3.56 Estado final cara oeste - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 147 |
| Fig. 3.3.57 Curva histerética general - Columna OR | 148 |
| Fig. 3.3.58 Curva histerética detallada - Columna OR | 149 |
| Fig. 3.3.59 Rotación de la columna región 1 - Columna OR | 150 |
| Fig. 3.3.60 Rotación de la columna región 2 - Columna OR | 151 |
| Fig. 3.3.61 Rotación de la columna región 3 - Columna OR | 152 |
| Fig. 3.3.62 Configuración de los transductores cara sur - Columna OR | 153 |
| Fig. 3.3.63 Deformación angular región 1 - Columna OR..... | 154 |
| Fig. 3.3.64 Deformación angular región 2 - Columna OR..... | 155 |
| Fig. 3.3.65 Deformación angular región 3 - Columna OR..... | 156 |
| Fig. 3.3.66 Rotación en la zapata - Columna OR | 157 |
| Fig. 3.3.67 Deslizamiento en la base de la columna - Columna OR..... | 157 |
| Fig. 3.3.68 Inicio de la prueba - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 158 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 3.3.69 Aparición de la primera grieta - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 159 |
| Fig. 3.3.70 Último pico del control por carga - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 160 |
| Fig. 3.3.71 Cara norte (R=-0.5%) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 160 |
| Fig. 3.3.72 Grietas inclinadas (R=0.5%) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 161 |
| Fig. 3.3.73 Cara norte (R=-1%) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 162 |
| Fig. 3.3.74 Daño en cara este - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 162 |
| Fig. 3.3.75 Desconchamiento de concreto en la base - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 163 |
| Fig. 3.3.76 Aparición y extensión de grietas (R=-1%) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 163 |
| Fig. 3.3.77 Cara norte (R=1%(2)) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 164 |
| Fig. 3.3.78 Cara lateral (R=1%(2)) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 164 |
| Fig. 3.3.79 Columna lateral inclinada (R=-1.5%) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 165 |
| Fig. 3.3.80 Aplastamiento de la columna - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 165 |
| Fig. 3.3.81 Daño en la base de la columna - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 166 |
| Fig. 3.3.82 Cara norte (R=1.5%) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 166 |
| Fig. 3.3.83 Aplastamiento de la columna - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 167 |
| Fig. 3.3.84 Cara norte (R=-1.5%(2)) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 167 |
| Fig. 3.3.85 Cara este (R=-1.5%(2)) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 168 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 3.3.86 Deslizamiento de la columna (R=-2%) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 168 |
| Fig. 3.3.87 Cara norte (R=2%) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 169 |
| Fig. 3.3.88 Daño en la base de la columna (R=2%) - Columna O* | 169 |
| Fig. 3.3.89 Cara lateral (R=2%) - Columna O* | 170 |
| Fig. 3.3.90 Acero de refuerzo expuesto cara este - Columna O* | 170 |
| Fig. 3.3.91 Cara norte (R=-2%(2)) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 171 |
| Fig. 3.3.92 Cara este (R=-2%(2)) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 171 |
| Fig. 3.3.93 Cara sur (R=-2% (2)) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 172 |
| Fig. 3.3.94 Cara oeste (R=-2% (2)) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 172 |
| Fig. 3.3.95 Cara norte (R=-2.5%) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 173 |
| Fig. 3.3.96 Cara este (R=-2.5%) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 173 |
| Fig. 3.3.97 Cara sur (R=-2.5%) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 174 |
| Fig. 3.3.98 Cara oeste (R=-2.5%) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 174 |
| Fig. 3.3.99 Estado final cara norte - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 175 |
| Fig. 3.3.100 Estado final cara sur - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 176 |
| Fig. 3.3.101 Estado final cara este - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 176 |
| Fig. 3.3.102 Estado final cara oeste - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 177 |
| Fig. 3.3.103 Curva histerética general - Columna O* | 178 |
| Fig. 3.3.104 Curva histerética detallada - Columna O* | 179 |
| Fig. 3.3.105 Rotación de la región 1 - Columna O* | 180 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 3.3.106 Rotación de la región 2 - Columna O* | 181 |
| Fig. 3.3.107 Rotación de la región 3 - Columna O* | 182 |
| Fig. 3.3.108 Deformación angular región 1 - Columna O* | 184 |
| Fig. 3.3.109 Deformación angular región 2 - Columna O* | 184 |
| Fig. 3.3.110 Deformación angular región 3 - Columna O* | 185 |
| Fig. 3.3.111 Modelo previo a la prueba - C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 186 |
| Fig. 3.3.112 Primera aparición de grietas (R=-0.5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 187 |
| Fig. 3.3.113 Agrietamiento en la base de la columna - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 188 |
| Fig. 3.3.114 Cara norte (R=0.5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 188 |
| Fig. 3.3.115 Primeras grietas en la cara este - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 189 |
| Fig. 3.3.116 Primeras grietas en la cara oeste - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 189 |
| Fig. 3.3.117 Extensión y aparición de grietas (R=1.5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 190 |
| Fig. 3.3.118 Cara norte (R=1.5%(2)) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 190 |
| Fig. 3.3.119 Cara norte (R=-2%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 191 |
| Fig. 3.3.120 Cara norte (R=-2%(2)) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 191 |
| Fig. 3.3.121 Cara norte (R=-2.5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 192 |
| Fig. 3.3.122 Cara norte (R=-2.5%(2)) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 193 |
| Fig. 3.3.123 Desprendimiento de pintura a base de cal - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 193 |
| Fig. 3.3.124 Cara norte (R=-3%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 194 |
| Fig. 3.3.125 Cara norte (R=3%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 195 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 3.3.126 Desprendimiento de pintura a base de cal en la solera - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 195 |
| Fig. 3.3.127 Agrietamiento del grout en la solera intermedia - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 196 |
| Fig. 3.3.128 Grout cara sur - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 196 |
| Fig. 3.3.129 Deslizamiento de grout - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 197 |
| Fig. 3.3.130 Carga cero después de la distorsión del 3% - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 198 |
| Fig. 3.3.131 Daño en cara norte - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 198 |
| Fig. 3.3.132 Grout cara norte - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 199 |
| Fig. 3.3.133 Desprendimiento de grout cara norte - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 199 |
| Fig. 3.3.134 Desprendimiento de pintura a base de cal - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 200 |
| Fig. 3.3.135 Desprendimiento total del grout cara sur - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 200 |
| Fig. 3.3.136 Cara sur después de la distorsión de 3% - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 201 |
| Fig. 3.3.137 Daño después de la distorsión de- 3.5% - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 202 |
| Fig. 3.3.138 Cara norte (R=3.5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 202 |
| Fig. 3.3.139 Grout en cara norte - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 203 |
| Fig. 3.3.140 Desprendimiento de grout en cara norte - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 203 |
| Fig. 3.3.141 Grout desprendido - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 204 |
| Fig. 3.3.142 Cara sur (R=3.5%) - Columna C-2 | 204 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 3.3.143 Cara norte (R=-4%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 205 |
| Fig. 3.3.144 Cara este (R=-4%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 206 |
| Fig. 3.3.145 Cara sur (R=-4%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 206 |
| Fig. 3.3.146 Cara oeste (R=-4%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 207 |
| Fig. 3.3.147 Cara norte (R=4%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 208 |
| Fig. 3.3.148 Cara sur (R=4%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 208 |
| Fig. 3.3.149 Cara norte en carga cero después de la repetición de -4% - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 209 |
| Fig. 3.3.150 Cara norte (R=4%(2)) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 210 |
| Fig. 3.3.151 Cara este (R=4%(2)) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 210 |
| Fig. 3.3.152 Cara sur (R=4%(2)) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 211 |
| Fig. 3.3.153 Solera intermedia cara sur (R=4%(2)) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 211 |
| Fig. 3.3.154 Solera intermedia cara sur (R=4%(2)) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 212 |
| Fig. 3.3.155 Confinamiento de los ángulos noreste - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 212 |
| Fig. 3.3.156 Confinamiento de los ángulos noroeste - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 213 |
| Fig. 3.3.157 Carga en cero posterior a los semiciclos de 4% - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 213 |
| Fig. 3.3.158 Cara norte (R=-5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 214 |
| Fig. 3.3.159 Confinamiento de la camisa de acero (R=-5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 215 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 3.3.160 Flexión fuera de plano de solera en cara este - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 215 |
| Fig. 3.3.161 Cara norte (R=5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 216 |
| Fig. 3.3.162 Cara este (R=5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 217 |
| Fig. 3.3.163 Cara sur (R=5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 217 |
| Fig. 3.3.164 Cara oeste (R=5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 218 |
| Fig. 3.3.165 Cara norte (R=5%(2)) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 219 |
| Fig. 3.3.166 Detalle en solera y acero expuesto - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 219 |
| Fig. 3.3.167 Detalle en solera intermedia sección noroeste - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 220 |
| Fig. 3.3.168 Columna en cero t después de R=5%(2) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 220 |
| Fig. 3.3.169 Estado final del daño cara norte - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 221 |
| Fig. 3.3.170 Estado final del daño cara este - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 221 |
| Fig. 3.3.171 Estado final del daño noroeste - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 222 |
| Fig. 3.3.172 Estado final del daño, deformación de solera - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 222 |
| Fig. 3.3.173 Estado final del daño suroeste - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 223 |
| Fig. 3.3.174 Estado final del daño cara sur - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 223 |
| Fig. 3.3.175 Curva histerética general - Columna C-2 | 224 |
| Fig. 3.3.176 Curva histerética detallada - Columna C-2..... | 225 |
| Fig. 3.3.177 Rotación de la región 1 - Columna C-2..... | 226 |
| Fig. 3.3.178 Rotación de la región 2 - Columna C-2..... | 227 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 3.3.179 Rotación de la región 3 - Columna C-2..... | 228 |
| Fig. 3.3.180 Deformación angular región 1 - Columna C-2..... | 230 |
| Fig. 3.3.181 Deformación angular región 2 - Columna C-2..... | 231 |
| Fig. 3.3.182 Deformación angular región 3 - Columna C-2..... | 232 |
| Fig. 3.3.183 Rotación en la zapata - Columna C-2..... | 233 |
| Fig. 3.3.184 Deslizamiento en la base de la columna – Columna C-2..... | 233 |
| Fig. 3.3.185 Modelo al inicio de la prueba – Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 234 |
| Fig. 3.3.186 Aparición de las primeras grietas - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 235 |
| Fig. 3.3.187 Cara norte (R=0.5%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 236 |
| Fig. 3.3.188 Cara sur (R=0.5%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 236 |
| Fig. 3.3.189 Cara este (R=0.5%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 237 |
| Fig. 3.3.190 Cara oeste (R=0.5%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 237 |
| Fig. 3.3.191 Aparición y extensión de grietas (R=1.5%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 238 |
| Fig. 3.3.192 . Desprendimiento de la pintura a base de cal (R=-2.5%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 238 |
| Fig. 3.3.193 Evolución del daño (R=3%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 239 |
| Fig. 3.3.194 Aplastamiento de la columna (R=3%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 239 |
| Fig. 3.3.195 Columna norte (R=4%(2)) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 240 |
| Fig. 3.3.196 Desprendimiento de concreto y deformación del ángulo - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 240 |
| Fig. 3.3.197 Cara norte (R=4.5%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 241 |
| Fig. 3.3.198 Deformación de la solera intermedia cara norte - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 241 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 3.3.199 Cara norte (R=-4.5%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 242 |
| Fig. 3.3.200 Cara norte pausa posterior a R=-4.5% - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 242 |
| Fig. 3.3.201 Deformación en solera intermedia cara norte - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 243 |
| Fig. 3.3.202 Cara norte (R=-5%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 244 |
| Fig. 3.3.203 Estado del grout (R=-5%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 244 |
| Fig. 3.3.204 Cara norte (R=5.5%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 245 |
| Fig. 3.3.205 Cara sur (R=5.5%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 246 |
| Fig. 3.3.206 Detalle en la fractura de la solera - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 246 |
| Fig. 3.3.207 Solera inferior fracturada - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 247 |
| Fig. 3.3.208 Solera fracturada - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)..... | 247 |
| Fig. 3.3.209 Estado final del daño cara norte - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 248 |
| Fig. 3.3.210 Estado final del daño cara sur - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 249 |
| Fig. 3.3.211 Estado final del daño cara este - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 249 |
| Fig. 3.3.212 Estado final del daño cara oeste - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023) | 250 |
| Fig. 3.3.213 Curva histerética general - Columna C-4 | 251 |
| Fig. 3.3.214 Curva histerética detallada - Columna C-4 | 252 |
| Fig. 3.3.215 Rotación de la región 1 - Columna C-4..... | 253 |
| Fig. 3.3.216 Rotación de la región 2 - C-4..... | 254 |
| Fig. 3.3.217 Rotación de la región 3 - Columna C-4..... | 255 |
| Fig. 3.3.218 Deformación angular región 1 - Columna C-4..... | 257 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 3.3.219 Deformación angular región 2 - Columna C-4..... | 258 |
| Fig. 3.3.220 Deformación angular región 3 - C-4 | 259 |
| Fig. 3.3.221 Rotación de la zapata - Columna C-4 | 260 |
| Fig. 3.3.222 Deslizamiento en la base de la columna - Columna C-4..... | 260 |
| Fig. 4.3.1 Vista frontal - Columna O | 266 |
| Fig. 4.3.2 Deformímetros internos - Columna O..... | 267 |
| Fig. 4.3.3 Deformaciones SLN80 - SLN10 – Columna O | 269 |
| Fig. 4.3.4 Deformaciones SLN81 - SLN11 – Columna O | 269 |
| Fig. 4.3.5 Deformaciones SLS60 - SLN30 – Columna O..... | 270 |
| Fig. 4.3.6 Deformaciones SLN82 - SLN12 – Columna O..... | 270 |
| Fig. 4.3.7 Deformaciones SLN83 - SLN13 – Columna O..... | 271 |
| Fig. 4.3.8 Evolución del agrietamiento cara norte - Columna O | 272 |
| Fig. 4.4.1 Vista frontal - Columna OR..... | 274 |
| Fig. 4.4.2 Deformímetros internos - Columna OR | 274 |
| Fig. 4.4.3 Deformaciones SLN80 - SLN10 – Columna OR..... | 276 |
| Fig. 4.4.4 Deformaciones SLN81 - SLN11 – Columna OR..... | 276 |
| Fig. 4.4.5 Deformaciones SLN60 - SLN30 – Columna OR..... | 277 |
| Fig. 4.4.6 Deformaciones SLS81 - SLS11 – Columna OR | 277 |
| Fig. 4.4.7 Deformaciones SLN83 - SLN13 – Columna OR..... | 278 |
| Fig. 4.4.8 Deformaciones STN1 - STS1 – Columna OR..... | 278 |
| Fig. 4.4.9 Deformaciones SLN71 – Columna OR..... | 279 |
| Fig. 4.4.10 Evolución del agrietamiento cara norte - Columna OR..... | 280 |
| Fig. 4.5.1 Vista frontal - Columna O* | 281 |
| Fig. 4.5.2 Deformímetros internos - Columna O* | 282 |
| Fig. 4.5.3 Deformaciones SLN80 - SLN10 – Columna O* | 283 |
| Fig. 4.5.4 Deformaciones SLN81 - SLN11 – Columna O* | 284 |
| Fig. 4.5.5 Deformaciones SLN60 - SLN30 – Columna O* | 284 |
| Fig. 4.5.6 Deformaciones SLS81 - SLS11 – Columna O* | 285 |
| Fig. 4.5.7 Deformaciones SLN82 - SLN12 – Columna O* | 285 |
| Fig. 4.5.8 Deformaciones SLN83 - SLN13 – Columna O* | 286 |
| Fig. 4.5.9 Deformaciones STN1 - STS1 – Columna O* | 286 |
| Fig. 4.5.10 Deformaciones STN2 - STS2 – Columna O* | 287 |
| Fig. 4.5.11 Evolución del agrietamiento cara norte – Columna O y O* | 289 |
| Fig. 4.5.12 Evolución del agrietamiento caras laterales - Columna O* | 289 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 4.6.1 Vista frontal - Columna C-2 | 290 |
| Fig. 4.6.2 Deformímetros internos - Columna C-2..... | 291 |
| Fig. 4.6.3 Deformímetros en el encamisado metálico cara norte - Columna C-2..... | 291 |
| Fig. 4.6.4 Deformímetros en el encamisado metálico cara oeste - Columna C-2..... | 292 |
| Fig. 4.6.5 Deformaciones SLN80 - SLN10 – Columna C-2..... | 293 |
| Fig. 4.6.6 Deformaciones SLN81 - SLN11 – Columna C-2..... | 294 |
| Fig. 4.6.7 Deformaciones SLS81 - SLS11 – Columna C-2..... | 294 |
| Fig. 4.6.8 Deformaciones SLN82 - SLN12 – Columna C-2..... | 295 |
| Fig. 4.6.9 Deformaciones SLN83 - SLN13 – Columna C-2..... | 295 |
| Fig. 4.6.10 Deformaciones STN1 - STS1 – Columna C-2..... | 296 |
| Fig. 4.6.11 Deformaciones STN2 - STS2 – Columna C-2..... | 296 |
| Fig. 4.6.12 Deformaciones AS1-AS2-AS3 – Columna C-2..... | 299 |
| Fig. 4.6.13 Deformaciones AA1-AA3-AA6 – Columna C-2..... | 300 |
| Fig. 4.6.14 Deformaciones AA2-AA4-AA5 – Columna C-2..... | 301 |
| Fig. 4.6.15 Deformaciones AL1-AL2 – Columna C-2 | 302 |
| Fig. 4.6.16 Deformaciones AL3-AL4 – Columna C-2 | 303 |
| Fig. 4.6.17 Deformaciones AL5-AL6 – Columna C-2 | 304 |
| Fig. 4.6.18 Deformaciones AL7-AL8 – Columna C-2 | 305 |
| Fig. 4.6.19 Evolución del agrietamiento cara norte – Columna C-2 y Columna O* | 307 |
| Fig. 4.6.20 Evolución del agrietamiento caras laterales - C-2 | 308 |
| Fig. 4.7.1 Vista frontal - Columna C-4 | 309 |
| Fig. 4.7.2 Deformímetros internos - Columna C-4..... | 310 |
| Fig. 4.7.3 Deformímetros en el encamisado metálico cara norte - Columna C-4..... | 310 |
| Fig. 4.7.4 Deformímetros en el encamisado metálico cara oeste - Columna C-4..... | 311 |
| Fig. 4.7.5 Deformaciones SLN80 - SLN10 – Columna C-4..... | 312 |
| Fig. 4.7.6 Deformaciones SLN81 - SLN11 – Columna C-4..... | 313 |
| Fig. 4.7.7 Deformaciones SLN60 - SLN30 – Columna C-4..... | 313 |
| Fig. 4.7.8 Deformaciones SLS81 - SLS11 – Columna C-4..... | 314 |
| Fig. 4.7.9 Deformaciones SLN82 - SLN12 – Columna C-4..... | 314 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 4.7.10 Deformaciones SLN83 - SLN13 – Columna C-4..... | 315 |
| Fig. 4.7.11 Deformaciones STN1 - STS1 – Columna C-4 | 315 |
| Fig. 4.7.12 Deformaciones STN2 - STS2 – Columna C-4 | 316 |
| Fig. 4.7.13 Deformaciones AS1-AS2-AS3 – Columna C-4..... | 319 |
| Fig. 4.7.14 Deformaciones AA1-AA3-AA6 – Columna C-4..... | 320 |
| Fig. 4.7.15 Deformaciones AA2-AA4-AA5 – Columna C-4..... | 321 |
| Fig. 4.7.16 Deformaciones AL1-AL2 – Columna C-4 | 322 |
| Fig. 4.7.17 Deformaciones AL3-AL4 – Columna C-4 | 323 |
| Fig. 4.7.18 Deformaciones AL5-AL6 - Columna C-4..... | 324 |
| Fig. 4.7.19 Deformaciones AL7-AL8 – Columna C-4 | 325 |
| Fig. 4.7.20 Evolución agrietamiento cara norte - Columna C-4 y Columna O* | 327 |
| Fig. 4.7.21 Evolución agrietamiento caras laterales - Columna C-4..... | 328 |
| Fig. 5.2.1 Envoltorio de los especímenes | 331 |
| Fig. 5.3.1 Rigidez de ciclo del programa experimental | 344 |
| Fig. 5.4.1 Ejemplo del trazo de ciclo – Disipación de energía..... | 346 |
| Fig. 5.4.2 Ecuación y líneas de tendencia - Disipación de energía | 347 |
| Fig. 5.4.3 Distorsiones máximas - Disipación de energía | 347 |
| Fig. 5.4.4 Primera parte del área bajo la curva 1 – Disipación de energía ... | 348 |
| Fig. 5.4.5 Segunda parte del área bajo la curva 2 – Disipación de energía. | 349 |
| Fig. 5.4.6 Primera parte del área bajo la curva 2 – Disipación de energía ... | 349 |
| Fig. 5.4.7 Segunda parte del área bajo la curva 2 – Disipación de energía. | 350 |
| Fig. 5.4.8 Diferencia de las áreas bajo la curva sección 1 - Disipación de energía | 351 |
| Fig. 5.4.9 Área de la primera sección - Disipación de la energía..... | 351 |
| Fig. 5.4.10 Diferencia de las áreas bajo la curva sección 2 - Disipación de energía | 352 |
| Fig. 5.4.11 Área de la segunda sección - Disipación de la energía..... | 352 |
| Fig. 5.4.12 Área total del ciclo - Disipación de energía | 353 |
| Fig. 5.4.13 Disipación de energía en los especímenes..... | 354 |
| Fig. 5.5.1 Obtención de valores curva idealizada (American Concrete Institute, 2022)..... | 356 |
| Fig. 5.5.2 Curva idealizada tipo (American Concrete Institute, 2022)..... | 356 |
| Fig. 5.5.3 Curva idealizada - Columna O..... | 357 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 5.5.4 Curva idealizada - Columna OR | 358 |
| Fig. 5.5.5 Curva idealizada - Columna O* | 358 |
| Fig. 5.5.6 Curva idealizada - Columna C-2..... | 359 |
| Fig. 5.5.7 Curva idealizada – Columna C-4..... | 359 |
| Fig. 5.6.1 Fluencia en deformímetros internos - Columna O..... | 361 |
| Fig. 5.6.2 Fluencia en deformímetros internos - Columna OR | 362 |
| Fig. 5.6.3 Fluencia en deformímetros internos - Columna O* | 363 |
| Fig. 5.6.4 Fluencia en deformímetros internos - Columna C-2..... | 364 |
| Fig. 5.6.5 Fluencia en deformímetros internos – Columna C-4 | 365 |
| Fig. 6.1.1 Orden de fluencia de los deformímetros en encamisado metálico - Columna C-2..... | 369 |
| Fig. 6.1.2 Orden de fluencia de los deformímetros en encamisado metálico - Columna C-4..... | 370 |
| Fig. 6.1.3 Comparación del estado final del daño | 372 |
| Fig. 6.2.1 Deformímetros que presentaron fluencia en las soleras - Columna C- 2..... | 373 |
| Fig. 6.2.2 Deformímetros que presentaron fluencia en las soleras - Columna C- 4..... | 373 |
| Fig. 6.3.1 Ecuación de la resistencia a fuerza cortante - NTC 2023..... | 378 |
| Fig. 6.3.2 Tendencia y ecuación de comportamiento de los especímenes..... | 379 |

INTRODUCCIÓN

La rehabilitación estructural ha sido un tema de creciente importancia en la ingeniería mexicana, ya que México se encuentra en una zona sísmicamente activa que a lo largo de su historia ha experimentado eventos sísmicos con impactos significativos en la integridad de estructuras, destacando los sismos de septiembre de 1985 y 2017. Gracias a las experiencias tenidas en los últimos años, se ha demostrado la necesidad de aplicar estrategias de rehabilitación y refuerzo estructural efectivas para fortalecer y preservar la infraestructura ante futuros eventos sísmicos.

La introducción de tecnologías y técnicas de rehabilitación y refuerzo estructural han sido fundamentales para mitigar los efectos devastadores de los sismos en las edificaciones y la infraestructura en general. Dichas técnicas involucran una serie de enfoques y métodos que van desde la evaluación de la vulnerabilidad de las estructuras dañadas hasta poner en práctica de soluciones de refuerzo y mejoramiento. Estas soluciones incluyen el encamisado metálico en columnas de concreto, objeto de estudio de la presente tesis.

La experiencia acumulada a lo largo de los sismos en México ha llevado a un enfoque cada vez más proactivo en la preparación para futuros eventos sísmicos. Las investigaciones y avances en rehabilitación estructural han llevado al desarrollo de normativas de construcción más rigurosas y a la incorporación de prácticas de diseño sísmico que priorizan la resiliencia y la seguridad.

La combinación de la experiencia sísmica, la investigación innovadora y la puesta en marcha de tecnologías avanzadas ha transformado la manera en que se aborda la rehabilitación de estructuras en México y en otras regiones propensas a sismos. Es por lo antes mencionado que actualmente se lleva a cabo el “Estudio Experimental de Columnas de Concreto Encamisadas con Elementos Metálicos” (Alcocer y otros, 2023), en el que por medio de una colaboración entre el Instituto de Ingeniería UNAM (II UNAM) y el Instituto para

la Seguridad en las Construcciones en la Ciudad de México (ISC) se espera diseñar, construir y ensayar 15 columnas de concreto, en tres etapas.

Las columnas ensayadas al momento de la escritura de la presente tesis son ocho de las cuales dos no fueron encamisadas y se tomaron como referencia para comparar las cuatro restantes, que fueron encamisadas con diferentes configuraciones y variaciones de los elementos metálicos. A continuación se muestra en la Tabla 1, las características de cada columna.

Tabla 1. Matriz de Columnas, Estudio Experimental

| No. | Nombre | Placa Base | Ancho de solera [in] | Espesor de solera [in] | Separación de solera [cm] | Ala del ángulo [in] | Grout |
|----------|----------------------|------------|----------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|------------|
| 1 | O | NO | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| | OR | NO | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 2 | S-2-1/4-h | SÍ | 2 | 1/4 | h | 6 | SÍ |
| 3 | S-2-1/4-h/2 | SÍ | 2 | 1/4 | h/2 | 6 | SÍ |
| 4 | S-2-1/4-h/4 | NO | 2 | 1/4 | h/4 | 6 | SÍ |
| 5 | O* | NO | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 6 | S-2-1/4-h/2-2 | NO | 2 | 1/4 | h/2 | 2 | SÍ |
| 7 | S-2-1/4-h/2-4 | NO | 2 | 1/4 | h/1 | 4 | SÍ |

Para fines del estudio de esta tesis, se acota en la Tabla 1 las columnas en las que se basará este trabajo mediante el estudio particular del efecto del ángulo en el encamisado con elementos metálicos. Las columnas son:

- O
- OR
- O*
- S-2-1/4-h/2-2
- S-2-1/4-h/2-4

Las características de los especímenes de esta tesis corresponden a la Tabla 2:

Tabla 2. Descripción de los especímenes

| Nombre | Notación |
|----------------------|---|
| O | O |
| OR | O Rehabilitada |
| O* | O Asterisco – similar a O |
| S-2-1/4-h/2-2 | Sin daño, ancho de la solera de 2 pulgadas, espesor de la solera de ¼ pulgada, soleras colocadas a h/2 y ala del ángulo de 2 pulgadas |
| S-2-1/4-h/2-4 | Sin daño, ancho de la solera de 2 pulgadas, espesor de la solera de ¼ pulgada, soleras colocadas a h/2 y ala del ángulo de 4 pulgadas |

En busca de identificar con mayor facilidad las columnas a estudiar, se renombrarán con los siguientes nombres (Tabla 3):

Tabla 3. Nombres de columnas para tesis

| Nombre Original | Nombre Tesis |
|-----------------|--------------|
| O | O |
| OR | OR |
| O* | O* |
| S-2-1/4-h/2-2 | C-2 |
| S-2-1/4-h/2-4 | C-4 |

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo consiste en presentar los resultados obtenidos tras el ensaye de dos especímenes encamisados con elementos metálicos variando la medida del ala del ángulo y compararlos con tres columnas de concreto denominadas de control debido a su falta de encamisado. Se busca contribuir al estudio de las técnicas de rehabilitación específicamente de encamisado de columnas de concreto.

Particularmente, se tiene como objeto:

- Presentar de manera detallada y sistemática las diferentes etapas que componen el estudio experimental.

- Llevar a cabo un análisis de los datos obtenidos a partir de los ensayos realizado.
- Comparar el comportamiento de las columnas con distintas configuraciones.
- Identificar patrones, tendencias y relaciones significativas en el análisis de datos y el comportamiento.
- Concluir sobre el efecto de la variación del ancho del ángulo en los encamisados con elementos metálicos.

ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

La presente tesis consta de siete capítulos, en los cuales se desarrolla el comportamiento de columnas de concreto con y sin encamisado con elementos metálicos. Cada uno de los capítulos discute y aborda particularidades del desarrollo de los experimentos y de los resultados.

El primer capítulo presenta los antecedentes, donde se hace una revisión de la literatura sobre columnas de concreto encamisadas con elementos metálicos, se incluye lo más relevante de los experimentos realizados de ser el caso.

Para el segundo capítulo se muestra el programa experimental bajo el cual se desarrolló este trabajo, así como la descripción de cada una de sus etapas. Se incluye la descripción detallada del diseño, construcción y ensaye.

En el tercer capítulo se describen los parámetros usados para la elaboración de gráficas con los datos recabados, de igual manera, mediante imágenes y la bitácora llevada en cada prueba es que se aprecia la evolución del daño, así como el estado final.

Después de hacer una descripción general del comportamiento de las columnas, en el cuarto capítulo se analizan los deformímetros, así como la evolución de las grietas a lo largo de las pruebas.

Luego de tener información suficiente sobre las pruebas y los datos, en el quinto capítulo se procedió a presentar los resultados, donde se mostraron las envolventes, la comparación de la predicción de la resistencia con los valores reales, el análisis de la rigidez y la capacidad de deformación.

Lo correspondiente al sexto capítulo fue el análisis del desempeño de los encamisados metálicos, donde se estudió el efecto de su tamaño y configuración.

Por último, en el séptimo capítulo se presentan las conclusiones y se hacen comentarios finales de todo el contenido de la presente tesis, mediante la discusión de áreas de oportunidad del estudio y los aportes que puede dar al estudio de encamisado con elementos metálicos.

1 ANTECEDENTES

El estudio del comportamiento de elementos estructurales de concreto ha demostrado que México y el mundo demandan nuevas técnicas de rehabilitación y refuerzo. Entre los factores que delimitan la intervención en este tipo de elementos se encuentran principalmente los daños por sismos, la necesidad de aumentar la capacidad de carga, daños por impactos o accidentales, diseños estructurales inadecuados o defectos constructivos. Es por ello la importancia de retomar las investigaciones destacadas que puedan relacionarse con el presente trabajo.

En este capítulo se hace una recapitulación de los distintos estudios realizados en materia de la técnica de rehabilitación de columnas de concreto con encamisado de acero.

1.1 Columnas de concreto no dúctiles

1.1.1 Definición de ductilidad

La ductilidad (Beer y otros, 2017) es una propiedad de los materiales que hace referencia a la capacidad de deformación sin fracturarse al ser sometido a un esfuerzo. Esta propiedad puede ser entendida a través de una curva de esfuerzo – deformación (Obsérvese la Fig. 1.1.1).

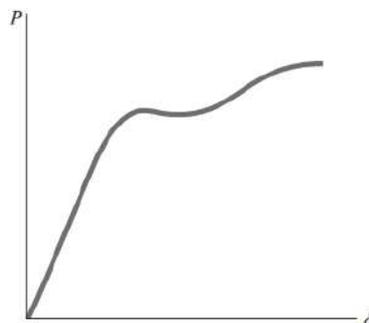


Fig. 1.1.1 Curva característica esfuerzo-deformación (Beer y otros, 2017)

La deformación, representada se ubica en el eje horizontal (eje x). Este eje mide cómo cambia la forma o las dimensiones del material debido a la aplicación de una carga. La deformación puede expresarse en términos de alargamiento, compresión, torsión, etc., dependiendo del tipo de carga y la dirección en la que actúa.

En cuanto a la carga, representada en la Fig. 1.1.1 por P, se ubica en el eje vertical (eje y). La carga se refiere a la fuerza aplicada al material, y puede ser una carga de tensión, compresión, corte u otros tipos de carga, dependiendo de la prueba o aplicación específica.

La curva esfuerzo-deformación ofrece información sobre la respuesta mecánica de un material al aplicársele una carga, Entre los detalles que proporciona se encuentran los siguientes:

- **Módulo de elasticidad** - El módulo de elasticidad es un indicador de la rigidez de un material. Cuando la curva presenta una pendiente pronunciada en su región inicial, esto denota que el material es altamente rígido y posee la capacidad de retornar a su forma original con facilidad tras la aplicación de una carga.
- **Punto de fluencia** – Indicador que limita cuando el material se deforma temporalmente (elásticamente) y cuando comienza a deformarse permanentemente (plásticamente).
- **Límite de fluencia** – El punto de la curva en el que el material se deforma irreversiblemente o se rompe por completo. La importancia de este límite radica en que indica cuanta carga el material soporta antes de sufrir daño severo o una ruptura.
- **Resistencia máxima** – Se refiere al punto más alto en la curva y representa la máxima carga que el material soporta antes de romperse por completo.

1.1.1.1 Ductilidad del concreto

El concreto, un material ampliamente utilizado en la construcción es conocido por su durabilidad y resistencia a la compresión. Sin embargo, uno de los desafíos inherentes al concreto es su falta de ductilidad en comparación con otros materiales.

La ductilidad en el concreto (Neville, 2011) se refiere a su capacidad para deformarse sin experimentar una fractura repentina o una pérdida considerable de resistencia. Al comparar con el acero que es un material altamente dúctil, se puede catalogar al concreto como frágil, ya que cuando es sometido a cargas tiende a presentar fracturas y pérdidas graduales de resistencia, limitando su capacidad de deformación antes de la falla.

Dentro de los factores que afectan directamente la ductilidad del concreto están:

- **Proporción agua-cemento** – Esta relación puede afectar la porosidad y por ende a la aparición de fisuras y fracturas.
- **Selección de agregados** – Las propiedades de los agregados seleccionados para la mezcla de concreto aumentan o reducen la capacidad de deformación antes de la falla.
- **Proceso de curado** – Un adecuado proceso de curado puede mejorar la resistencia y la ductilidad del concreto, pues al no ser realizado correctamente afecta a la proporcionalidad de agua del concreto.
- **Diseño de mezcla** – La dosificación y selección de los materiales, influye en el comportamiento del concreto y su resistencia, por ende en la ductilidad del material.

1.1.1.2 Columnas de concreto armado

Las columnas de concreto representan elementos fundamentales en la ingeniería estructural, desempeñando un papel crucial en la estabilidad y resistencia de edificios y estructuras. Este tipo de elementos desempeñan un

papel esencial al proporcionar soporte vertical y resistencia a cargas de compresión en edificios, puentes, represas y una variedad de otras estructuras. Su importancia radica en su capacidad para resistir fuerzas significativas, mantener la estabilidad de las edificaciones y garantizar la seguridad de las personas que las utilizan.

El diseño adecuado de columnas de concreto es un proceso crítico y que debe ser cuidado. Al diseñar se deben considerar factores como la carga máxima que la columna debe soportar, la altura del elemento, las condiciones sísmicas y las restricciones del sitio para determinar las dimensiones y la cantidad de acero de refuerzo necesario. La elección del tipo de concreto y la calidad del acero de refuerzo son decisiones que afectarán la resistencia y durabilidad de las columnas. Ejemplos de códigos de diseño incluyen el ACI 318-19, (American Concrete Institute, 2019).

Las columnas de concreto armado combinan dos materiales fundamentales: el concreto y el acero. El concreto proporciona una excelente resistencia a la compresión, mientras que el acero de refuerzo compensa su debilidad a tensión. Esta simbiosis permite que las columnas resistan tanto fuerzas de compresión como de tensión, lo que es esencial para mantener la estabilidad de las estructuras.

La construcción de columnas de concreto armado involucra varias etapas. El proceso de construcción comienza con la cimbra, que es un molde temporal de madera que define la forma de la columna. La cimbra debe ser diseñada para resistir la presión del concreto fresco sin deformarse.

Una vez que el cimbrado sea realizado correctamente, se procede a la colocación del acero de refuerzo. Las barras de acero deben estar limpias y libres de óxido, ya que la adherencia entre el concreto y el acero es esencial para la resistencia de la columna. El diseño estructural determina el tamaño, la disposición precisa y el número de barras de refuerzo a usar, que se colocan según las especificaciones. El proceso culmina con el curado adecuado del concreto para evitar la formación de grietas y asegurar su resistencia final.

La construcción de columnas de concreto armado es un proceso esencial en la industria de la construcción. La adaptación a las normativas locales, la selección de materiales adecuados y la aplicación de técnicas de construcción eficientes son fundamentales para garantizar estructuras seguras y duraderas. Los ingenieros y constructores deben estar informados sobre las prácticas y regulaciones específicas para lograr resultados exitosos en proyectos de construcción.

1.1.2 Investigación nacional

1.1.2.1 Columnas con encamisados de concreto

El encamisado de concreto (Cruz, 2022) es una técnica que se utiliza para reparar y reforzar elementos estructurales, generalmente de concreto, como muros, vigas, columnas y nudos. En general, este método implica agregar una capa de concreto nuevo en más de una cara para aumentar la sección transversal del elemento estructural existente. Esta técnica se conoce como encamisado de concreto. Frecuentemente, esta camisa está reforzada con acero en forma de barras corrugadas o mallas de alambre soldado. Para unir los concretos existentes y nuevos, se pueden utilizar varios tipos de conectores, lo que permite transferir los esfuerzos entre los materiales y lograr un funcionamiento monolítico.

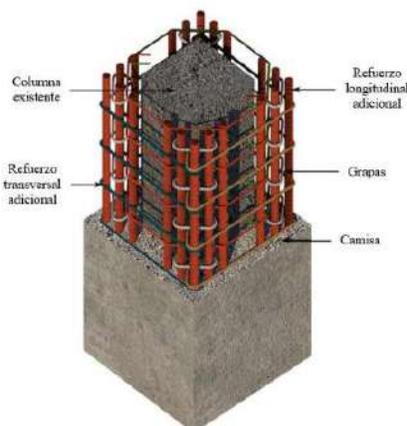


Fig. 1.1.2 Columna encamisada con concreto reforzado (INIFED, 2021)

La técnica de encamisado se utiliza comúnmente para mejorar la resistencia de elementos estructurales frente a cargas verticales o laterales. Esto se debe a diversas razones, como modificaciones en la estructura, aumento de la carga en pisos superiores, daños causados por diferentes factores o diseños deficientes para sismos significativos.

El procedimiento general de construcción de encamisados implica varias etapas:

- Reparación: Incluye la inyección y sellado de grietas y fisuras, así como la reparación del concreto en casos de daños considerables.
- Preparación de superficie: Se enfoca en aumentar la rugosidad de la superficie del concreto existente y, en algunos casos, en la instalación de conectores de acero fijados con epoxi en barrenos.
- Colocación del refuerzo de la camisa: Implica la disposición de barras de refuerzo, que pueden atravesar varios niveles verticales o conectarse horizontalmente, según el diseño.
- Colocación del concreto nuevo: Se lleva a cabo utilizando cimbras o concreto lanzado.

Esta técnica de rehabilitación, cuando se aplica con concreto reforzado en columnas, puede mejorar su resistencia a momentos flexionantes, fuerza cortante, capacidad de deformación no lineal, rigidez y corregir deficiencias de longitud de traslape, además de contribuir a la mejora de la respuesta sísmica de un edificio. No obstante, es un proceso constructivo invasivo que requiere una supervisión cuidadosa para lograr sus objetivos. Es esencial considerar todas las consideraciones relacionadas con materiales, dimensiones y mecanismos de unión entre el concreto existente y el nuevo.

En proyectos de rehabilitación, es crucial conocer las características de las técnicas propuestas, ya que, aunque pueden ofrecer beneficios, al ser

modificaciones no previstas en el diseño original de las estructuras, también pueden presentar desventajas que deben abordarse adecuadamente.

1.1.2.2 Proyecto: “Resistencia a fuerza cortante de columnas de concreto reforzadas con camisas de acero”

El proyecto titulado: “Resistencia a fuerza cortante de columnas de concreto reforzadas con camisas de acero” (González y otros, 2007), es un estudio que fue llevado a cabo en México que tuvo como objetivo determinar el comportamiento y la resistencia a la fuerza cortante de columnas de concreto reforzadas con camisas de acero sujetas a carga axial y carga transversal alternante.

El propósito era determinar si su comportamiento era adecuado y si se podía calcular su resistencia a la fuerza cortante utilizando los procedimientos convencionales. El estudio analizó el tamaño de los ángulos y las placas transversales que formaban la camisa, el daño experimentado en las columnas y varios métodos de construcción, como la unión de los ángulos al concreto con resina epóxica, sujetarlos a presión antes de soldar las soleras, soldar las soleras sin pegar ni presionar los ángulos, calentarlas y soldarlas antes de que se enfríen, y una combinación de estos métodos. Se presentan estudios analíticos para la interpretación de los ensayos y se describe el trabajo experimental.

Los especímenes ensayados consistieron en modelos de columnas con sección transversal de 20x25 cm y de altura 150 cm. El refuerzo longitudinal constó en 4 barras del no. 6, y los estribos se construyeron con barras del no. 3. Los estribos se colocaron con una distancia de 75 cm para que el concreto y las soleras pudieran resistir la fuerza cortante. El concreto empleado tenía una resistencia a la compresión nominal de 200 kg/cm², mientras que el acero tenía un esfuerzo de fluencia nominal de 4200 kg/cm².

En cuanto al encamisado de acero fue conformado por ángulos en cada esquina de la columna, los cuales fueron unidos por soleras a lo largo de toda la altura, como se observa en la Fig. 1.1.3.

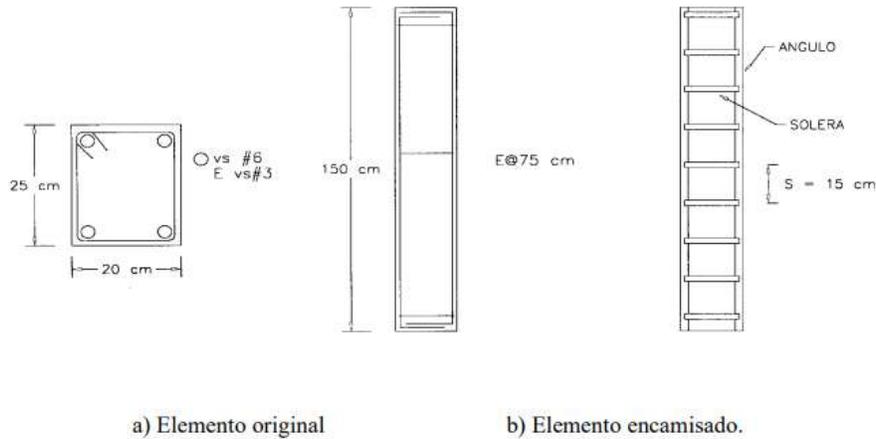


Fig. 1.1.3 Especimen Tipo (González y otros, 2007)

La investigación se llevó a cabo en tres fases. En la primera fase, se ensayaron 19 especímenes, en los que se determinaron los tamaños de los ángulos y las soleras que formaban las camisas, así como cuatro métodos diferentes para colocar los ángulos sobre las columnas: ángulos con presión y con resina, ángulos con presión y sin resina, ángulos sin presión y con resina, ángulos sin presión y sin resina.

En la segunda fase, se tomaron en cuenta los resultados de la primera, utilizando únicamente las camisas que correspondían a la cantidad mínima de acero, se empleó un método alternativo para fijar las camisas, que consistió en fijar los ángulos longitudinales, precalentar las soleras y soldarlas a los ángulos mientras estaban calientes. Cabe mencionar que a la temperatura a la que las soleras se calentaban fue variable, se usaron cuatro diferentes temperaturas; 90°, 70° y 50° y temperatura ambiente. En esta segunda etapa, se construyeron cinco especímenes iguales por cada variable de temperatura dando un total de 20 columnas

Para la tercera y última fase, se utilizaron especímenes con daño previo el cual fue provocado gracias a la aplicación de cargas que se detenían

cuando eran perceptibles grietas de hasta 0.3 mm de ancho, para el caso catalogadas como daño o agrietamiento visual. Después del daño, los modelos eran desmontados del marco de carga, para poder colocar adecuadamente la camisa con una mezcla de procedimientos de las fases anteriores, elaborando un total de 20 modelos.

En cuanto a los resultados experimentales es descrito por los autores que el comportamiento de la mayoría de los especímenes fue similar, compartiendo que las fallas fueron provocadas por tensión diagonal, con deformaciones laterales que muestran un grado de ductilidad significativo. Prácticamente en todos los modelos se formaron grietas inclinadas cerca de la zona de empotramiento que se prolongaron y aumentaron en ancho conforme la prueba avanzó. La Fig. 1.1.4 muestra una columna ensayada en la investigación con una falla típica.



Fig. 1.1.4 Modelo y falla típica (González, 2007)

Los resultados del proyecto arrojaron que la soldadura tuvo un buen desempeño al no tener falla alguna en los ángulos o soleras, sin embargo, en el concreto se presentaron las fallas en los extremos de la grieta inclinada.

En cuanto a los especímenes donde el encamisado fue colocado sin presión y sin resina, se apreció el deslizamiento de entre la camisa y el concreto de los elementos.

A pesar del deslizamiento, la resistencia observada en las columnas con cuantía mínima fue comparable a la de las columnas con otros métodos de encamisado. No obstante, en comparación con otros procedimientos o elementos testigo, hubo reducciones de resistencia en las columnas con cuantía máxima, que se atribuyeron al deslizamiento. Se consideró inconveniente este comportamiento, por lo que no se usó el procedimiento correspondiente en las otras series de ensayos. Cuando se usó presión sin resina, se produjo un fenómeno similar, pero de menor magnitud.

La resistencia en la segunda fase no se vio reducida por los deslizamiento de los modelos, mientras que para la tercera fase se observó que la resistencia teórica fue rebasada por la resistencia experimental.

La investigación encontró que los diferentes métodos utilizados para encamisar columnas de concreto con ángulos y soleras de acero fueron satisfactorios. La rigidez de los especímenes se degrada cuando no hay resina epoxi. El estudio muestra el gran panorama existente ante este tipo de rehabilitación estructural y los resultados invitan a incursionar en el tema.

1.1.3 Investigación en el extranjero

1.1.3.1 Tesis por Riyad Said Aboutaha

En este estudio (Aboutaha, 1994), el objetivo fue determinar cuán efectivos son los encamisados de acero hechos de placas rectangulares delgadas para reforzar y reparar columnas de concreto armado que presentan deficiencias en su diseño en términos de ductilidad. Todas las columnas investigadas en esta investigación se diseñaron de acuerdo con las disposiciones de los códigos ACI 318-56 y ACI 318-63. Según los autores, las

pautas de diseño son aplicables a columnas de concreto armado no dúctiles que cumplen con los requisitos de las antiguas disposiciones del código ACI.

Se ensayaron en tres series de ensayos 28 columnas de concreto armado a escala, los especímenes fueron probados antes y después de los encamisados de acero. Los autores ensayaron columnas que tenían un traslape inadecuado en el refuerzo longitudinal antes y después de ser reforzadas con camisas de acero. Además, se probaron columnas con resistencia a cortante insuficiente tanto en la dirección débil como en la fuerte de la sección transversal.

En la primera fase, se probaron 17 modelos de "columnas de flexión", mientras que en la segunda se ensayaron las 11 restantes "columnas de cortante".

Para las "columnas de flexión", el espécimen de prueba era una columna en voladizo, que representaba la mitad de una columna en un marco de construcción real. Se aplicó una carga lateral cíclica en la punta de la columna. Las zapatas tenían 80" x 80" (203.2 x 203.2 cm) de planta y 24" (60.96 cm) de espesor. Las columnas de flexión tenían todas 9 pies (18" o 274.32 cm) de altura desde la parte superior de la zapata hasta el punto de aplicación de la carga, para asegurar que el comportamiento estuviera dominado por la flexión.

Los especímenes de flexión fueron de cuatro tipos diferentes. Las columnas de tipo "A" eran de 18" x 36" (45.72 x 91.44 cm) y estaban reforzadas con 16 barras longitudinales corrugadas de grado 60 de no. 8. Por lo tanto, este tipo de columnas estaba reforzado transversalmente con estribos deformados de no. 3 @ 16" grado 40 en cada otra barra longitudinal. Las columnas de tipo "B" eran como las de tipo "A", pero se proporcionaba un estribo en cada barra longitudinal. Las columnas de tipo "C" eran de 18" x 27" (45.72 x 68.58 cm) y estaban reforzadas con 12 barras longitudinales deformadas de grado 60 de no. 8. La columna de tipo "D" era una columna cuadrada de 18" x 18" (45.72 x 45.72 cm), reforzada con ocho barras longitudinales deformadas de no. 8.

En cuanto a las "columnas de cortante", estas se construyeron sobre zapatas similares a las utilizadas para las "columnas de flexión. Todas las columnas de cortante tenían 4 pies(48" o 121.92 cm) de altura desde la parte superior de la zapata hasta el punto de aplicación de la carga, para asegurar que el comportamiento estuviera dominado por el cortante. Ocho columnas se cargaron en la dirección débil, mientras que tres columnas se cargaron en la dirección fuerte.

Todas las columnas de cortante estaban reforzadas con 16 barras longitudinales de grado 60 del no. 8. Las barras eran continuas a lo largo de la columna y hasta la zapata. Los tipos "A" y "C" estaban reforzados transversalmente con estribos en cada otra barra longitudinal. Sin embargo, las columnas de tipo "B" estaban reforzadas transversalmente con estribos en cada barra longitudinal. Las columnas de tipo "A" y "B" se cargaron en la dirección débil, mientras que las columnas de tipo "C" se cargaron en la dirección fuerte.

Para las columnas de flexión reforzadas se utilizaron camisas rectangulares de acero, excepto en un espécimen donde la unión del traslape se soldó. Las camisas de acero se colocaron en la región de la unión en la base de la columna.

Las camisas de este último tipo de modelos se colocaron con las siguientes variantes:

- Camisa rectangular de acero sólido con pernos de anclaje adhesivos
- Camisas rectangulares de acero con pernos mecánicos
- Camisas rectangulares de acero (soldadas y atornilladas)
- Camisas de acero parciales

En cuanto al concreto utilizado en los especímenes, se utilizaron diferentes tipos, que variaron entre 2240 y 5040 psi. De igual manera, se utilizaron barras de refuerzo de grado 60 para todas las longitudinales, para los estribos de refuerzo transversales se usaron barras de grado 40, cabe mencionar que los grados y el concreto fue seleccionado para poder representar el material

usado en construcciones de los años 50's y 60's en Estados Unidos. Las placas usadas en las camisas fueron hechas con un espesor de $\frac{1}{4}$ de pulgada de acero A36.

En busca de representar las mismas fuerzas que las columnas de los edificios experimentan durante los terremotos, la zapata fue postensada a la losa del laboratorio usando barras de $1\frac{1}{4}$ ". Se aplicó una carga lateral de 200 o 500 kip (100 a 250 t) dependiendo del actuador usado y si se refería a un ensaye a flexión o cortante. Esta configuración permitió que las columnas presentaran un momento lineal y cortante constante a lo largo de toda la altura de la columna. En la Fig. 1.1.5 se observan las dos configuraciones usadas para la aplicación de carga con actuadores.

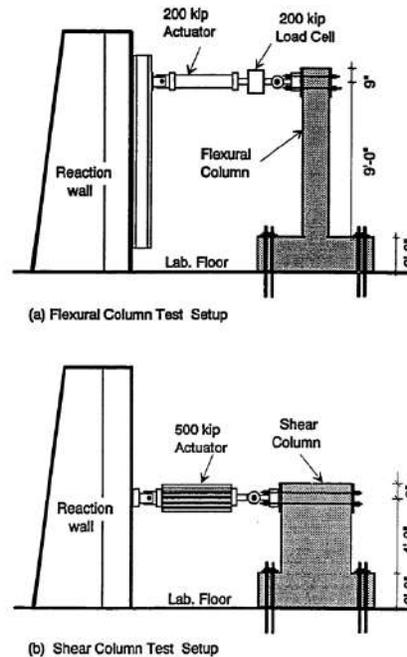


Fig. 1.1.5 Configuración del marco de carga (Aboutaha, 1994)

No se aplicó carga axial sobre ninguno de los especímenes. Cabe mencionar que la historia de carga de la tesis que se describe en este apartado fue tomada como referencia para la sección de experimentación del presente trabajo. Aplicando primeramente un control por carga con incrementos de 5

kip (2.5 t) hasta un desplazamiento inelástico significativo observado. Posteriormente, se aplicaron ciclos a cada 0.5% de distorsión.

Para la adecuada medición de los resultados de los especímenes, fue usada una celda de carga de 200 kip (100 t), la cual estuvo relacionada a los actuadores, también fueron colocados transductores de desplazamiento, potenciómetros lineares y strain gauges colocados tanto interna como externamente.

Dentro de los resultados más relevantes obtenidos mediante este estudio se observaron:

- Las columnas de concreto reforzado no rehabilitadas con traslapes adecuados cuados son vulnerables a las cargas laterales, como las que se producen durante los terremotos.
- Las camisas de acero proporcionan un confinamiento adicional al concreto, lo que ayuda a mejorar la resistencia y la ductilidad de la columna.
- Los pernos de anclaje adhesivos se utilizan para unir la camisa de acero a la columna de concreto sin necesidad de soldar o perforar la columna. Los pernos de anclaje adhesivos son particularmente importantes para el reforzamiento de columnas anchas, ya que ayudan a garantizar que la camisa de acero se deforme con la columna de concreto en la región del empalme.
- Es importante que las camisas de acero no tengan contacto con la cimentación, ya que esto podría reducir la efectividad de la camisa de acero.
- Se encontró que las camisas de acero pierden su efectividad en el confinamiento del empalme de la columna a una deformación de dilatación por microdeformaciones. Esto significa que las camisas de acero no son tan efectivas para prevenir que las barras empalmadas se rompan a deformaciones muy altas.
- Las columnas rehabilitadas con camisas de acero mostraron una ductilidad y disipación de energía mucho mayores que las columnas

originales no rehabilitadas. Esto significa que las columnas rehabilitadas pudieron deformarse más y disipar más energía antes de fallar.

- Las columnas rehabilitadas con camisas de acero mostraron una capacidad de flexión mayor que la capacidad de flexión nominal teórica de las columnas originales no rehabilitadas. Esto significa que las columnas rehabilitadas pudieron soportar cargas más altas antes de fallar.
- Las columnas rehabilitadas con camisas de acero de una altura equivalente a 1.5 veces la longitud del empalme se desempeñaron mejor que las rehabilitadas con camisas de acero de una altura equivalente a 1.2 veces la longitud del empalme. Esto se debe a que las camisas de acero más altas proporcionan un confinamiento más efectivo a la unión de la columna.

Los resultados de este estudio son importantes para el diseño y construcción de columnas de concreto encamisadas con elementos metálicos, pues brindan resultados y recomendaciones contundentes en materia.

1.1.3.2 India

En 2016 el Instituto de Tecnología y Ciencia de Singhgad ubicado en Pune, India publicó los resultados de un estudio (Jodawat y otros, 2016) a cargo del Departamento de Ingeniería Civil en el que se muestra la rehabilitación de columnas de concreto armado mediante camisas de acero compuestas de ángulos y placas.

Este estudio experimental tuvo como propósito evaluar el desempeño de encamisados con placas de acero y la aportación del ángulo a la resistencia de los especímenes ensayados o con placas de acero que cubrieran en su totalidad al elemento, para ello se diseñó y detalló una columna de concreto armado según las disposiciones de la norma IS 456:2000. Se realizó un diseño de mezcla de concreto y en busca de garantizar la resistencia requerida se realizaron pruebas de cubos de concreto para asegurar que los resultados coincidieran con el diseño de mezcla. Se hicieron pruebas preliminares para

estimar la carga en la que la primera grieta aparecería y la carga de falla de una columna de concreto armado común, capturando los resultados de carga a través de una máquina de ensayos universal (UTM). Las condiciones de carga de las columnas se decidieron en función de la carga de falla para inducir grietas en la columna bajo una carga de 85% de la de falla.

El proyecto constó de 14 modelos construidos con dimensiones de 200 x 250 x 1450 mm, hechos de concreto con resistencia de 250 kg/cm², mientras que el acero era grado Fe415, para el refuerzo longitudinal fueron usadas barras de 12 mm de diámetro y para el refuerzo lateral se usaron barras de 8 mm de diámetro a cada 190 mm. Los modelos fueron probados aplicándoles carga axial.

Las conclusiones del estudio fueron las siguientes:

- El aumento de la resistencia de los modelos encamisados en comparación con las columnas sin encamisados para diferentes condiciones de carga y sistemas estructurales resultó en que el incremento de la resistencia para las columnas encamisadas con ángulo y sistema de placa completa son de 32% y 22%, respectivamente, mientras que el aumento de la resistencia para los especímenes cargados a 85% encamisados con ángulo de refuerzo y sistema de placa completa son de 16% y 6%, respectivamente.
- La presencia del ángulo en las camisas resulta ser mejor que el desempeño de la placa completa en términos de capacidad de carga y mejora en el confinamiento de la columna.
- Los modelos encamisados muestran una mayor ductilidad en comparación con las columnas normales, ya que muestran un comportamiento mejorado después de la fluencia.

Los autores describen un alcance de los resultados a futuro, donde se indica que es posible utilizar un esquema de instrumentación avanzada para capturar la respuesta de la estructura de forma más precisa, que al realizar este tipo de estudio se permiten determinar los parámetros óptimos de los sistemas de refuerzo y que es posible realizar un estudio para estimar el tamaño y espesor óptimos del ángulo y la barra de refuerzo en el caso del

refuerzo de ángulo y el espesor óptimo en el caso de utilizar placas para el encamisado. El estudio muestra mejoras que permiten la comprensión del comportamiento de columnas de concreto encamisadas y, por lo tanto, mejorar su diseño y rehabilitación.

1.1.3.3 Egipto

A cargo de la Universidad Al-Azhar se realizó el estudio experimental (Hosny Khalil, Ali, & Beih, 2018) que se describe en las siguientes líneas, siendo su propósito investigar el efecto del encamisado de columnas de concreto mediante tres especímenes a los que se les fue aplicada carga vertical. Los modelos fueron ensayados hasta su falla y a lo largo de las pruebas se monitoreó y se llevó control de su comportamiento. Para completar la investigación, los autores realizaron relaciones numéricas que reflejaron en modelados de elementos finitos no lineales en ANSYS, en busca de validar los resultados obtenidos en laboratorio.

Las técnicas de encamisado empleadas en el estudio fueron tres:

- Tipo 1 – Encamisado completo por placas de acero
- Tipo 2 – Cuatro ángulos verticales colocados en las esquinas de la columna unidos por cinco soleras
- Tipo 3 – Cuatro ángulos verticales colocados en las esquinas de la columna, unidos por tres soleras

Todas las camisas fueron unidas a los elementos de concreto utilizando mortero epóxico. A los especímenes les fue aplicada una carga monótona axial hasta la falla, utilizando diferentes valores de excentricidad y diferentes parámetros del mecanismo de refuerzo.

Los modelos de concreto reforzado tenían una altura de 1000 mm y una sección transversal de 200 x 200 mm. La resistencia a compresión del concreto fue de 38 N/mm² (380 kg/cm²) y el esfuerzo a la fluencia usado de 360 N/mm² (3600 kg/cm²).

En la Fig. 1.1.6 se puede observar la configuración del encamisado de acero de los tres especímenes.

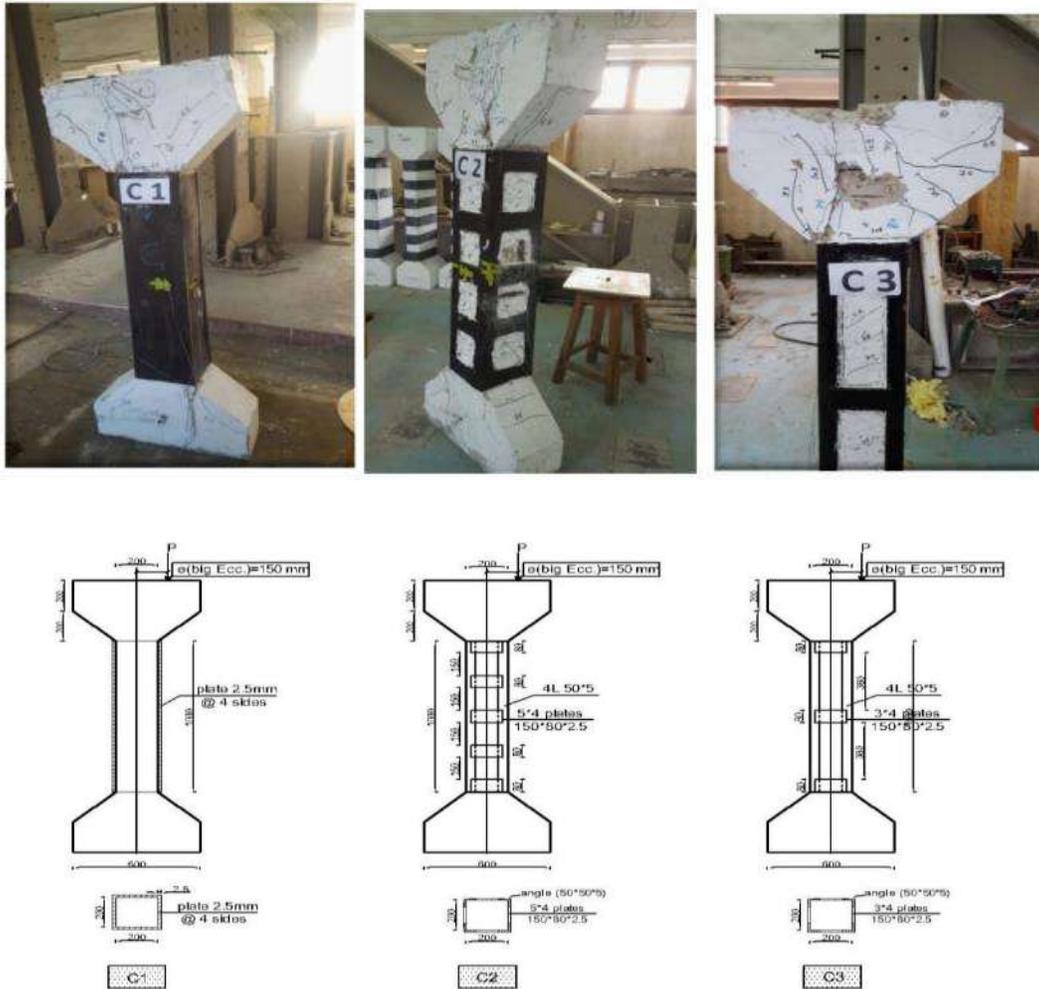


Fig. 1.1.6 Detalle de los especímenes (Hosny y otros, 2018)

Los modelos fueron ensayados en el laboratorio de concreto de la Universidad de Ain Shams, se aplicó carga estática excéntrica aplicada mediante un gato hidráulico. La historia de carga de los experimentos fue aplicada en incrementos cíclicos empezando en cero hasta la carga en la que se llegó a la falla de cada modelo. En cada incremento de carga, se hacía una pausa en la que se registraban los datos más relevantes de la celda de carga y de los deformímetros.

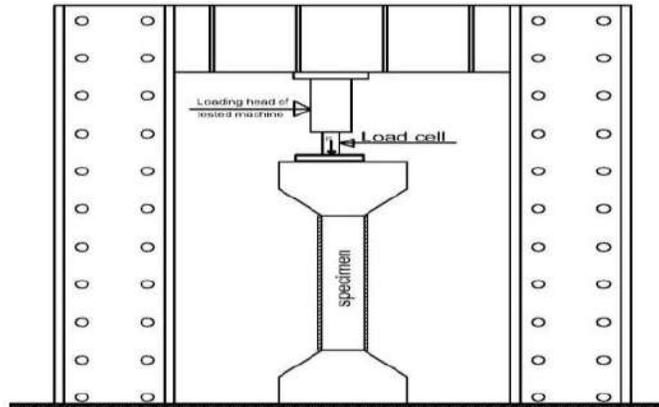


Fig. 1.1.7 Marco de carga, Egipto (Hosny y otros, 2018)

Después de la etapa de experimentación se procedió a realizar el análisis de datos y el modelado con elemento finito de los modelos, lo cual permitió concluir que los resultados numéricos concordaron con los obtenidos experimentalmente.

A través del presente estudio los autores concluyen lo siguiente:

- Se observó que el número de soleras tiene un efecto insignificante en la capacidad última de las columnas debido a la gran separación entre ellas.
- Las técnicas de encamisado con elementos metálicos utilizadas en las columnas aumentaron la resistencia última de las columnas a un valor que oscila entre 27.4% y 28.8%.
- Los especímenes reforzados con ángulos y soleras registraron una resistencia última mayor que el reforzado con el encamisado completo.
- La ductilidad de las columnas ensayadas mejoró tras el encamisado debido a la ductilidad de estos elementos.
- Al observar que la resistencia a la que fallaron los modelos de ángulos y soleras fue mayor que la de del encamisado completo, se concluyó que económicamente los modelos de cuatro ángulos son menos costosos y más eficaces.
- Los resultados del análisis de elementos finitos mostraron una buena concordancia con los resultados experimentales, con una diferencia en el rango de 8%.

1.1.3.4 Japón

La universidad de Kyushu a través de su estudio titulado: "Steel jacketing for improvement of column strength and ductility" (Sakino & Sun, 2000) muestra un informe de las investigaciones y estudios realizados en Japón sobre el comportamiento sísmico de columnas de concreto encamisadas con acero, poniendo especial énfasis en la resistencia y la deformación de estos elementos.

Japón al estar ubicado en una zona altamente sísmica se ha visto afectado por terremotos como los de Northridge en 1994 y el de Hyogoken-Nanbu en 1995, que han causado daños importantes en edificaciones, destacando las mayores problemáticas relacionadas con las columnas de concreto armadas, lo cual se puede relacionar con la falta de confinamiento transversal, dando como resultado una baja resistencia a cortante y una ductilidad deficiente. Por lo anteriormente mencionado, para este país es imperante el desarrollo de métodos que puedan mejorar estas problemáticas.

La técnica por excelencia y centro del estudio de los autores presenta al encamisado con elementos metálicos de columnas como uno de los métodos más eficaces para mejorar la resistencia de estos elementos antes de los sismos, denotando dos ventajas notables: el confinamiento que aporta a la columna y la prevención de la caída de concreto de, pues esto último evita el deterioro de la adherencia y la deformación de las barras longitudinales de las columnas.

Los autores muestran su trabajo experimental en el que establecieron un modelo de curva de esfuerzo-deformación para el concreto confinado, dentro de las variables estudiadas se encontraron el espesor de la pared de las camisas metálicas, guardando una relación entre el ancho del elemento y el espesor de la pared, otra variable fue la resistencia a compresión del concreto (f_c'). Para el propósito, se ensayaron 48 especímenes cuadrados

con secciones de 175 x 175 mm, todos los modelos fueron sometidos a carga axial.

En cuanto a los resultados obtenidos, fue propuesto un modelo carga axial-deformación, en el que se pudieron predecir estas relaciones del concreto encamisado, utilizando cuatro parámetros: resistencia máxima del concreto confinado (f_{cc}'), deformación máxima a la carga máxima y dos parámetros propios de la curva, pudiendo estos cuatro parámetros determinarse a través del valor de f_c' , el espesor del encamisado metálico (t) y el esfuerzo de fluencia en tensión del acero (f_{yt}). Las formulaciones obtenidas, fueron verificada en 39 especímenes de diversas investigaciones realizadas en Japón. A continuación se muestran las gráficas descritas anteriormente y modelos de la curva carga-deformación.

Mediante este estudio se demuestra que la resistencia a carga axial de las columnas encamisadas con elementos metálicos se puede evaluar mediante formulaciones empíricas obtenidas de resultados experimentales y pueden ser usadas para el diseño de columnas de concreto con este método de rehabilitación estructural en Japón y el mundo.

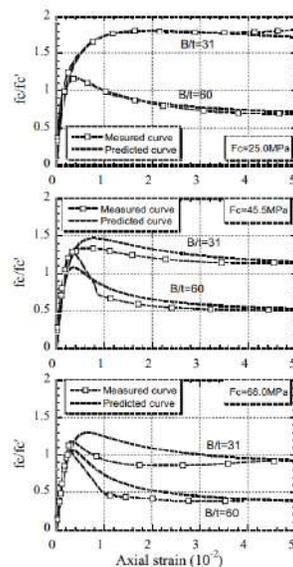


Fig. 1.1.8 Comparación entre los resultados experimentales y los derivados del modelo propuesto (Sakino, 2000)

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Introducción

México es un país con alta actividad sísmica. Varios sismos de gran magnitud, como los ocurridos en 1985 y 2017, han afectado al país debido a su magnitud (Aguirre, 2018); de 8.1 y 7.1 respectivamente. Estos terremotos han causado daños y pérdidas significativas, incluyendo el colapso de estructuras completas.

Ambos sucesos no sólo revelaron las vulnerabilidades estructurales y la necesidad de una respuesta efectiva a los desastres, sino que también unieron a la sociedad en la solidaridad y la búsqueda de soluciones para reducir los riesgos sísmicos en el futuro.

Después de los sismos, han sido frecuentes las denuncias relacionadas con edificaciones mal construidas que colapsaron o sufrieron daños irreparables. Las investigaciones realizadas después de este hecho arrojaron luz sobre una serie de irregularidades alarmantes en permisos y procesos constructivos, dejando al descubierto una serie de problemas estructurales y prácticas irresponsables, lo que llevó a un llamado urgente a tomar medidas correctivas y preventivas (Nájar, 2018).

Tras el sismo de 2017 en México, se desplegó una respuesta integral que abarcó desde la evaluación de daños hasta el apoyo a las víctimas. Inicialmente, los edificios y estructuras afectados fueron evaluados minuciosamente por las autoridades, lo que llevó al cierre temporal o la demolición de los edificios que representaban un riesgo inminente. Al mismo tiempo se llevaron a cabo investigaciones exhaustivas con la participación de expertos en ingeniería estructural para determinar los factores que contribuyeron a los colapsos y daños. El resultado de este proceso fue una revisión profunda de las regulaciones y códigos de construcción del país. Esto llevó a la actualización y el fortalecimiento de los estándares de construcción

y seguridad sísmica, motivando un aumento significativo en la búsqueda de nuevas técnicas y enfoques estructurales.

Una de las investigaciones impulsadas por el sismo de 2017 es la que describe la autora en esta tesis. Siendo su propósito el de mostrar los resultados obtenidos de dos especímenes encamisados en los que se estudia particularmente el efecto del ángulo y tres modelos sin encamisado que sirven como columnas de control para comparar los datos obtenidos de la experimentación con este método de rehabilitación estructural.

Debido a la naturaleza de la investigación y sus alcances, los ensayos de las columnas de concreto fueron realizados en el Laboratorio de Estructuras Grandes del Centro Nacional de Prevención contra Desastres (CENAPRED).

A continuación se describe el programa experimental general llevado a cabo en todo el estudio, sin embargo, se hace énfasis en los siguientes cinco especímenes descritos en la Introducción general:

- O
- OR
- O*
- C-2
- C-4

2.2 Generalidades

El programa experimental se enfocó en realizar pruebas en columnas de concreto reforzado con características comunes (Alcocer & Murià, Rehabilitación sísmica de la infraestructura, 2020) de la década de los 50's en la Ciudad de México, como la falta de refuerzo transversal adecuado, los ganchos de estribos a 90 grados y la baja resistencia del concreto. Como bien ha sido mencionado, la variable en la que se centra esta tesis es en el efecto del tamaño del ala del ángulo en los especímenes encamisados.

Se buscó evaluar cómo el uso de elementos metálicos afecta la rehabilitación de elementos estructurales como las columnas comparando los modelos que han sido encamisados y los modelo de control que no han sido reforzados. Además, se llevó a cabo un análisis de como la cantidad de acero utilizada y la facilidad en la ejecución y supervisión del proceso constructivo requerido para realizar estas rehabilitaciones y otros factores pueden influir en el resultado.

El proyecto experimental desarrollado en el marco de la tesis escrita por Aboutaha (1994) fue crucial para el presente programa experimental, ya que los modelos ensayados mostraron resultados concluyentes, siendo así la elección de tomar como base las características generales de los especímenes construidos.

2.3 Descripción de los especímenes

Los especímenes construidos en el proyecto siguieron la línea de los ensayados en la tesis de Aboutaha (1994), compartiendo características en cuanto a sus dimensiones y características de los materiales.

A continuación se muestra información general de los especímenes (Tabla 4), la cual fue tomada de Alcocer y otros (2023):

Tabla 4. Características generales especímenes (Alcocer y otros, 2023)

| Característica | Detalle |
|--|----------|
| Sección transversal de la columna [cm] | 45 x 90 |
| Altura efectiva de la columna [cm] | 120 |
| Altura total de cola columna [cm] | 170 |
| Resistencia nominal del concreto a la compresión [kg/cm ²] | 200 |
| Porcentaje (cuantía) de acero de refuerzo longitudinal [%] | 2 |
| Separación de estribos del No. 3 [cm] | 40 |
| Configuración de la columna y ensaye | Voladizo |

| Característica | Detalle |
|---|------------------------------------|
| Carga axial [kg] | Sin carga axial |
| Tipo de carga lateral | Unidireccional, cíclica reversible |
| Daño previo | Sí / No |
| Nivel de daño según Norma de Rehabilitación | Intermedio / Grave |

Se optó por tener las siguientes variables, que para el objeto de esta tesis se centró en la variación del efecto del ángulo:

Columnas sin encamisado:

- Columna de concreto reforzado sin daño previo
- Columna de concreto reforzado con daño previo y rehabilitada a través de la inyección de resina

Columnas encamisadas con elementos metálicos:

Soleras

- Peralte 2"
- Espesor 1/4"
- Separación h/2
- Soldadura Unión ángulo y solera

Ángulos

- Ala de los ángulos 4" y 6"
- Espesor 1/8 mayor que la solera

Adicionalmente, al hacer la elección de las características de los especímenes a ensayar se realizó una revisión de la Guía técnica para la rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa en México (Alcocer & Murià, Rehabilitación sísmica de la infraestructura, 2020), donde se comprobó que las propuestas cumplen adecuadamente los requisitos de diseño dictados, dentro de los que destacan:

- Se usará mortero fluido sin contracción con una resistencia a compresión mínima de 30 MPa (300 kg/cm²) o igual a la del concreto original para asegurar el contacto de los elementos metálicos del encamisado.
- Las placas de acero tienen un espesor mínimo de 6.4 mm (1/4 in) y un espesor máximo de 12.7 mm (1/2 in). Para el caso, no se colocaron placas de acero en los dos especímenes a abordar en este escrito.
- Los ángulos de acero deben tener un espesor mínimo de 6.4 mm (1/4 in) y un espesor máximo de 19.1 mm (3/4 in).

De la introducción general, se retoma la Tabla 1, y se insertan únicamente las columnas correspondientes al estudio.

Tabla 5. Tabla Especímenes

| No. | Nombre | Placa Base | Ancho de solera [in] | Espesor de solera [in] | Separación de solera [cm] | Ala del ángulo [in] | Grout |
|-----|---------------|------------|----------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|-------|
| 1 | O | NO | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| | OR | NO | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 2 | O* | NO | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 3 | S-2-1/4-h/2-2 | NO | 2 | 1/4 | h/2 | 2 | SÍ |
| 4 | S-2-1/4-h/2-4 | NO | 2 | 1/4 | h/1 | 4 | SÍ |

El nombre “O” proviene de la columna denominada como original, tomándose la primera letra de esta palabra. Las columnas originales o de control elaboradas para el fin, fueron elementos sin ningún tipo de encamisado metálico.

El espécimen denominado “OR” hace referencia a una columna de control, sin embargo la R pertenece a la característica de haber sido rehabilitada con resina epoxi.

Las siguientes dos columnas comparten estar encamisadas con elementos metálicos, lo que nos lleva a lo siguiente (Tabla 6);

Tabla 6. Explicación denominación de columnas encamisadas

| Elemento | Explicación |
|----------|-------------|
| S | Sin daño |

| Elemento | Explicación |
|---------------|--------------------------|
| 2 | Ancho de la solera |
| $\frac{1}{4}$ | Espesor de la solera |
| $h/2$ | Separación entre soleras |
| 2 o 4 | Ancho del ala del ángulo |

En las siguientes figuras (Fig. 2.3.1 y Fig. 2.3.2) se muestra la geometría de los modelos ensayados. La zapata fue de forma cuadrada y tuvo un peralte de 70 cm. La columna fue rectangular con dimensiones de 45 x 90 cm y tuvo una altura de 170 cm. La altura de aplicación de la carga horizontal fue de 120 cm de altura, medida desde la parte superior del dado. Se aplicó la carga lateral sobre la cara de 45 cm.

La disposición del acero de refuerzo de los especímenes fue la misma que la usada en la tesis de Aboutaha (1994).

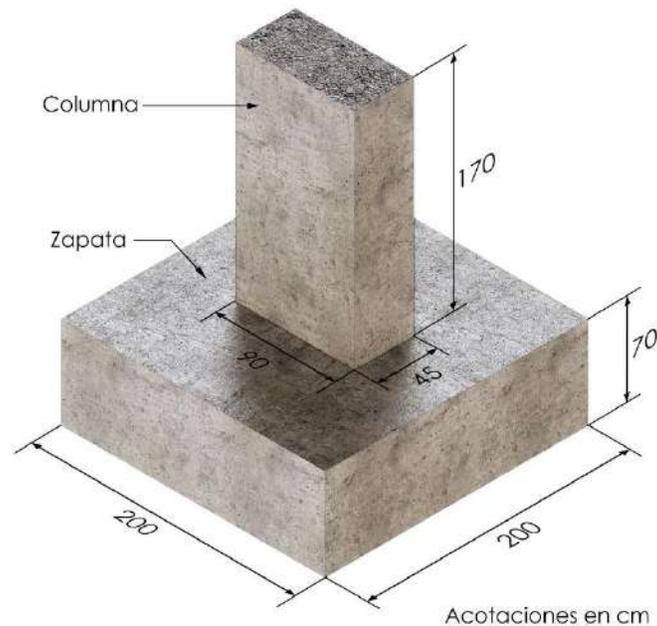
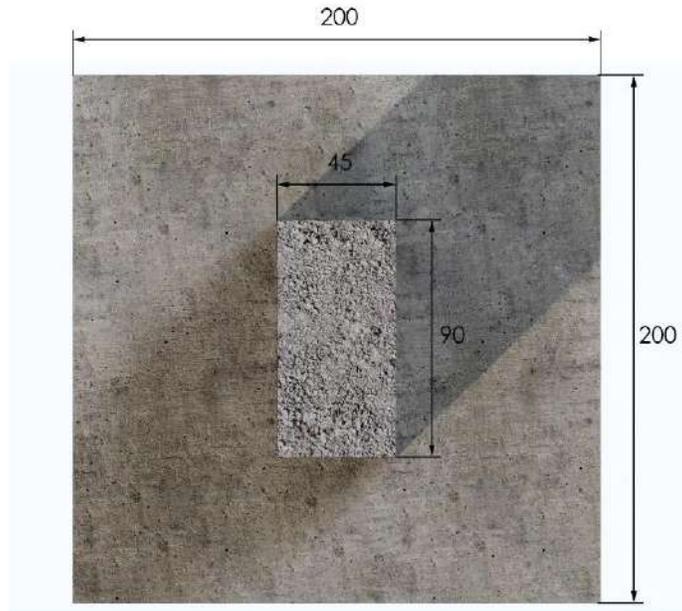


Fig. 2.3.1. Dimensiones de las columnas de concreto, vista lateral



Acotaciones en cm

Fig. 2.3.2 Dimensiones de las columnas de concreto, vista aérea

2.3.1 Materiales

En este apartado se desglosa la información general de los materiales usados para la construcción de los modelos producto del programa experimental. Se divide en tres secciones, pues a estas divisiones obedecen los tres materiales presentes; concreto, acero correspondiente a las barras y a los elementos de las camisas y mortero tipo grout que fue usado en las dos últimas columnas como elemento de contacto entre el acero y el concreto.

Todos los materiales usados para el fin de esta investigación fueron debidamente muestreados y ensayados en busca de que sus propiedades cumplieran con los índices de calidad buscados.

Los especímenes fueron construidos en su totalidad en sitio, en el Laboratorio de Estructuras Grandes (LEG) del CENAPRED.

2.3.1.1 Concreto

El concreto es un material de construcción compuesto por cemento, agua, agregados finos y gruesos. Es un material versátil que se puede utilizar en una amplia gama de aplicaciones en la construcción, incluidos elementos estructurales como las columnas de concreto.

Como fue descrito anteriormente, los modelos constaron de dos partes; zapata y columna. Para cada una de las partes fue usado un tipo de concreto en específico, pues pese a que estas dos secciones formaron un elemento monolítico, sus propiedades fueron distintas. Cabe mencionar que el concreto fue auspiciado por la empresa CEMEX.



Fig. 2.3.3 Figura representativa de olla CEMEX, (CEMEX, 2022)

Las siguientes tablas muestran las propiedades generales del concreto utilizado (Tabla 7 y Tabla 8):

Tabla 7. Concreto en las zapatas

| Propiedades del Concreto en Zapatas | |
|-------------------------------------|------------------------|
| NTC RDF Clase | 1 estructural |
| Resistencia a la compresión | 350 kg/cm ² |
| T. M. A. | 20 mm |
| Agregado | Caliza |
| Proceso de curado | Normal 28 días |
| Revenimiento | 10 a 14 cm |

Tabla 8. Concreto en las columnas

| Propiedades del Concreto en Columnas | |
|--------------------------------------|------------------------|
| NTC RDF Clase | 2 estructural |
| Resistencia a la compresión | 200 kg/cm ² |
| T. M. A. | 20 mm |
| Agregado | Caliza |
| Proceso de curado | Normal 28 días |
| Revenimiento | 14 cm |

El proceso de muestreo y ensayos realizados al concreto se desglosan en el apartado 2.6.1.

2.3.1.2 Mortero tipo grout

Para los especímenes de este proyecto se utilizó mortero tipo grout de la marca Sika. Este producto (SikaGrout, 2014) según sus características promete ser un: "Mortero expansivo, de consistencia seca a autonivelante para anclajes, rellenos y nivelación. Utiliza los compuestos del cemento, arena de granulometría y aditivos para controlar los cambios de volumen. Su fórmula cuenta con alta resistencia mecánica, manejabilidad y no presenta oxidación debido a que no contiene agregados de hierro."



Fig. 2.3.4 Mortero tipo Grout usado, (SikaGrout, 2014)

Se ahondará en su colocación en el inciso 2.5.3.2.

2.3.1.3 Barras del acero de refuerzo

Para asegurar la resistencia y la integridad de las columnas del proyecto, se usó acero de refuerzo. Las columnas estructurales suelen usar acero corrugado como refuerzo. La superficie de este acero tiene protuberancias anilladas que le permiten adherirse al concreto.

La cantidad de acero de refuerzo que necesita una columna estructural depende de varios factores, incluida la carga que debe soportar, el tamaño de la columna y el tipo de acero utilizado. Para los especímenes se determinó usar longitudinalmente 16 barras corrugadas del no. 8 y transversalmente estribos del no. 3 a cada 40 cm hasta la altura de 1.2 m, después fueron colocados estribos a cada 10 cm. En la Fig. 2.3.5 se observa lo anteriormente descrito.

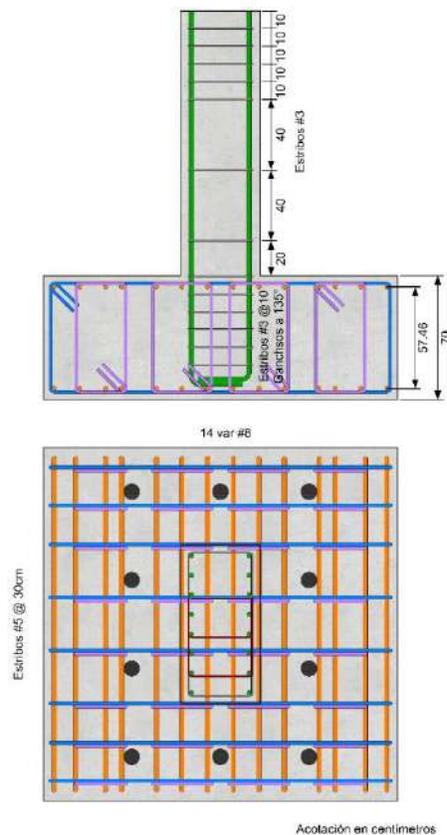


Fig. 2.3.5 Distribución del acero de refuerzo de los modelos

2.3.1.4 Acero del encamisado metálico

El encamisado metálico fue conformado por ángulos y soleras. Sus propiedades y características son importantes debido a la aportación que harán a la resistencia del elemento que encamisamos. Los elementos metálicos suelen estar fabricados con acero de alta calidad, seleccionado cuidadosamente para cumplir con lo requerido.

La descripción detallada de los materiales utilizados en el encamisado de acero es esencial en un proyecto de investigación, ya que permite evaluar la idoneidad de la técnica de encamisado metálico para una estructura particular. Factores como la calidad del acero, su espesor y su capacidad para resistir las tensiones y las cargas determinan en gran medida la eficacia y la longevidad del refuerzo metálico.

El diseño y ejecución adecuados del encamisado metálico también son cruciales. Un encamisado mal diseñado o ejecutado puede no ser eficaz para el elemento estructural.

Los proveedores de acero para el encamisado proporcionaron los órdenes de compra que comprueban las propiedades de estos elementos, los cuales se muestran en las siguientes tablas (Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11):

Tabla 9. Composición química de los elementos metálicos de las camisas

| Elem. | C [%] | Mn [%] | S [%] | P [%] | Cr [%] | Mo [%] | Nb [%] | Ni [%] | Si [%] | V [%] | C.E. [%] | Sn [%] |
|--------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|----------|--------|
| Ángulo | 0.21 | 0.93 | 0.004 | 0.008 | 0.06 | 0.011 | 0 | 0.04 | 0.19 | 0 | 0.388 | 0.006 |
| Solera | 0.195 | 0.65 | 0.028 | 0.011 | 0.12 | 0.29 | 0.036 | 0 | 0.09 | 0.002 | 0.388 | 0.016 |

De acuerdo con la información proporcionada por el proveedor “DEACERO” (2023), el material de acero utilizado para los ángulos del encamisado metálico de 2” y 4” cumple con las siguientes normas de fabricación:

- Normas de fabricación del acero: ASTM A36-2008 (American Society for Testing and Materials, ASTM A36/A36M-08: Standard Specification for Carbon Structural Steel, 2008), A529-2005 (American Society for Testing and Materials, 2005), A572-2012 (Materials, ASTM A572/A572M-12: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel, 2012) y A992-2011 (Materials, ASTM A992/A992M-11: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel with Normalized Yield Points, 2011) .
- Normas dimensionales: NMX B252 (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1988), ASTM A6/A6M-2012 (American Society for Testing and Materials, 2012).

En la Tabla 10, se indican las propiedades mecánicas de los elementos.

Tabla 10. Propiedades mecánicas del acero de los ángulos

| Propiedad | |
|--|-------------------------------|
| RT (resistencia de diseño) [kg/mm ²] | 53.2 |
| Alargamiento [%] | 32.8 |
| Prueba de doblez | Completada satisfactoriamente |

El proveedor del acero de las soleras fue la empresa “Gerdau Corsa” (Gerdau S/A, 2019), quienes indican que sus productos cumplen las especificaciones técnicas de las normas:

- ASTM 6 (American Society for Testing and Materials, 2012)
- ASTM A36-2008 (American Society for Testing and Materials, ASTM A36/A36M-08: Standard Specification for Carbon Structural Steel, 2008)

La Tabla 11 muestra las propiedades mecánicas de las soleras indicadas por Gerdau Corsa.

Tabla 11. Propiedades mecánicas del acero de las soleras

| Propiedad | |
|------------------|------|
| Alargamiento [%] | 32.5 |
| Fu [MPa] | 500 |
| Fy [MPa] | 355 |

2.4 Diseño de los especímenes

Cualquier proyecto de investigación experimental requiere el diseño de ensayos. Para garantizar la confiabilidad de los resultados de las pruebas, los especímenes deben ser lo suficientemente uniformes como para representar las condiciones reales en las que se basan estas columnas. En este apartado se aborda la justificación de los diseños mediante los cálculos obtenidos principalmente a flexión y cortante, entre otros factores.

Uno de los aspectos más destacados al tomar decisiones sobre el diseño de los especímenes fue el dispositivo mediante el cual se harían los ensayos y el tipo de carga que se aplicaría, que para este caso fue carga lateral. Como bien ya fue mencionado, la parte experimental correspondiente al proyecto fue realizada en el Laboratorio de Estructuras Grandes del CENAPRED, donde se contaba con la maquinaria propia de este centro.

En las Fig. 2.4.1 y Fig. 2.4.2 se puede observar el la disposición del acero transversal y longitudinal de la columna, el cual está sustentado en las siguientes páginas.

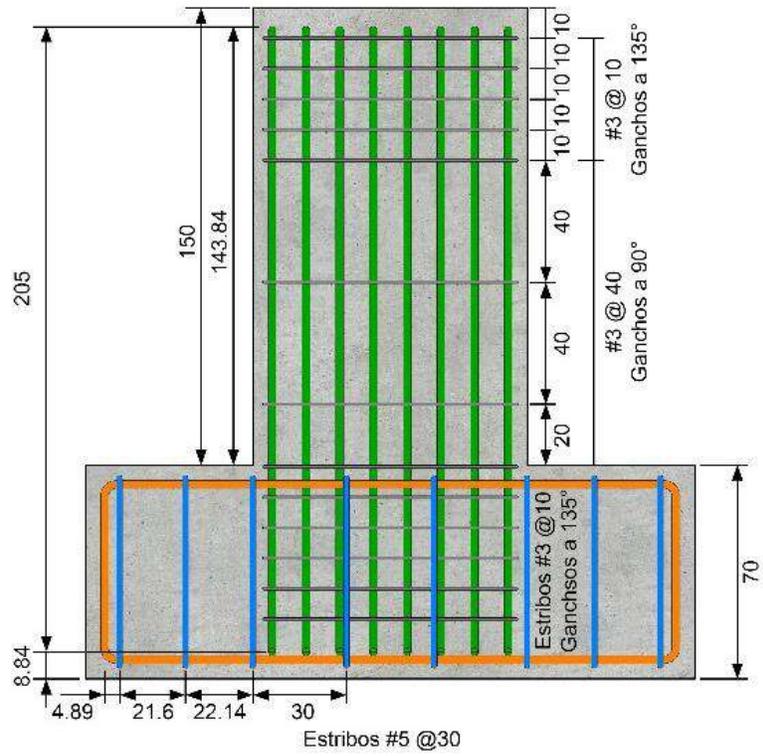


Fig. 2.4.1 Vista 1 acero de refuerzo del espécimen

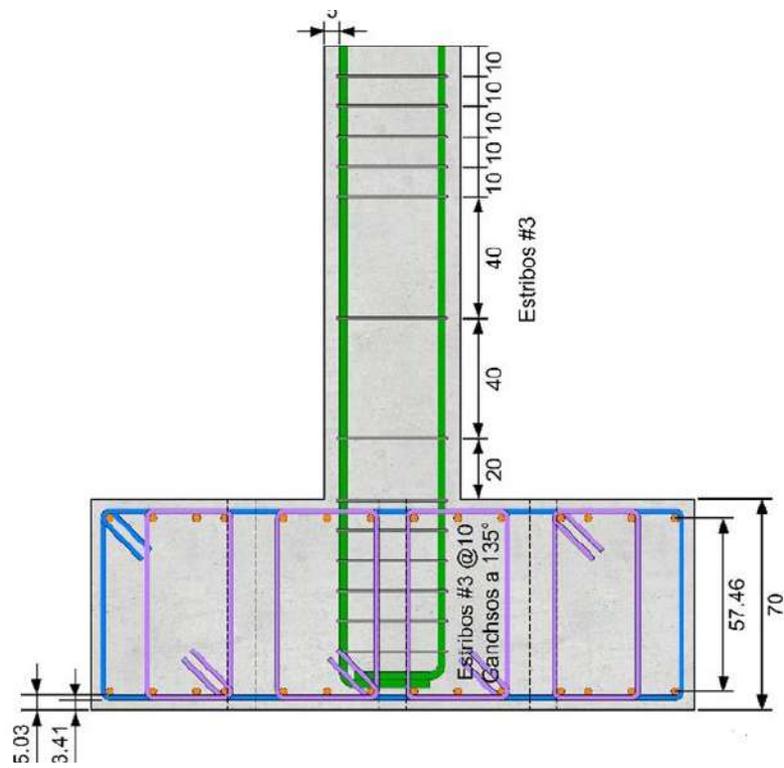


Fig. 2.4.2 Vista 2 acero de refuerzo del espécimen

2.4.1 Diseño de la zapata de cimentación

Retomando el apartado de los materiales, en la Tabla 12 se presentan los correspondientes a la zapata los cuales fueron considerados los adecuados para su diseño.

Tabla 12. Resumen materiales zapata de cimentación

| Material y propiedad | [kg/cm ²] |
|--------------------------|-----------------------|
| fc' del concreto | 350 |
| fy del acero de refuerzo | 4200 |

2.4.1.1 Diseño por flexión

En el LEG del CENAPRED se contó con dos tipos de dispositivos para aplicar carga lateral en los modelos.

Para la prueba de la columna O, se utilizó un gato hidráulico con capacidad de 100 t para aplicar la carga lateral cíclica, en busca de generar la presión necesaria en el gato, se utilizó una bomba eléctrica manual para controlarlo. En las siguientes columnas se utilizaron dos gatos de 100 t cada uno, controlados por un sistema MTS, aplicando un total de 200 t de carga lateral. Estas dos variantes de configuraciones en la aplicación de carga fueron aplicadas a 120 cm a partir de la zapata, lo cual se observa en la Fig. 2.4.3.

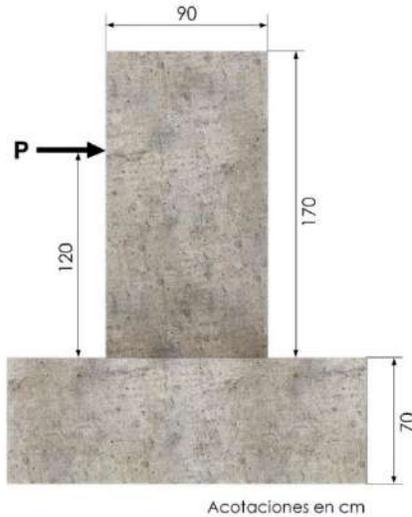


Fig. 2.4.3 Vista frontal del espécimen

Para los cálculos de esta sección correspondiente al diseño por flexión se tomaron en cuenta las máximas cantidades correspondientes a la capacidad de los gatos hidráulicos; 100 y 200 t.

A continuación, se desarrollan los cálculos a flexión:

Caso 1, P = 100 t

Datos

A continuación se presentan los datos a utilizar:

$$P = 100 [t]$$

$$f_c' = 350 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$f_y = 4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$b = 200 [cm]$$

$$d = 65 [cm]$$

$$F_R = 0.9$$

$$h = 1.2 [m]$$

Procedimiento

Primeramente se procede a calcular el momento actuante y el momento último:

$$M_{actuante} = P * h = 100 [t] * 1.2 [m] = 120 [t * m]$$

$$M_{último} = M_{actuante} * 1.4 = 120 [t * m] * 1.4 = 168 [t * m]$$

Posteriormente, con los datos del concreto se busca el valor de beta 1, el cual depende de la resistencia de este material.

$$\beta_1 = 0.85 \quad \text{Si } f'c' \leq 280 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$\beta_1 = 1.05 - \frac{f'c'}{1400} \geq 0.65 \quad \text{Si } f'c' \geq 280 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

El concreto es mayor a 280 kg/cm², por lo que se utiliza la segunda ecuación y se revisa la condición de que el número resultante debe ser mayor a 0.65.

$$\beta_1 = 1.05 - \frac{350 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]}{1400} = 0.8$$

$$\beta_1 = 0.8 \geq 0.65$$

$$\beta_1 = 0.8$$

Se cumple la desigualdad, por lo que el valor se toma como adecuado, el cual se ocupa para resolver la siguiente ecuación:

$$f_c'' = 0.85 * f_c' = 0.85 * 350 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] = 297.5 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

A continuación, se calculan las cuantías; mínima, balanceada y máxima. Los valores de las cuantías se aplican en las fórmulas de acero mínimo, acero balanceado y acero máximo.

$$\rho_{mínima} = \frac{0.7 * \sqrt{f_c'}}{f_y} = \frac{0.7 * \sqrt{350 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]}}{4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]} = 0.00312$$

$$A_{s,mínimo} = \rho_{mínima} * b * d = 0.00312 * 200 [cm] * 65 [cm] = 40.56 cm^2 = 41 cm^2$$

$$\rho_{balanceada} = \frac{f_c''}{f_y} * \frac{6000 * \beta_1}{f_y + 6000} = \frac{297.5 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]}{4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]} * \frac{6000 * 0.8}{4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] + 6000} = 0.033$$

$$A_{s,balanceado} = \rho_{balanceada} * b * d = 0.033 * 200 [cm] * 65 [cm] = 429 cm^2$$

$$\rho_{Máxima} = \rho_{balanceada} * 0.9 = 0.033 * 0.9 = 0.0297$$

$$A_{s,Máximo} = \rho_{Máxima} * b * d = 0.0297 * 200 [cm] * 65 [cm] = 386.1 cm^2$$

Una vez resueltas las formulaciones, anteriores se calcula el acero necesario y se propone una configuración, que para el caso es de 14 barras no. 8.

$$A_{s,necesario} = \frac{f_c''}{f_y} * b * d * \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 * M_{último}}{F_R * f_c'' * b * d^2}} \right]$$

$$A_{s,necesario} = \frac{297.5 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]}{4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]} * 200 [cm] * 65 [cm]$$

$$* \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 168 [ton * m]}{0.9 * 297.5 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] * 200 [cm] * (65 [cm])^2}} \right]$$

$$A_{s,necesario} = 71.12 [cm^2]$$

Se propone el siguiente acero 14 no. 8.

$$q = \rho * \frac{f_y}{f_c''} = 0.0297 * \frac{4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]}{297.5 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]} = 0.419$$

El siguiente paso es el cálculo del momento resistente. En caso de que éste sea mayor que el momento último, los resultados serán concluyentes.

$$M_{Resistente} = F_R * f_c'' * b * d^2 * q * (1 - 0.5(q))$$

$$M_{Resistente} = 0.9 * 297.5 [kg/(cm^2)] * 200 [cm] * (65 [cm])^2 * 0.419 * (1 - 0.5(0.419))$$

$$M_{Resistente} = 749.4 [t * m] = 750 [t * m]$$

$$M_{Resistente} = 750 [t * m]$$

$$M_{último} = 168 [t * m]$$

$$M_{Resistente} > M_{último}$$

Se cumplió la desigualdad, por lo que el resultado es correcto. En la Fig. 2.4.4 Vista en planta de la distribución del acero en la zapata se muestra la distribución del acero en la zapata.

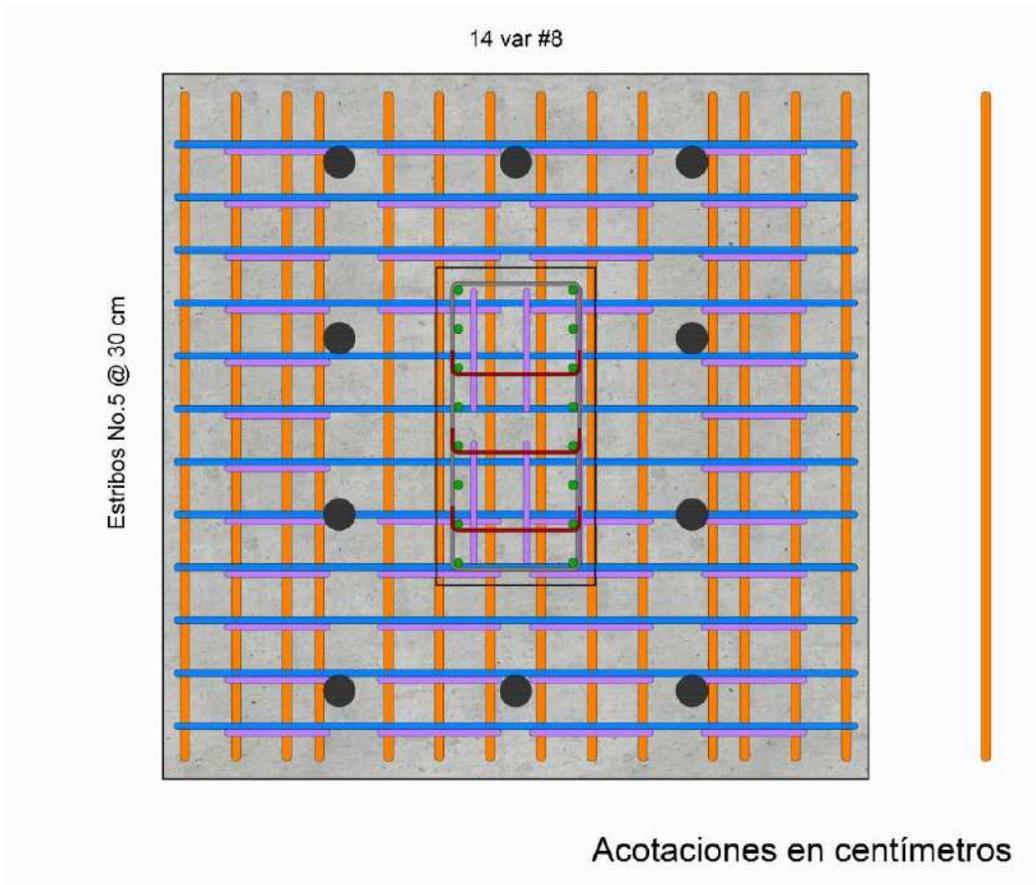


Fig. 2.4.4 Vista en planta de la distribución del acero en la zapata

Caso 2, P = 200 t

Datos

A continuación se presentan los datos a utilizar:

$$P = 200 [t]$$

$$f'c = 350 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$fy = 4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$b = 200 [cm]$$

$$d = 65 [cm]$$

$$F_R = 0.9$$

$$h = 1.2 [m]$$

Procedimiento

Primeramente se procede a calcular el momento actuante y el momento último:

$$M_{actuante} = P * h = 200 [t] * 1.2 [m] = 240 [t * m]$$

$$M_{último} = M_{actuante} * 1.4 = 240 [t * m] * 1.4 = 336 [t * m]$$

Posteriormente, con los datos del concreto se busca el valor de beta 1, el cual depende de la resistencia de este material.

$$\beta_1 = 0.85 \quad \text{Si } f'c \leq 280 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$\beta_1 = 1.05 - \frac{f'c}{1400} \geq 0.65 \quad \text{Si } f'c \geq 280 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

El concreto es mayor a 280 kg/cm², por lo que se utiliza la segunda ecuación y se revisa la condición de que el número resultante debe ser mayor a 0.65.

$$\beta_1 = 1.05 - \frac{350 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]}{1400} = 0.8$$

$$\beta_1 = 0.8 \geq 0.65$$

$$\beta_1 = 0.8$$

Se cumple la desigualdad, por lo que el valor se toma como adecuado, el cual se ocupa para resolver la siguiente ecuación:

$$f_c'' = 0.85 * f_c' = 0.85 * 350 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] = 297.5 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

A continuación, se calculan las cuantías; mínima, balanceada y máxima. Los valores de las cuantías se aplican en las fórmulas de acero mínimo, acero balanceado y acero máximo.

$$\rho_{mínima} = \frac{0.7 * \sqrt{f_c'}}{f_y} = \frac{0.7 * \sqrt{350 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]}}{4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]} = 0.00312$$

$$A_{s,mínimo} = \rho_{mínima} * b * d = 0.00312 * 200 [cm] * 65 [cm] = 40.56 cm^2 = 41 cm^2$$

$$\rho_{balanceada} = \frac{f_c''}{f_y} * \frac{6000 * \beta_1}{f_y + 6000} = \frac{297.5 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]}{4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]} * \frac{6000 * 0.8}{4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] + 6000} = 0.033$$

$$A_{s,balanceado} = \rho_{balanceada} * b * d = 0.033 * 200 [cm] * 65 [cm] = 429 cm^2$$

$$\rho_{Máxima} = \rho_{balanceada} * 0.9 = 0.033 * 0.9 = 0.0297$$

$$A_{s,Máximo} = \rho_{Máxima} * b * d = 0.0297 * 200 [cm] * 65 [cm] = 386.1 cm^2$$

Una vez resueltas las formulaciones, anteriores se calcula el acero necesario y se propone una configuración, que para el caso es de 14 barras del No. 8.

$$A_{s,necesario} = \frac{f_c''}{f_y} * b * d * \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 * M_{\text{último}}}{F_R * f_c'' * b * d^2}} \right]$$

$$A_{s,necesario} = \frac{297.5 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]}{4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]} * 200 [cm] * 65 [cm]$$

$$* \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 336 [t * m]}{0.9 * 297.5 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] * 200 [cm] * (65 [cm])^2}} \right]$$

$$A_{s,necesario} = 148.77 [cm^2]$$

Se propone el siguiente acero 19 no. 10.

$$q = \rho * \frac{f_y}{f_c''} = 0.0297 * \frac{4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]}{297.5 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]} = 0.419$$

El siguiente paso es el cálculo del momento resistente. En caso de que éste sea mayor que el momento último, los resultados serán concluyentes.

$$M_{Resistente} = F_R * f_c'' * b * d^2 * q * (1 - 0.5(q))$$

$$M_{Resistente} = 0.9 * 297.5 [kg/(cm^2)] * 200 [cm] * (65 [cm])^2 * 0.419 * (1 - 0.5(0.419))$$

$$M_{Resistente} = 749.4 [t * m] = 750 [t * m]$$

$$M_{Resistente} = 750 [t * m]$$

$$M_{\text{último}} = 336 [t * m]$$

$$M_{Resistente} > M_{\acute{u}ltimo}$$

Se cumpli3 la desigualdad, por lo que el resultado es correcto.

Cabe mencionar que cuando los espec6menes fueron dise1ados, 6nicamente se consider3 la carga establecida en el Caso 1, por lo que todos los modelos siguieron con esa configuraci3n y distribuci3n de acero de refuerzo. Sin embargo, pese a que el segundo caso considera la carga de los dos actuadores usados, la cual fue aplicada para todos los modelos excepto para la primera columna, se opt3 tambi3n por usar los resultados del primer caso como aplicables debido a que los c6lculos tanto de la zapata como de la columna concluyeron que la columna fallar6 primero que la zapata.

2.4.1.2 Dise1o por fuerza cortante

En este apartado se incluir6n los c6lculos a cortante de la zapata. Para la construcci3n de los espec6menes fueron considerados 10 agujeros en la zapata, los cuales coincidieron con las medidas de los de la losa del LEG en el CENAPRED, permitiendo anclar la zapata mediante el postensado de barras, lo cual se puede observar en la Fig. 2.4.5.

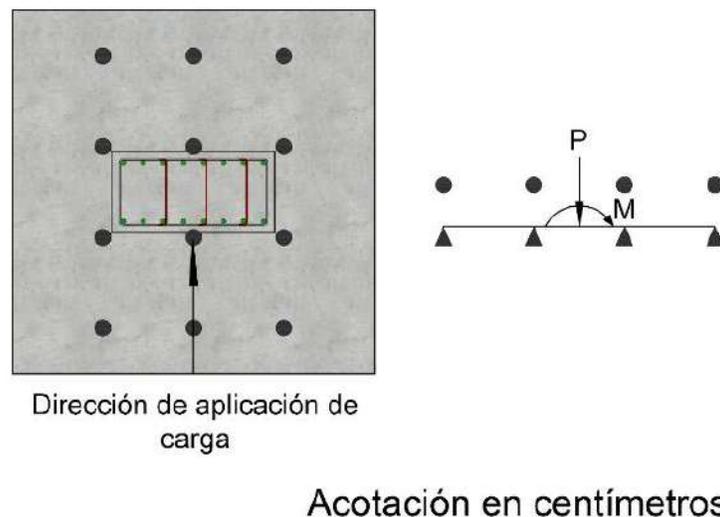


Fig. 2.4.5 Vista en planta de la aplicaci3n de carga y ubicaci3n de las barras postensadas en las pruebas

El momento actuante es la fuerza de carga multiplicada por la altura de la columna. La fuerza cortante se calcula considerando que la base de la columna está fijada a la losa de reacción mediante las barras postensadas. Debido a la simetría de los especímenes, se considera que en las dos líneas de barras postensadas se distribuye la fuerza cortante, cada una soportando la mitad.

Para lo siguiente, se consideró la condición original al momento de diseñar los especímenes; $P = 100$ t. A continuación se muestran los cálculos (Alcocer y otros, 2023) realizados en el proyecto.

Datos

A continuación, se presentan los datos iniciales utilizados en los cálculos:

$$P = 100 [t]$$

$$h = 1.2 [m]$$

$$F_R = 0.75$$

$$b = 200 [cm]$$

$$d = 65 [cm]$$

$$f_c' = 350 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Procedimiento

Primeramente, se hace el cálculo del momento actuante inicial y el momento actuante a ocupar considerando que al ser dos líneas de agujeros, el momento actuante inicial se divide a la mitad.

$$M_{actuante_{inicial}} = P * h = 100 [t] * 1.2 [m] = 120 [t * m]$$

$$M_{actuante} = \frac{M_{actuante\ inicial}}{2} = \frac{120 \left[\frac{t}{m} \right]}{2} = 60 \left[\frac{t}{m} \right]$$

Se calcula el cortante último total, el cual es resultado del momento actuante inicial por el factor 1.4

$$V_u = M_{actuante\ inicial} * 1.4 = 168 [t]$$

El siguiente paso es la obtención del resultado de la fuerza cortante de diseño que toma el concreto.

$$V_{CR} = 0.5 * F_R * b * d * \sqrt{f_c'} = 0.5 * 0.75 * 200 [cm] * 65 [cm] * \sqrt{350 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]} = 91.2 [t]$$

Para validar el valor de cortante anterior, se revisa que se cumpla la siguiente desigualdad:

$$V_{CR} \leq F_R * 1.5 * b * d * \sqrt{f_c'}$$

$$F_R * 1.5 * b * d * \sqrt{f_c'} = 0.75 * 1.5 * 200 [cm] * 65 [cm] * \sqrt{350 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]} = 273.6 [t]$$

$$V_{CR} = 91.2 [t]$$

$$F_R * 1.5 * b * d * \sqrt{f_c'} = 273.6 [t]$$

Se cumple la condición proveniente de la desigualdad. Seguido, se observan las dos siguientes ecuaciones y se elige el caso correspondiente para obtener s.

$$Si V_u > V_{CR} \leq 1.5 * F_R \quad s \leq 0.5 * d$$

$$Si V_u > 1.5 * F_R \quad s \leq 0.25 * d$$

La ecuación que cumple las desigualdades es la primera, por lo que:

$$s = 0.5 * 65 [cm] = 32.5 [cm]$$

Una vez obtenidos todos los valores anteriores, se procede a obtener el acero de refuerzo transversal.

$$A_v = \frac{(V_u - V_{CR}) * s}{F_R * f_y * d} = \frac{(168 [t] - 91.2 [t]) * 32.5 [cm]}{0.75 * 4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] * 65 [cm]} = 12.19 [[cm]^2]$$

Se proponen estribos del no. 5 @ 30 cm.

2.4.2 Diseño de resistencia a corte de la columna

En esta sección se presentan las características de los materiales usados en la construcción de la columna. A diferencia de la Tabla 12, donde únicamente se mencionaron las propiedades del acero y del concreto (Tabla 13) y en la Tabla 14 se especifica el acero longitudinal y transversal resultante del apartado 2.4.1, correspondiente a los cálculos realizados que aplican para este elemento. Se retomaron los cálculos realizados en el marco del reporte general (Alcocer y otros, 2023) de este proyecto buscando cumplir los siguientes casos:

- NTC – Concreto 2017
- ACI – 318 – 19 (American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19), 2019)

Tabla 13. Resumen materiales de la columna

| Material y propiedad | [kg/cm ²] |
|--------------------------|-----------------------|
| fc' del concreto | 200 |
| fy del acero de refuerzo | 4200 |

Tabla 14. Acero de refuerzo en la columna

| Tipo de acero de refuerzo | Especificación |
|---------------------------|----------------|
| Longitudinal (Barras) | 16 #8 |
| Transversal (Estribos) | No. 3 @ 40 cm |

En la siguiente figura (Fig. 2.4.6) se muestra la distribución del acero en la columna.

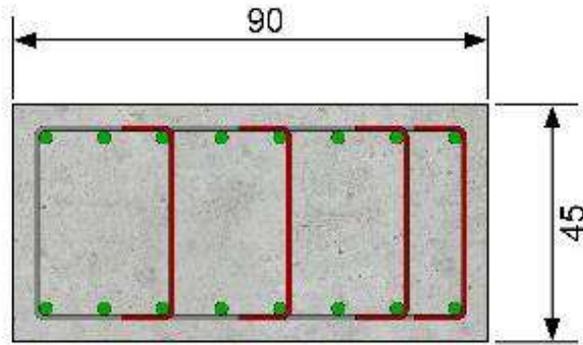


Fig. 2.4.6 Vista en planta del acero de refuerzo en la columna

Caso 1, NTC – Concreto 2017

Datos

Seguido se incluyen los datos a utilizar en los cálculos:

$$f_c' = 200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$f_y = 4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$b = 45 [cm]$$

$$d = 90 [cm]$$

$$F_R = 1$$

$$D_{barras} = 8 [in] = 2.54 [cm]$$

$$Cantidad_{barras} = 16$$

Procedimiento

El primer paso es el cálculo del acero longitudinal, así como la sección comprendida de la columna.

$$A_{longitudinal} = Cantidad_{barras} * \frac{\pi * (D_{barras})^2}{4} = 16 * \frac{\pi * (2.54 [cm])^2}{4} = 81.073 [cm^2]$$

$$A_{concreto} = b * d = 45 [cm] * 90 [cm] = 4050 [cm^2]$$

Posteriormente, se realiza el cálculo de la cuantía del acero longitudinal:

$$\rho = \frac{A_{longitudinal}}{A_{concreto}} = \frac{81.073 [[cm]^2]}{4050 [[cm]^2]} = 0.02$$

Después se evalúa la cuantía de acero y se opera la ecuación correspondiente a la fuerza cortante de diseño que toma el concreto.

Si $\rho \geq 0.015$

$$V_{CR} = F_R * 0.5 * \sqrt{f_c'} * b * d = 1 * 0.5 * \sqrt{200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]} * 45 [cm] * 85 [cm] = 27.05 [t]$$

A continuación se hace el cálculo de la fuerza cortante de diseño que toma el refuerzo transversal.

$$V_{SR} = \frac{F_R * A_V * f_y * d}{s} = \frac{1 * 2 * 0.71 [cm^2] * 4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] * 85 [cm]}{40 [cm]} = 12.67 [t]$$

Para obtener el cortante resistente de la columna se hace la suma de los dos cortantes anteriores:

$$V_R = V_{CR} + V_{SR} = 27.05 [t] + 12.67[t] = 39.72 [t]$$

Caso 2, ACI - 318 - 19 (American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19), 2019)

Datos

$$\gamma_{concreto} = 2400 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$f_c' = 200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] = 20 [MPa]$$

$$f_y = 2400 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] = 24 [MPa]$$

$$D_{estribos} = \frac{3}{8} [in] = 0.952 [cm]$$

$$s = 40 [cm]$$

Procedimiento

$$A_V = 2 * \frac{\pi * (D_{estribos})^2}{4} = 2 * \frac{\pi * (0.952 [cm])^2}{4} = 1.424 [cm^2] = 142.4 [mm^2]$$

$$\frac{A_V}{s} = \frac{1.424 [cm^2]}{40 [cm]} = 0.0356 [cm] = 0.356 [mm]$$

$$\frac{A_V}{s} > \frac{A_{Vmin}}{s}$$

$\frac{A_{Vmin}}{s}$ el mayor:

$$0.062 \sqrt{f_c'} \frac{b_w \cdot s}{f_y} = 0.062 \sqrt{20 [MPa]} \frac{900 [mm]}{420 [MPa]} = 0.594 [mm]$$

$$0.35 \frac{b_w \cdot s}{f_y} = 0.35 * \frac{900 [mm]}{420 [MPa]} = 0.75 [mm]$$

Como

$$\frac{A_V}{s} < \frac{A_{Vmin}}{s} ; V_c = \left(0.66 * \lambda_s * \lambda * (\rho_w)^{\frac{1}{3}} * \sqrt{f_c'} + \frac{N_u}{6A_g} \right) * b_w * d < 0.42 \lambda \sqrt{f_c'} b_w d$$

Considerando concreto de peso 2400 kg/m³, $\lambda = 1.0$

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + 0.004 * d}} \leq 1$$

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + 0.004 * 450 [mm]}} = 0.845$$

$$V_c = \left(0.66 * \lambda_s * \lambda * (\rho_w)^{\frac{1}{3}} * \sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right) * b_w * d$$

$$= \left(0.66 * 0.845 * 1 * (\rho_w)^{\frac{1}{3}} * \sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right) * b_w * d = 29.08 [t]$$

La fuerza cortante máxima que puede desarrollar es:

$$V_c \leq 0.42 * \lambda * \sqrt{f'_c} * b_w * d = 718448 N = 71.84 [t]$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} = \frac{142.4 [[mm]^2] \left(4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] \right) (850 [mm])}{400 [mm]} = 12.71 [t]$$

$$< 0.42(1)\sqrt{20} (850)(450) = 71.84 [t]$$

$$\therefore V_n = 29.08 [t] + 12.71 [t] = 41.79 [t]$$

2.4.3 Longitud de desarrollo

Los cálculos pertenecientes a este apartado fueron retomados de la versión más reciente del informe correspondiente al proyecto (Alcocer y otros, 2023).

Caso 1, I_{dn} ACI

La mayor de:

$$a) \left(\frac{f_y \psi_e \psi_r \psi_o \psi_c}{23 \lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b^{1.5}.$$

(Epóxico) $\psi_e = 1$ (Refuerzo sin recubrimiento)

(Confinamiento) $\psi_e = 1$ (Para barras no. 36 y menores)

(Ubicación) $\psi_o = 1$

(Resistencia $\psi_c = \frac{f_{c'}}{105} + 0.6 = 0.79$ para $f_{c'} < 42$ [MPa]

Concreto)

$\lambda=1$ Concreto peso normal

$$\therefore \left[\frac{4200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] * 1 * 1 * 1 * 0.79}{23 * 1 * \left(\sqrt{200 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]} \right)} \right] (25.44 [mm])^{1.5} = 41.29 \text{ mm}$$

b) $8b_d = 8 * 25.4 [mm] = 203.52 [mm]$

2.4.4 Diseño de la cimbra

La cimbra es una estructura temporal, cuidadosamente diseñada y armada. Es el cuerpo que sostiene el concreto y el cual da su formar, uno de sus objetivos es mantener la integridad del modelo mientras fragua y alcanza su resistencia requerida. Construir la cimbra con precisión es esencial en proyectos experimentales, ya que es el primer paso para obtener resultados confiables y representativos. En este contexto, la selección de materiales adecuada, la configuración de la cimbra y el proceso de montaje son aspectos cruciales que merecen una atención minuciosa.

La cimbra se hizo en dos secciones, pues son dos elementos con diferentes geometrías; la zapata y la columna. Para ello, es importante señalar que en el caso de la zapata y la columna los elementos de madera horizontales se unieron con barras roscadas con diámetro de 3/8 in, tuercas y rondanas, mientras que los elementos verticales de la sección de la zapata se atiesaron con hilos trenzados de alambre recocado de calibre 16.

Se planteó que la cimbra fuera conformada por polines, barrotes y hojas de triplay. Cabe mencionar que para el desarrollo del diseño de la cimbra, se consideró un peso volumétrico del concreto $\gamma = 2.4 \left[\frac{t}{m^3} \right]$. En la Tabla 15 se muestran las dimensiones propuestas de los elementos de madera a usar:

Tabla 15. Dimensiones de elementos de madera (cimbra)

| Elemento | b [in], b [mm] | d [in], d[mm] | t [mm] |
|----------|-------------------|-------------------|---------|
| Polín | 3 [in], 75 [mm] | 3 [in], 3 [mm] | N/A |
| Barrote | 1 ½ [in], 38 [mm] | 3 ¼ [in], 82 [mm] | N/A |
| Triplay | N/A | N/A | 18 [mm] |

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Madera (NTC-Madera) (Gobierno Federal Mexicano, 2017), se deben considerar los siguientes factores (Tabla 16):

Tabla 16. Factores NTC - Madera

| Descripción | Factor | Valor |
|--|-----------------|---------------------------------------|
| Factor de resistencia a flexión | F_R | 0.8 |
| Valor de esfuerzo a flexión | f_{fu} | $6 \left[\frac{t}{m^3} \right]$ |
| Factor de modificación por contenido de humedad | K_{Fh} | 0.8 |
| Factor de modificación por peralte a flexión | K_{Fp} | 1.25 |
| Factor de reducción de resistencia a cortante | f_{RV} | 0.7 |
| Valor especificado de esfuerzo a cortante | f'_{vu} | $165 \left[\frac{t}{m^2} \right]$ |
| Valor de modificación por contenido de humedad de madera laminada a cortante | K_{Vh} | 0.8 |
| Factor de modificación por duración de carga continua | K_d | 0.9 |
| Factor de compartición de carga | K_c | 1.15 |
| Valor modificado del esfuerzo a flexión | f_{fu} | $686.2 \left[\frac{t}{m^2} \right]$ |
| Valor modificado del esfuerzo a cortante | f_{vu} | $102.46 \left[\frac{t}{m^2} \right]$ |
| Presión del concreto | E_c | $1.68 \left[\frac{t}{m^2} \right]$ |
| Carga uniforme sobre barroses | ω | $0.54 \left[\frac{t}{m} \right]$ |
| Ancho de triplay | b_t | 1 [m] |
| Módulo de sección del polín | $S_{s_{polin}}$ | $7.37 \times 10^{-5} [m^3]$ |
| Módulo de inercia del polín | I_{polin} | $3.68 \times 10^{-5} [m^4]$ |

| Descripción | Factor | Valor |
|-------------------------------|----------------------|--|
| Módulo de sección del barrote | S_{barrote} | $4.32 \times 10^{-5} \text{ [m}^3\text{]}$ |
| Módulo de inercia del barrote | I_{barrote} | $2.16 \times 10^{-5} \text{ [m}^4\text{]}$ |

2.4.4.1 Cimbra de la zapata

En esta sección se realizaron los cálculos correspondientes a la cimbra de la zapata.

Comenzando con la revisión, se opera la siguiente ecuación en búsqueda de obtener la separación entre los barros:

$$S_t = \sqrt{\frac{t^2 * f_{fu} * b_t}{\omega}} = \sqrt{\frac{(18 \text{ [mm]})^2 * 686.2 \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^2}\right] * 1 \text{ [m]}}{0.54 \left[\frac{\text{t}}{\text{m}}\right]}} = 0.639 \text{ [m]}$$

Partiendo del valor anterior, se decidió dejar una separación entre barros de 0.49 m.

La cimbra debe ser capaz de resistir la presión del concreto, como si fuera una viga, que en este caso serían los barros que reciben la presión uniformemente distribuida. De igual manera, es necesario incluir en el diseño de la cimbra abrazaderas horizontales y apoyos intermedios a través de los polines verticales, logrando confinar todas las paredes de la cimbra (Tabla 17).

Tabla 17. Dimensiones apoyos (cimbra)

| Descripción | Factor | Valor |
|-------------------------------|----------|--|
| Ancho tributario | b_p | 0.25 [m] |
| Longitud del claro | l | 0.75 [m] |
| Factor de estabilidad lateral | ϕ | 1 |
| Carga uniforme sobre polín | ω | $0.172 \left[\frac{\text{t}}{\text{m}}\right]$ |

Revisión por Flexión

Se calcula el momento máximo:

$$M_{max} = \frac{\omega * l^2}{8} = \frac{0.172 \left[\frac{t}{m} \right] * 0.75 [m]}{8} = 0.016 \left[\frac{t}{m} \right]$$

Seguido, se procede a hacer el cálculo del momento resistente:

$$M_R = f_{fu} * S_{polín} * \emptyset = 686.2 \left[\frac{t}{m^2} \right] * 7.37 \times 10^{-5} [m^3] * 1 = 0.05 \left[\frac{t}{m} \right]$$

$$M_R > M_{max}$$

Se cumple la desigualdad, por lo que el elemento propuesto es apto para la cimbra.

A continuación se hace la revisión por fuerza cortante:

$$V_{max} = 0.5 * \omega * l = 0.189 [t]$$

Como siguiente paso, se calcula el cortante resistente:

$$V_R = \frac{F_{Rv} * f_{vu} * b * d}{1.5} = 0.27 [t]$$

$$V_R > V_{max}$$

Se cumplió la desigualdad indicando que la selección es apropiada.

La cimbra de la zapata se propone con las siguientes dimensiones:

Tabla 18. Dimensiones de la base (cimbra)

| Dimensiones | [m] |
|-------------|-----|
| B | 2 |
| D | 2 |
| H | 0.7 |

En cuanto a las dimensiones de los polines, éstas se mantienen de 3 x 3 [in] y el peso volumétrico del concreto ya mencionado. Se consideran los siguientes factores para el cálculo de la base:

Tabla 19. Factores para la base de la zapata (cimbra)

| Descripción | Factor | Valor |
|----------------------|--------|------------------------------------|
| Presión del concreto | E_c | $2.4 \left[\frac{t}{m^2} \right]$ |

| | | |
|---|----------|--------------------------------------|
| Valor modificado del esfuerzo a flexión | f_{fu} | $686.2 \left[\frac{t}{m^2} \right]$ |
| Espesor del triplay | t | $\frac{3}{4} [in], 0.018 [m]$ |
| Carga uniformemente repartida | ω | $1.34 \left[\frac{t}{m} \right]$ |

En la siguiente ecuación se opera para obtener la separación adecuada entre polines:

$$S_t = \sqrt{\frac{t^2 * f_{fu} * b_t}{\omega}} = \sqrt{\frac{(0.018[m])^2 * 686.2 \left[\frac{t}{m^2} \right] * 1 [m]}{1.34 \left[\frac{t}{m} \right]}} = 0.41 [m]$$

Por geometría del espécimen se decidió que las separaciones fueran de 39 cm. En las siguientes figuras (Fig. 2.4.7 y Fig. 2.4.8) se puede observar la distribución de la cimbra en la zapata.

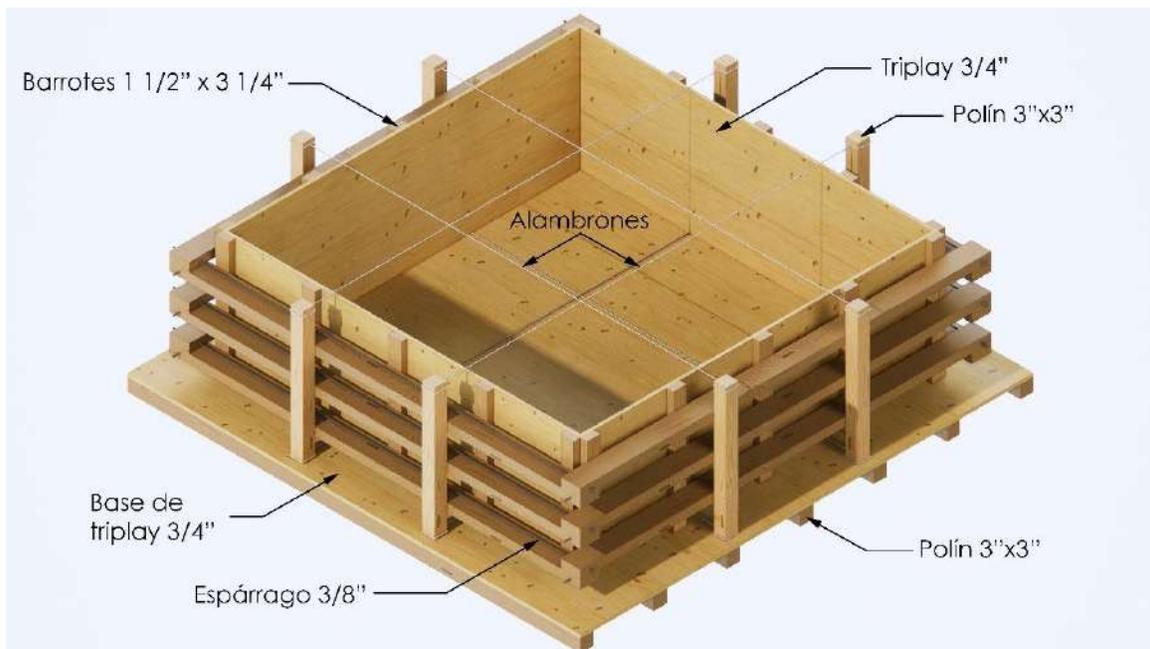


Fig. 2.4.7 Isométrico de la cimbra correspondiente a la zapata

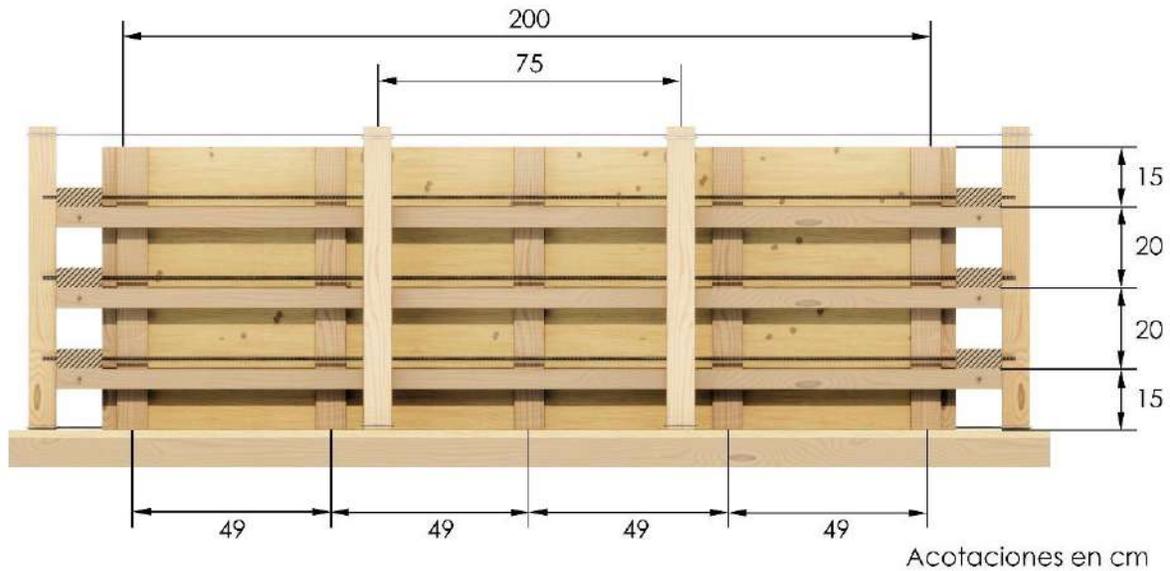


Fig. 2.4.8 Vista lateral de la cimbra correspondiente a la zapata

2.4.4.2 Cimbra de la columna

Este apartado corresponde a los cálculos de la cimbra para la columna. Se retoman los valores iniciales mencionados en 2.4.4 y se consideran los siguientes (Tabla 20) para esta sección:

Tabla 20. Valores considerados para la cimbra de la columna

| Descripción | Factor | Valor |
|-------------------------------|----------|------------------------------------|
| Presión del concreto | E_c | $3.6 \left[\frac{t}{m^2} \right]$ |
| Ancho tributario del barrote | b_p | $0.42 [m]$ |
| Ancho del triplay | b_t | $1 [m]$ |
| Carga uniformemente repartida | ω | $0.810 \left[\frac{t}{m} \right]$ |

Se utiliza la misma ecuación con los valores correspondientes a la columna para obtener la separación entre los barrotes:

$$S_t = \sqrt{\frac{t^2 * f_{fu} * b_t}{\omega}} = \sqrt{\frac{(0.018[m])^2 * 686.2 \left[\frac{t}{m^2} \right] * 1 [m]}{0.810 \left[\frac{t}{m} \right]}} = 0.524 [m]$$

Al ser una sección de 90 cm, lo calculado no se adecúa a la geometría, por lo que se consideran separaciones de 42 cm entre barros.

Para las abrazaderas en sentido horizontal que confinan las cuatro paredes, se hacen los cálculos con la abrazadera que mayor presión recibe; la abrazadera inferior. Se mantienen las medidas de los polines de 3 x 3 in.

Tabla 21. Factores de las abrazaderas de la cimbra en la columna

| Descripción | Factor | Valor |
|-------------------------------|----------|----------------------------------|
| Ancho tributario | b_p | 0.2 [m] |
| Longitud del polín | l | 1 [m] |
| Factor de estabilidad lateral | ϕ | 1 |
| Carga uniforme sobre polín | ω | 0.302 $\left[\frac{t}{m}\right]$ |

Revisión por Flexión

Se calcula el momento máximo:

$$M_{max} = \frac{\omega * l^2}{8} = \frac{0.302 \left[\frac{t}{m}\right] * 1 [m]}{8} = 0.037 \left[\frac{t}{m}\right]$$

Seguido, se procede a hacer el cálculo del momento resistente:

$$M_R = f_{fu} * S_{spolín} * \phi = 686.2 \left[\frac{t}{m^2}\right] * 7.37 \times 10^{-5} [m^3] * 1 = 0.05 \left[\frac{t}{m}\right]$$

$$M_R > M_{max}$$

Se cumple la desigualdad, por lo que el elemento propuesto es apto para la cimbra.

A continuación se hace la revisión por fuerza cortante:

$$V_{max} = 0.5 * \omega * l = 0.5 * 0.302 \left[\frac{t}{m}\right] * 1 [m] = 0.151 [t]$$

Como siguiente paso, se calcula el cortante resistente:

$$V_R = \frac{F_{Rv} * f_{vu} * b * d}{1.5} = 0.27 [t]$$

$$V_R > V_{max}$$

Se cumplió la desigualdad indicando que los elementos son aptos para la cimbra.

Las Fig. 2.4.9, Fig. 2.4.10 y Fig. 2.4.11 muestran la disposición de la cimbra de la columna:

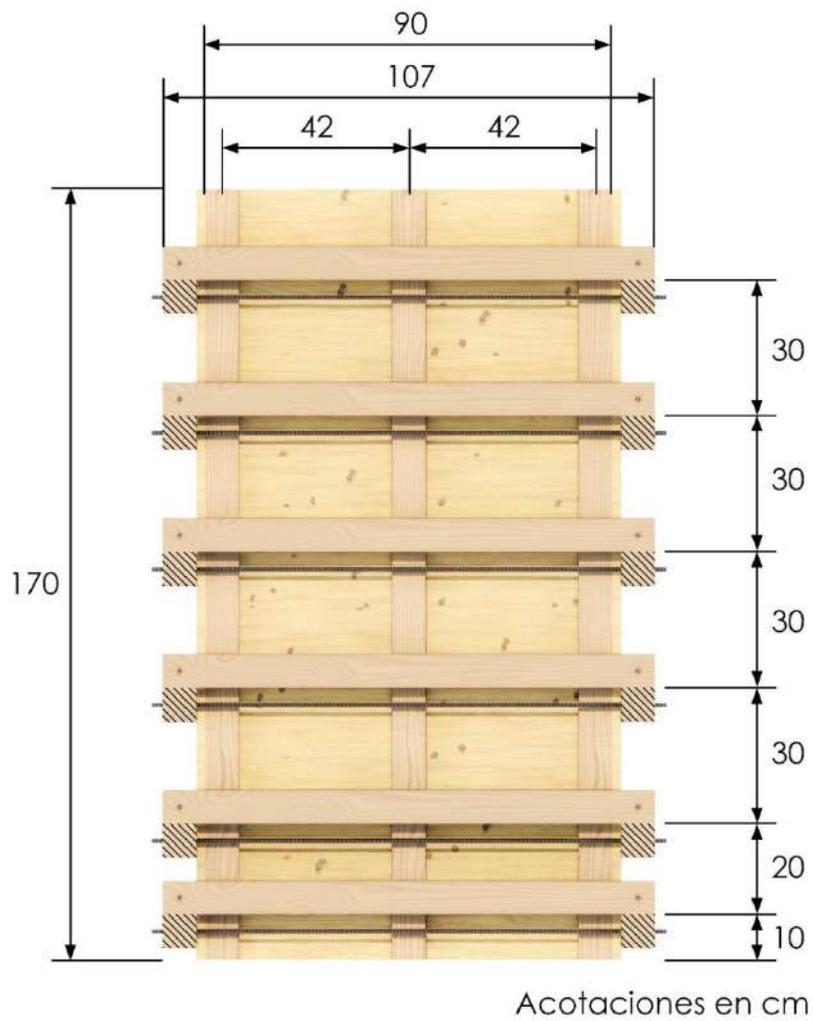


Fig. 2.4.9 Vista frontal de la cimbra de la columna

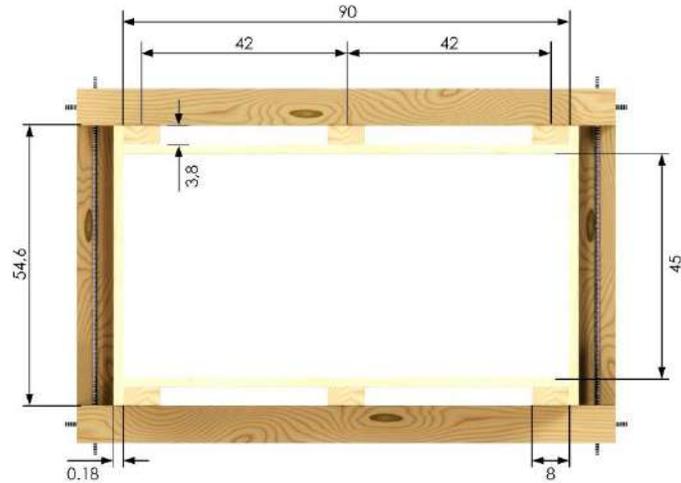


Fig. 2.4.10 Vista en planta de la cimbra de la columna

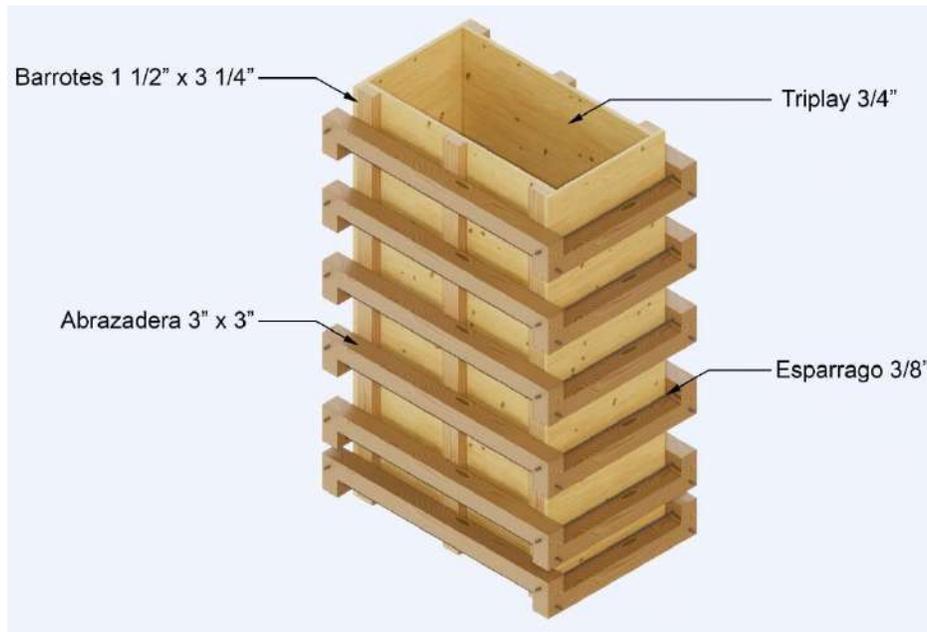


Fig. 2.4.11 Isométrico de la cimbra de la columna

2.4.5 Diseño de camisas metálicas

Al observar el comportamiento de las columnas encamisadas anteriores del proyecto (mencionadas en la Introducción y que no son objeto de estudio de la presente tesis), se especuló que la variación del ala del ángulo era el factor que mayor implicación y variación daba a la resistencia de las columnas de concreto cuando eran encamisadas, lo que es objeto de este trabajo. Se

optó por probar dos modelos con 2" y 4 " en el ángulo respectivamente y retomando las variaciones de los modelos de Aboutaha (1994).

2.4.6 Diseño unión concreto-acero

Siguiendo la recomendación del INIFED (Alcocer & Murià, Rehabilitación sísmica de la infraestructura, 2020) donde se menciona que para garantizar la correcta adhesión entre el encamisado metálico en cualquiera de sus formas y un elemento de concreto, se deberá emplear un mortero líquido sin contracción con una resistencia mínima de 300 kg/cm² o con una resistencia igual o mayor a la del concreto original, optando por la cifra que sea más alta en cada caso. Por ello se usó el mortero tipo grout descrito en la sección de Materiales.

2.5 Proceso constructivo

En este apartado se ahonda en la descripción del proceso llevado a cabo en cada etapa de la construcción de los especímenes. Los modelos del proyecto fueron construidos en series de cuatro, esto debido al espacio destinado para su construcción en el CENAPRED y a la complejidad que involucra su ejecución. Para garantizar la validez de los resultados de las pruebas, este proceso fue planificado y se llevó a cabo cuidadosamente.

Se detalla desde la habilitación del acero interno de la columna, hasta la colocación del encamisado con elementos metálicos y la instrumentación externa para las pruebas.

2.5.1 Instrumentación interna

La instrumentación interna se refiere a la colocación de deformímetros en las barras de refuerzo de los especímenes, las cuales son embebidas en el colado del concreto. El habilitado de las barras con este tipo de instrumentación lleva una serie de pasos precisos que deben cumplirse para garantizar la adecuada toma de datos.

El proceso constructivo de la colocación de deformímetros consta de las siguientes etapas:

- Preparación de la superficie
- Colocación de los deformímetros
- Fijación de los dispositivos
- Conexión con el sistema de adquisición de datos

Las barras de refuerzo transversal y longitudinal se doblaron y cortaron a la medida requerida para el armado. Esta acción permitió planificar la ubicación estratégica de los deformímetros. Una vez planificada la ubicación, se procedió a marcar con un plumón permanente la medida requerida. El siguiente paso fue colocar las barras a trabajar en un área adecuada. Las barras se aseguraron sobre caballetes metálicos para evitar movimientos no deseados (Fig. 2.5.1).



Fig. 2.5.1 Barras de acero sobre caballetes metálicos (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Posteriormente, se procedió al desbaste de barras corrugadas, proceso que consiste en eliminar la superficie corrugada de las barras de acero, dejando una superficie lisa. Para ello, se utilizó una herramienta rotativa tipo Dremel con un cabezal de lija de grano fino para no dañar el acero. Se realizó el desbastado hasta que se libró un área de aproximadamente 3 cm, sitio donde fueron colocados los dispositivos. En la Fig. 2.5.2 se muestra la etapa de desbaste de las barras de acero.



Fig. 2.5.2 Desbaste de la corrugación de una barra (Palma, 2022 - 2023)

Seguido, se utilizaron limas para metal con las que se pudo dar un acabado más uniforme y sin textura a la zona de colocación del strain gauge, sin embargo, únicamente con las limas no se obtuvo el acabado espejo y sin ralladuras que se necesita, lo que se puede observar en la Fig. 2.5.3. Por lo que se procedió a pulir el área con lijas del agua de las siguientes denominaciones y números:

- Lijas de agua de grano medio: 150 y 180
- Lijas de agua de grano fino: 220 y 400
- Lijas de agua de grano extrafino: 600 y 1000



Fig. 2.5.3 Acabado de la barra después del desbaste (Palma, 2022 - 2023)

En la Fig. 2.5.4 se observa el acabado logrado con tipo espejo con una superficie extremadamente lisa, alto nivel de brillo, uniformidad en el acabado y sin porosidades.



Fig. 2.5.4 Acabado tipo espejo (Alcocer, y otros, 2022)

El último paso de la preparación de la superficie de las barras es la limpieza del área donde se hizo la colocación de los dispositivos, la cual se realizó con acetona y algodón. Se humedeció un pedazo de algodón con acetona y después se limpió el área, dejando secar la región completamente.

Las cajas de deformímetros contienen un paquete de hojas transparente que auxilian en la colocación de los dispositivos, estas hojas se deben tener preparadas. Para empezar la colocación de deformímetros se debe contar con el kit especial de pegado que consta de un frasco de catalizador (A) y uno de pegamento (B), es necesario contar con ambos, pues la sustancia A, activa la B. Para comenzar, es necesario retirar la cubierta protectora del strain gauge y posicionarla en la ubicación deseada para cerciorar que esta sea correcta. A continuación, se aplica una gota de catalizador en la parte inferior del deformímetro, seguida de la aplicación de una gota de pegamento en la misma área. Usando las hojas transparentes como guía, se ejerce presión con un dedo sobre el deformímetro durante al menos 30 s en la barra. En la Fig. 2.5.5 se muestra la colocación del strain gauge hasta este paso.



Fig. 2.5.5 Pegado de strain gauge (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Para que los cables de los dispositivos no interfieran con futuras actividades, se enrollan y se pegan a la barra con *masking tape*. (Fig. 2.5.6)



Fig. 2.5.6 Cables de deformímetros (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Al ser barras de refuerzo internas, se busca proteger los deformímetros, pues debido a su sensibilidad son susceptibles a sufrir daños durante el colado o el ensaye, por lo que envuelve con cinta de aislar, cinta vulcanizadora y gasas

en este orden, posteriormente se aplica resina para fijar completamente (Obsérvese las Fig. 2.5.7 y Fig. 2.5.8).



Fig. 2.5.7 Barras envueltas en gasas (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 2.5.8 Barra envuelta en gasa y con resina aplicada (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Finalmente las barras se encuentran instrumentadas (Fig. 2.5.9) con los deformímetros. Pese a la aplicación de las diferentes capas de protección, se debe tener un manejo cuidadoso para evitar daños en los dispositivos.



Fig. 2.5.9 Estribos instrumentados (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

2.5.2 Columnas y zapatas

Esta sección aborda el armado de acero, la elaboración de la cimbra, el colado de concreto y el proceso de curado en los modelos a ensayar para propósito de esta tesis.

2.5.2.1 Armado de columnas y zapatas

El armado se comenzó con la sección de las zapatas (Fig. 2.5.10), fue seguida la disposición del acero descrita en 2.4. Sin embargo, debido a la colocación de los tubos de PVC de 3", los cuales fueron posicionados para guardar el espacio sobre los que pasarían las barras para realizar el postensado de los especímenes con la losa del laboratorio, las posiciones de las barras cercanas a estos tubos se tuvieron que adecuar. Cabe señalar que los elementos de acero del armado de la zapata no tuvieron instrumentación interna alguna.



Fig. 2.5.10 Armado de la zapata (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En cuanto al armado correspondiente a las columnas se tuvo especial cuidado en no dañar la instrumentación en las barras y estribos. El primer paso fue a la colocación de las barras longitudinales y la verificación de sus medidas de acuerdo con la disposición del acero de refuerzo. Una vez posicionadas adecuadamente se situaron y aseguraron los estribos (Fig. 2.5.11). Después se midieron las distancias entre los elementos del armado para verificar que coincidieran con las requisiciones y finalmente se dio por terminada esta etapa (Fig. 2.5.12) del proceso constructivo.



Fig. 2.5.11 Detalle de los estribos en el armado de la columna (Palma, 2022 - 2023)



Fig. 2.5.12 Armado de refuerzo de la columna y zapata (Palma, 2022 - 2023)

2.5.2.2 Elaboración de cimbra

La cimbra de los especímenes se construyó de acuerdo con los cálculos realizados en las secciones 2.4.4.1 y 2.4.4.2. Cada cuerpo, es decir, columna y zapata, se construyó con una configuración de madera diferente y en diferentes etapas, ya que el colado así lo requirió.

El primer paso consistió en la preparación del sitio. La zona donde se colocó la cimbra fue despejada de cualquier material o elemento que pudiera afectar su nivel al inicio de la construcción. Además, se colocó una capa de plástico debajo de las hojas de triplay que sirvieron como base de la cimbra, con el propósito de proteger la losa del laboratorio y prevenir la adherencia del concreto a esta.

La base de la cimbra fue formada por dos hojas de triplay de $\frac{3}{4}$ " , donde se trazaron e hicieron los orificios de los tubos de PVC por los que se hizo el postensado de los especímenes con la losa. Para evitar que el concreto se adhiriera a la cimbra, se aplicó aceite desmoldante sobre la superficie de la cimbra antes de verter el concreto, ayudando a crear una barrera que impidió la adherencia del concreto (Fig. 2.5.13). Después de que todas las caras fueron debidamente engrasadas se hizo la colocación y sujeción de los barrotes y polines, así como las hojas de triplay que formaron el cajón de madera de la zapata (Fig. 2.5.14). Fue usado alambroón para poder asegurar todos los elementos.



Fig. 2.5.13 Aplicación de aceite desmoldante en la cimbra (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 2.5.14 Cajón de cimbra de la zapata (Palma, 2022 - 2023)

Después del colado de la columna, comenzó la construcción de la cimbra de las columnas, la cual fue colocada el día anterior al colado de este segundo elemento, se esperaron dos días después del colado de la zapata para poder colocar la cimbra en la posición adecuada y hacer los ajustes necesarios, para al día siguiente colar el elemento. A continuación en la Fig. 2.5.15 se observa la cimbra de la columna en sitio.



Fig. 2.5.15 Cimbra de la columna (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

2.5.2.3 Colocación del concreto de las zapatas y las columnas

En busca de garantizar el buen desempeño del concreto y que la resistencia correspondiera con lo requerido, se siguieron los procedimientos de la NMX-C-159-ONNCE-2004 (Gobierno Federal, 2004) plasmados en la publicación “Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio” (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2011).

El primero de los pasos por seguir previo al proceso de colado fue la preparación del sitio de trabajo a través de la limpieza y nivelación de las áreas donde se colocó la cimbra.

El colado de las zapatas comenzó una vez llegada la olla de concreto, inmediatamente se revisó que el informe técnico coincidiera con los datos y cantidades solicitadas, después de corroborarlo se pidió al operador girar la olla durante 5 min. Seguido, se sacó de la olla lo equivalente a una carretilla de concreto, el cual fue tirado. Se volvió a girar la olla durante 2 min para lograr mayor homogeneidad en la mezcla. Posteriormente, se realizó la prueba de revenimiento y al obtener un valor de 16 cm se prosiguió con el vertido de concreto (Fig. 2.5.16) en las zapatas de los especímenes. Simultáneo a este colado, fueron elaborados especímenes cilíndricos con los que se buscó probar la resistencia del concreto (2.6 Pruebas de laboratorio de los materiales: Caracterización de propiedades del concreto y acero en el programa experimental).

El concreto se dispuso en capas con el fin de prevenir la segregación y asegurar un llenado completo de todos los espacios requeridos, garantizando al mismo tiempo una compactación adecuada en cada una de las capas. Después de verter cada capa, se introdujo el vibrador de manera vertical durante varios minutos, evitando en contacto con las paredes de la cimbra. Este procedimiento se repitió al verter las capas sucesivas de concreto, con la diferencia de que el vibrador no penetró más de 5 cm en la capa inferior inmediata.



Fig. 2.5.16 Colado del concreto en las zapatas (Palma, 2022 - 2023)

Luego del vibrado, se dio el acabado final del concreto según las especificaciones del proyecto, alisando la superficie. El acabado final (Fig. 2.5.17) se llevó a cabo después de que el concreto fue vertido, vibrado y ha comenzado a fraguar. El objetivo principal de esta fase fue lograr una superficie lisa, uniforme y estéticamente agradable.



Fig. 2.5.17 Acabado del concreto en la zapata (Palma, 2022 - 2023)

Al pasar 3 d del colado de las zapatas, se realizó el proceso de colado para las columnas, el cual se llevó a cabo con ayuda de una bacha para vaciar y distribuir el concreto de manera controlada en áreas específicas durante el proceso de construcción, facilitando el alcance de la altura necesaria. De igual manera, el procedimiento se llevó a cabo a cabo en capas, repitiendo el mismo proceso de vibrado que en el colado de las zapatas. En la siguiente figura (Fig. 2.5.18), se muestra el colado con auxilio de la bacha.



Fig. 2.5.18 Colado de las columnas (Palma, 2022 - 2023)

2.5.2.4 Curado del concreto

El proceso de curado del concreto (American Concrete Institute, 2022) se llevó a cabo después del colado, implica mantener una humedad adecuada y mantener condiciones de temperatura controladas durante un período de tiempo determinado para garantizar que el concreto alcance su máximo nivel de resistencia y durabilidad. Para mantener un buen rendimiento a lo largo del tiempo y prevenir la fisuración prematura, es esencial un curado adecuado.

Se optó por el método de riego para el curado de los especímenes, aplicando agua en las superficies de concreto, asegurando que siempre estuvieran húmedas. El curado fue oportuno, continuo y uniforme.

Los modelos se descimbraron después de 7 d a partir del colado de las columnas. Se verificó que la instrumentación interna estuviera en buenas condiciones mediante el uso de un multímetro. Finalmente, en la siguiente imagen (Fig. 2.5.19) se observan los especímenes después de todo su proceso constructivo exceptuando elementos externos como el encamisado y su instrumentación.



Fig. 2.5.19 Especímenes curados y fraguados (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

2.5.3 Encamisado metálico

La sección 2.5.3 está dedicada a la descripción de todas las etapas relacionadas al encamisado metálico. Después del procedimiento ahondado en estas líneas, los especímenes estaban listos para ser instrumentados externamente y preparar los modelos para las pruebas.

2.5.3.1 Construcción de encamisados metálicos

Después de que los modelos fraguaron exitosamente, se dio pie a iniciar la construcción de los encamisados conformados por elementos metálicos;

soleras y ángulos. Los dos encamisados fueron construidos en sitio en el LEG del CENAPRED, iniciando con el posicionamiento de las solera inferiores en las cuatro caras, para poder soldar los ángulos y continuar el armado del resto de las camisas. La distancia entre soleras fue de 42.5 centímetros a eje de los elementos. La variación de las camisas fue en el ancho del ala del ángulo, sin embargo el proceso constructivo fue el mismo.

A continuación se muestran las Fig. 2.5.20 y Fig. 2.5.21 en las que se aprecia la disposición del acero referente a las camisas.

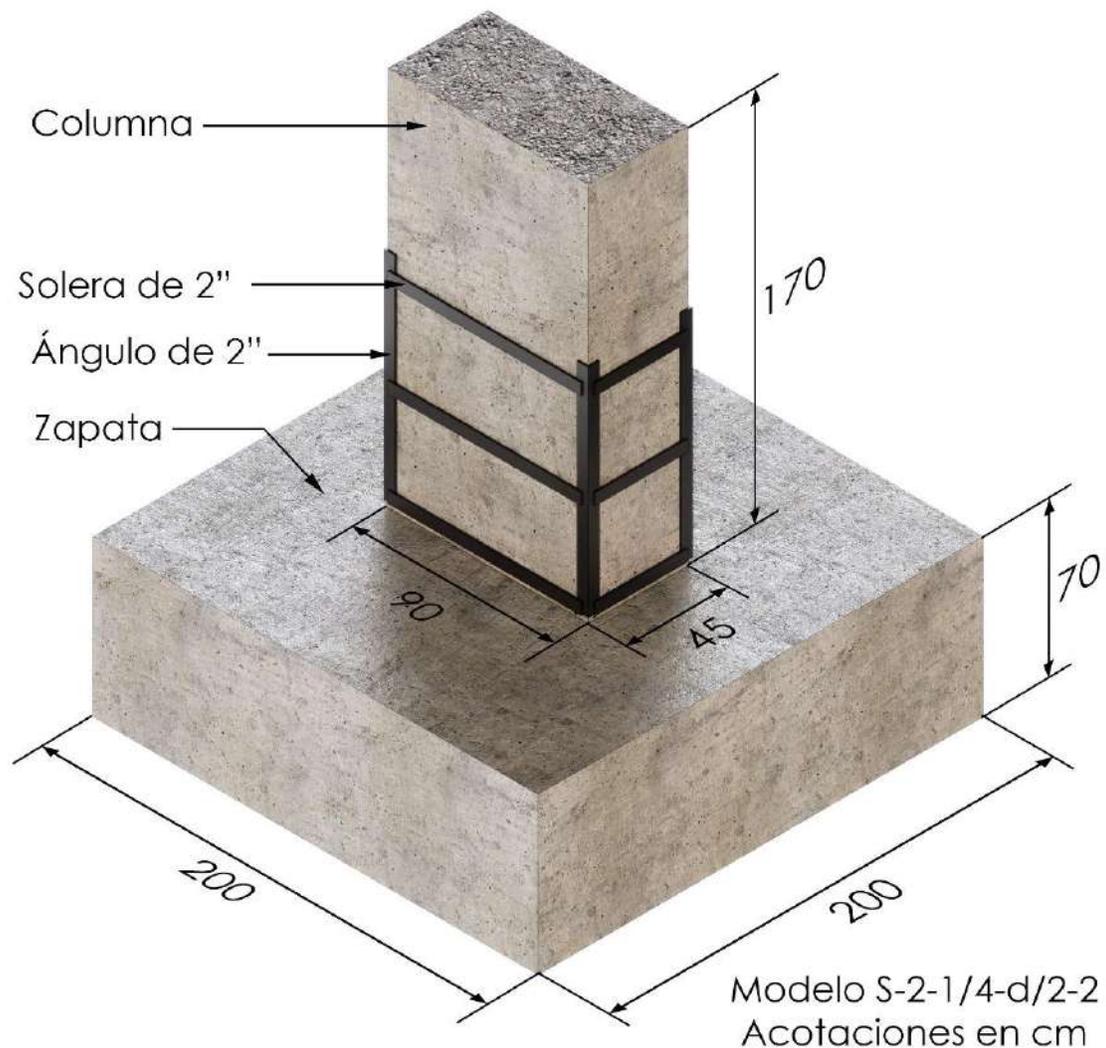


Fig. 2.5.20 Disposición del encamisado metálico C-2

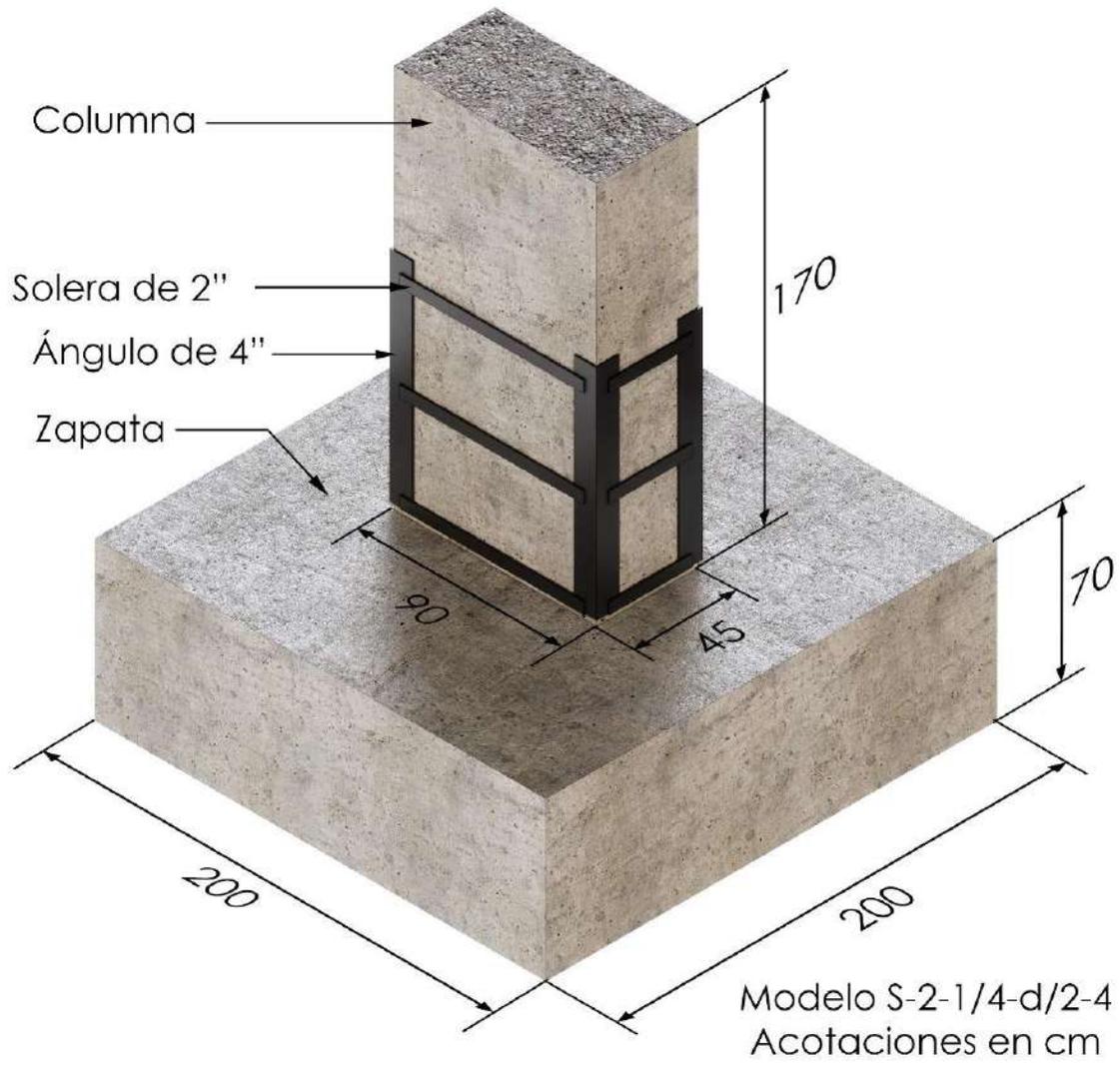


Fig. 2.5.21 Disposición del encamisado metálico C-4

Las siguientes imágenes muestran el proceso constructivo de los encamisados de acero (Fig. 2.5.22).



Fig. 2.5.22 Proceso constructivo del encamisado metálico (Palma, 2022 - 2023)

La soldadura usada en el encamisado metálico fue de filete. En el caso del encamisado metálico, la soldadura de filete (Fig. 2.5.23) se utilizó para unir las piezas de metal que forman la camisa, fue realizada de acuerdo con las normas de seguridad vigentes. El soldador certificado utilizó equipo de protección personal, como guantes, gafas y casco.

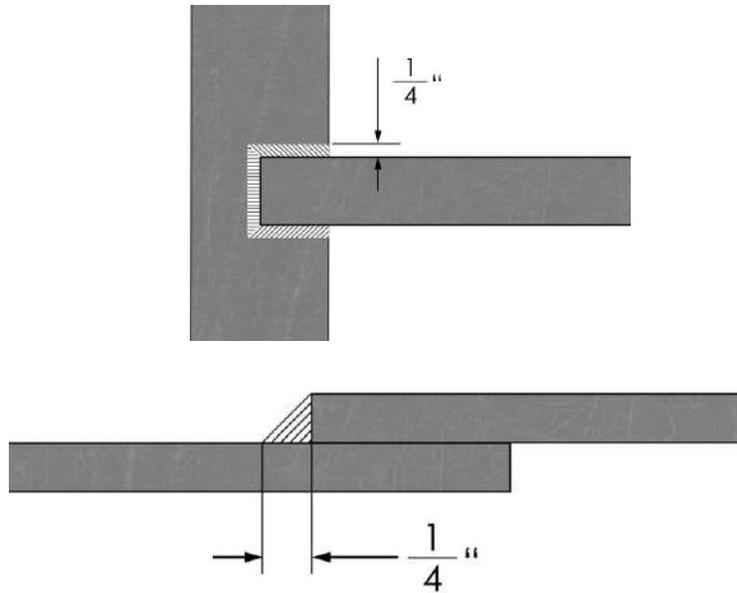


Fig. 2.5.23 Detalle de la soldadura en los encamisados

2.5.3.2 Unión concreto-acero

La unión de concreto con el acero se realizó siguiendo la normativa mencionada en la sección 2.4.6. Para lo que se preparó la columna de concreto para recibir el grout, limpiando y removiendo el polvo de la superficie. Después se posicionó y alineó la camisa metálica alrededor del elemento de concreto y se hizo la cimbra de acuerdo con las Fig. 2.5.20 y Fig. 2.5.21, colocando una calza en la base de la columna para poder dejar la separación indicada en los planos. El grout de la marca Sika fue preparado como lo indicó su ficha técnica (SikaGrout, 2014) y colocado entre la columna y la camisa como lo indican las siguiente figuras (Fig. 2.5.24 y Fig. 2.5.25).

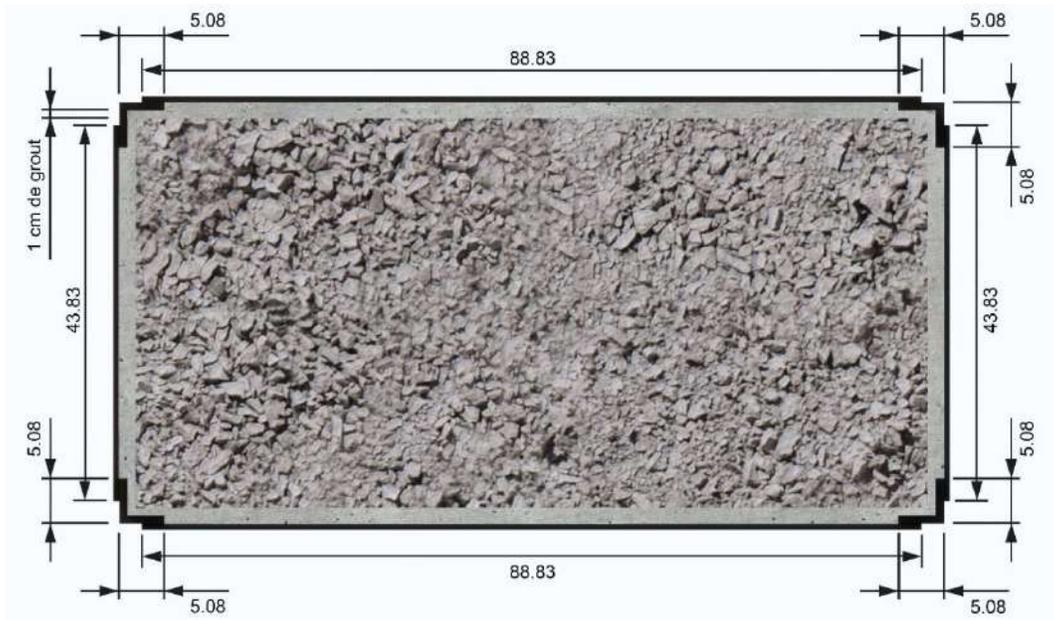


Fig. 2.5.24 Vista en planta de la camisa de acero en C-2 y disposición del grout en cm

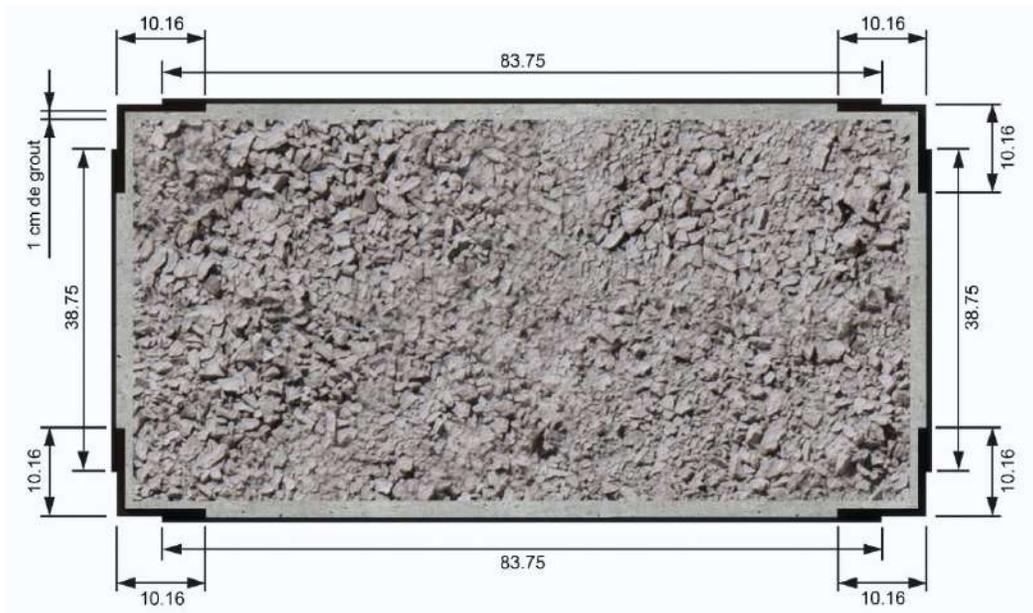


Fig. 2.5.25 Vista en planta de la camisa de acero en C-4 y disposición del grout en cm

En la siguiente figura (Fig. 2.5.26) se muestra el proceso de la colocación de la cimbra y el grout.



Fig. 2.5.26 Proceso constructivo de la colocación del grout (Palma, 2022 - 2023)

2.5.4 Instrumentación externa

A diferencia del proceso y dispositivos usados en la colocación de la instrumentación interna descrito en 2.5.1, la instrumentación externa fue colocada como último paso indispensable previo a la prueba. Fueron colocados transductores de desplazamiento con los siguientes rangos de medición:

Tabla 22. Descripción de la instrumentación externa

| Tipo de Transductor | Cantidad [pzas] | Distribución |
|---------------------|-----------------|--|
| CDP – 50 mm | 6 | 6 instrumentos verticales en la cara sur |
| CDP – 25 mm | 10 | 4 instrumentos horizontales y 4 instrumentos diagonales en la cara sur |
| SDP – 200 mm | 1 | En la altura de la aplicación de la carga cara oeste |

| Tipo de Transductor | Cantidad [pzas] | Distribución |
|-------------------------|-----------------|---|
| SDP – 100 mm | 2 | Instrumento a la mitad de la aplicación de carga cara oeste |
| SDP – 50 mm | 1 | Instrumento en la cara lateral de la zapata de cimentación |
| Micrómetros de carátula | 8 | Instrumentos en las caras laterales en determinadas alturas |

Para la colocación de los instrumentos externos, se hicieron seis orificios en tres diferentes alturas señaladas en la Fig. 2.5.27 y Fig. 2.5.28, de manera que se tuvieron dos orificios en cada nivel, esto para poder colocar barras roscadas con resina epóxica y poder armar un marco en el que se colocó la instrumentación externa en la cara sur.

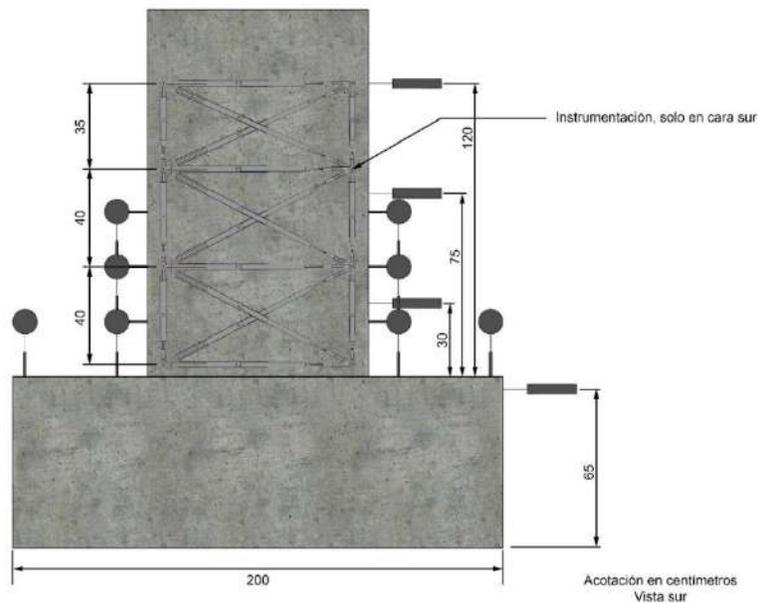


Fig. 2.5.27 Instrumentación externa cara sur con deformímetro de desplazamiento DHL-3

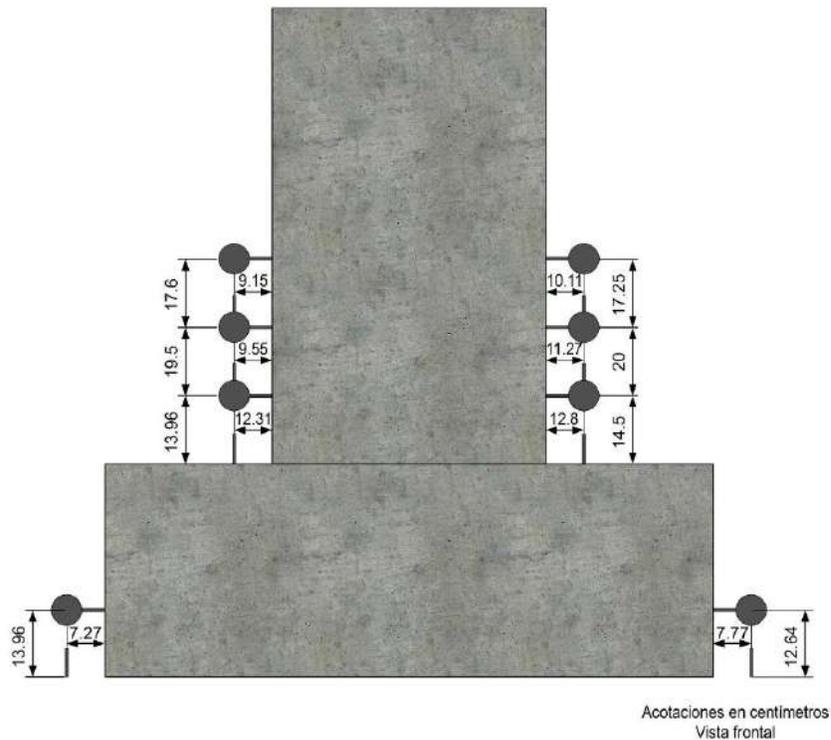


Fig. 2.5.28 Instrumentación externa cara sur con deformímetros de carátula en la zapata

En la sección 2.5.5 se hace referencia a la instalación de deformímetros como instrumentación externa en las camisas metálicas. En los apartados individuales de los especímenes, se describe la disposición de estos dispositivos de medición.

2.5.5 Preparación previa a la prueba experimental

Tras alcanzar la resistencia máxima a los 28 días desde el colado de las columnas, se procedió a preparar las pruebas correspondientes. Posteriormente, en aquellos casos en que fuera necesario, se procedió a instalar las camisas de acero, seguido de la colocación de la instrumentación externa. Después, se aplicó una capa de pintura de color blanco sobre los especímenes, seleccionándose dicho color debido a su capacidad para facilitar la detección de fisuras y daños a lo largo de los ensayos. Posteriormente, se colocó instrumentación externa mediante deformímetros en la camisa, siguiendo el mismo proceso descrito en 2.5.4 hasta la colocación de la cinta vulcanizadora, ya que debido a la superficie plana de

las camisas no es necesario realizar los pasos restantes. Asimismo, con el propósito de mejorar la visualización del daño en los elementos metálicos, se aplicó una capa de pintura a base de cal sobre los encamisados.

2.6 Pruebas de laboratorio de los materiales: Caracterización de propiedades del concreto y acero en el programa experimental

El apartado 2.6 del programa experimental se centra en las pruebas de laboratorio destinadas a caracterizar las propiedades del concreto y del acero, materiales de los cuales fueron construidos los especímenes. Estas pruebas son esenciales para evaluar la calidad y la resistencia, brindan datos útiles que ayudarán a la investigación. Esta sección describe las metodologías utilizadas y los resultados obtenidos.

2.6.1 Ensayes de concreto

La evaluación del concreto en sus estados fresco y endurecido es esencial para tener éxito en el programa experimental. Este apartado se centra en los ensayos para analizar el comportamiento del concreto desde su mezcla inicial hasta su estado final, lo que nos permite comprender sus propiedades en cada etapa.

2.6.1.1 Ensayes de concreto en estado fresco

Prueba de revenimiento

En las siguientes líneas se describe el método usado para realizar la prueba de revenimiento basado en ACI-211.1-19 (American Concrete Institute, 2019). La prueba de revenimiento tiene el objetivo de calcular la distancia a la que un cono de Abrams se hunde cuando se retira de una muestra de concreto. Este ensayo evalúa la consistencia y trabajabilidad del concreto fresco. Los resultados de la prueba de revenimiento son cruciales para garantizar que el concreto cumpla con las especificaciones requeridas.

Las herramientas necesarias para realizar la prueba son las siguientes:

- Cono de Abrams estándar para pruebas de revenimiento (10 cm de diámetro en la parte superior x 20 cm de diámetro en la parte inferior x 30 cm de altura)
- Barra con punta redondeada (60 cm de largo x 16 mm de diámetro)
- Cucharón
- Placa de acero (50 x 50 cm)
- Regla o flexómetro

Los pasos seguidos fueron los siguientes:

1. Limpieza del área de trabajo – se buscó garantizar una superficie plana y horizontal sobre la cual se puede hacer adecuadamente la prueba.
2. Posicionamiento de la placa de acero – la placa fue posicionada en el área de la prueba.
3. Limpieza del cono de revenimiento – se humedeció con agua y fue colocado sobre la placa de acero.
4. Toma de muestra de concreto fresco – se tomó una muestra de tamaño suficiente para llenar el cono.
5. Llenado de la primera capa – para comenzar el llenado del cono, quien estuvo a cargo de realizar la prueba se paró sobre los estribos y verter el concreto a $1/3$ del volumen del cono.
6. Varillado de la capa – el varillado se realizó 25 veces, empujando la barra dentro del cono de manera definida.
7. Llenado de la segunda capa – el concreto fue vertido hasta $2/3$ del cono.
8. Varillado de la capa – se varilló 25 veces hasta la parte superior de la capa anterior.
9. Llenado de la tercera capa – para este paso se vertió el concreto hasta que se desparrame sobre el cono.
10. Varillado de la capa – con el concreto desparramado, se varilló 25 veces hasta la parte superior de la capa anterior.
11. Nivelado de la superficie - la barra se ocupó en este paso para aplanar la superficie del cono.

12. Limpieza de alrededores – se limpió la parte superior del cono y el perímetro de la base.
13. Levantamiento del cono – se dejó de pisar los estribos y el cono fue levantado de forma recta, procurando evitar el movimiento del concreto.
14. Posicionamiento del cono y la barra – el cono se colocó de forma invertida a un costado de la muestra de concreto y la barra se posicionó de forma horizontal sobre el cono
15. Mediciones – se tomó la medida vertical entre el cono de concreto y la barra en posición horizontal.
16. Verificación de los resultados – después de obtener la medida se compararon las medidas con las requisiciones y en caso de estar dentro de las tolerancias, se da por terminada la prueba.

Para el programa experimental de esta tesis, se hicieron dos pruebas de revenimiento, de las cuales se muestran los resultados a continuación (Tabla 23):

Tabla 23. Resultados de revenimiento

| Olla | Revenimiento [cm] |
|--------------|-------------------|
| 1 – zapatas | 17.5 |
| 2 – columnas | 15 |

Se concluyó que las pruebas fueron satisfactorias siguiendo con los requerimientos de los materiales mencionados en 2.3.1 Materiales. En la Fig. 2.6.1 se muestra la medición de la segunda prueba.



Fig. 2.6.1 Prueba de revenimiento (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Prueba de compresión (procedimiento realizado en concreto fresco)

La prueba evalúa la resistencia a compresión del concreto cuando ha fraguado y alcanzado su resistencia máxima a los 28 días. Sin embargo, pese a que es una prueba que finaliza cuando el material está endurecido se inicia con el concreto fresco. En las siguientes líneas se describe el proceso, comenzando con las herramientas necesarias para llevar a cabo la prueba:

- Cilindros de 15 cm de diámetro x 30 cm de altura (guardando una relación 2:1 entre sus dimensiones)
- Cucharón
- Barra con punta redondeada (60 cm x 16 mm)
- Placa de acero
- Martillo de goma
- Llana de acero

Los pasos mencionados a continuación se llevaron a cabo para la prueba de compresión con el concreto en estado fresco son los siguientes:

1. Preparación de la zona de trabajo – se despejó el área suficiente plana y segura para poder realizar los especímenes y después situarlos en un lugar con condiciones adecuadas para su fraguado.
2. Engrasado de los cilindros – los moldes fueron engrasados con aceite en sus paredes interiores.
3. Etiquetado – previo a comenzar el muestreo, se etiqueta y nombra detenidamente los cilindros, pues es de gran importancia tenerlos identificados para su segunda etapa en estado endurecido.
4. Toma de muestra de concreto fresco – fue tomada cantidad suficiente de concreto acarreado por una carretilla para poder llenar los cilindros.
5. Vertido de la primera capa de concreto – el cilindro fue llenado a $1/3$ de su altura.
6. Varillado de capa – se varilló 25 veces sin tocar la base del molde.
7. Golpes con el martillo de goma – se dieron de 10 a 15 golpes distribuidos en el perímetro del cilindro.
8. Vertido de la segunda capa de concreto – se colocó concreto hasta $2/3$ de la altura del cilindro.
9. Varillado de capa – se hicieron 25 penetraciones con la barra procurando entrar 10 mm.
10. Golpes con el martillo de goma – se dieron de 10 a 15 golpes más distribuidos en el cilindro.
11. Vertido de la tercera capa de concreto – el cilindro fue llenado más allá de su tope, desparramando el concreto.
12. Varillado de capa – se varilló las últimas 25 veces, buscando penetrar aproximadamente 10 mm.
13. Golpes distribuidos – se dieron de 10 a 15 golpeteos en las paredes del molde.
14. Enrasado – con ayuda de la barra o una llana, se procede a nivelar la parte superior del cilindro y se limpia el molde en caso de tener concreto en sus alrededores.
15. Curado – para garantizar que los resultados coincidan, los cilindros de concreto deben llevar el mismo procedimiento que los elementos

colados, por lo que estos se fraguan y después de 28 días estarán listos para su prueba a compresión.

En este proceso llevado a cabo con el concreto en estado fresco, no se obtienen resultados. Seguido, en la Fig. 2.6.2 se muestra una imagen del proceso de elaboración de cilindros. Fueron elaborados 3 muestras por elemento a probar (3 cilindros por zapata y 3 por columna).



Fig. 2.6.2 Elaboración de cilindros de concreto (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

2.6.1.2 Ensayes de concreto en estado endurecido

Prueba de compresión (procedimiento realizado en concreto endurecido)

Retomando las secciones de Materiales y Ensayes de concreto en estado fresco, las resistencias de concreto para la zapata y la columna fueron de 350 kg/cm² y 200 kg/cm² respectivamente.

Después de 28 días del colado de las columnas, los cilindros estuvieron listos para ser ensayados, sin embargo, se optó por probar las muestras de las columnas pasados estos 28 días y los correspondientes a la columna después de haber concluido las pruebas experimentales de los especímenes.

Las probetas cilíndricas fueron ensayadas de acuerdo con la NMX C-083 ONNCCE (ONNCE, 2014), donde se establece que la máquina de ensayo debe tener dos bloques de acero para aplicar cargas, su superficie de contacto no se debe deformar al aplicar las cargas necesarias. Según la norma, los cilindros se cabecearon con cemento de yeso (*Hydro-stone*), garantizando que las superficies estuvieran planas, paralelas y así distribuir uniformemente la carga aplicada uniformemente en la sección transversal. Las pruebas se realizaron controlando la carga, con una velocidad constante de 5 t/min hasta la falla.

A continuación, en la siguiente tabla se encuentran los resultados promedio de las resistencias obtenidas, derivadas de la prueba:

Tabla 24. Resumen de las pruebas de compresión en el concreto

| Concreto | fc' requerido [kg/cm ²] | fc' promedio experimental [kg/cm ²] |
|----------|-------------------------------------|---|
| Zapatas | 350 | 404 |
| Columnas | 200 | 320 |

Con los resultados anteriores, se concluye que los resultados cumplen los requisitos de resistencia solicitados.

Las siguientes figuras (Fig. 2.6.3, Fig. 2.6.4 y Fig. 2.6.5) muestran las probetas cilíndricas en las pruebas de compresión en el concreto:



Fig. 2.6.3 Cilindro colocado para ser probado a compresión (Palma, 2022 - 2023)



Fig. 2.6.4 Cilindro al final de la prueba de compresión (Palma, 2022 - 2023)



Fig. 2.6.5 Probeta cilíndrica con conos formados en ambos sentidos (Palma, 2022 - 2023)

El modo de falla del cilindro (Fig. 2.6.5) llevó a la conclusión que las probetas fueron realizadas correctamente.

2.6.2 Ensayes de acero

La sección 2.6.2 Ensayes de acero examina en detalle los procedimientos y las consideraciones consideradas en las pruebas a tensión, con el objetivo de verificar la calidad del acero usado en el refuerzo y en las camisas para el proyecto.

2.6.2.1 Ensayes de acero en barras

Como se ha mencionado anteriormente, se usaron barras corrugadas del no. 8 en el acero longitudinal, mientras que para los estribos se usaron del no. 3, más información de sus propiedades se puede encontrar en 2.3.1.3 Barras del acero de refuerzo. Para su muestreo se cortaron tres probetas de 75 cm de longitud de cada tipo de barras.

El procedimiento realizado fue el siguiente:

1. Preparación de la muestra – se verificó que las medidas fueran adecuadas para la prueba y se instrumentaron con deformímetros de 3 y 5 mm.
2. Posicionamiento de la probeta en la máquina universal – se ajustó la máquina y se colocó la probeta de manera alineada dentro de las mordazas de sujeción.
3. Aplicación de la carga – se aplicó una carga gradual y uniforme a una velocidad de 5 t/min.
4. Registro del fallo y almacenamiento de datos – las probetas fueron llevadas a la falla y al finalizar, los datos se almacenaron para su posterior análisis.

Gracias a los resultados recabados fue posible identificar los resultados finales del acero plasmados en la siguiente tabla:

Tabla 25. Resumen pruebas a tensión en acero de refuerzo

| Tipo de barra | f_y [kg/cm ²] | f_u [kg/cm ²] |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|
| No. 3 | 4 498.4 | 6 544 |
| No. 8 | 4 696.2 | 6763 |

De igual manera, los deformímetros colocados en las barras y los resultados arrojados por la máquina universal permitieron la construcción de las curvas esfuerzo-deformación que se muestran a continuación (Fig. 2.6.6, Fig. 2.6.7, Fig. 2.6.8, Fig. 2.6.9 y Fig. 2.6.10):

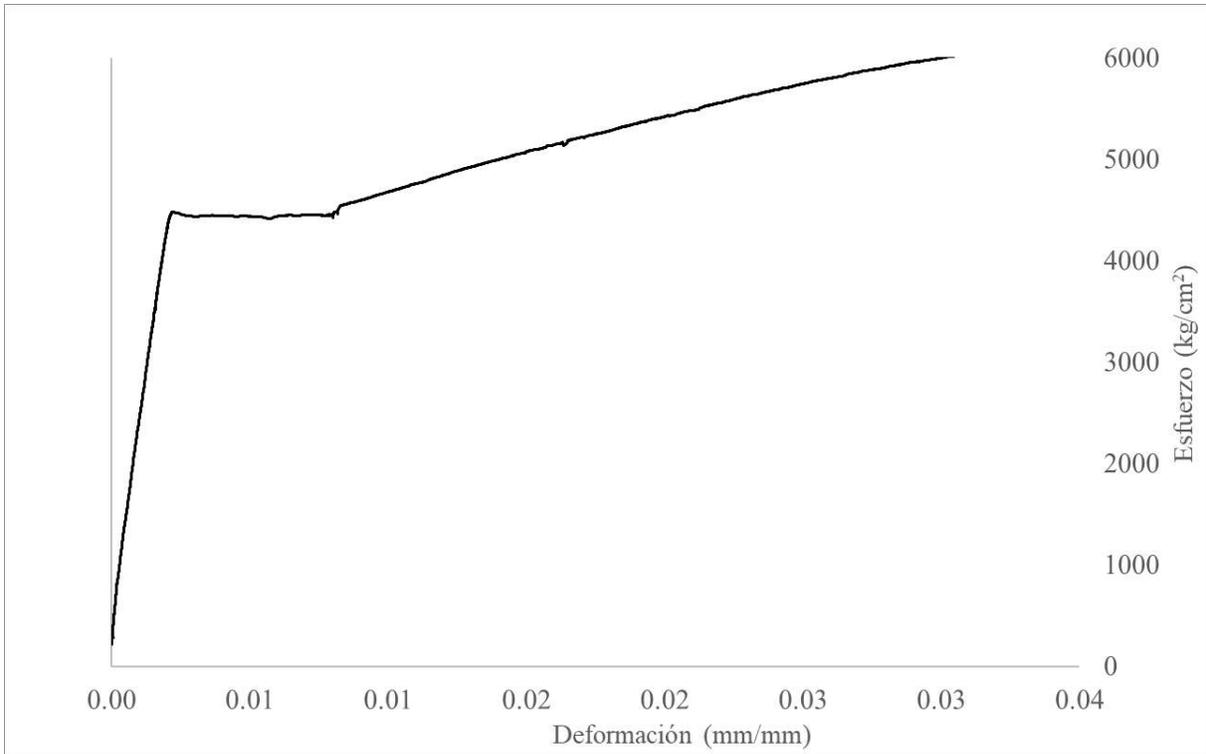


Fig. 2.6.6 Curva esfuerzo-deformación Probeta 1 - Barra #8

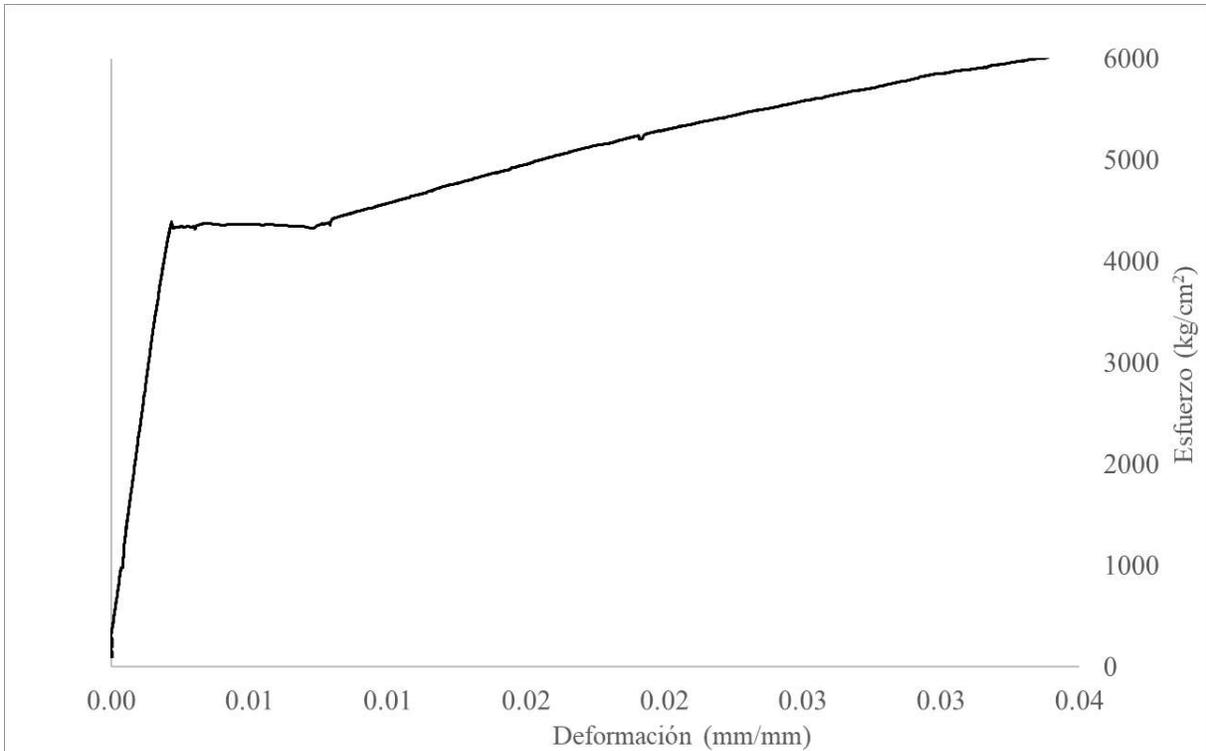


Fig. 2.6.7 Curva esfuerzo-deformación Probeta 2 - Barra #8

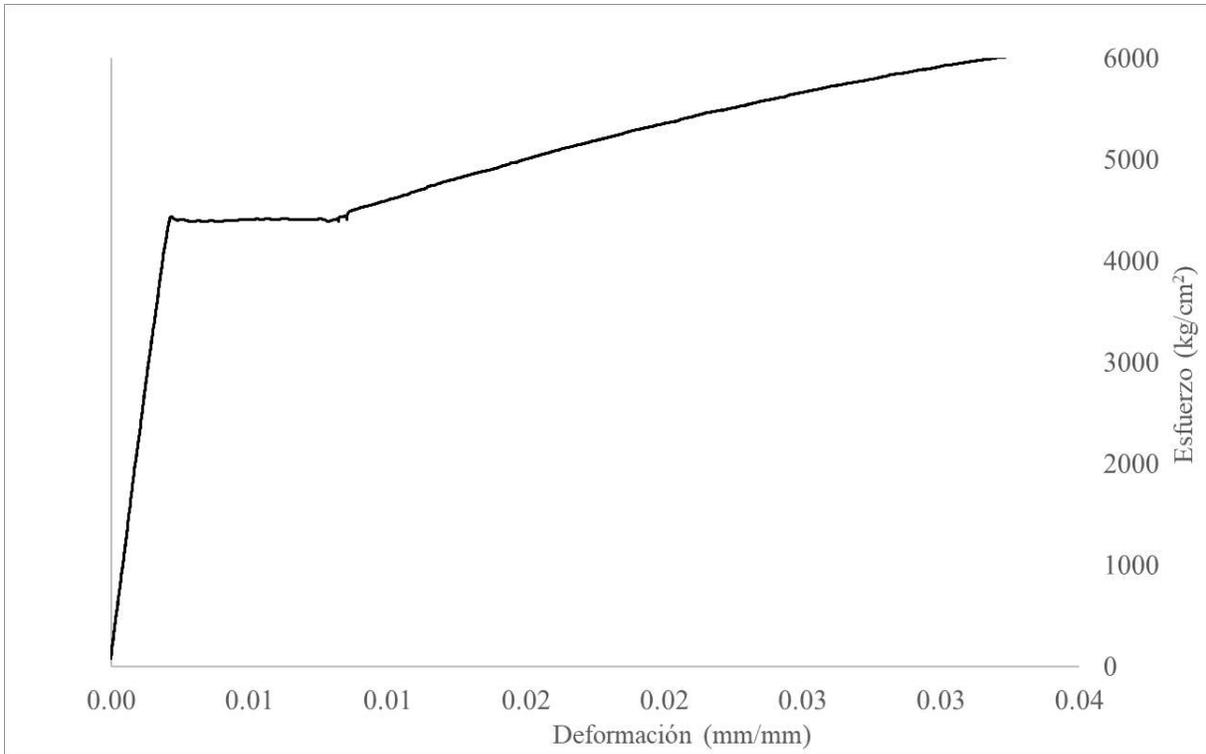


Fig. 2.6.8 Curva esfuerzo-deformación Probeta 3 - Barra #8

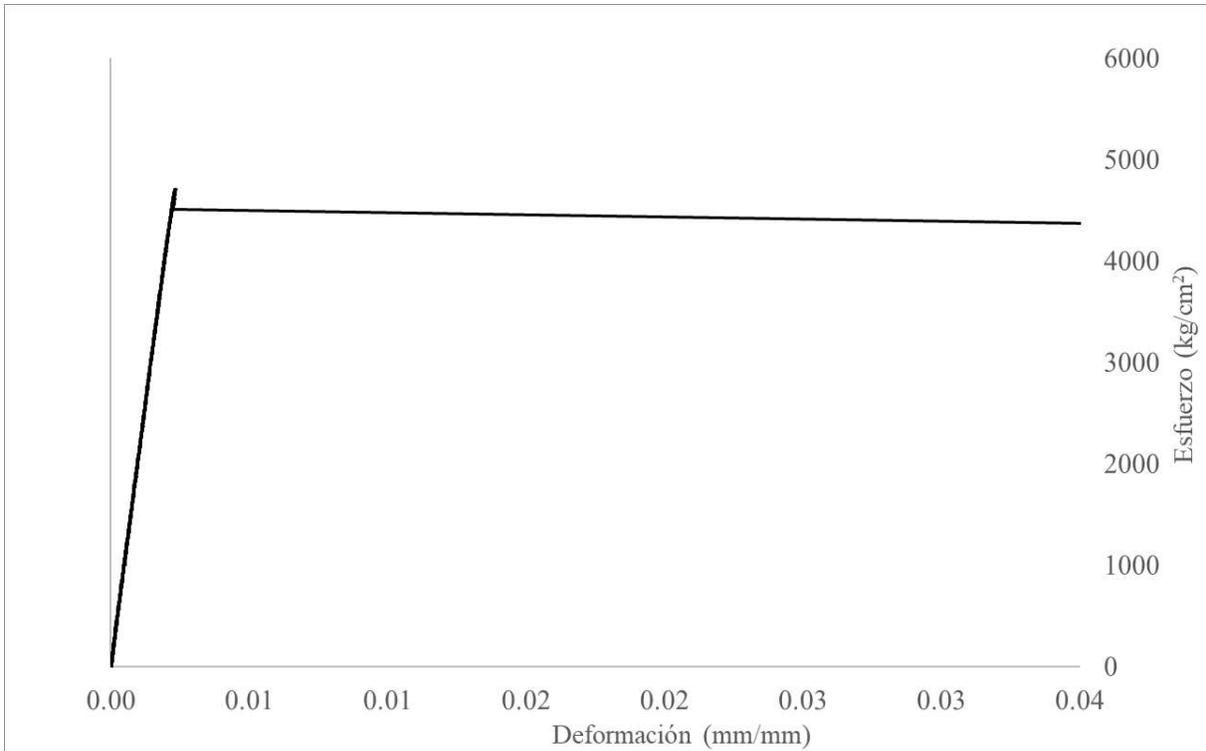


Fig. 2.6.9 Curva esfuerzo-deformación Probeta 1 - Barra #3

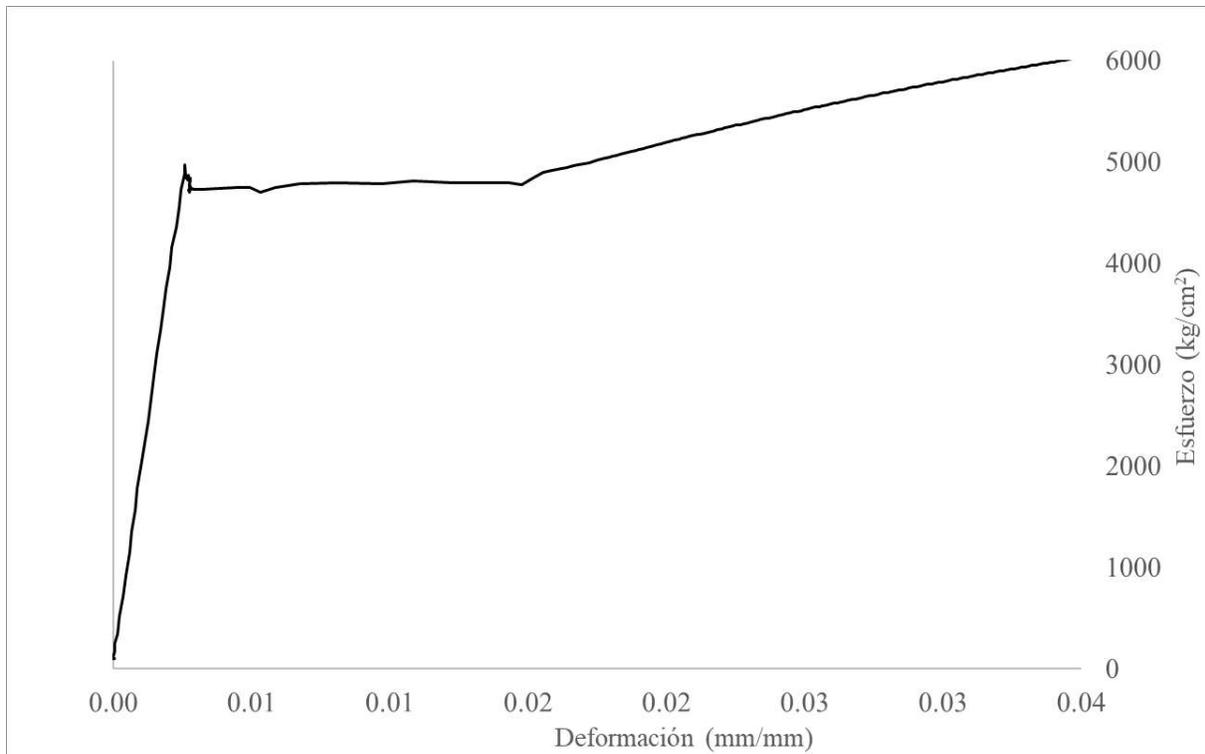


Fig. 2.6.10 Curva esfuerzo-deformación Prueba 2 - Barra #3

El valor obtenido de la deformación en la fluencia del acero fue registrado y transformado a microdeformaciones mediante la multiplicación del valor obtenido por 10^6 . Para obtener los límites de las microdeformaciones que se tomaron para el análisis de los deformaciones en el punto de fluencia se hizo el promedio de todos los valores obtenidos, obteniendo un valor de 2300 microdeformaciones con unidades de (mm/mm).

La siguiente figura (Fig. 2.6.11) ilustra la falla de una barra del No. 3 al término de la prueba a tensión a la que sometida:



Fig. 2.6.11 Falla en la probeta a tensión (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

2.7 Dispositivo de carga

El objetivo de la aplicación de la carga lateral en los ensayos fue representar las solicitudes a la que es sometida una columna de concreto en un sismo, por lo que se adecuó un marco de carga que pudiera cumplir con que la carga fuera aplicada a una altura determinada, no se obstruyera la formación y propagación de grietas, y que en este se pudieran probar especímenes con características similares entre sí, pero con mayor resistencia.

En el primer ensaye, correspondiente a la columna de control denominada como O, se aplicó la carga lateral mediante un gato hidráulico de 100 t controlado por una bomba eléctrica manual. Una placa de 40 x 80 cm anclada con barras postensadas se utilizó para instalar el gato hidráulico en el muro de reacción, sin embargo, se optó por no continuar usando este sistema de aplicación de carga lateral.

Para las siguientes columnas se utilizaron dos gatos de 100 t controlados a un sistema MTS. Un sistema MTS (MTS, 2023) de gatos hidráulicos utiliza el principio de la presión hidráulica para aplicar la fuerza deseada, el sistema está conformado por 3 principales componentes:

- Cilindro hidráulico – es un tubo hueco que en un extremo tiene un pistón conectado a una bomba hidráulica que aplica presión a través de los fluidos del cilindro.
- Depósito de fluido hidráulico – es el lugar de almacenamiento del fluido para el funcionamiento del cilindro.
- Válvula de control – a través de ella se controla el flujo del fluido en el cilindro.

El sistema MTS es controlado por computadora, por lo que la aplicación de carga, así como los resultados son más certeros y exactos.

Los gatos se fijaron al muro de reacción mediante una placa con barras de 1 ¼" postensadas. Además, cada modelo se fijó a la losa a través 10 barras de 1 ¼" postensadas. En la siguiente figura (Fig. 2.7.1) se muestra la configuración usada en el marco de carga:

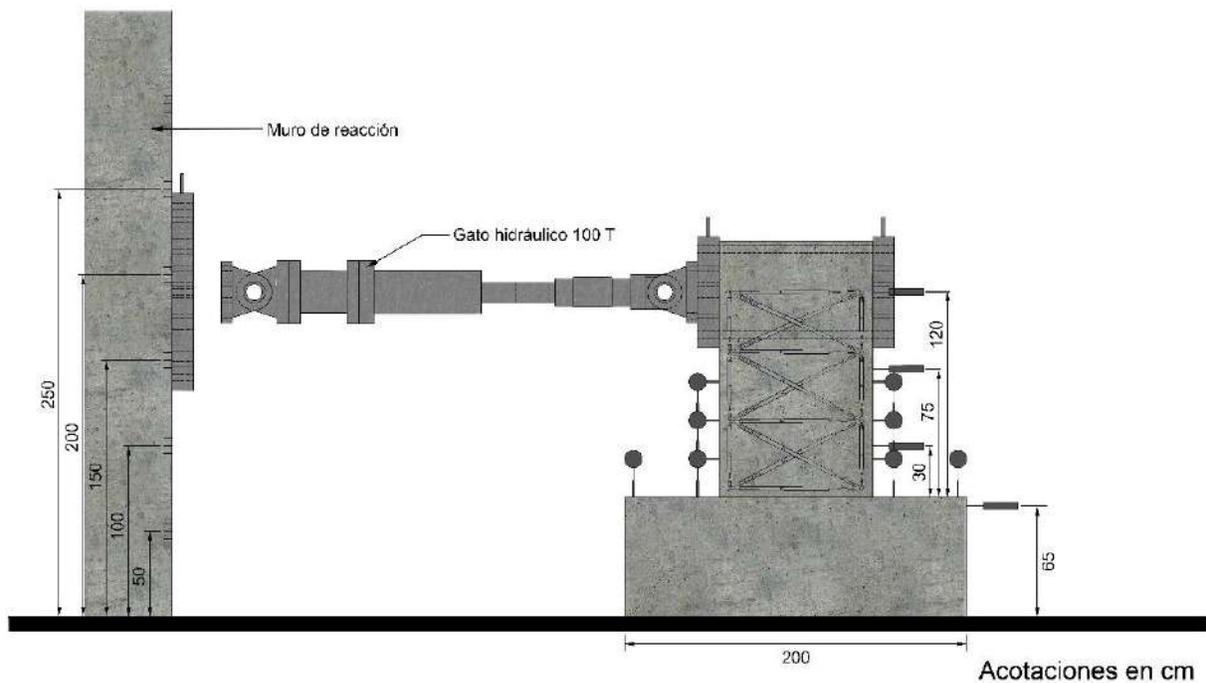


Fig. 2.7.1 Marco de carga

Para los especímenes, se colocó una capa de *Hydro-stone* de 1 cm de espesor entre la zapata de la columna y la losa de reacción para garantizar un contacto uniforme entre el marco de carga y los modelos, así como también una capa de 1 cm de espesor entre las placas y los modelos a ensayar con el mismo fin.

El funcionamiento de los gatos hidráulicos consistió en su empuje y retracción para aplicar la carga lateral. El empuje en dirección opuesta al muro de reacción fue para la aplicación de los semiciclos con signo negativo en la historia de carga, mientras que la retracción correspondió a los semiciclos positivos.

2.8 Historia de carga

El control basado en carga y el control basado en desplazamiento son las dos opciones disponibles para la metodología de determinación de la carga histórica, según las directrices del comité técnico ACI 374.

Al retomar ciertas características y condiciones del proyecto experimental realizado por Aboutaha (1994), también se llevaron a cabo los ensayos con la misma historia de carga que en su tesis describe con el propósito de asegurar la comparabilidad entre los resultados de este y del estudio mencionado.

La historia de carga consistió en la aplicación cíclica alternada de carga lateral con incrementos al término de cada ciclo hasta llegar a la falla. Los dos tipos de controles tanto por carga y por desplazamiento fue aplicada a los especímenes, primeramente la de carga comenzando con la aplicación de un ciclo de 5 t, seguido dos ciclos de 10 t y dos ciclos de 20 t. Al finalizar el control por carga, comenzó el control por desplazamiento (distorsión), aplicando dos ciclos de carga para cada valor de distorsión comenzando con una distorsión de 0.5% e incrementando en 0.5% al término de cada dos ciclos.

A continuación se observa la historia controlada por carga (Fig. 2.8.1) y desplazamiento (distorsión) (Fig. 2.8.2):

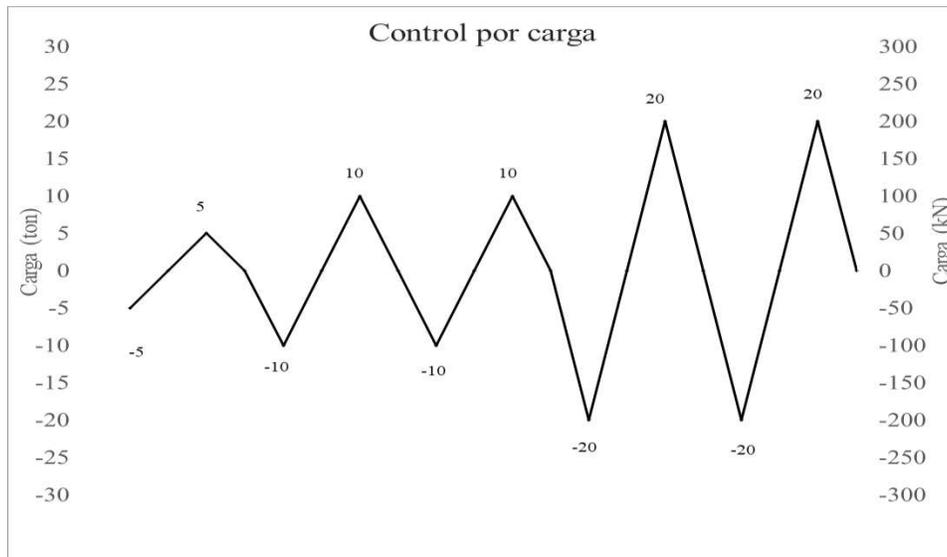


Fig. 2.8.1 Control por carga (Palma, 2022 - 2023)

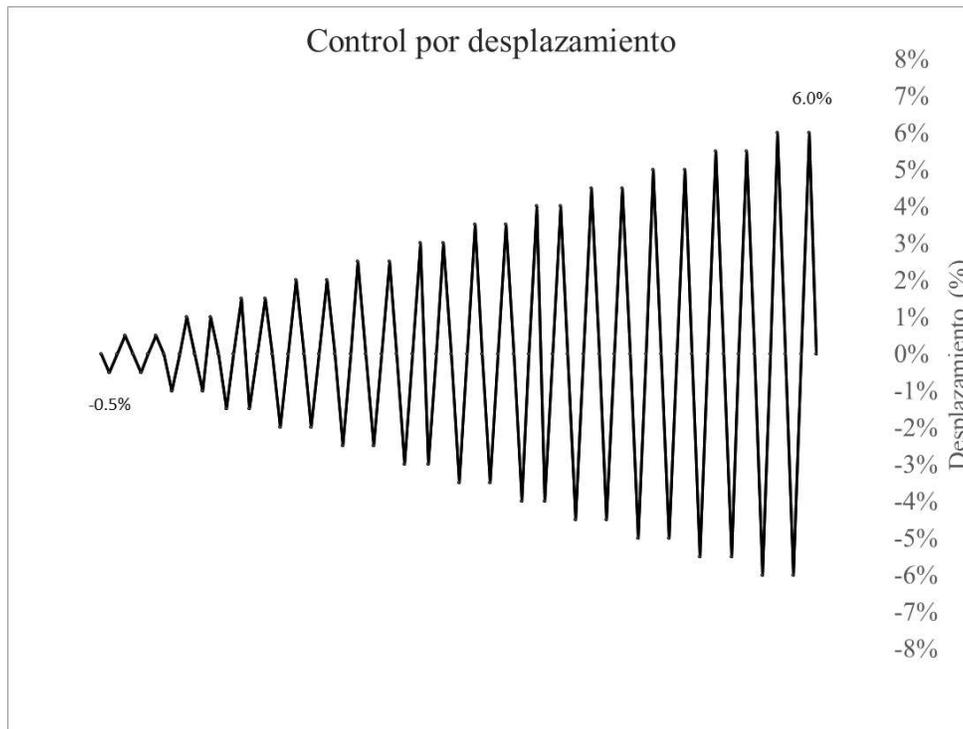


Fig. 2.8.2 Control por desplazamiento (Palma, 2022 - 2023)

A partir del inicio del control por desplazamiento (distorsión), se hizo referencia a cada semiciclo con un número positivo o negativo que lo representó a lo largo de las pruebas realizadas. En la siguiente tabla (Tabla 26), se muestra esta distribución, de la cual se hará uso en las gráficas de las columnas para identificar y ubicar de manera más sencilla cada semiciclo.

Tabla 26. Numeración de los semiciclos a cada distorsión

| Semiciclo | Distorsión (%) |
|-----------|----------------|
| -1 | -0.5% |
| 1 | 0.5% |
| -2 | -0.5% |
| 2 | 0.5% |
| -3 | -1% |
| 3 | 1% |
| -4 | -1% |
| 4 | 1% |
| -5 | -1.5% |
| 5 | 1.5% |
| -6 | -1.5% |
| 6 | 1.5% |
| -7 | -2% |
| 7 | 2% |
| -8 | -2% |
| 8 | 2% |
| -9 | -2.5% |
| 9 | 2.5% |
| -10 | -2.5% |
| 10 | 2.5% |
| -11 | -3% |
| 11 | 3% |
| -12 | -3% |
| 12 | 3% |
| -13 | -3.5% |
| 13 | 3.5% |
| -14 | -3.5% |
| 14 | 3.5% |
| -15 | -4% |
| 15 | 4% |
| -16 | -4% |
| 16 | 4% |
| -17 | -4.5% |

| Semiciclo | Distorsión (%) |
|-----------|----------------|
| 17 | 4.5% |
| -18 | -4.5% |
| 18 | 4.5% |
| -19 | -5% |
| 19 | 5% |
| -20 | -5% |
| 20 | 5% |
| -21 | -5.5% |
| 21 | 5.5% |
| -22 | -5.5% |
| 22 | 5.5% |
| -23 | -6% |
| -23 | 6% |
| -24 | -6% |
| -25 | 6% |
| -26 | -6.5% |
| 26 | 6.5% |

2.9 Captura de datos

La captura de datos desempeñó un papel fundamental en el programa experimental, ya que constituyó el cimiento del conocimiento científico y la toma de decisiones informadas. La adquisición de datos permitió recopilar información valiosa sobre fenómenos y variables específicas, lo que a su vez facilitó el análisis, la interpretación y el cumplimiento de los objetivos. Estos datos fueron esenciales para evaluar la efectividad de los encamisados metálicos, medir el impacto de las variables en el ancho del ala del ángulo, y en última instancia, obtener conclusiones sólidas. La captura de datos con precisión y consistencia proporcionó una base confiable para la toma de decisiones, la optimización de procesos y el diseño de especímenes posteriores al programa experimental incluido en esta tesis.

La instrumentación por la cual se realizó la adquisición de datos se colocó en puntos considerados relevantes para estudiar el comportamiento local y global de la estructura. Se utilizaron los siguientes tipos de instrumentos: celdas de carga, transductores de desplazamiento, y deformímetros. Los dos primeros tipos se consideraron componentes de la instrumentación externa,

mientras que el último se denominó instrumentación interna y externa dependiendo de su ubicación.

2.9.1 Instrumentación externa

En el marco del programa experimental de columnas de concreto encamisadas con elementos metálicos sometidas a cargas laterales, la instrumentación externa fue imperante e indispensable. Las celdas de carga permitieron registrar las fuerzas aplicadas y transmitidas a las columnas, brindando información fundamental sobre la capacidad de resistencia y estabilidad de los especímenes ante cargas laterales. Por su parte, los transductores de desplazamiento fueron esenciales para medir las deformaciones y desplazamientos que experimentó la columna durante los ensayos, proporcionando valiosa información sobre su comportamiento y el nivel de daño. Además, el uso de deformímetros permitió monitorear las tensiones y deformaciones superficiales, permitiendo un análisis detallado de la respuesta estructural. Esta combinación de instrumentos externos permitió una recopilación completa y precisa de datos, lo que fue esencial para comprender y evaluar el rendimiento de las columnas encamisadas y de las columnas de control.

2.9.2 Instrumentación interna

En ingeniería estructural, la instrumentación interna de acero de refuerzo utilizando deformímetros es una técnica de monitoreo muy precisa para evaluar la tensión y la deformación en elementos de construcción como vigas y columnas. La instrumentación interna del proyecto consistió en insertar los dispositivos de medición en el acero de refuerzo embebidos en los elementos de concreto de manera estratégica. Estos deformímetros registraron cuidadosamente cualquier cambio en la longitud o deformación del acero cuando se sometió a la prueba cíclica en la que se aplicó carga lateral.

El uso de deformímetros se mostró prometedor para medir las deformaciones en el acero con precisión y confiabilidad. Los instrumentos transmitieron los datos a un sistema de adquisición de datos, donde se registraron en tiempo real y se almacenaron para su posterior análisis.

3 COMPORTAMIENTO GENERAL

3.1 Introducción

La realización de un programa experimental en el marco de un proyecto como este, permitió observar el comportamiento estructural de dos columnas de concreto encamisadas con elementos metálicos y tres sin encamisados que no sería evidente en la teoría. Cabe mencionar que en México es necesario el estudio en materia de esta técnica, pues no existe la información suficiente para poder establecer un patrón de comportamiento y recomendaciones de la construcción e instalación de elementos metálicos en encamisados.

Para evaluar y conocer el desempeño de los especímenes, es importante comprender cada parámetro, por lo que en 3.2 se describirán y en los apartados sucesivos se explicará el comportamiento de cada uno de los modelos ensayados.

3.2 Definición de parámetros

Es fundamental comprender las implicaciones y significados de los parámetros siguientes:

- Distorsión
- Curva carga-distorsión
- Deformación angular
- Rotación y curvatura
- Rotación y deslizamiento de la cimentación

Lo anterior es necesario para poder interpretar los resultados de los ensayos experimentales, comprender su comportamiento, y proponer variables nuevas de estudio o modelos de comportamiento en el futuro.

3.2.1 Distorsión

Conocer la definición de distorsión y las partes que la componen es importante debido a que es un parámetro que se utilizó para poder conocer el comportamiento de cada uno de los especímenes.

La distorsión es un parámetro adimensional que mide el ángulo que se genera entre la configuración deformada y original. Se calcula como el cociente entre el desplazamiento lateral y la altura a la que se aplica la carga lateral. La distorsión es el término común para describir esta deformación.

El análisis del comportamiento y los modos de falla de una columna se puede realizar examinando las deformaciones que se producen en la estructura como resultado del corte y la flexión, por lo tanto, las deformaciones tendrán estas dos divisiones. Se tomará la misma notación para explicar la distorsión que en (Alcocer y otros, 2023). En la sección 2.5.4 se puede encontrar más información de los transductores de desplazamiento colocados sobre un marco articulado utilizados para este fin.

Δ_F desplazamiento lateral correspondiente a la flexión en cm (Fig. 3.2.1)

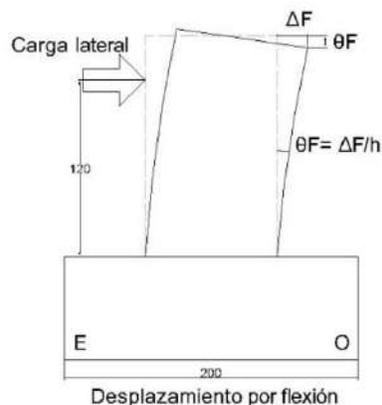


Fig. 3.2.1 Desplazamiento por flexión (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Δ_C desplazamiento lateral correspondiente al corte en cm (Fig. 3.2.2)



Fig. 3.2.2 Desplazamiento por corte (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Δ_T desplazamiento lateral total, correspondiente a la suma de los desplazamientos de flexión y corte en cm (Fig. 3.2.3)

$$\Delta_T = \Delta_F + \Delta_C$$

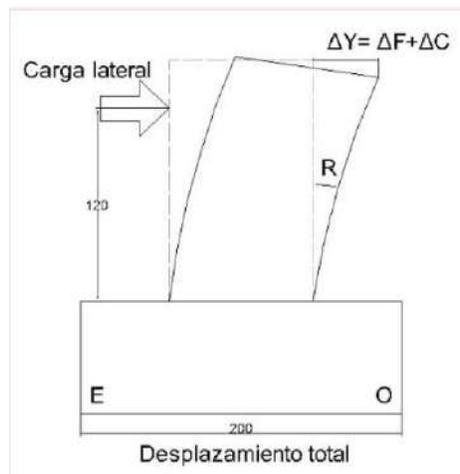


Fig. 3.2.3 Resultado de los desplazamiento por corte y flexión (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

3.2.2 Curva carga lateral-distorsión

Una curva carga lateral-distorsión es una representación gráfica de cómo la carga y la deformación de una estructura se relacionan entre sí. La curva se

calcula aplicando una carga a la estructura y midiendo la deformación. Luego se retira la carga y se repite el procedimiento cíclico. Pese a que la curva no es un parámetro, conocer su composición promueve un mayor entendimiento de la interpretación de los datos.

La forma característica de la curva es un bucle cerrado, debido a que la estructura experimenta deformaciones distintas durante la aplicación y el retiro de la carga. El comportamiento de estructuras bajo carga se analiza mediante este tipo de curvas, las cuales proporcionan información sobre su capacidad para resistir cargas, su respuesta frente a cargas repetidas y permiten tener información suficiente para el diseño de elementos estructurales.

Los componentes de las curvas carga lateral-distorsión son los siguientes:

- Eje horizontal – deformación (distorsión)
- Eje vertical – carga aplicada
- Curva – respuesta a la aplicación y retiro de la carga a lo largo de la obtención de datos

3.2.3 Deformación angular

La deformación angular fue medida mediante transductores de desplazamiento ubicados en la cara sur (Fig. 3.2.4), los cuales fueron colocados en diagonal, formando una X. Los extremos de los tubos fueron fijados a espárragos que fungieron como un marco. Cada par de espárragos extremos diagonales se midió de centro a centro y se tomó como la longitud inicial. Utilizando estos datos, se determinó la deformación unitaria de la siguiente manera:

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{L_0}$$

ε_i deformación unitaria en el momento i
 δ_i desplazamiento en el instante i, cm

L_0 longitud inicial, cm

Para la obtención de la deformación angular, se hizo la suma de las deformaciones unitarias correspondientes a las diagonales que formaban la X. Se puede expresar de la siguiente manera:

$$\gamma_i = |\varepsilon_1| + |\varepsilon_2|$$

γ_i deformación angular en determinado momento

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ deformación unitaria de cada una de las diagonales

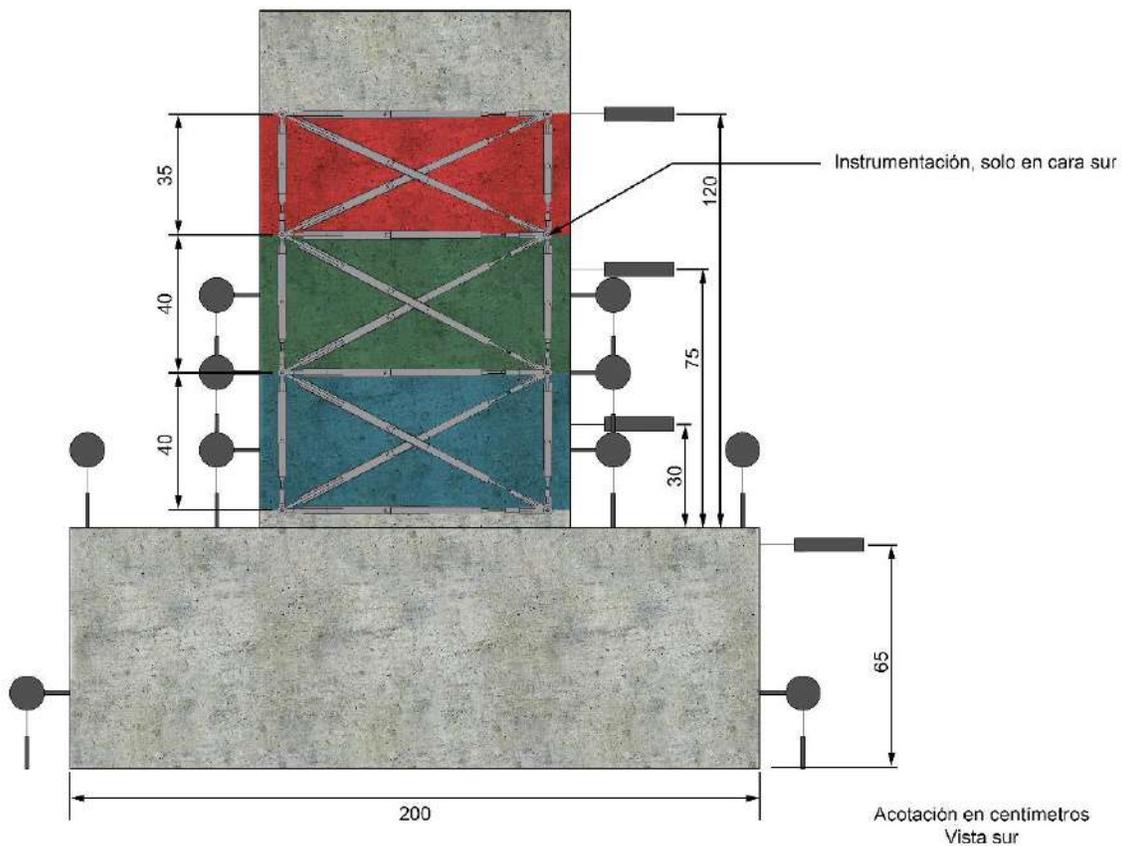


Fig. 3.2.4 Instrumentación externa - Deformación angular

3.2.4 Rotación y curvatura

El cambio de orientación de una columna se conoce como rotación. Se puede calcular con el cociente del ángulo entre la dirección original de la columna y su dirección actual.

En los ensayos la rotación fue medida con transductores de carátula ubicados en las caras laterales de los especímenes, fueron fijados mediante barras roscadas como el marco de los transductores de desplazamiento ubicados en la cara sur. Sin embargo también fueron utilizadas bases de acrílico colocadas en el vástago para garantizar el contacto con una superficie lisa y en cuanto a la fijación, se colocaron ángulos de aluminio asegurados con tuercas a las barras roscadas. Para realizar las mediciones, los instrumentos fueron colocados en 6 puntos estratégicos que permitieron la medición de tres regiones, lo que se observa en Fig. 3.2.5.

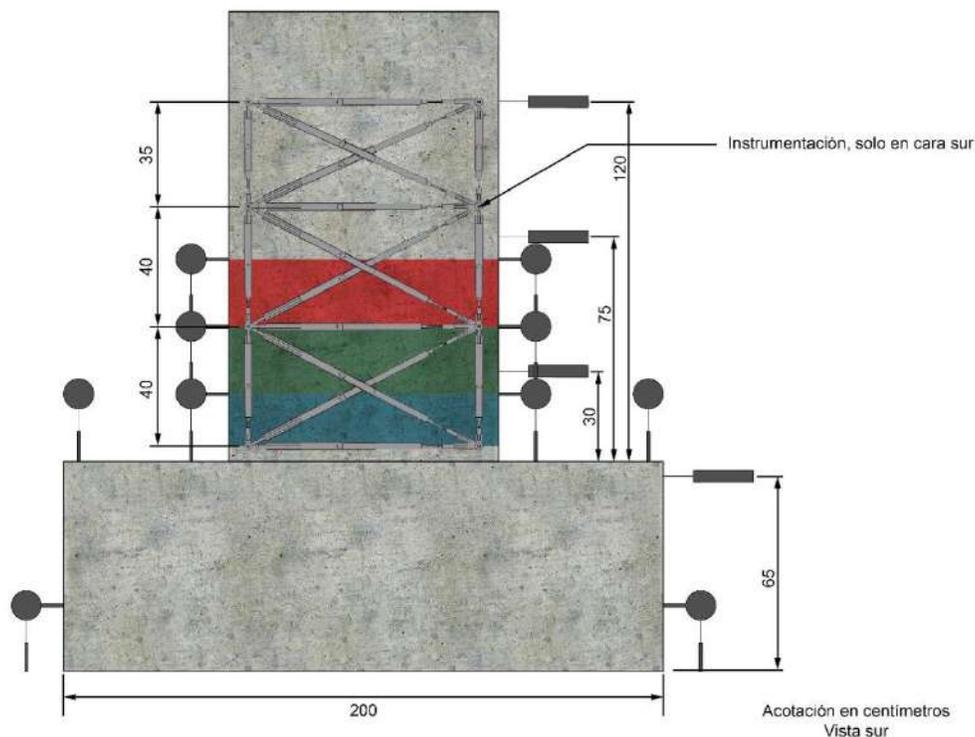


Fig. 3.2.5 Ubicación de transductores de carátula en caras laterales (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

3.2.5 Rotación y deslizamiento de la cimentación

Para la medición de la rotación y el deslizamiento de la cimentación Para medir los desplazamientos verticales de las caras este y oeste de la zapata, se instalaron dos transductores de desplazamiento. Estos datos se utilizaron para calcular las rotaciones de la cimentación. Además, se instaló un transductor de desplazamiento horizontal orientados este – oeste para registrar los deslizamientos entre la cimentación y la losa.

3.3 Comportamiento general de los modelos ensayados

En este apartado, se exponen los resultados obtenidos de los ensayos realizados. Este contenido se subdivide en la descripción de cada espécimen, comenzando con una sección general que aborda la evolución del daño a lo largo de la prueba, seguida de tres secciones derivadas de los experimentos. Estas últimas proporcionan detalles sobre las gráficas histeréticas, las deformaciones angulares, así como la rotación y el deslizamiento de la cimentación.

A lo largo del programa experimental fue necesario establecer al menos 1 columna de control, para el caso se construyeron 3, las cuales fueron referencia para poder compararlas con los 2 especímenes encamisados con elementos metálicos (ángulos y soleras). La determinación de la falla se basó en que esta ocurrió cuando se perdió el 20% de la resistencia con respecto a la resistencia máxima registrada a lo largo de la prueba.

3.3.1 COLUMNA O

El espécimen “O” fue la columna de referencia para comparar las columnas reforzadas con las dos configuraciones de camisas metálicas. Cabe mencionar que todas las columnas tienen las mismas características en cuanto a su geometría y la distribución de acero de refuerzo.

La columna O siguió la historia de carga mencionada en 2.8, siendo primeramente controlada por carga, y posteriormente por desplazamiento.

En cada pausa durante el ensaye se marcó la aparición y extensión de grietas, las cuales fueron caracterizadas por colores y por la escritura del paso en que esa grieta apareció. De igual manera, el comportamiento general de la columna a lo largo de toda la prueba fue plasmado en una bitácora en la que se registraron datos como el paso, la carga, el desplazamiento, la medición de las grietas de control y peculiaridades relevantes.

3.3.1.1 Evolución del daño

En este apartado se muestra la secuencia de daño que sufrió la columna O. La prueba inició (Fig. 3.3.1) con el control por carga, donde en el semiciclo de 10 t se formaron las primeras grietas en la parte inferior de la columna este. Posteriormente, en el pico en el que se le aplicó carga en sentido negativo de 10 t se observaron las primeras grietas a flexión en las caras oeste y norte, también se observó la aparición de nuevas grietas en la unión de la columna con la zapata. En el siguiente semiciclo de 10 t, se apreció que el comportamiento de la cara norte fue replicado en la cara sur, donde se extendieron las grietas ya existentes y aparecieron nuevas.

En los siguientes picos por control de carga la aparición y extensión de grietas continuó sin ningún cambio relevante.

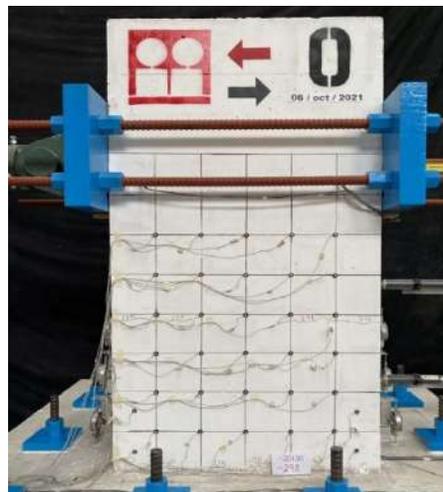


Fig. 3.3.1 Columna O en el inicio de la prueba (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En el primer semiciclo (Fig. 3.3.2) con distorsión de 0.5%, se observaron las primeras grietas inclinadas con espesor de 2.6 mm que atravesaban prácticamente las tres regiones de estudio en la cara norte.



Fig. 3.3.2 Columna O (R=0.5%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En el pico inmediato siguiente (Fig. 3.3.3 y Fig. 3.3.4) se observó la aparición y extensión de grietas inclinadas y horizontales en la cara oeste. Se notó la continuidad de grietas nacientes en la cara sur en las caras laterales. De igual manera, en la cara norte se observaron grietas inclinadas en ambos sentidos con espesor de hasta 0.15 mm, las cuales cortan prácticamente toda el área de estudio de la columna.

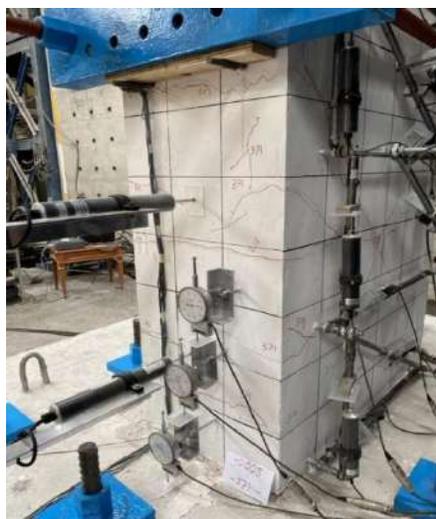


Fig. 3.3.3 Columna O vista lateral ($R=-0.5\%$) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

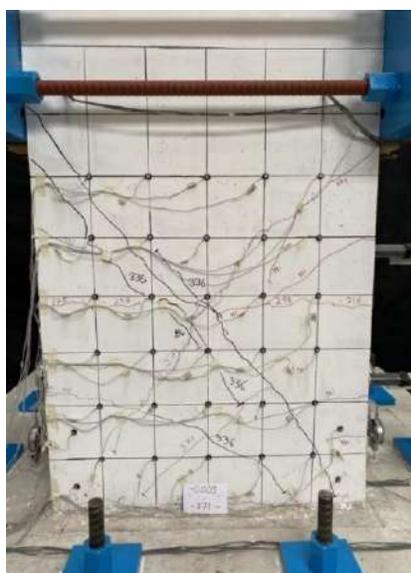


Fig. 3.3.4 Columna O ($R=-0.5\%$) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En el semiciclo con repetición y distorsión de 0.5% (Fig. 3.3.5) se extendieron grietas existentes en las caras norte y sur, sin embargo, no aparecieron nuevas. Lo anterior fue replicado en el siguiente semiciclo con el mismo desplazamiento, pero en signo opuesto, en ambas caras la medición de espesor de grietas llegó hasta 1 mm.



Fig. 3.3.5 Column O (R=0.5% (2)) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Después de llegar a la siguiente pausa en 0 t rumbo al siguiente pico se escuchó un crujido proveniente del concreto, el cual resultó en la abertura de las grietas principales hasta en 12 mm en las caras norte y sur que se midió en el primer semiciclo con distorsión de 1% (Fig. 3.3.6 y Fig. 3.3.7).

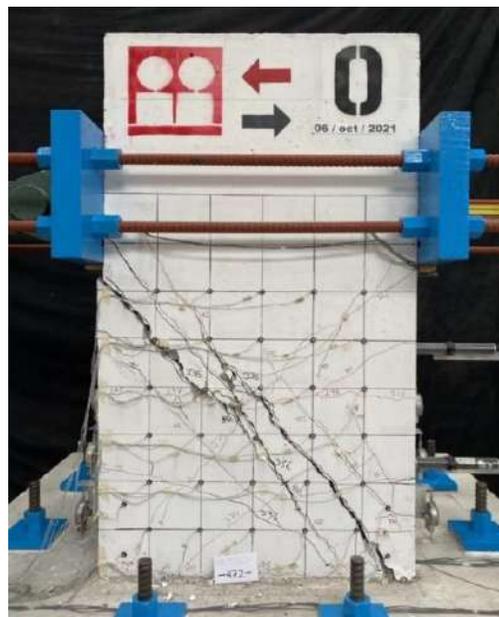


Fig. 3.3.6 Column O cara norte (R=1%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.7 Column O cara sur (R=1%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En las dos siguientes pausas, en la primera con distorsión de -1% (Fig. 3.3.8) y la segunda en cero t de carga se observaron grietas de hasta 18 mm y 13 mm, respectivamente. De igual manera, en la cara este era más evidente el daño que en la cara oeste.



Fig. 3.3.8 Column O vista lateral (R=-1%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.9 Columna O pausa en 0 t posterior a R=-1% (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Para los semiciclos con distorsión de 1.5% (Fig. 3.3.10) tanto en positivo como en negativo, eran evidentes y con una abertura de hasta 10 mm las grietas principales formando una cruz. Se pudo notar el corte de bloques de concreto que posteriormente se desprendieron de la columna. El mayor daño del espécimen se concentró en el centro del elemento.

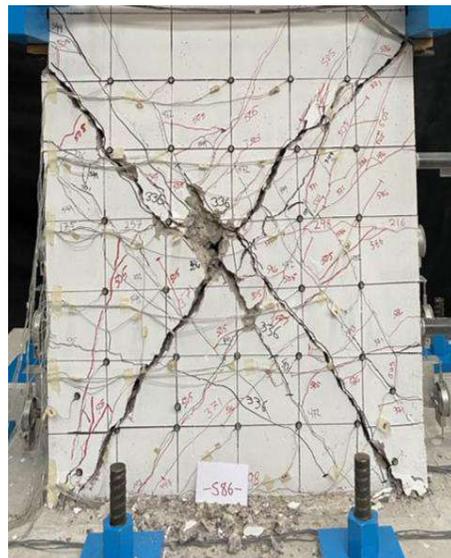


Fig. 3.3.10 Columna O (R=1.5%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Al iniciar el semiciclo con distorsión de 2% (Fig. 3.3.11) fue observado un incremento en el espesor de las grietas llegando hasta 20 mm. Un paso antes de la llegada a cero t de carga fue más notorio el aplastamiento en el centro de la columna.

En cero t de carga, las grietas llegaron a 10 mm en la cara norte, mientras que una de las grietas de control residuales en la cara este fue determinada como inmedible.

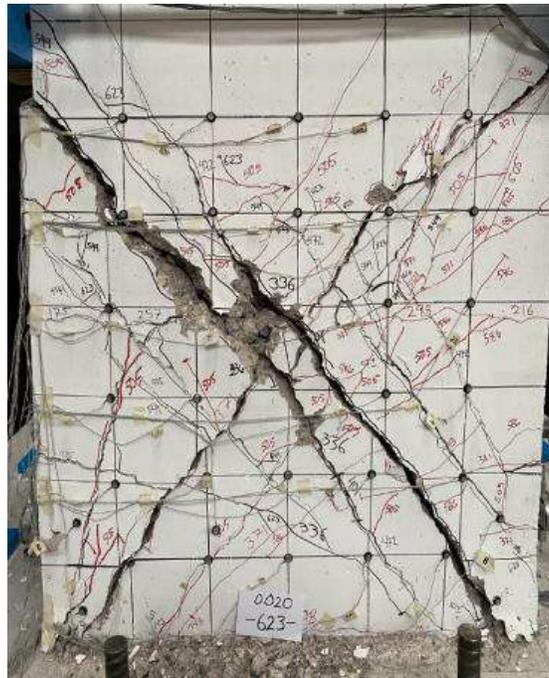


Fig. 3.3.11 Columna O (R=2%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la pausa con distorsión de -2% (Fig. 3.3.12 y Fig. 3.3.13) se midieron las grietas con mayor espesor a lo largo de toda la prueba con 21 mm, principalmente en la cara norte. El desprendimiento de concreto en el centro de la columna fue considerable, el comportamiento de la cara norte se replicó en la cara sur. También se observó la aparición y extensión de desprendimiento de concreto en las caras laterales del espécimen.

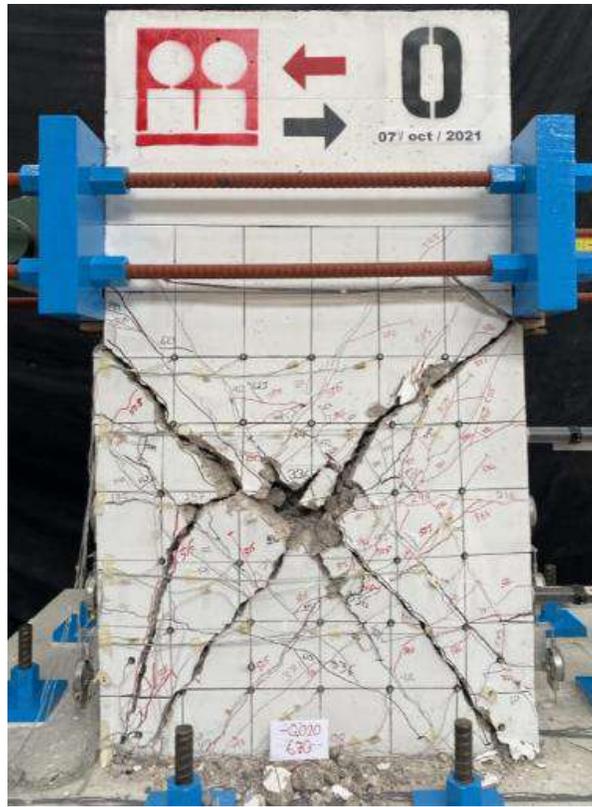


Fig. 3.3.12 Column O cara norte ($R=2\%$) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.13 Column O cara oeste ($R=2\%$) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En el pico con repetición correspondiente a la distorsión de 2% (Fig. 3.3.14), las grietas dejaron de medirse debido a que estaban fuera del rango de medición. El daño se manifestó en el desprendimiento de concreto que permitió la exposición de acero de refuerzo.

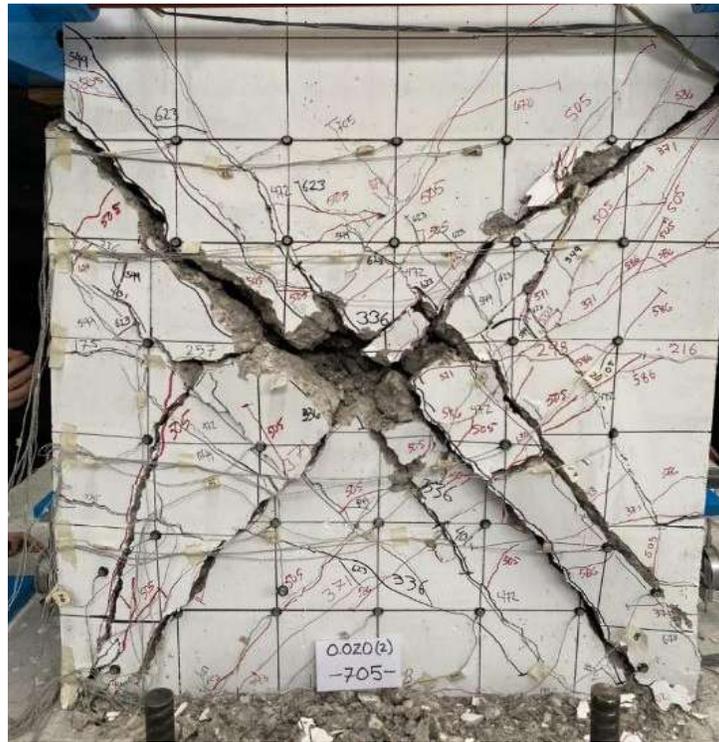


Fig. 3.3.14 Columna O ($R=2\%$ (2)) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Posteriormente, la prueba se llevó a un pico con distorsión de 2.5% para después volver a cero t de carga con lo que se finalizó la prueba.

3.3.1.2 Estado final del daño

Al término de la prueba (Fig. 3.3.15), la caída de bloques de concreto hizo que la exposición del acero en estribos y barras en la cara norte fuera más notoria. El aplastamiento de la columna en el centro de la columna fue observado por medio del desplazamiento del concreto en el plano z.



Fig. 3.3.15 Estado final del daño Columna O cara norte (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la cara este (Fig. 3.3.16) el mayor daño fue observado en la parte superior, siendo la grieta con mayor abertura continuidad de las grietas principales en sentido negativo de la cara norte.



Fig. 3.3.16 Estado final del daño Columna O cara este (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Cabe mencionar que para la cara oeste el mayor daño se observó en la parte inferior, siendo continuidad de la misma grieta con mayor espesor de la cara este. La grieta principal de la cara oeste fue resultado del evidente aplastamiento de la columna, cabe mencionar que este fenómeno se observó en las dos caras laterales, pero que fue más notoria en el lado oeste.

3.3.1.3 Comportamiento histerético

La Fig. 3.3.17 muestra la curva histerética de la columna O, la cual es resultado de graficar la distorsión en el eje x contra carga lateral total aplicada en el eje y. La distorsión se indica en porcentaje (%), mientras que la carga lateral se indica tanto en t como en kN.

En la gráfica se observa que el semiciclo con mayor distorsión llevado en el ensaye fue de 2.5%, sin embargo, el último ciclo completado fue de 2%.

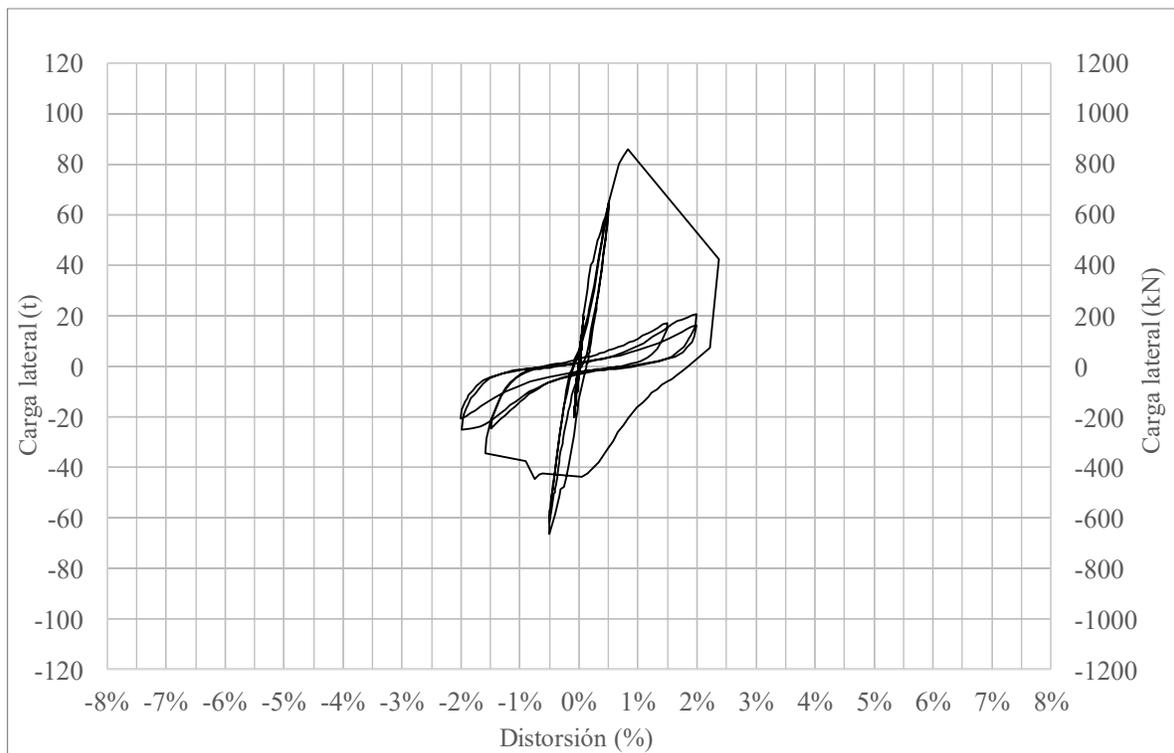


Fig. 3.3.17 Curva histerética general - Columna O

La siguiente figura (Fig. 3.3.18), corresponde a la misma gráfica, sin embargo se incluyen los hitos más importantes, así como semiciclos que destacaron a

lo largo de la prueba. Se aprecia en el gráfico una simetría notable. Las primeras grietas se manifestaron durante el semiciclo negativo con una carga de 10 t. En la Figura 3.3.18 se puede notar una disminución significativa en la rigidez después de completar el segundo ciclo. La resistencia máxima se registró a 86.05 t en el primer semiciclo, con una distorsión del 1%. En el semiciclo negativo inmediato ($R=-1\%$) posterior a haber alcanzado la resistencia máxima, la columna experimentó una pérdida del 50% en comparación con su valor máximo, lo que lleva a suponer que el espécimen falló de manera inminente después de alcanzar su punto más alto de resistencia. Por último, la resistencia en el último pico, correspondiente a un semiciclo negativo de la prueba, se situó en 20.65 t, lo que representó una pérdida de 76% en comparación con la resistencia máxima.

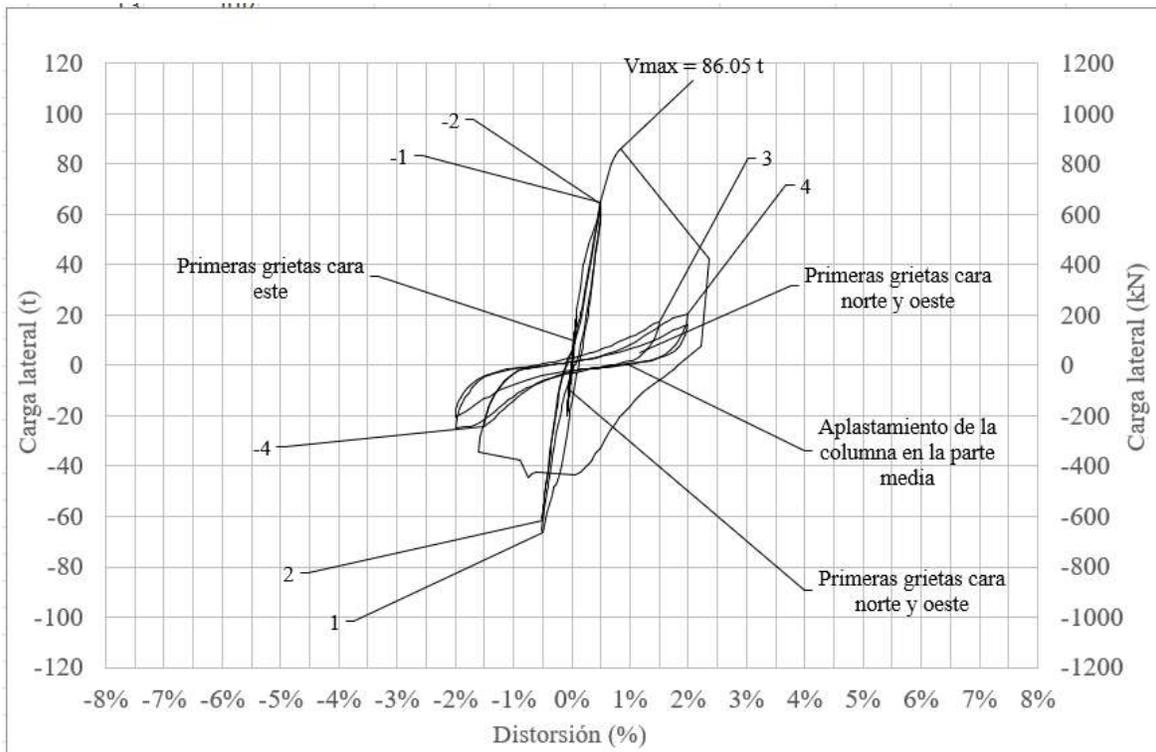


Fig. 3.3.18 Curva histerética detallada - Columna O

3.3.1.4 Rotación y curvatura

Las rotaciones de la columna fueron calculadas en las tres regiones mencionadas en 3.2.4 mediante transductores de carátula ubicados en las

caras laterales de los especímenes. En las siguientes figuras se muestran las gráficas correspondientes a cada región.

En la siguiente tabla, se observa el resumen de las rotaciones máximas correspondientes a cada una de las regiones. Seguido, se desarrolla el comportamiento de la curva de cada región de las rotaciones.

Tabla 27. Rotación - Columna O

| Región | Rotación máxima (mm/mm) |
|--------|-------------------------|
| 1 | 0.0037 |
| 2 | 0.0029 |
| 3 | 0.0071 |

La Fig. 3.3.19 representa la rotación de la región 1, fue la curva más estable con lazos más asimétricos respecto a las otras regiones. Se observa una pérdida de la rigidez después de los primeros ciclos. Los valores máximos de la rotación fueron de 0.0037 mm/mm en esta región, los cuales fueron alcanzados después de alcanzar la resistencia máxima de la columna.

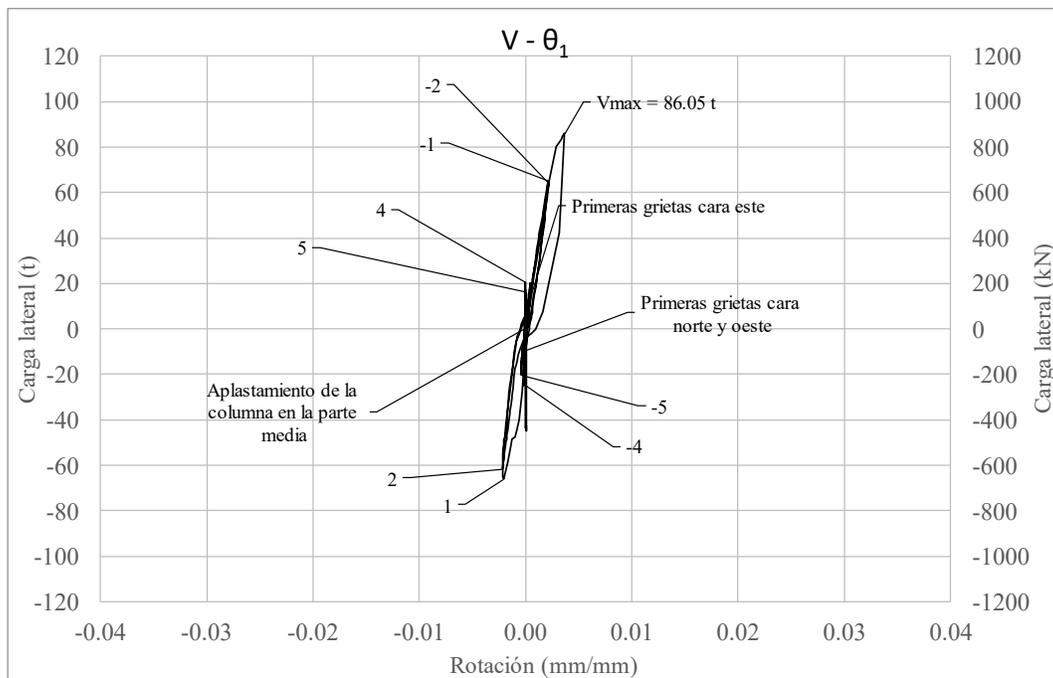


Fig. 3.3.19 Rotación de la región 1 - Columna O

En la Fig. 3.3.20 se observa la rotación de la segunda región. Los lazos histeréticos fueron menos amplios y presentaron simetría en ambos sentidos. Se aprecia una menor pérdida de la rigidez después de la resistencia máxima respecto a la región anterior. El valor de la rotación mayor registrado en esta segunda gráfica fue de 0.0029 mm/mm.

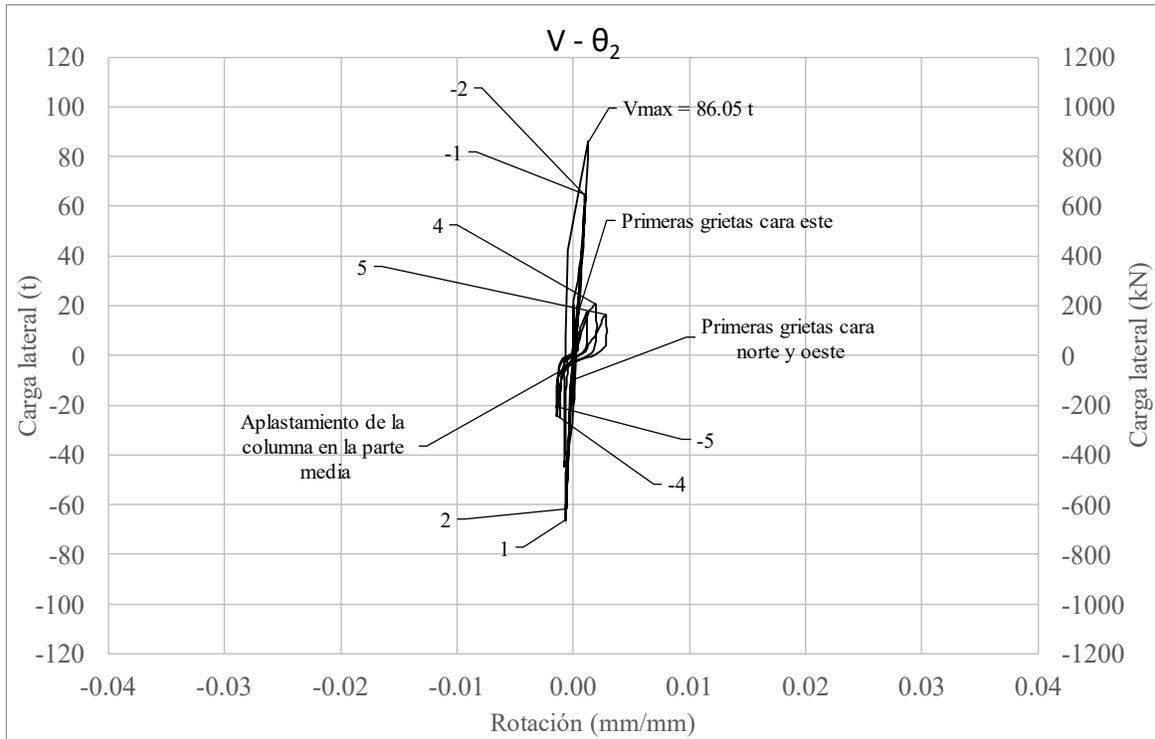


Fig. 3.3.20 Rotación de la región 2 - Columna O

La rotación de la región 3 es mostrada en la Fig. 3.3.21 donde se muestra la curva menos geométrica de las regiones, con un comportamiento elástico lineal en los primeros ciclos. La columna en esta región tuvo una pérdida de la rigidez evidente a partir del tercer ciclo. La máxima rotación obtenida en esta gráfica fue de 0.0071 mm/mm.

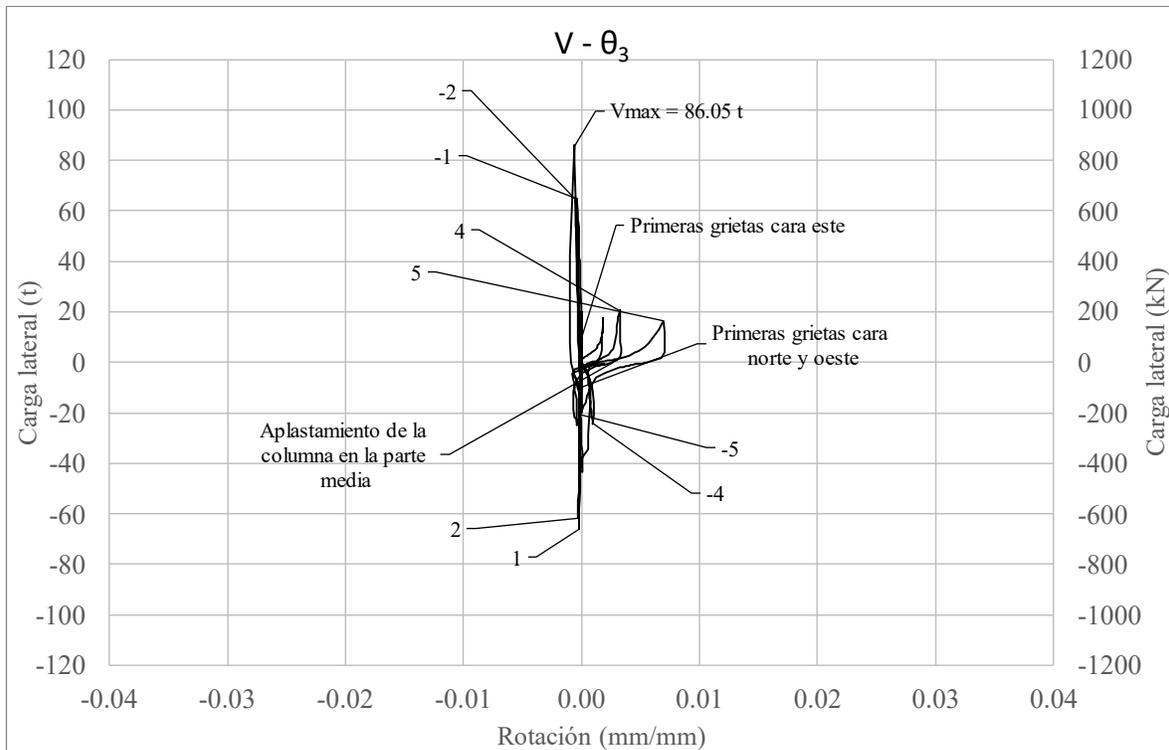


Fig. 3.3.21 Rotación de la región 3 - Columna O

A continuación se muestran las gráficas correspondientes a las curvaturas que se refieren al resultado de la rotación obtenida en cada región entre la altura en que fueron colocados los transductores de carátula. Las curvaturas en las tres regiones fueron prácticamente despreciables, teniendo los siguientes máximos (Tabla 28. Curvatura - Columna O):

Tabla 28. Curvatura - Columna O

| Región | Curvatura máxima (1/mm) |
|--------|-------------------------|
| 1 | 0.0000157 |
| 2 | 0.00000728 |
| 3 | 0.00000591 |

El comportamiento de la curvatura de las tres regiones fue muy similar, lo que se pudo apreciar en los valores reportados, los cuales fueron muy cercanos a cero.

3.3.1.5 Deformación angular

La particularidad de la columna O es que los transductores solo fueron colocados en un sentido en diagonal, por lo que no fue posible calcular la deformación angular en esta columna.

3.3.1.6 Rotación y deslizamiento de la cimentación

En este apartado, se muestran las curvas referentes a la rotación y al deslizamiento en la base de la columna. Para la rotación fueron colocados dos deformímetros de carátula en la base de la zapata que midieron verticalmente en las caras este y oeste. En cuanto al deslizamiento, se colocó un transductor de desplazamiento en la base de la columna, donde empieza la zapata. La configuración de los dispositivos de medición se puede observar en 2.9.1.

La Fig. 3.3.22 muestra la rotación en la zapata, se observa que los valores medidos fueron muy cercanos a cero. La rotación máxima medida fue de 0.00006 mm/mm, lo que indicó que fueron prácticamente nulas. El deslizamiento en la base de la columna se observa en la Fig. 3.3.23, donde se registró un valor máximo de 0.18 mm, lo cual señala un pequeño deslizamiento.

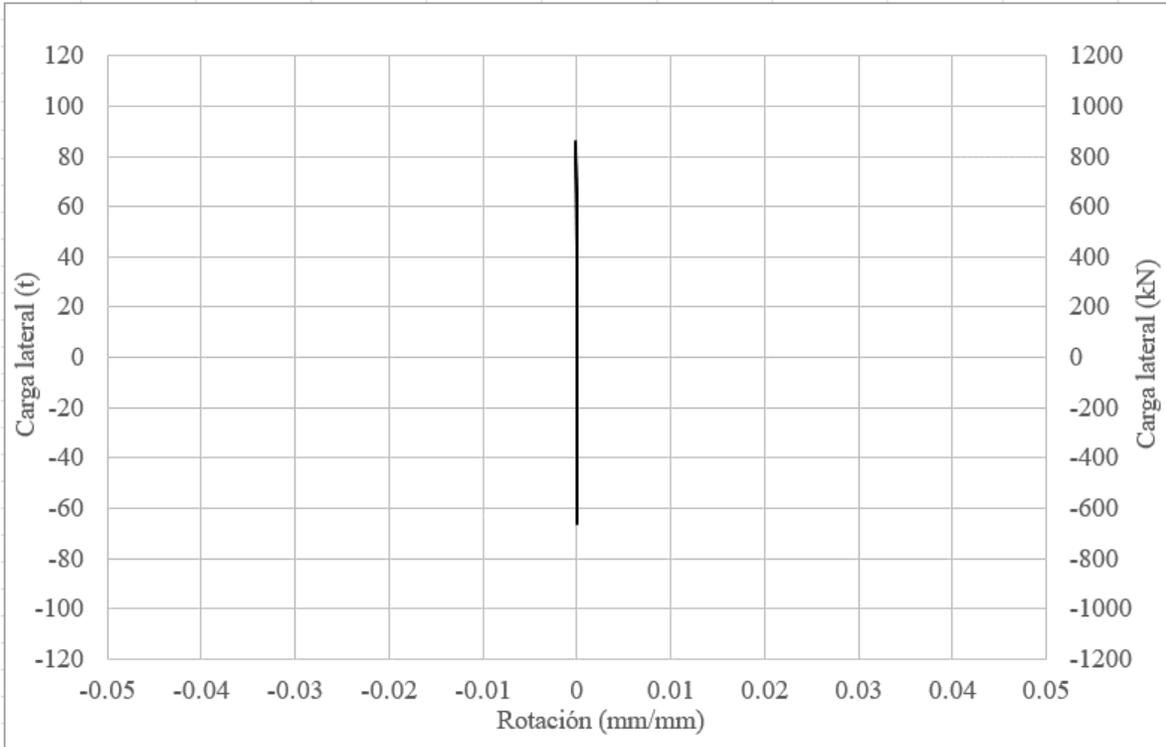


Fig. 3.3.22 Rotación en la zapata - Columna O



Fig. 3.3.23 Deslizamiento en la base de la columna - Columna O

3.3.2 COLUMNA OR

La columna "OR" que por sus siglas significan Original Reparada, fue la columna "O" rehabilitada posterior al primer ensayo. El método de reparación fue primeramente la identificación y remoción de los bloques de concreto no adheridos al elemento monolítico, así como los desprendidos en la prueba, esto con la finalidad de limpiar la zona y mantener libre el área en la que se realizó la reparación. Posterior a la limpieza, se procedió a la inyección de resina epoxi en las grietas que se encontraban aún en el área de concreto, posteriormente se realizó el colado con grout.

En la Fig. 3.3.24 y Fig. 3.3.25 se observa el procedimiento inicial de la rehabilitación de la columna.



Fig. 3.3.24 Columna OR previo a la rehabilitación (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.25 Inicio del procedimiento de rehabilitación - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Se llevó a cabo la inyección de grietas con una presión de 40 psi (2.8 kg/cm²). Este proceso se inició desde la boquilla inferior de cada grieta y para después ascender para inyectar en la boquilla superior inmediata. Durante la inyección, la resina fluía rápidamente hacia el interior del centro de la columna, lo que impidió llenar completamente toda la grieta con resina epoxi (Fig. 3.3.26 y Fig. 3.3.27).



Fig. 3.3.26 Primeros pasos de la rehabilitación - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.27 Inyección de grietas - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

A continuación, se muestra una figura representativas (Fig. 3.3.28) de la rehabilitación de la columna OR. En las caras norte y sur se inyectaron con resina epoxi un total de ocho grietas, cuatro y cuatro respectivamente, mientras que en las caras laterales se realizó la inyección de tres grietas en la cara oeste y una en la cara este. Las grietas inyectadas tuvieron un espesor máximo de 2 mm. Una vez colocada la resina, se selló con una pasta de resina la parte superficial de las grietas.



Fig. 3.3.28 Proceso de la inyección de grietas - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

El área donde se realizó el colado del grout (Fig. 3.3.29) tenía una textura rugosa que benefició su unión con el concreto de la columna. Posterior a la inyección y sellado de las grietas, se cimbró y se colaron 208 L de grout fluido. Después del colado (Fig. 3.3.30), se realizó el proceso de curado por 21 días.



Fig. 3.3.29 Colado del espécimen - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.30 Columna después del colado - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la siguiente figura (Fig. 3.3.31) se observa el resultado de rehabilitación de la ahora columna OR.



Fig. 3.3.31 Resultado de la rehabilitación - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Para el ensaye de la columna se siguió la misma historia de carga y desplazamiento que la columna O, la cual fue la usada en las columnas siguientes.

De igual manera, se llevó registro en una bitácora del comportamiento general de la columna, de las grietas de control y de todas las particularidades ocurridas a lo largo del ensaye. Cabe mencionar que previo al inicio de la prueba, se notó la formación de grietas que fueron producto del colado con grout.

3.3.2.1 Evolución del daño

A continuación, se muestran diversas fases (Fig. 3.3.32) en la secuencia del daño observado durante el ensaye de la única columna rehabilitada a lo largo del proyecto experimental llevado a cabo.

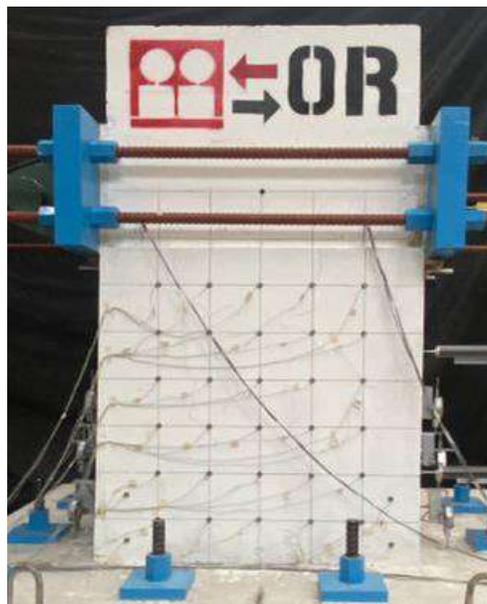


Fig. 3.3.32 Modelo previo a la prueba - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Al inicio de la prueba en el pico (Fig. 3.3.33) con 10 t de carga en sentido positivo, se formaron las primeras grietas con grosor de 0.1 mm en la cara norte, las cuales se observaron como continuación de las marcadas con líneas punteadas que correspondían a la rehabilitación de la columna.

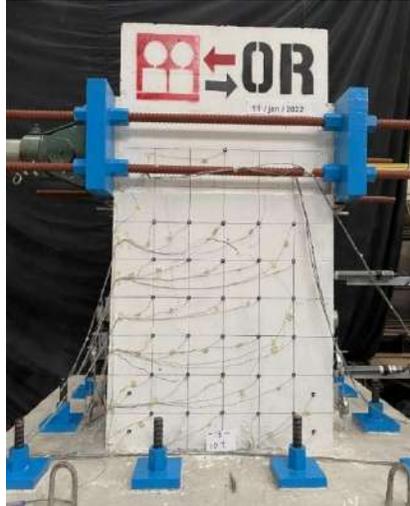


Fig. 3.3.33 Control por carga (10 t) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En el incremento de carga al pico de 10 t en sentido negativo no se percibió la formación de nuevas grietas, sin embargo, fue en la repetición de 10 t (Fig. 3.3.34) en sentido positivo donde aparecieron grietas en la cara este que se extendió a la cara norte y sur. Cabe mencionar que en este pico se observó la réplica del comportamiento en la cara norte en la cara sur.

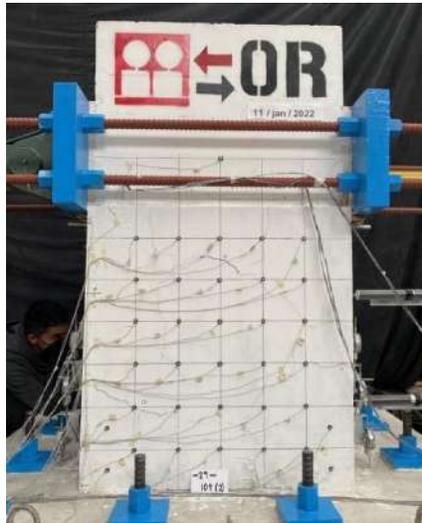


Fig. 3.3.34 Repetición del control por carga (10 t) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.35 Cara lateral (10 t) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la repetición con signo negativo de 10 t (Fig. 3.3.36 y Fig. 3.3.37), aparecieron grietas en la cara oeste que se extendieron en la cara norte y sur, lo cual es el comportamiento del pico anterior, pero en la cara lateral opuesta.

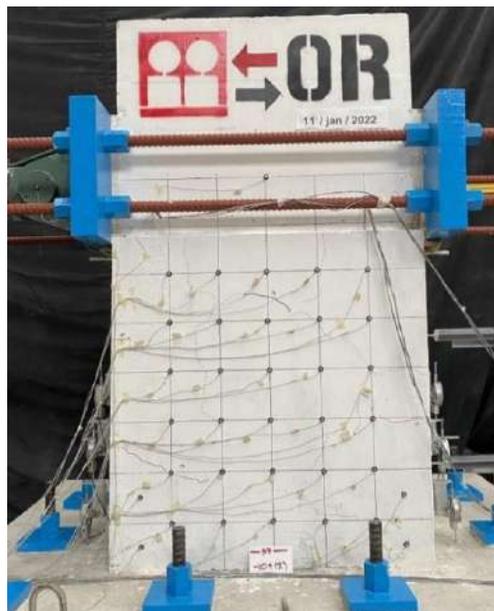


Fig. 3.3.36 Extensión de grietas cara norte - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.37 Aparición de grietas cara oeste - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En el pico con incremento a 20 t (Fig. 3.3.38) se observó la extensión de las grietas existentes en la cara norte y laterales, manteniendo el mismo grosor de hasta 0.1 mm.

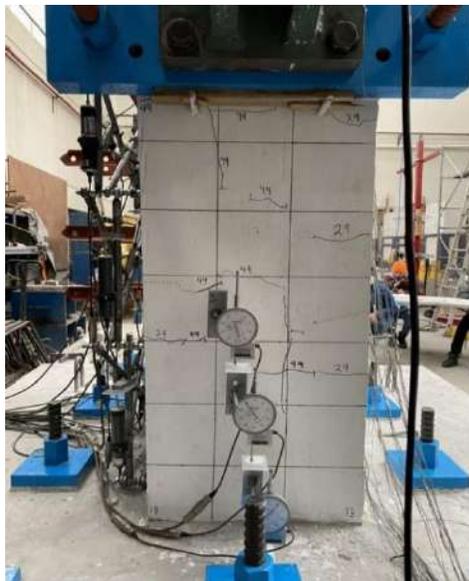


Fig. 3.3.38 Carga lateral (20 t) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En el pico negativo de 20 t (Fig. 3.3.39) el grosor de grietas alcanzó hasta 0.3 mm. La aparición de nuevas grietas fue muy poco perceptible a diferencia de otros picos.

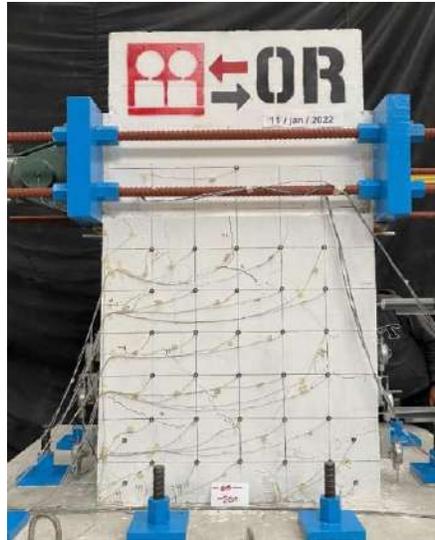


Fig. 3.3.39 Cara norte ciclo negativo (20 t) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

El comportamiento fue constante en los picos restantes correspondientes al control por carga, haciendo referencia a la extensión y aparición de grietas con un espesor no mayor a 0.3 mm. La siguiente imagen (Fig. 3.3.40) hace alusión al estado de la columna en el último pico negativo de 20 t relacionado a la historia de carga.

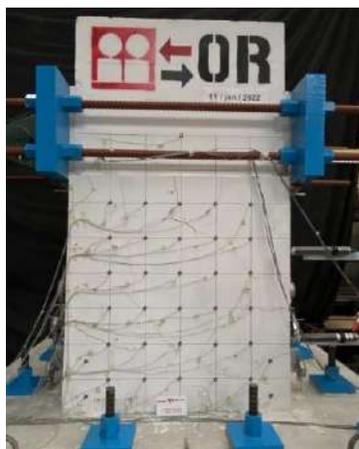


Fig. 3.3.40 Último pico en el control por carga - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

A continuación, se muestra el desarrollo de la prueba a partir del control por desplazamiento. Momentos antes de la llegada al primer pico se escuchó un sonido proveniente del concreto, lo cual resultó en las primeras grietas inclinadas en sentido negativo. Dichas grietas atravesaban parcialmente de esquina superior a esquina inferior opuesta, formando la diagonal. A partir del pico se denominaron dos grietas de control de 0.6 mm y 1.2 mm. La siguiente imagen muestra el primer pico por distorsión el cual corresponde al 0.5% (Fig. 3.3.41).

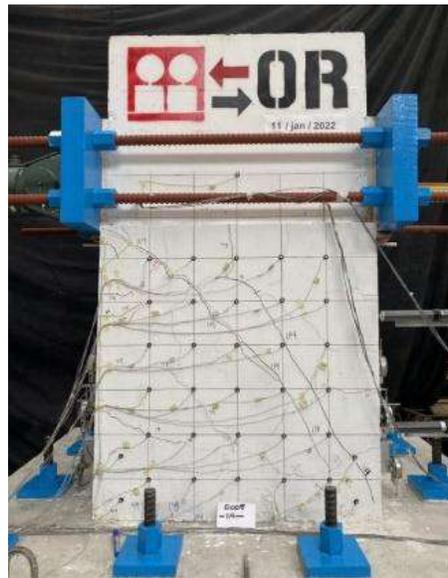


Fig. 3.3.41 Columna OR (R=0.5%) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En el pico con distorsión de -0.5% (Fig. 3.3.42), se observaron grietas que atravesaron la cara norte, tal como en la pausa anterior, sin embargo, en sentido opuesto. La formación de grietas en ambos sentidos hizo visible una X, cabe mencionar que ambas líneas se intersecaron en la zona central de la columna, donde antes de ser rehabilitado el espécimen el ensaye anterior sufrió el mayor daño. Las grietas inclinadas en sentido negativo tuvieron un espesor de hasta 0.05 mm, mientras que las aparecidas en este semiciclo llegaron a 0.8 mm.

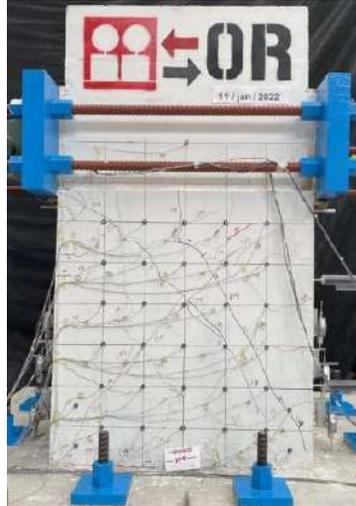


Fig. 3.3.42 Grietas en cara norte ($R=-0.5\%$) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la repetición del semiciclo con desplazamiento de 0.5% (Fig. 3.3.43 y Fig. 3.3.44) en sentido positivo. Se notó la extensión a la cara este de la grieta con mayor espesor de la cara norte en sentido negativo. Las grietas de control en la cara norte tuvieron espesores de hasta 1.8 mm en esta pausa.

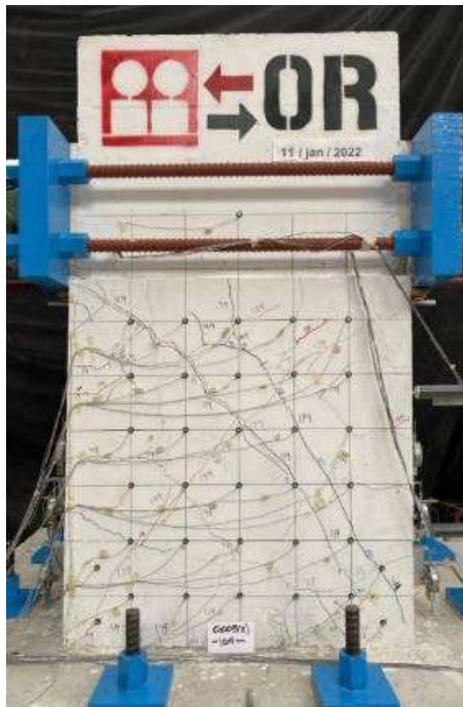


Fig. 3.3.43 Cara norte ($R=0.5\%(2)$) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

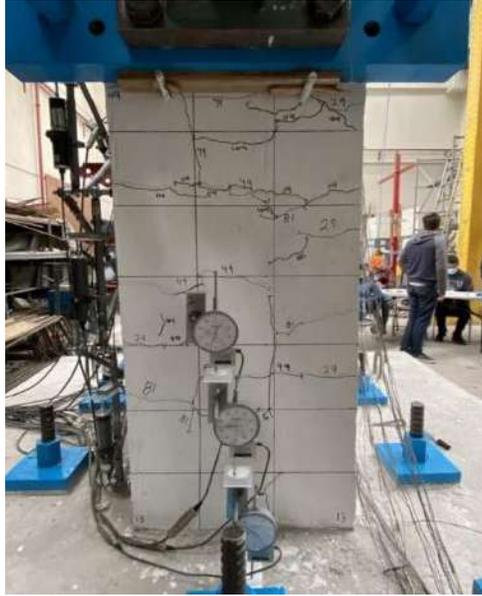


Fig. 3.3.44 Cara este ($R=0.5\%(2)$) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

La prueba continuó el comportamiento con formación y extensión de grietas, sin embargo, fue hasta antes de la pausa con distorsión de 1% (Fig. 3.3.45) en sentido negativo que se observó el aplastamiento del espécimen en la esquina noroeste de la base, de igual manera, se escucharon crujidos provenientes del concreto. En la misma pausa inmediata, se midió una grieta de 2.3 mm en la esquina superior derecha en la columna.

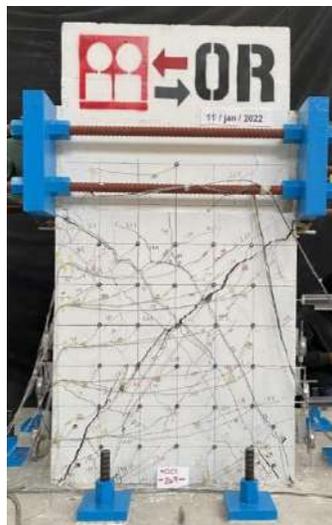


Fig. 3.3.45 Aplastamiento del espécimen ($R=-1\%$) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Previo al pico con 1% de distorsión se observó el leve desprendimiento de concreto en la cara norte, fenómeno que fue constante para la prueba a partir de ese momento. A la llegada de la pausa en pico, las grietas inclinadas que formaron la equis en la cara norte alcanzaron sus aberturas máximas, siendo de 3.8 mm la mayor en sentido negativo, mientras que en sentido negativo tuvo un grosor de 3.6 mm.



Fig. 3.3.46 Extensión de agrietamiento (R=1%) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En el incremento con distorsión de 1.5% (Fig. 3.3.47 y Fig. 3.3.48) fue evidente el daño en la columna, lo cual se vio reflejado en el desprendimiento de concreto de las caras norte y sur, centrándose el daño en la parte central de la columna. En la siguiente imagen se puede observar el daño descrito anteriormente.



Fig. 3.3.47 Cara norte (R=1.5%) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.48 Estado cara sur ($R=1.5\%$) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la pausa del semiciclo con distorsión negativa de 1.5% (Fig. 3.3.49) el grosor de las grietas aumentó considerablemente llegando hasta 13 mm y el daño en la columna ya no sólo era evidente en el centro del espécimen.



Fig. 3.3.49 Semiciclo ($R=-1.5\%$) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Fue en la repetición de la distorsión negativa de 1.5% cuando se observó el desprendimiento de concreto en bloques, haciendo que el daño fuera severo para este momento de la prueba. Cabe mencionar que a partir de este semiciclo y por la caída del concreto, la mayoría de las grietas de control fueron inmedibles, por lo que se decidió seguir con la prueba, pero sin medir el espesor de éstas. Para las caras laterales la prueba continuó con el cierre en carga cero y abertura de grietas en los picos, siendo el daño no comparable con el de las caras frontales, que replicaban el comportamiento una con otra (Fig. 3.3.50).



Fig. 3.3.50 Daño en el espécimen ($R=1.5\%(2)$) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la distorsión negativa a 2% (Fig. 3.3.51) se observó el descubrimiento de acero de refuerzo en la cara sur, esto debido al daño presentado en el concreto.



Fig. 3.3.51 Acero de refuerzo expuesto ($R=-2\%$) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

El mismo comportamiento del semiciclo de -2% fue replicado en la cara norte en la repetición del pico negativo de -2% (Fig. 3.3.52), lo cual mostró la falla evidente de la columna y el daño que sufrió la columna.



Fig. 3.3.52 Cara norte ($R=-2\%$ (2)) - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

3.3.2.2 Estado final del daño

La prueba fue concluida al llegar a la distorsión negativa a 2.5% y después a carga cero. Las fotografías tomadas al término de la prueba permitieron observar un notable deterioro en el núcleo de la columna. Las grietas eran inmedibles, pues atravesaban completamente el centro, permitiendo una visión clara desde la cara norte hasta la cara sur del centro de la columna. Además, se observaba la presencia de desprendimientos de trozos de mortero fluido en ambas caras de la columna. En las caras laterales, el agrietamiento fue menor, pero también era considerable, pues parte de las grietas más relevantes eran continuación de las existentes en las caras frontales.

Se produjo una falla por corte debido a la amplia separación del refuerzo transversal y a su limitada capacidad de deformación. Cabe destacar que este comportamiento fue muy similar a la columna O, a pesar de que la

columna OR fue rehabilitación del espécimen probado previamente. En las siguientes imágenes (Fig. 3.3.53, Fig. 3.3.54, Fig. 3.3.55 y Fig. 3.3.56) se observan todas las caras de la columna en esta etapa de la prueba.



Fig. 3.3.53 Estado final cara norte - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.54 Estado final cara sur - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

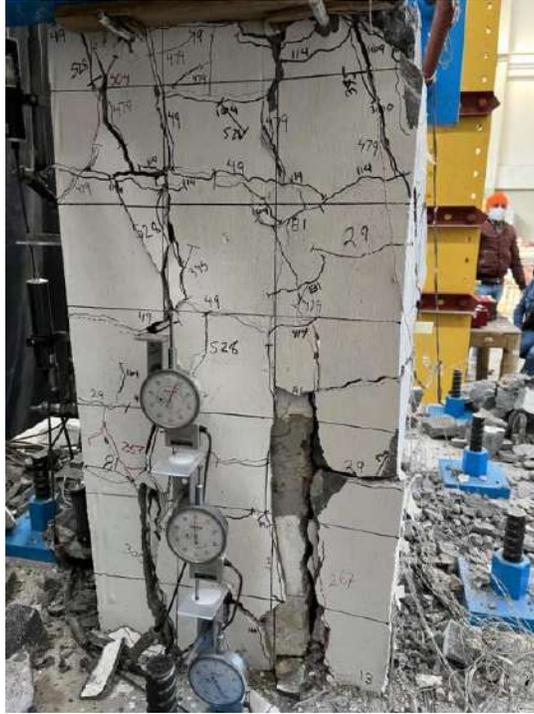


Fig. 3.3.55 Estado final cara este - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

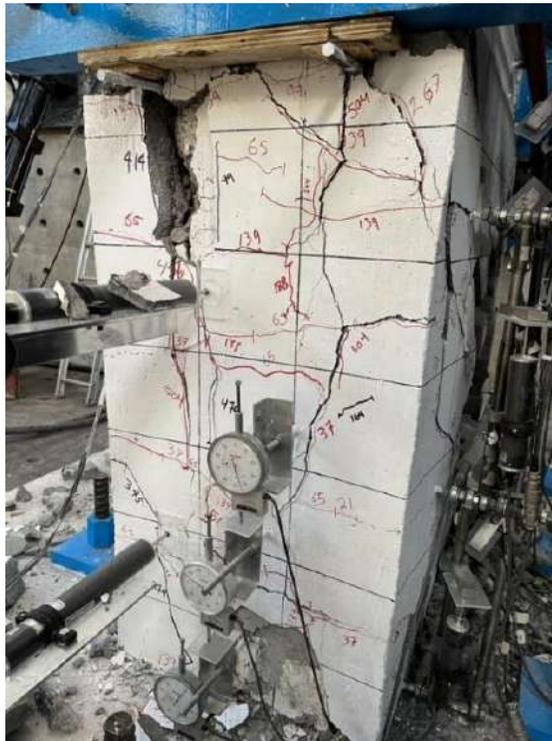


Fig. 3.3.56 Estado final cara oeste - Columna OR (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

3.3.2.3 Comportamiento histerético

En la Fig. 3.3.57 se muestra la curva carga lateral-distorsión de la columna. Se observa una curva con lazos poco amplios al inicio de la prueba. El espécimen O* fue llevado a un semiciclo con distorsión máxima de 2.5%.

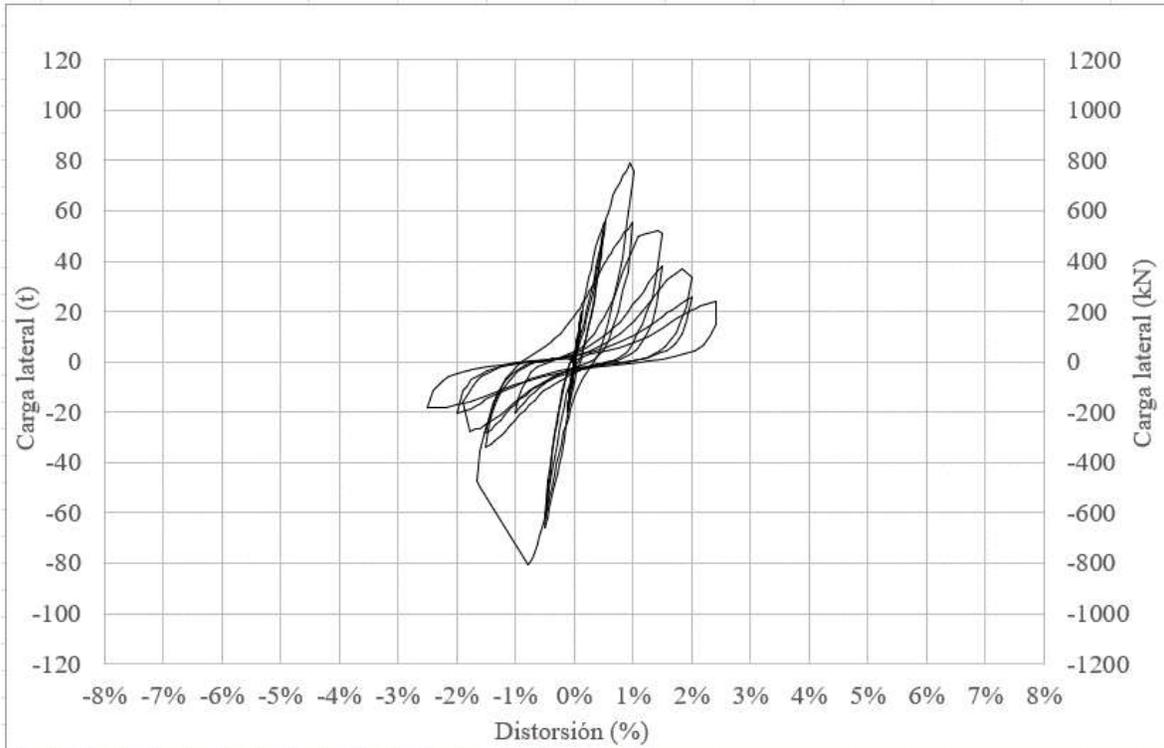


Fig. 3.3.57 Curva histerética general - Columna OR

La siguiente figura (Fig. 3.3.58), al igual que la anterior grafica la distorsión en porcentaje contra la carga lateral aplicada al espécimen a lo largo de la prueba, la diferencia radica en la inclusión de los acontecimientos más importantes los cuales son incluidos en comentarios. Se observa una curva simétrica en toda la prueba a excepción del lazo que correspondió al semiciclo donde la columna alcanzó su resistencia máxima, lo cual ocurrió inmediatamente después del desprendimiento de grout en la columna sur. Las primeras grietas aparecieron en el primer semiciclo negativo con -5 t. Se aprecia de la curva que se tuvo una pérdida de rigidez después de los primeros ciclos por distorsión; sin embargo, fue hasta que alcanzó una distorsión de 1% cuando comenzó a ser evidente. La resistencia máxima a la

que llegó el modelo fue de 80.6 t en el semiciclo con distorsión positiva de 1%, en el pico inmediato de distorsión se tuvo una pérdida de la resistencia de 31%, por lo que se concluye la columna OR falló después de haber alcanzado su resistencia máxima. Al término de la prueba, cuando fue aplicado un semiciclo con distorsión de 2.5% la última carga que resistió fue de 18.25 t, lo que significó una pérdida de la resistencia de 77%.

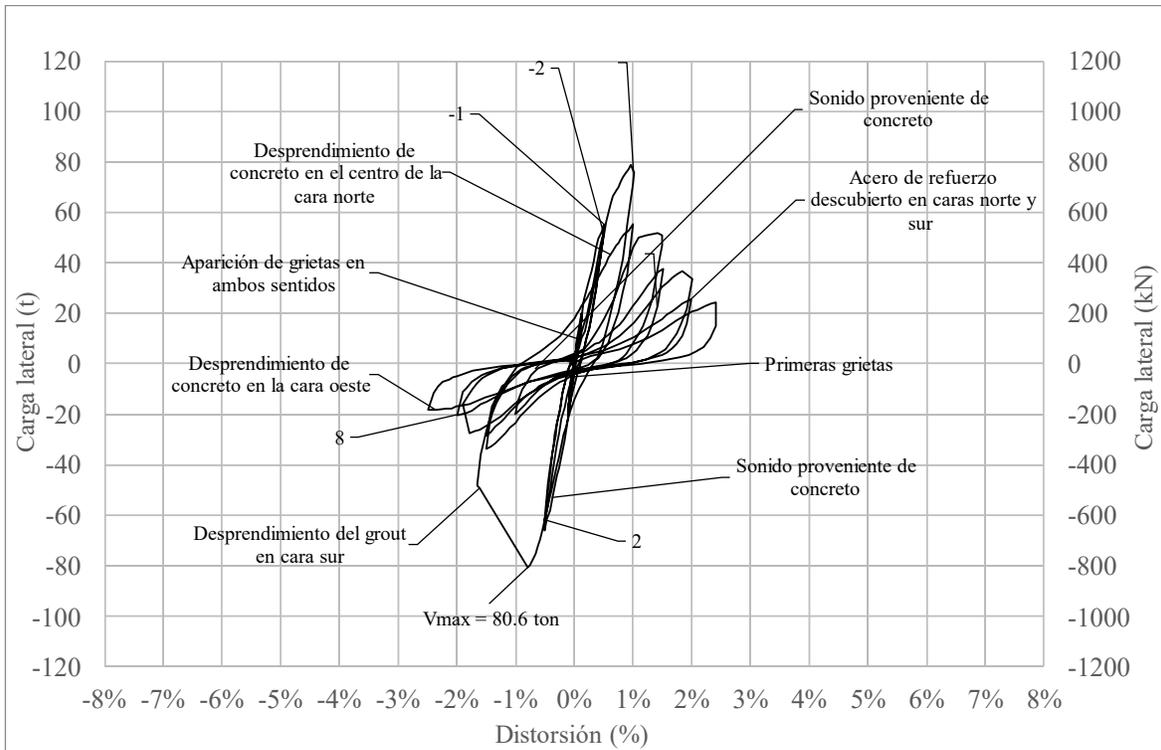


Fig. 3.3.58 Curva histerética detallada - Columna OR

3.3.2.4 Rotación y curvatura

En esta sección, primeramente se abordan las rotaciones medidas con transductores de carátula colocados en las caras laterales en tres regiones.

A continuación, en la siguiente tabla se incluyen los valores máximos obtenidos en cuanto a rotación en las tres regiones a lo largo del ensayo de la columna OR:

Tabla 29. Rotación - Columna OR

| Región | Rotación máxima (mm/mm) |
|--------|-------------------------|
| 1 | 0.016 |
| 2 | 0.006 |
| 3 | 0.003 |

Se observó que la mayor curvatura ocurrió en la primera región y la menor de éstas en la tercera.

La primera figura (Fig. 3.3.59) muestra el comportamiento de la primera región, donde se aprecia una curva similar a la curva histerética formada a lo largo de la prueba. El comportamiento de la rotación se tradujo en la gráfica con lazos más simétricos de las tres regiones. La pérdida de la rigidez se observó después del primer ciclo aplicado con distorsión de 0.5%. La región 1 fue en la que se presentó el valor mayor de la rotación del espécimen, con 0.16 mm/mm. La rotación máxima fue presentada después del evidente daño debido al desprendimiento de concreto en el centro de la columna en una pausa con distorsión de 2%.

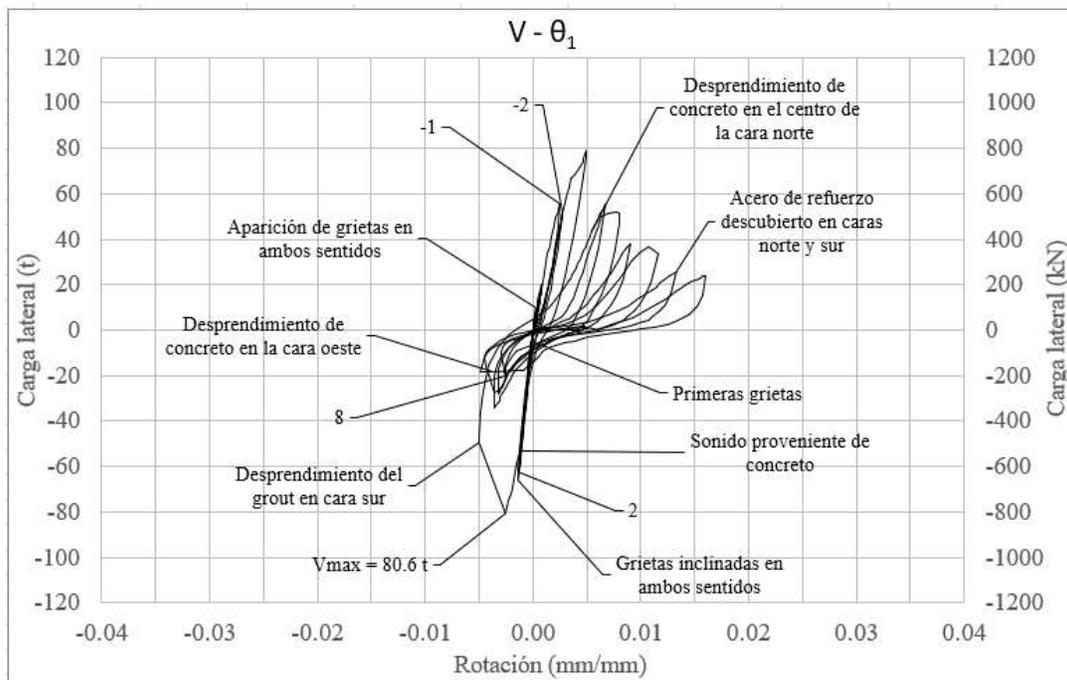


Fig. 3.3.59 Rotación de la columna región 1 - Columna OR

En la siguiente figura (Fig. 3.3.60) se observa la curva de la rotación de la región 2. Los lazos fueron menos extensos que la gráfica anterior, centrando sus mayores rotaciones en el tercer cuadrante. La pérdida de la rigidez de la columna fue evidente hasta empezar el primer ciclo con 1% de distorsión. La rotación máxima registrada en esta región fue la menor de todo el espécimen de las tres regiones con un valor de 0.0063 mm/mm, lo cual ocurrió momentos antes del desprendimiento de concreto en la cara oeste.

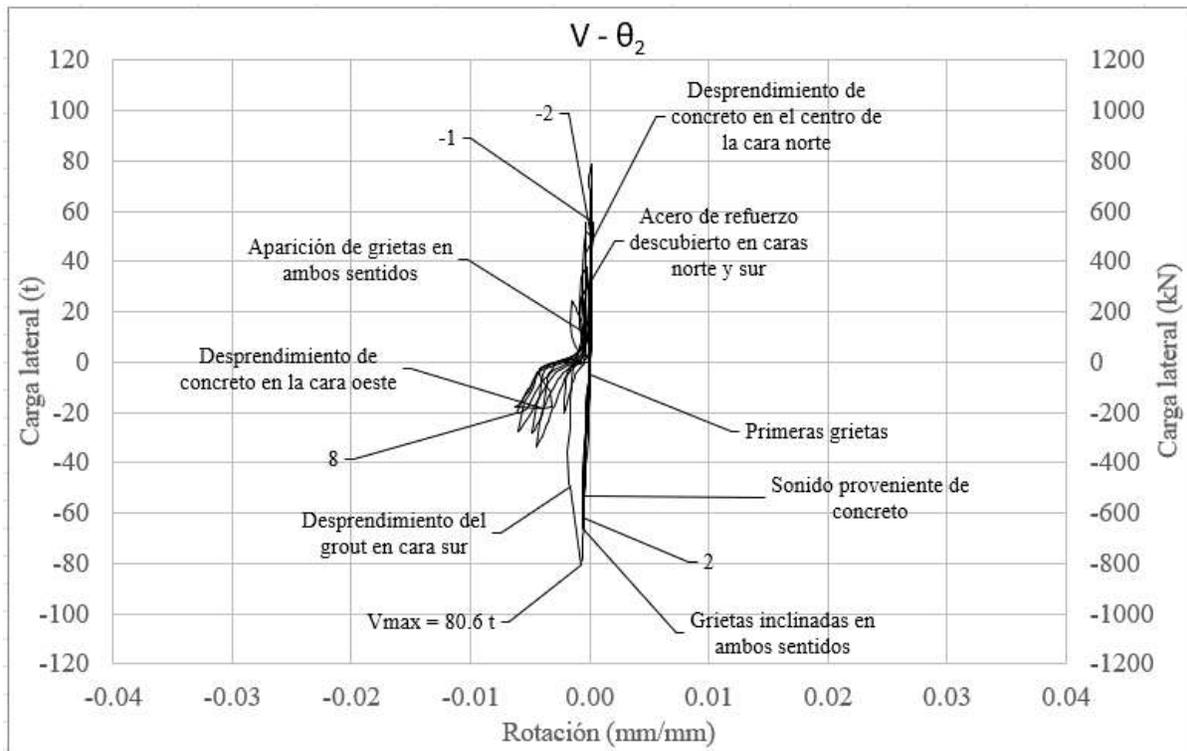


Fig. 3.3.60 Rotación de la columna región 2 - Columna OR

La rotación de la región 3 se aprecia en la Fig. 3.3.61, donde se muestra una curva con lazos histeréticos poco amplios y poca simetría a lo largo de ella. Esta región fue la que presentó una menor pérdida de rigidez a lo largo de la aplicación de la carga, manteniéndose así hasta después de que el acero de refuerzo se encontrara expuesto en las caras norte y sur. La rotación máxima de esta región registrada fue de 0.003 mm/mm, la menor de las tres regiones. La rotación máxima ocurrió después del desprendimiento de concreto en la cara lateral oeste, al igual que en la región 2.

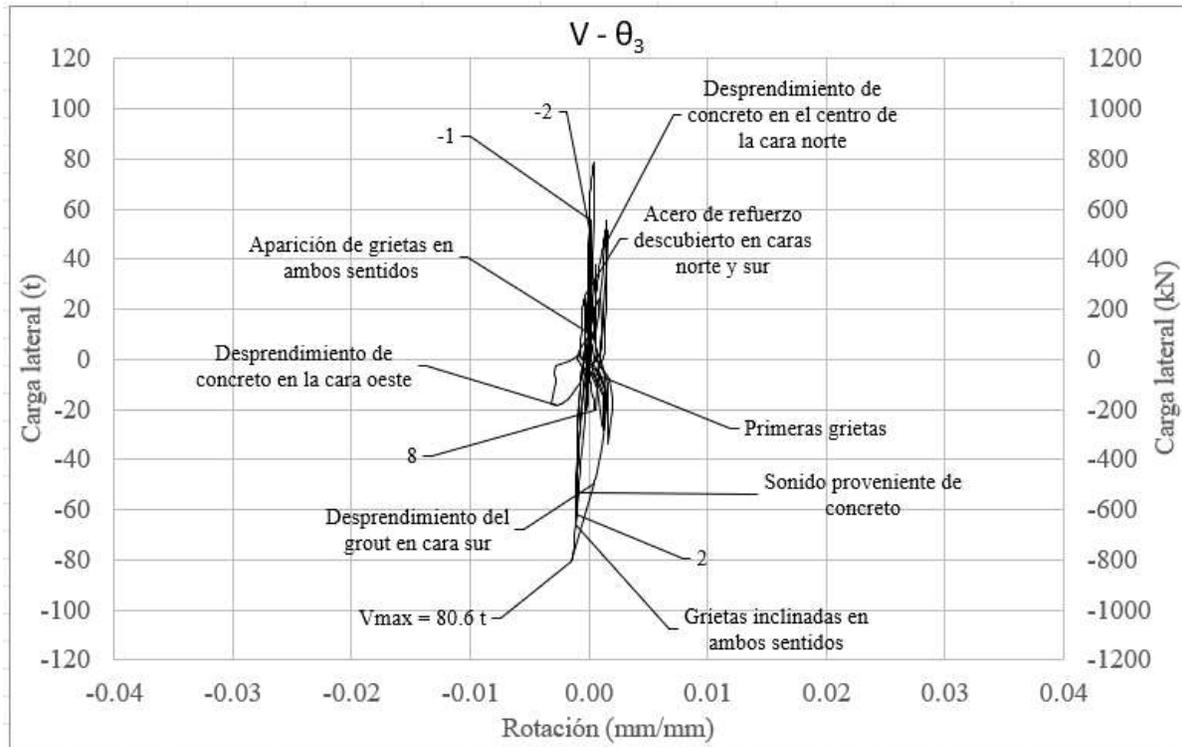


Fig. 3.3.61 Rotación de la columna región 3 - Columna OR

A continuación, se describe la información obtenida de las curvaturas de cada región de la columna, las cuales fueron obtenidas de la división de la división de las curvaturas entre la altura a la que fueron colocados los transductores de carátula que fueron colocados para las mediciones.

La siguiente tabla (Tabla 30) resume los valores máximos de curvaturas obtenidos en las tres regiones:

Tabla 30. Curvatura - Columna OR

| Región | Curvatura máxima (1/mm) |
|--------|-------------------------|
| 1 | 0.00004 |
| 2 | 0.00003 |
| 3 | 0.00002 |

El comportamiento fue similar entre las regiones y no rebasó el valor de 0.00004 1/mm.

3.3.2.5 Deformación angular

La deformación fue obtenida de la información registrada de los transductores de desplazamiento en posición diagonal colocados en la cara sur de los especímenes.

A partir de este modelo y a diferencia de la columna O, en cada región en que fueron colocados los transductores de manera diagonal en ambos sentidos, de manera que se formó una X en cada una de las regiones medidas. La nueva configuración (Fig. 3.3.62) que se llevó a cabo en este y los demás especímenes es la siguiente:

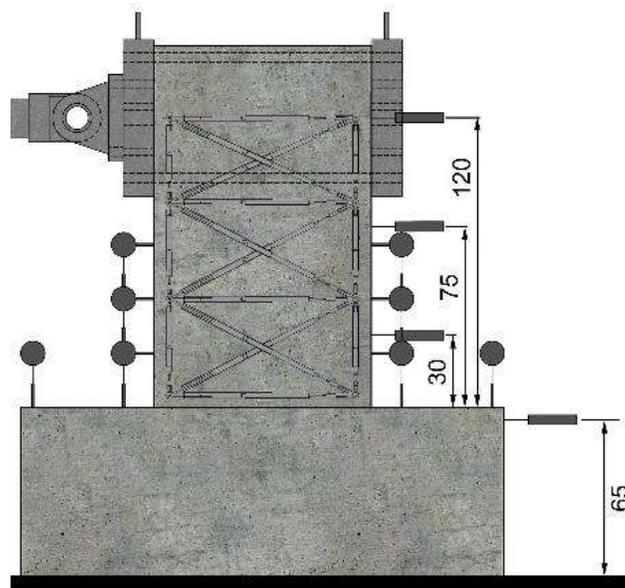


Fig. 3.3.62 Configuración de los transductores cara sur - Columna OR

A continuación, en la Tabla 31 se resumen los valores máximos de la deformación angular obtenidos en cada región:

Tabla 31. Deformación angular - Columna OR

| Región | Deformación angular (mm/mm) |
|--------|-----------------------------|
| 1 | 0.254 |
| 2 | 0.351 |
| 3 | 0.248 |

La deformación angular de la región 1 se observa en la primera gráfica (Fig. 3.3.63), con una máxima deformación registrada de 0.254 mm/mm, la cual ocurrió en la repetición del semiciclo con distorsión de 1.5%, donde se observó el desprendimiento de concreto en las caras norte y sur. Después de que el espécimen alcanzó su resistencia máxima, los lazos de la curva tuvieron un desplazamiento en la deformación, sin embargo, estos no mostraron ninguna amplitud, manteniéndose en los mismos valores. En el último ciclo, cuando el aplastamiento en la columna fue más evidente, el valor de las deformaciones angulares fue menor a sus valores registrados en ciclos anteriores.

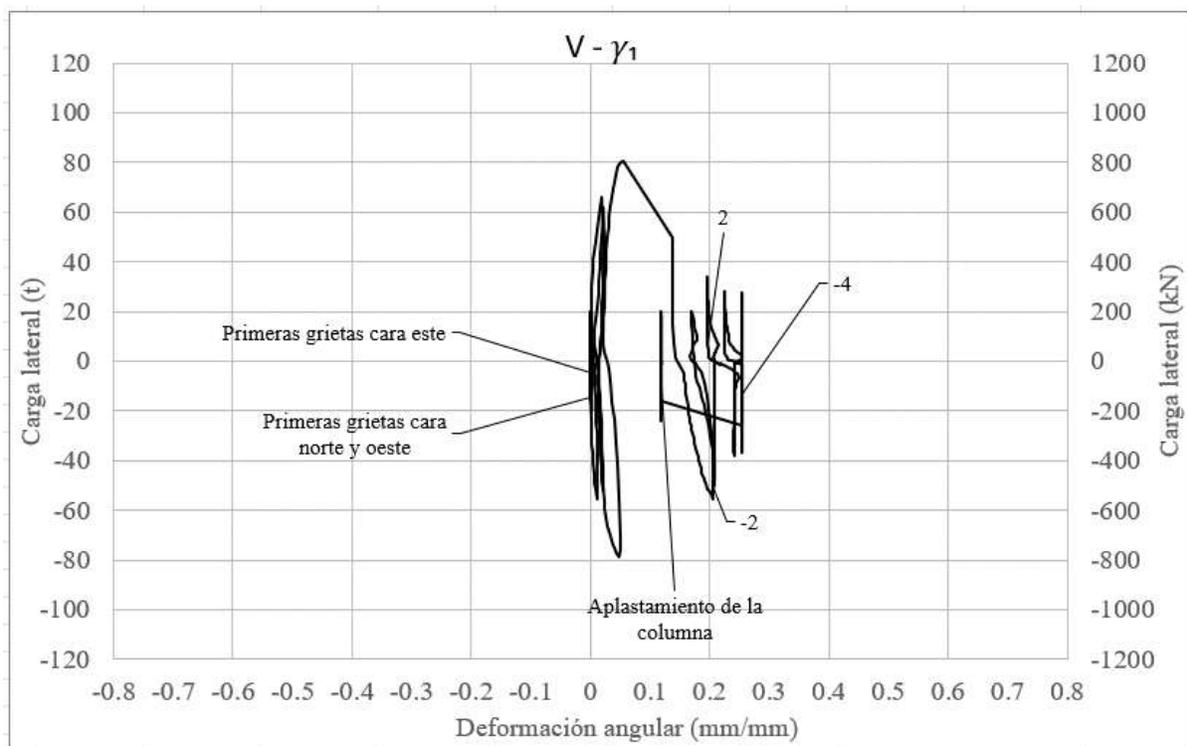


Fig. 3.3.63 Deformación angular región 1 - Columna OR

En la Fig. 3.3.64, se muestra la curva de la región 2 que grafica la deformación angular contra la carga lateral aplicada. La deformación máxima registrada en esta región fue de 0.35 mm/mm en el semiciclo con distorsión de 1.5%, siendo el máximo valor de este parámetro obtenido de las tres regiones. Los lazos posteriores al mayor valor obtenido mostraron que la deformación angular alcanzada en los siguientes ciclos fue la misma a excepción de una disminución de su valor después del segundo ciclo, posterior a este hito la

deformación angular mantuvo prácticamente el valor máximo alcanzado hasta el final de la prueba, lo cual se observa en la gráfica.

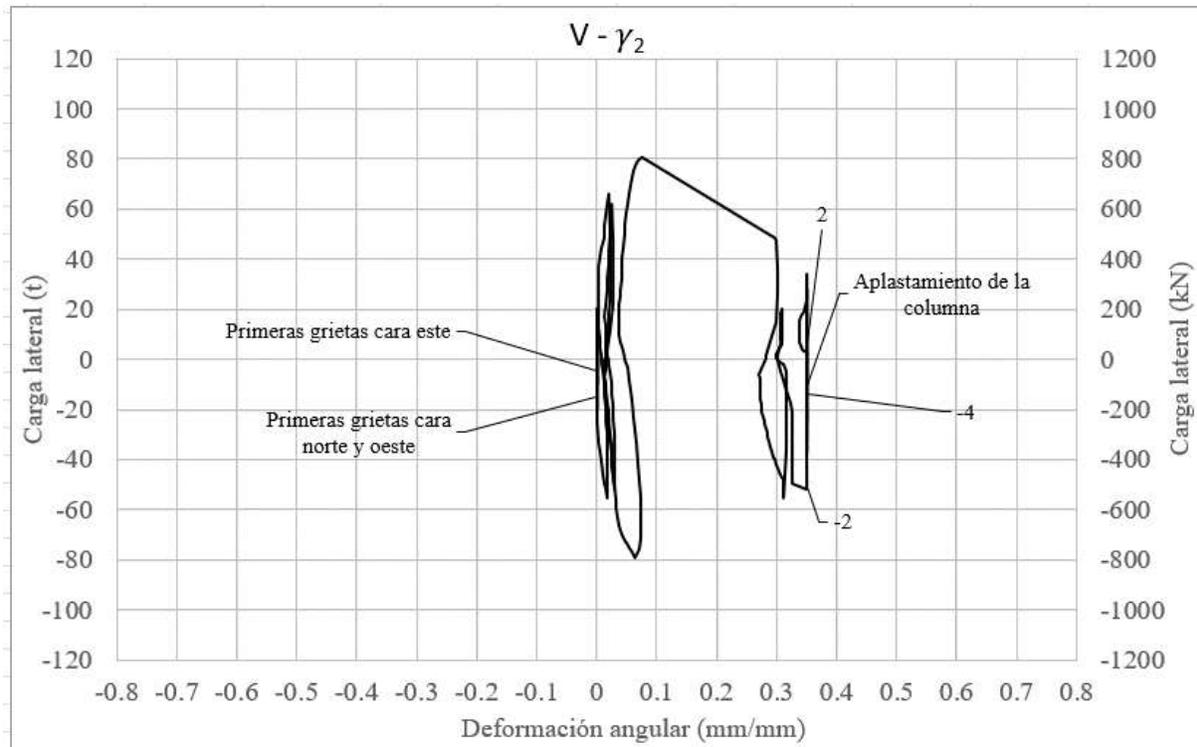


Fig. 3.3.64 Deformación angular región 2 - Columna OR

La curva de la región 3 del espécimen OR correspondiente a la deformación angular se observa en la Fig. 3.3.65, donde se tuvo un valor máximo de 0.248 mm/mm. Se aprecia que en los primeros ciclos de la prueba los valores de la deformación angular mantuvieron un valor muy cercano a 0 mm/mm; dichos ciclos correspondieron al control por carga y al primer ciclo por distorsión. Después de alcanzar el valor de la carga máxima aplicada, se observó un incremento considerable en el valor del desplazamiento inmediatamente registrado, el cual fue 0.128 mm/mm, el cual incrementó conforme la prueba avanzó hasta llegar al término esta y alcanzar la deformación angular mayor.

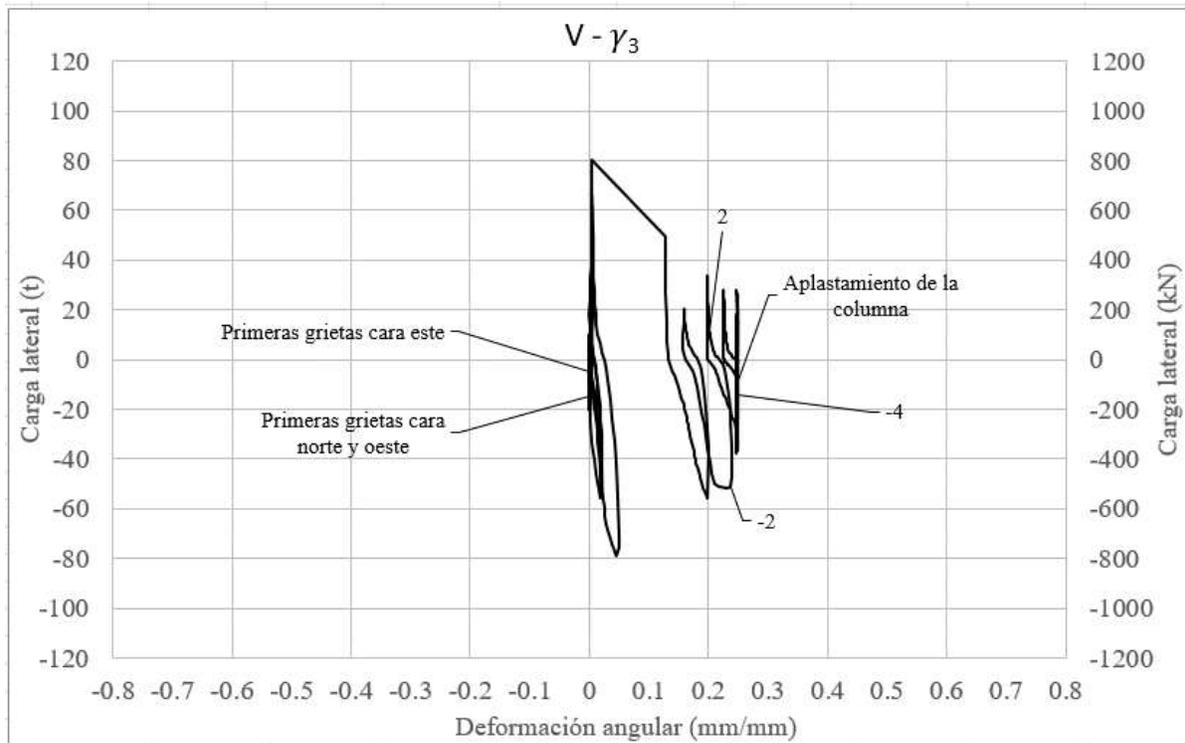


Fig. 3.3.65 Deformación angular región 3 - Columna OR

3.3.2.6 Rotación y deslizamiento de la cimentación

En este apartado se describen los parámetros medidos en la base de la columna y de la zapata, midiendo la rotación y el deslizamiento. La rotación de la zapata (Fig. 3.3.66) fue medida en la base de las caras laterales por un par de deformímetros de carátula colocados en cada una de ellas. En cuanto al deslizamiento de la columna (Fig. 3.3.67), éste fue medido en la parte superior de la zapata, donde se registraron los datos por medio de un transductor de desplazamiento. La configuración de los dispositivos externos colocados se puede observar con mayor detalle en la sección 2.9.1.

El valor máximo de la rotación obtenido en la zapata fue de 0.0018 mm/mm, valor muy cercano a cero, lo cual nos observa que la medición de este parámetro fue cercana a 0 en toda la prueba. El deslizamiento de la zapata máximo registrado fue de 0.155 mm, lo que indica un desplazamiento pequeño en esta sección.

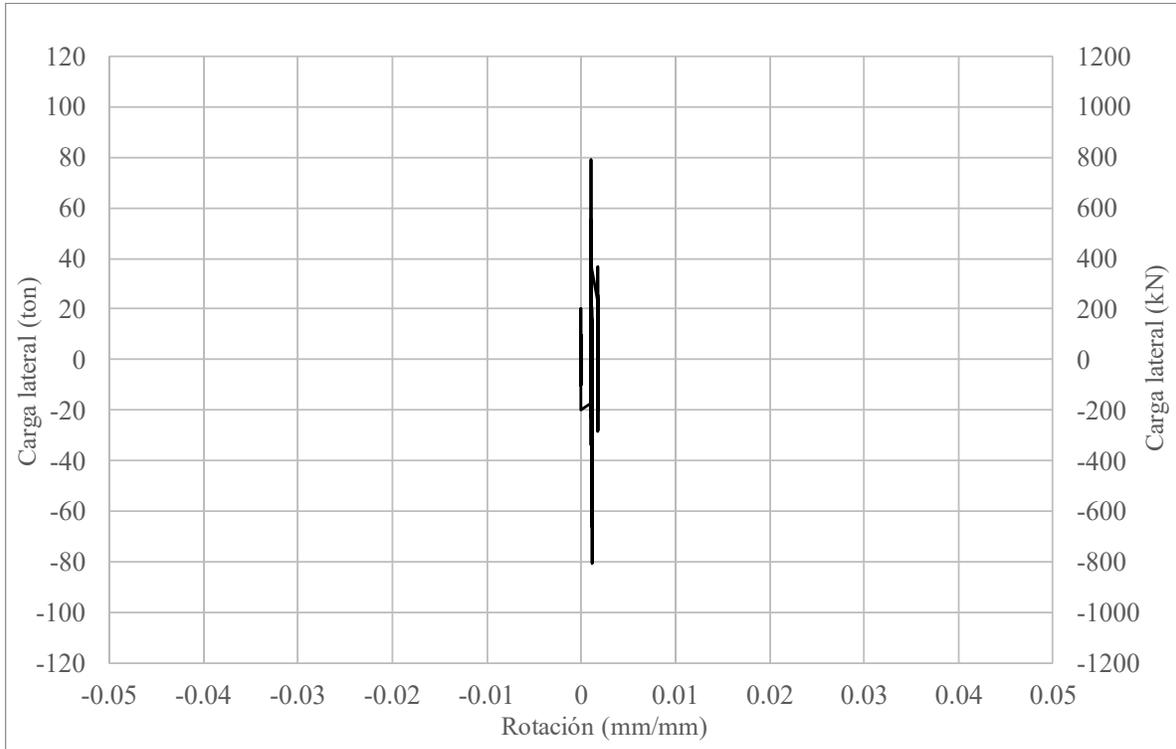


Fig. 3.3.66 Rotación en la zapata - Columna OR



Fig. 3.3.67 Deslizamiento en la base de la columna - Columna OR

3.3.3 Columna O*

La columna O* es la segunda columna que se tomará como referencia y segundo espécimen original esto debido a su falta de encamisado con elementos metálicos de ángulos y soleras. Cabe mencionar que debido al proceso constructivo el armado tuvo variaciones transversal y longitudinalmente.

El ensayo de la columna (Fig. 3.3.68) siguió el mismo procedimiento de carga y desplazamiento que se utilizó en la columna O, con dos actuadores. Se mantuvo un registro detallado en una bitácora del comportamiento general de la columna, de las grietas de control y de todas las características particulares que ocurrieron durante el ensayo, anotando el paso y el desplazamiento correspondiente ante cada suceso.

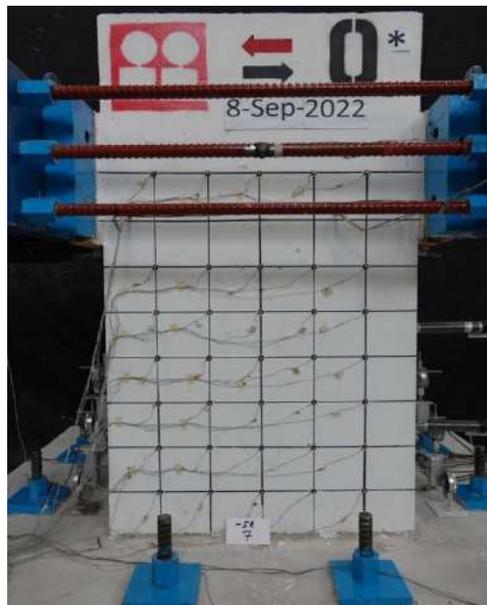


Fig. 3.3.68 Inicio de la prueba - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

3.3.3.1 Evolución del daño

Seguidamente se muestra la evolución del daño en el transcurso de la prueba de la columna O*. El ensayo inició sin ninguna anomalía o peculiaridad, sin embargo, fue hasta el pico negativo con carga de 5 t donde fue observada

la primera grieta (Fig. 3.3.69), la cual atravesó horizontalmente la cara este en la sección inferior y tuvo un grosor menor a 0.1 mm.



Fig. 3.3.69 Aparición de la primera grieta - Columna O (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)*

En la pausa con carga de 20 t se observó la formación de las primeras grietas horizontales en las caras norte, sur y oeste, dichas grietas tuvieron un espesor de hasta 0.1 mm.

Posterior a este pico, durante el control por carga se apreció la formación y extensión de grietas, así como la abertura y cierre de estas lo cual correspondía a si los gatos se retraían o se extendían, pero sin ningún otro acontecimiento relevante. A continuación, se muestra la Fig. 3.3.70 que representa el último semiciclo aplicado en el control por carga de esta columna.

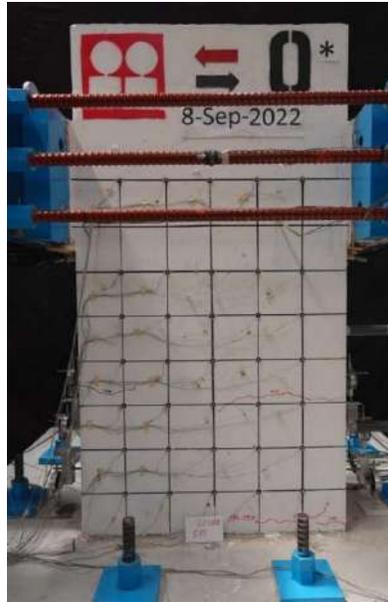


Fig. 3.3.70 Último pico del control por carga - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Al término del último semiciclo inició el control por distorsión donde en la pausa negativa de 0.5% (Fig. 3.3.71) se observó la formación de dos grietas inclinadas en sentido negativo, las cuales atravesaban la cara norte por los extremos.

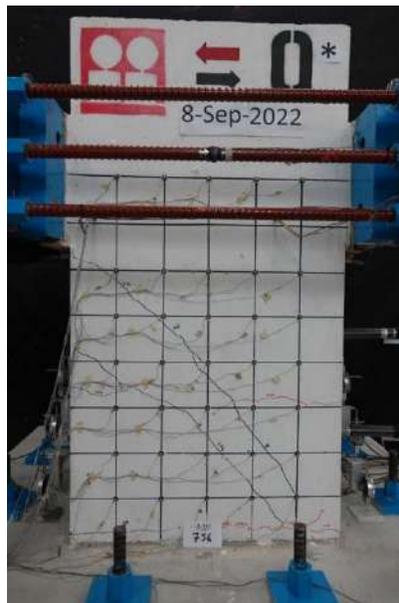


Fig. 3.3.71 Cara norte ($R=-0.5\%$) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Para el pico con distorsión de 0.5% (Fig. 3.3.72) se observaron grietas inclinadas como en el semiciclo anterior, pero en sentido opuesto, formando una X entre las grietas principales. A partir de este momento se denominaron grietas de control en la cara norte, las cuales fueron indicadores del comportamiento del espécimen y se llevaría control de esta a través de su grosor, mientras el daño lo permita. La grieta inclinada en sentido positivo tuvo un grosor de 0.3 mm en este semiciclo.

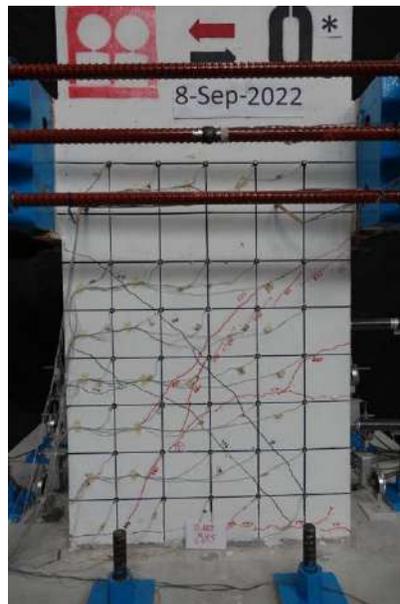


Fig. 3.3.72 Grietas inclinadas ($R=0.5\%$) - Columna O (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)*

En la distorsión negativa de 1% (Fig. 3.3.73) se pudo apreciar el aplastamiento de concreto en los extremos. De igual manera, se observó el daño en la parte superior de las caras laterales principalmente en la cara este (Fig. 3.3.74), justo debajo de la posición de los gatos y las placas con las que se sostuvo la celda de carga. Cabe mencionar que, en este pico, las grietas tuvieron un espesor en la cara norte de hasta 2.8 mm. En la esquina noroeste se observó el inicio de desconchamiento del concreto en la base de la columna (Fig. 3.3.75).

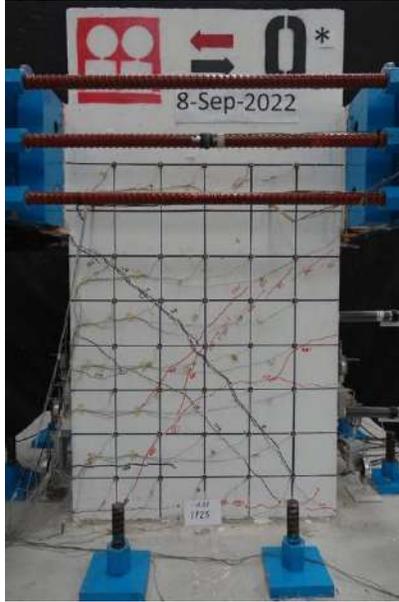


Fig. 3.3.73 Cara norte ($R=-1\%$) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.74 Daño en cara este - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.75 Desconchamiento de concreto en la base - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

La pausa con distorsión de 1% permitió apreciar la formación y extensión de nuevas grietas, así como del aumento del grosor de las grietas existentes. Durante la pausa del pico de -1% (Fig. 3.3.76), se notó la formación de grietas con la misma trayectoria en sentido opuesto y mismo comportamiento que la pausa inmediata anterior. En la cara norte las grietas alcanzaron espesores de 4 mm, mientras que en las caras laterales el máximo fue de 0.8 mm.



Fig. 3.3.76 Aparición y extensión de grietas ($R=-1\%$) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la pausa con repetición de la distorsión de 1% (Fig. 3.3.77 y Fig. 3.3.78), se observó la formación de nuevas grietas en sentido positivo en la base de la columna. Las grietas de la cara norte midieron hasta 1.4 mm, mientras que el

lado oeste 1 mm, donde se observó la aparición de grietas inclinadas en la parte superior e inferior de la columna y las grietas en lado oeste permanecieron cerradas en este pico.

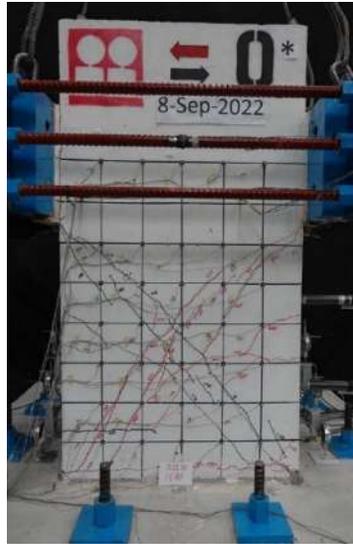


Fig. 3.3.77 Cara norte (R=1%(2)) - Columna O (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)*



Fig. 3.3.78 Cara lateral (R=1%(2)) - Columna O (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)*

Posteriormente, en el pico inmediato que fue del aumento negativo a la distorsión de 1.5%, la grieta principal en color negro que atravesaba la

columna de extremo superior este a extremo inferior oeste tuvo un incremento visible y medible en su espesor (Fig. 3.3.79), alcanzando hasta 8 mm. En el extremo inferior de la columna en el nacimiento de la grieta se apreció el aplastamiento y desprendimiento de concreto. También se notó como el incremento de la grieta norte mencionada se extendió en la cara este provocando el desprendimiento de concreto (Fig. 3.3.80 y Fig. 3.3.81).

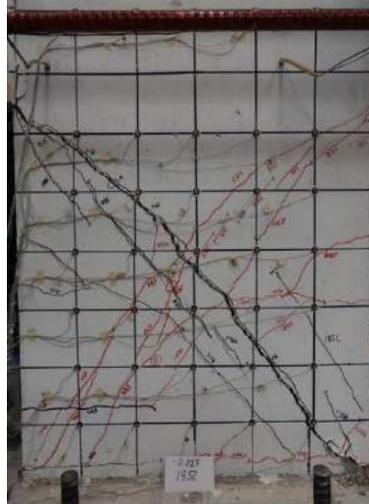


Fig. 3.3.79 Columna lateral inclinada ($R=-1.5\%$) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.80 Aplastamiento de la columna - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.81 Daño en la base de la columna - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la primera pausa con distorsión positiva de 1.5% (Fig. 3.3.82) se observó el mismo comportamiento que en el pico anterior, pero en sentido opuesto. El aplastamiento del espécimen en la parte inferior izquierda de la cara norte se percibió con menor aplastamiento y desprendimiento de concreto, al igual que el lado oeste donde se notó la formación de grietas inclinadas, continuación de la grieta principal que atravesó la columna de extremo a extremo (Fig. 3.3.83). El espesor de la grieta que tuvo una abertura más notable alcanzó una medición de 8 mm, misma que pasó en la pausa anterior en el desplazamiento en sentido negativo.

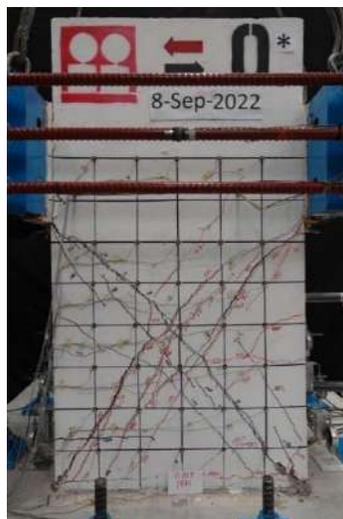


Fig. 3.3.82 Cara norte (R=1.5%) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.83 Aplastamiento de la columna - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

A la llegada de 0 t de carga después de la repetición negativa con distorsión de 1.5% (Fig. 3.3.84 y Fig. 3.3.85), se retiraron transductores horizontales, debido a que la carrera de estos ya no fue suficiente para los desplazamientos que la columna marcaba. En esta pausa, se observó mayor daño en la grieta principal inclinada en sentido negativo con un espesor de hasta 7 mm, de igual manera, en la cara este se notó el desprendimiento de concreto, el cual seguía aparentemente sostenido en la columna, sin embargo, las grietas hacían notar el daño en esta cara.

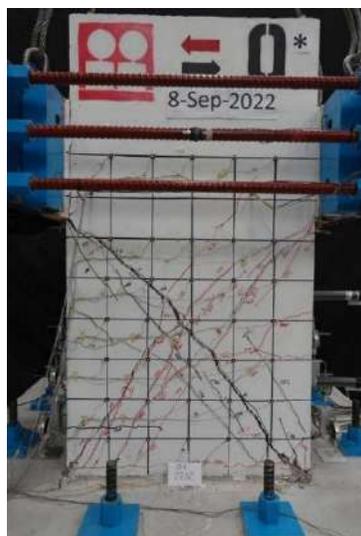


Fig. 3.3.84 Cara norte ($R=-1.5\%$) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

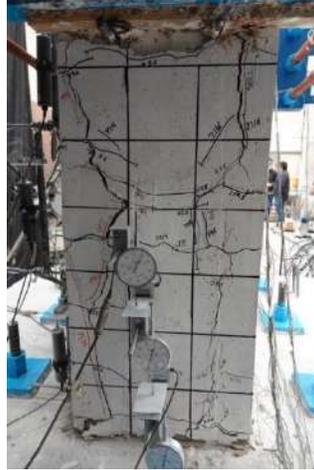


Fig. 3.3.85 Cara este ($R=-1.5\%(2)$) - Columna O (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)*

A partir de la repetición del pico con desplazamiento de 1.5%, se observó la abertura de ambas grietas lo que fue destacado debido a que en pausas anteriores mientras una grieta se abría más, otra se cerraba, fenómeno que ya no ocurrió a partir de este desplazamiento, sino que ambas grietas principales mantuvieron una abertura considerable.

Posteriormente la siguiente pausa correspondió al incremento negativo del 2% de desplazamiento (Fig. 3.3.86), donde se observó en la cara norte el deslizamiento del concreto de aproximadamente 1 cm, lo cual se apreció visualmente en la cuadrícula.



Fig. 3.3.86 Deslizamiento de la columna ($R=2\%$) - Columna O (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)*

Después de la pausa anteriormente mencionado se llegó a 0 t de carga, y al empezar el semiciclo para llegar a 2% de distorsión positiva se escuchó un sonido proveniente del concreto, lo cual fue atribuido a la abertura de un estribo. Al llegar a la pausa en la distorsión de 2% (Fig. 3.3.87, Fig. 3.3.88, Fig. 3.3.89 y Fig. 3.3.90) se dejaron de medir las grietas debido al daño a este momento de la prueba. En esta pausa se pudo observar el acero de refuerzo expuesto en la cara este.



Fig. 3.3.87 Cara norte ($R=2\%$) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.88 Daño en la base de la columna ($R=2\%$) - Columna O*

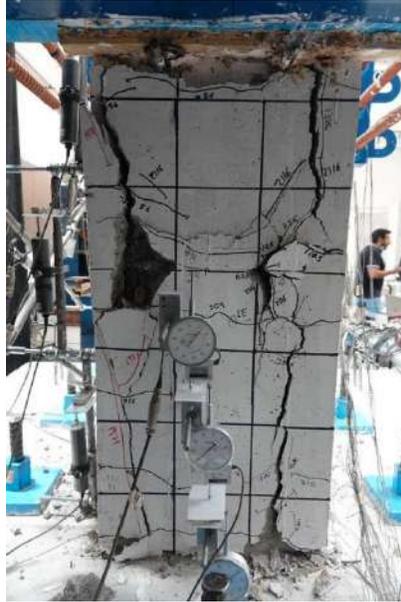


Fig. 3.3.89 Cara lateral (R=2%) - Columna O*



Fig. 3.3.90 Acero de refuerzo expuesto cara este - Columna O*

La prueba llegó a 0 t de carga, después comenzó el siguiente semiciclo negativo correspondiente a la distorsión del 2% se escucharon dos sonidos debidos al daño en el concreto. A la llegada de la pausa, se retiraron deformímetros colocados en la cara sur debido al daño en la columna. Las siguientes imágenes muestran el daño en esta distorsión en las cuatro caras de la columna (Fig. 3.3.91, Fig. 3.3.92, Fig. 3.3.93 y Fig. 3.3.94). La Fig. 3.3.92 muestra el efecto de grietas por hendimiento en la cara este.



Fig. 3.3.91 Cara norte ($R=-2\%(2)$) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.92 Cara este ($R=-2\%(2)$) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.93 Cara sur ($R=-2\%$ (2)) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

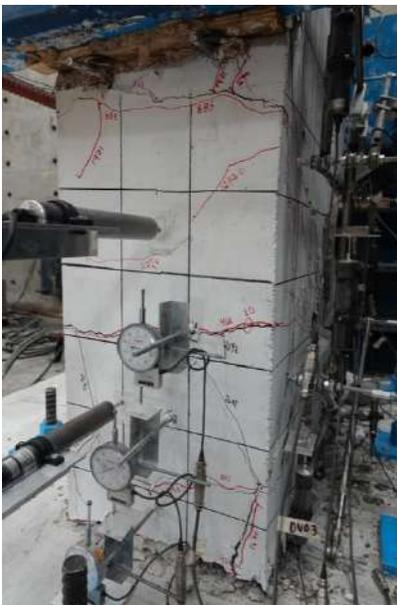


Fig. 3.3.94 Cara oeste ($R=-2\%$ (2)) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

La prueba continuó, terminando la repetición positiva a 2%, el incremento y la repetición de los semiciclos correspondientes a la distorsión a 2.5% en sentido negativo y positivo. Dentro de los sucesos relevantes son los sonidos provenientes del concreto y los instrumentos retirados debido al daño.

Destacó también la caída de bloques de concreto principalmente en la parte central de la cara norte y en la cara este.

A continuación, se muestran imágenes en el último semiciclo negativo con la distorsión de 2.5% (Fig. 3.3.95, Fig. 3.3.96, Fig. 3.3.97 y Fig. 3.3.98), el cual también correspondió a la última pausa previo al término de la prueba.



Fig. 3.3.95 Cara norte (R=-2.5%) - Columna O (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)*



Fig. 3.3.96 Cara este (R=-2.5%) - Columna O (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)*



Fig. 3.3.97 Cara sur ($R=-2.5\%$) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.98 Cara oeste ($R=-2.5\%$) - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

3.3.3.2 Estado final de daño

En las siguientes imágenes se observa el estado final del espécimen, donde las grietas son inmedibles debido al daño. Se notó la fragmentación de la columna en bloques de concreto principalmente en la cara norte y sur. También se observó el aplastamiento del concreto y la extensión de grietas principales en las caras frontales hacia las laterales. El daño se concentró en el centro de la columna en todas las caras, pudiéndose observar el acero de refuerzo de la columna.



Fig. 3.3.99 Estado final cara norte - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.100 Estado final cara sur - Columna O (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)*

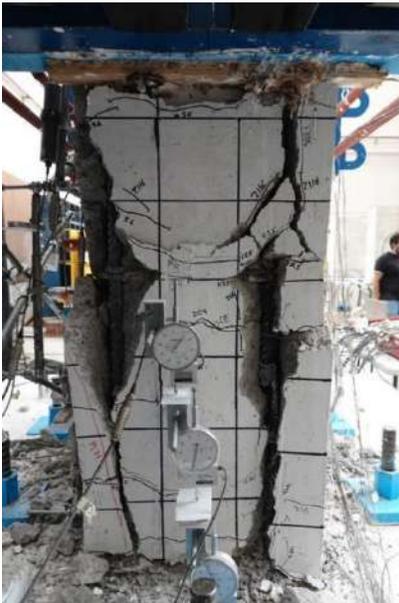


Fig. 3.3.101 Estado final cara este - Columna O (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)*

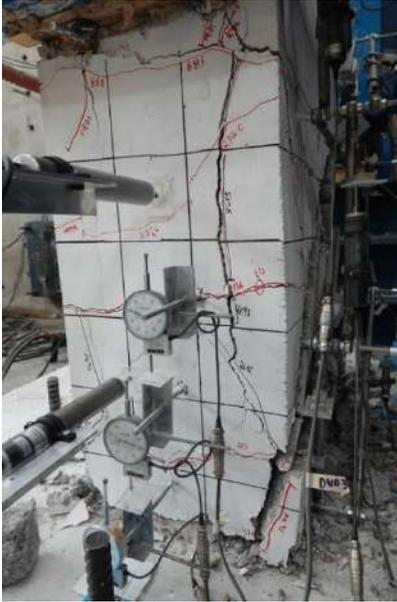


Fig. 3.3.102 Estado final cara oeste - Columna O* (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

3.3.3.3 Comportamiento histerético

La curva histerética general de la columna O* se aprecia en la Fig. 3.3.103 donde se grafica la distorsión contra la carga lateral aplicada. Los primeros ciclos se observan con poca variación en la amplitud de los lazos histeréticos, sin embargo, esto cambia a lo largo de la prueba. La mayor distorsión aplicada al espécimen fue de 2.5%.

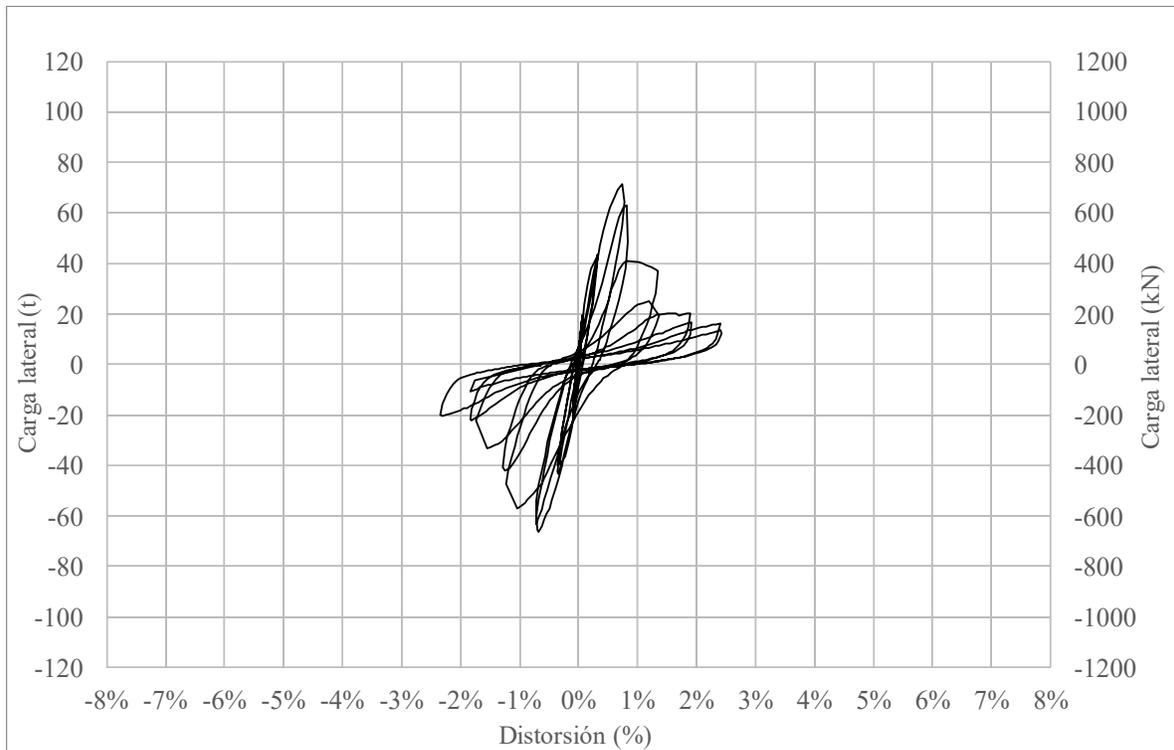


Fig. 3.3.103 Curva histerética general - Columna O*

En la Fig. 3.3.104 se destacan los hitos más importantes, así como ciclos destacados. Se observa una curva simétrica tanto para la parte positiva como para la negativa en sus lazos histeréticos. Las primeras grietas en la columna O* se formaron en la pausa del primer semiciclo correspondiente a la aplicación de carga negativa de 20 t. En la gráfica se aprecia la pérdida de rigidez después de haber finalizado los dos primeros ciclos ($R = 0.5\%$ y $R = 0.5\%(2)$) por desplazamiento, sin embargo, fue hasta el tercer semiciclo negativo en el que se alcanzó la resistencia máxima de 71.35 t en la distorsión de -1%. En la pausa inmediata con distorsión de 1%, la columna tuvo una pérdida de 7% respecto a su resistencia máxima. En la pausa del último semiciclo con distorsión de 2.5% la resistencia a la que llegó la columna fue de 13.43 t, lo que representó la pérdida de 81% de la resistencia máxima alcanzada.

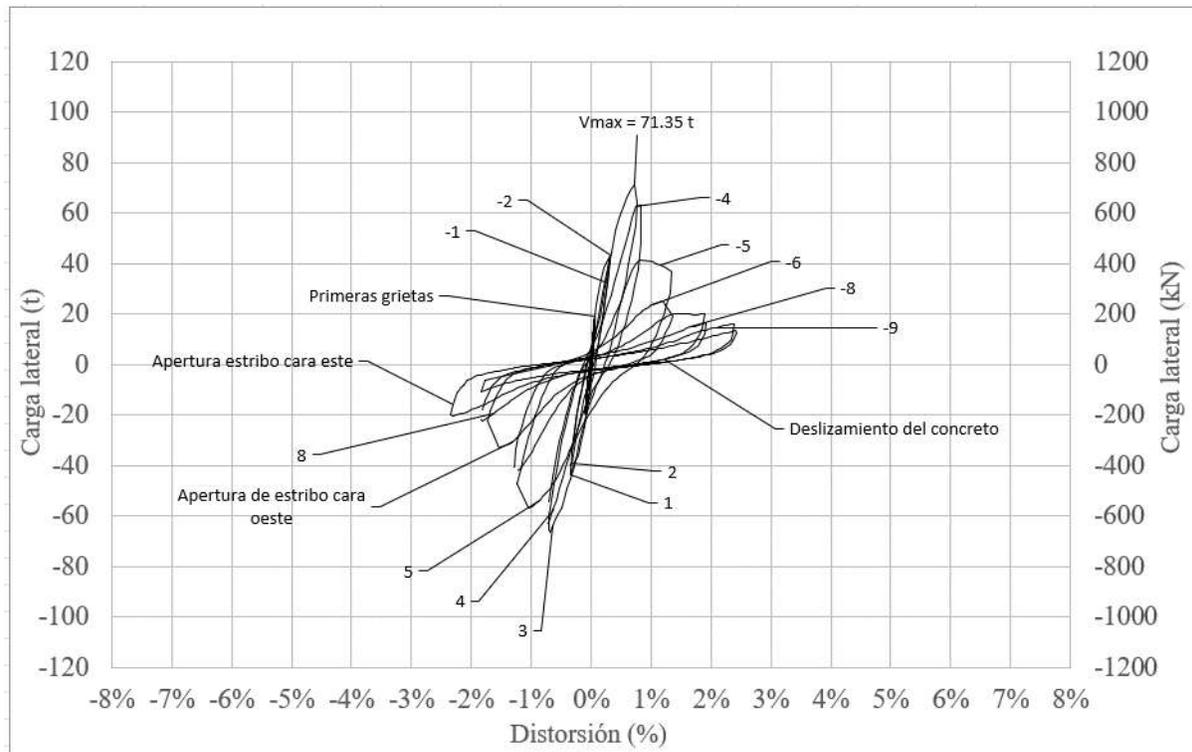


Fig. 3.3.104 Curva histerética detallada - Columna O*

3.3.3.4 Rotación y curvatura

La rotación de la columna O* fue medida al igual que en los especímenes anteriores, por medio de tres transductores de desplazamiento colocados a tres diferentes alturas en las caras laterales de la columna con el fin de medir tres regiones.

La importancia de conocer los valores máximos en cada región es conocer en cuál de las tres zonas los valores alcanzados fueron mayores. Los valores máximos registrados de las rotaciones en el ensaye fueron los siguientes:

Tabla 32. Rotación - Columna O*

| Región | Rotación máxima (mm/mm) |
|--------|-------------------------|
| 1 | 0.019 |
| 2 | 0.003 |
| 3 | 0.006 |

La curva correspondiente a la primera región de la rotación se observa en la Fig. 3.3.105, donde se observa la gráfica más simétrica de las tres regiones con lazos de mayor amplitud. La gráfica es muy similar a la obtenida en la curva histerética de la columna. La rotación máxima del modelo fue registrada en esta región; con 0.0194 mm/mm en la pausa positiva del semiciclo con distorsión de 2.5%.

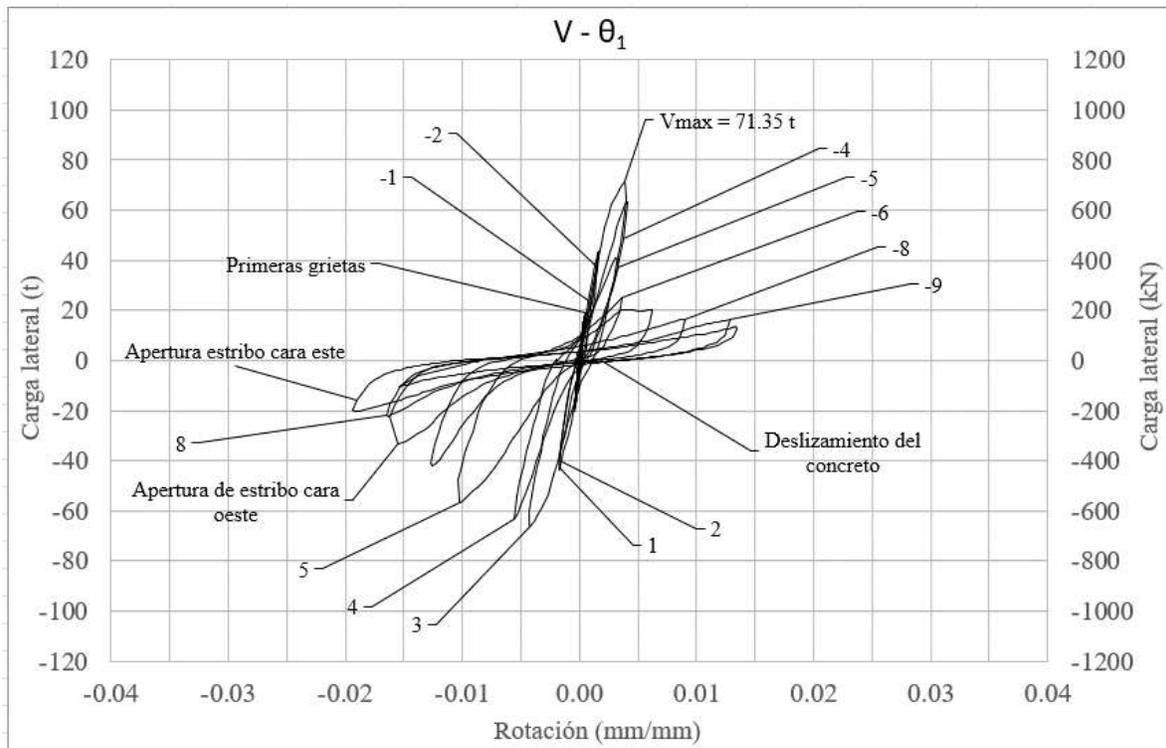


Fig. 3.3.105 Rotación de la región 1 - Columna O*

En la Fig. 3.3.106 se contemplan las rotaciones de la segunda región, donde se aprecia la formación de una curva con menores rotaciones que en la primera región. Se observa una rigidez constante prácticamente en toda la prueba a excepción de los últimos ciclos donde del lado izquierdo se formaron pequeños lazos que alcanzaron una rotación máxima de 0.0026 mm/mm. El valor máximo registrado en esta región ocurrió cuando la prueba se encontraba en la aplicación de carga lateral para llegar a la distorsión positiva de 2.5%.

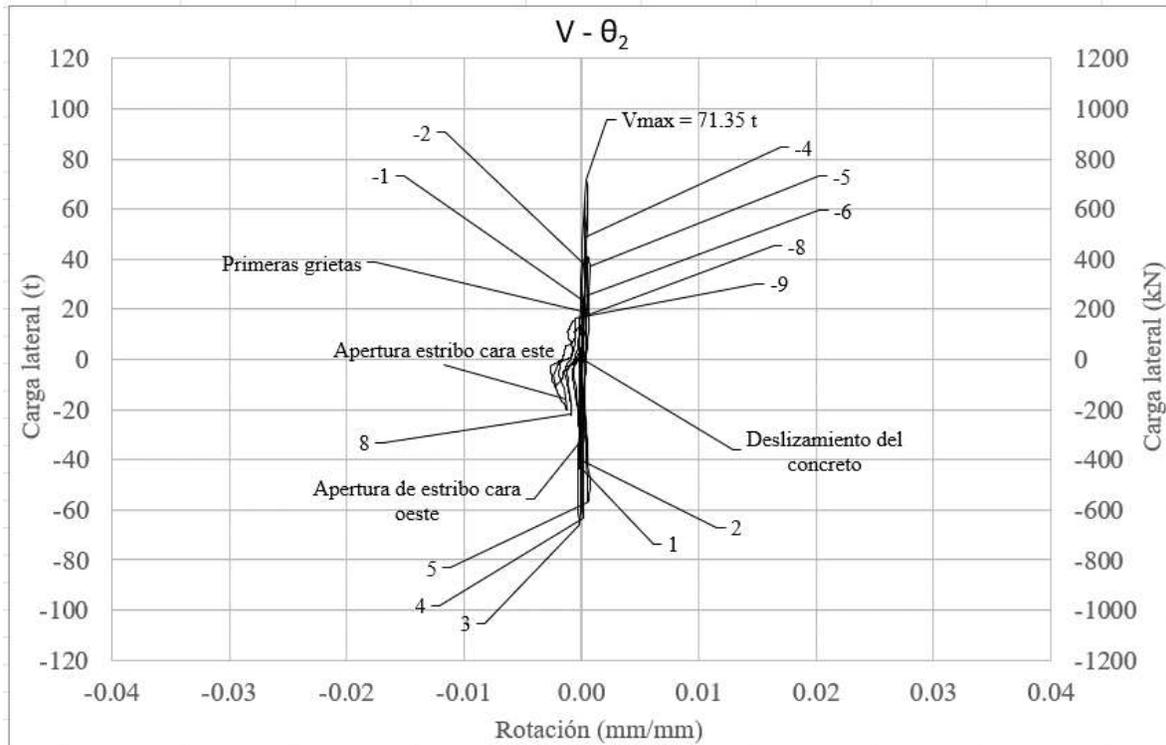


Fig. 3.3.106 Rotación de la región 2 - Columna O*

La gráfica de las rotaciones obtenidas en la región 3 se muestra en la Fig. 3.3.107. Las rotaciones registradas fueron muy cercanas a cero hasta llegar a la distorsión de 1.5% en el quinto ciclo, posterior a ello se observó la formación de lazos con mayor amplitud orientados hacia el lado izquierdo. La distorsión máxima registrada fue de 0.0062 mm/mm en el primer semiciclo con distorsión de 2.5% donde se escuchó un sonido proveniente del concreto, resultado del daño a la columna.

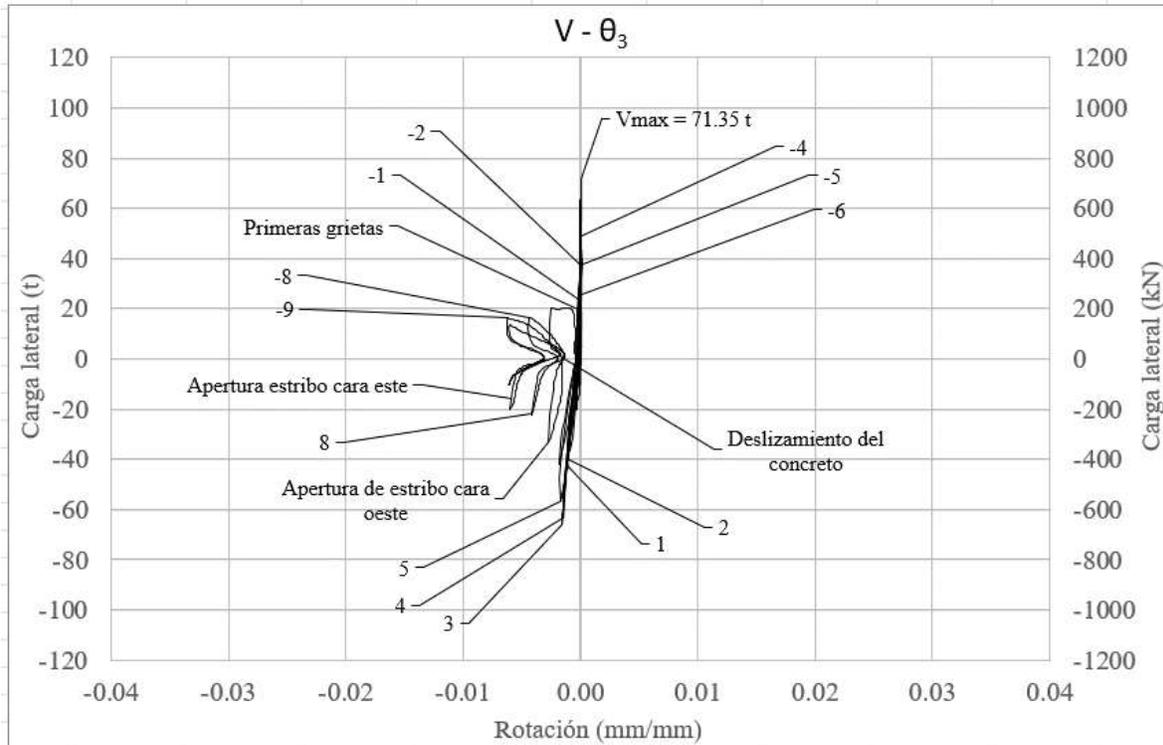


Fig. 3.3.107 Rotación de la región 3 - Columna O*

A continuación, se muestran las gráficas de las curvaturas de cada región, las cuales son resultado de la división de las rotaciones obtenidas entre la altura a la que fueron colocados los deformímetros.

El comportamiento registrado a lo largo de la prueba fue muy cercano a cero, por lo tanto despreciable. A continuación, se resumen los valores máximos alcanzados en cada región (Tabla 33):

Tabla 33. Curvatura - Columna O*

| Región | Curvatura máxima (1/mm) |
|--------|-------------------------|
| 1 | 0.000036 |
| 2 | 0.000032 |
| 3 | 0.000018 |

Las curvas mostraron un comportamiento similar en las tres regiones, donde el menor valor fue en la región 3 y el mayor en la región 1 con 0.000036 1/mm.

3.3.3.5 Deformación angular

Las deformaciones angulares en las tres regiones de estudio delimitadas fueron obtenidas gracias a los transductores de desplazamiento diagonales colocados en la cara sur de los modelos.

Pese a que los resultados de las deformaciones angulares máximas registradas en cada región fueron muy similares, el comportamiento de las gráficas en sus inicios fue diferente. A continuación se incluye la Tabla 34 que resume los valores máximos registrados:

Tabla 34. Deformación angular – Columna O*

| Región | Deformación angular (mm/mm) |
|--------|-----------------------------|
| 1 | 0.237 |
| 2 | 0.279 |
| 3 | 0.241 |

En la Fig. 3.3.108 se observa la curva perteneciente a la región 1, donde la máxima deformación angular registrada fue de 0.237 mm/mm y se presentó cuando fue evidente el deslizamiento del concreto en la cara norte de la columna y se presentó la abertura de un estribo en la cara oeste. Se observa cierto cambio en el comportamiento de la curva en el semiciclo -8 que representa la distorsión de -2%.

La región 2 (Fig. 3.3.109) es en la que se presentaron las mayores deformaciones angulares con un valor máximo de 0.279 mm/mm que se alcanzó en el semiciclo -6 con distorsión de -1.5% y se mantuvo hasta el final de la prueba. El comportamiento de la región es el más estable de las tres regiones.

Finalmente la curva de la deformación angular correspondiente a la región 3 se observa en la Fig. 3.3.110, donde el mayor valor registrado fue de 0.241 mm/mm en el primer semiciclo negativo con distorsión de 2.5%. La curva de esta región fue muy similar a la anterior, la diferencia radicó en la amplitud de sus lazos a lo largo de todo el ensaye.

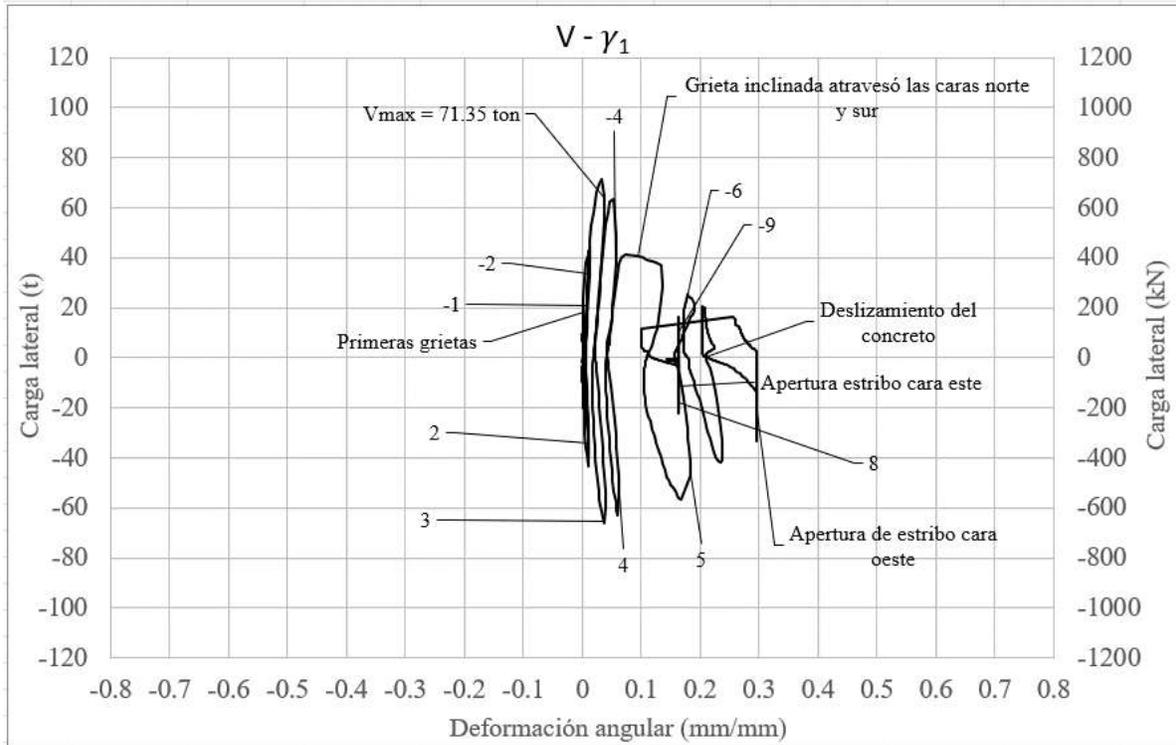


Fig. 3.3.108 Deformación angular región 1 - Columna O*

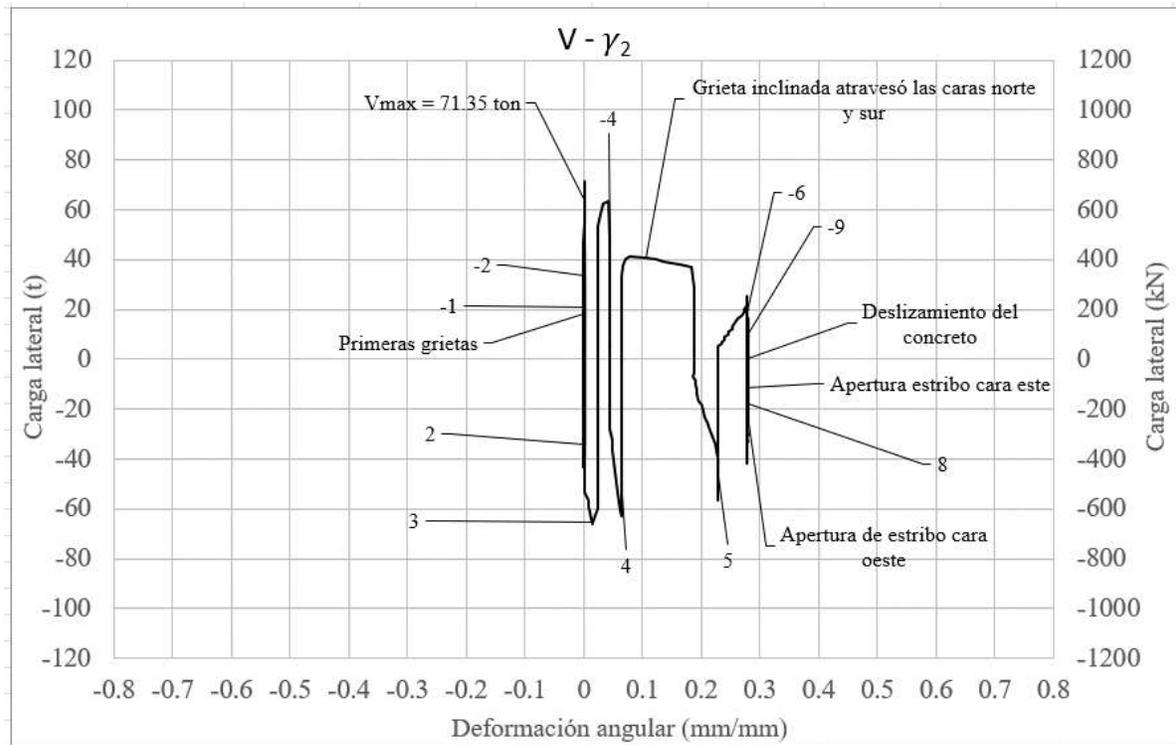


Fig. 3.3.109 Deformación angular región 2 - Columna O*

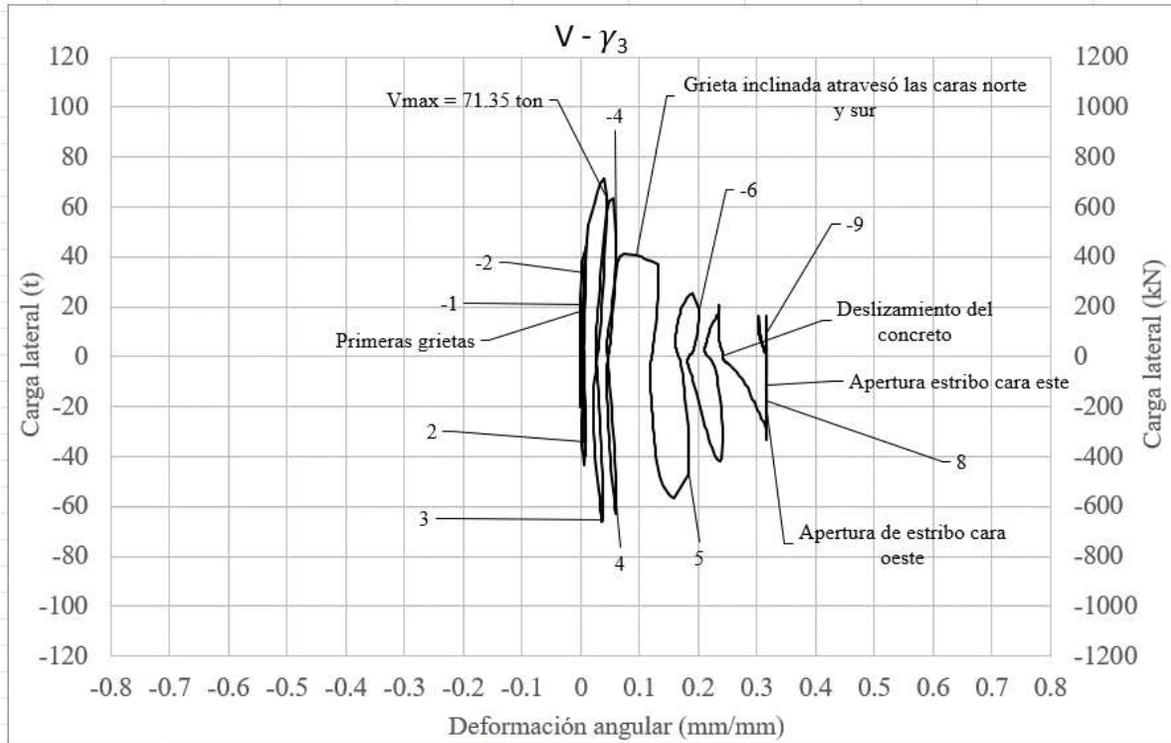


Fig. 3.3.110 Deformación angular región 3 - Columna O*

3.3.3.6 Rotación y deslizamiento de la cimentación

En esta sección se describe el comportamiento de la rotación y deslizamiento de la zapata del espécimen O*. Las rotaciones fueron medidas por medio de la colocación de dos transductores de carátula; uno en la cara este y otro en la cara oeste en la base de la zapata, lo que permitió la medición de las deformaciones en las caras este y oeste.

El deslizamiento de la zapata se registró por medio de un transductor de desplazamiento colocado en la cara oeste en la parte superior de la zapata.

Los valores registrados en la rotación de la zapata fueron muy cercanos a cero, el valor máximo medido fue de 0.00012 mm/mm. El valor máximo del deslizamiento en la base de la columna fue de 0.18 mm/mm.

3.3.4 Columna C-2

La columna C-2 es la primera columna encamisada en ensayarse para el fin de la presente tesis. El espécimen sin daño estuvo encamisado con ángulos con ala de 2 pulgadas, los cuales fueron colocados en las cuatro esquinas de la columna, con una longitud de 97 cm, dejando un espacio entre la camisa y la zapata, lo cual se puede observar en la siguiente figura (Fig. 3.3.111). De igual manera, el encamisado también estuvo compuesto por soleras con espesor de 6 mm y ancho de 2 mm, las cuales fueron colocadas a una separación de 42.5 cm entre ellas.

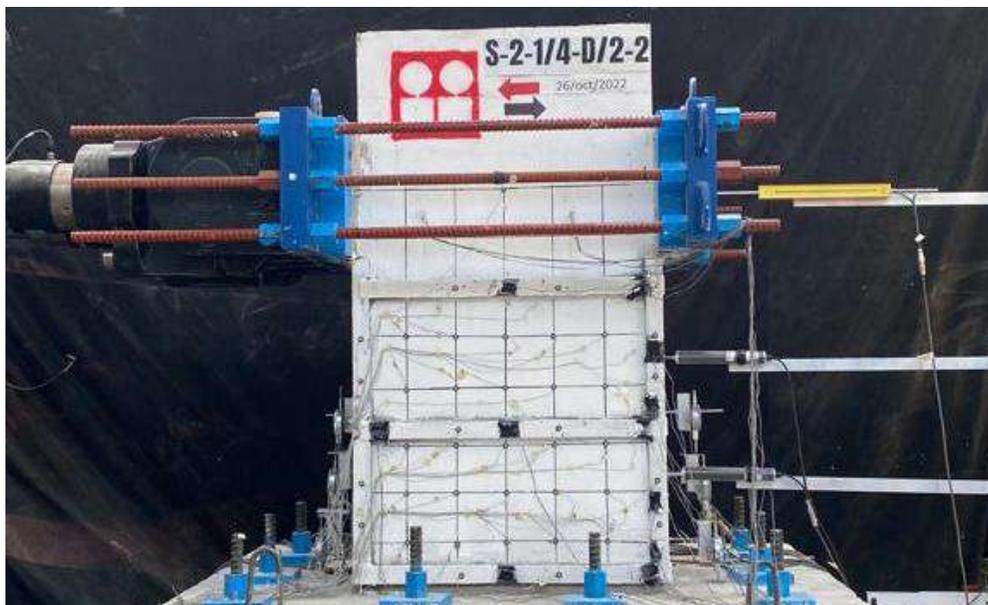


Fig. 3.3.111 Modelo previo a la prueba - C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

La configuración del refuerzo de la columna y la zapata fue la misma utilizada que en los especímenes anteriores. La columna fue construida en sitio y probada sin daño, así como el encamisado de acero fue soldado y colocado en la columna. Para garantizar un buen contacto entre el encamisado de elementos metálicos y la columna, se colocó un mortero fluido tipo *grout*. La historia de carga aplicada a esta columna fue la misma que en las pruebas descritas anteriormente. Primero, controlada por carga hasta llegar a 20 t, en sentido positivo y negativo, para después aplicar un control por distorsión, que en este caso llegó a 6%. Para asegurar un buen control a lo largo de la

prueba, se marcaron las grietas con color negro y rojo que correspondían a si el semiciclo era positivo (empuje hacia el oeste) o negativo (empuje hacia el este). Simultáneamente, se llevó un registro escrito en el que se describieron los espesores de las grietas denominadas de control que fueron las más representativas de todas las caras, también se describieron las anomalías y las particularidades a lo largo del ensaye para poder comprender de mejor manera el comportamiento de la columna encamisada.

3.3.4.1 Evolución del daño

Seguidamente, se describe el daño y la evolución de la prueba del primer espécimen encamisado, estudio de la presente tesis, así como los hitos más relevantes del ensaye.

Las primeras grietas inclinadas se presentaron (Fig. 3.3.112) en la distorsión de -0.05% , también en esta misma pausa, se observaron grietas propias de la zapata y en el área de 3 cm entre la columna y la zapata (Fig. 3.3.113).



Fig. 3.3.112 Primera aparición de grietas ($R=-0.5\%$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.113 Agrietamiento en la base de la columna - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Para la pausa del semiciclo con distorsión 0.05%, se apreció la presencia de grietas inclinadas en ambos sentidos (Fig. 3.3.114), las cuales alcanzaron hasta 0.15 mm de espesor. En cuanto a las caras laterales (Fig. 3.3.115 y Fig. 3.3.116), se observaron las primeras grietas con espesores de hasta 0.1 mm.

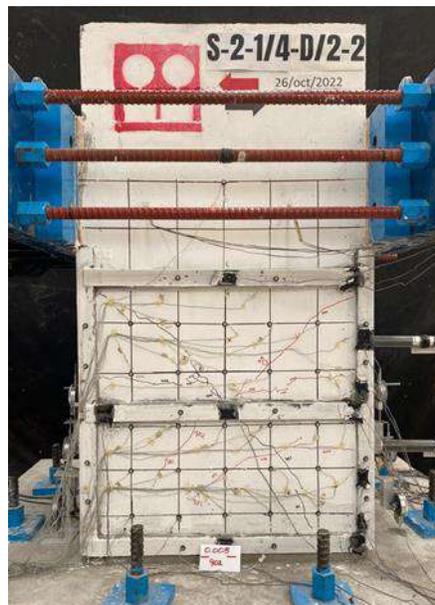


Fig. 3.3.114 Cara norte (R=0.5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.115 Primeras grietas en la cara este - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.116 Primeras grietas en la cara oeste - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En los siguientes semiciclos, el comportamiento de las grietas continuó en cuanto a su extensión y aparición de grietas. A continuación, se observa el estado del espécimen en la distorsión positiva de 1.5% (Fig. 3.3.117), donde se apreció una mayor presencia de grietas. Para este momento de la prueba, se pudo observar una mayor concentración del daño en el centro de la columna.



Fig. 3.3.117 Extensión y aparición de grietas ($R=1.5\%$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la pausa correspondiente a la repetición de la distorsión negativa de 1.5% (Fig. 3.3.118), la abertura de grietas fue la mayor que se había presentado hasta el momento de la prueba, alcanzando hasta 2.2 mm en la cara norte, mientras que en las caras laterales la abertura mayor fue de 0.8 mm.



Fig. 3.3.118 Cara norte ($R=1.5\%(2)$) (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Fue en la distorsión negativa de -2% (Fig. 3.3.119) que en la cara norte se observó la continuidad de la grieta principal inclinada en sentido negativo. De igual manera, en este semiciclo fue más notable el aplastamiento en la base de la columna, en las anteriores y futuras pausas obedeció al empuje o jalón al que se llevó el espécimen.

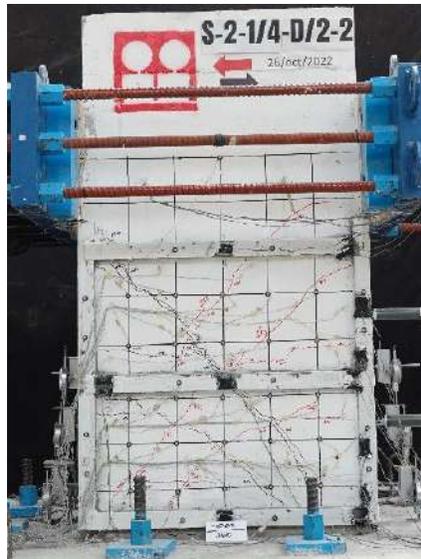


Fig. 3.3.119 Cara norte ($R=-2\%$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Durante el semiciclo de repetición con distorsión negativa de -2% (Fig. 3.3.120), se notó la aparición de grietas en la zapata de hasta 0.6 mm. La aparición de nuevas grietas en el área cubierta por la camisa fue imperceptible, únicamente continuó la extensión y abertura de grietas ya existentes.

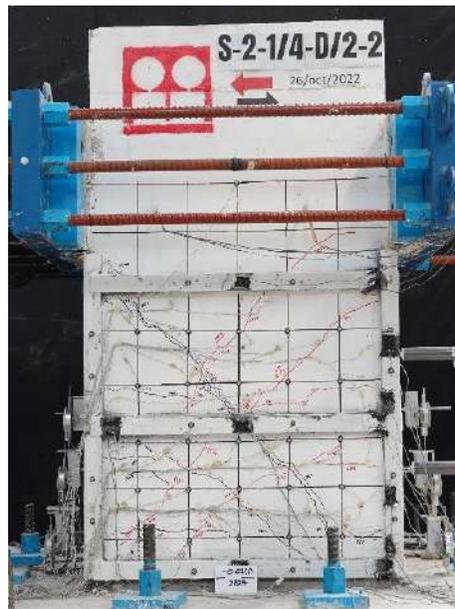


Fig. 3.3.120 Cara norte ($R=-2\%(2)$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Para el incremento a la distorsión de -2.5% (Fig. 3.3.121), se pudo observar la formación de grietas nacientes de la grieta principal inclinada en sentido negativo y la mayor abertura de la grieta principal en toda la prueba. En cuanto al siguiente semiciclo correspondiente a la distorsión a 2.5% en sentido positivo, se observó el mismo comportamiento en las grietas opuestas, que para el caso correspondieron a las de color rojo.

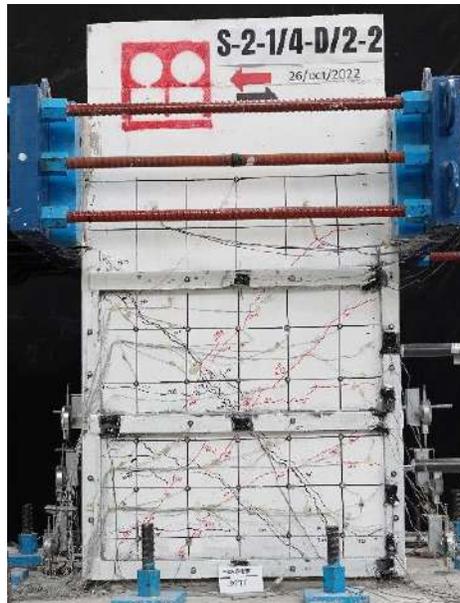


Fig. 3.3.121 Cara norte (R=-2.5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la repetición del semiciclo negativo con distorsión de -2.5% (Fig. 3.3.122), las grietas en la cara norte con mayor espesor fueron de 4 mm , mientras que en la cara lateral este fue de 2.5 mm .

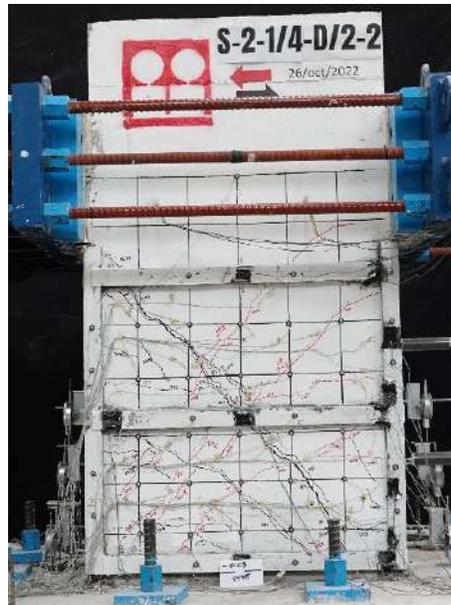


Fig. 3.3.122 Cara norte ($R=-2.5\%$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

La prueba continuó con normalidad hasta la pausa en cero t de carga, la cual fue posterior a la repetición del semiciclo positivo con distorsión de 2.5%. En dicha pausa, se observó una aparición considerable de grietas en la cara este y desprendimiento en la pintura a base de cal en la solera intermedia de la cara norte.



Fig. 3.3.123 Desprendimiento de pintura a base de cal - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Para el incremento del semiciclo negativo correspondiente a la distorsión de -3% (Fig. 3.3.124), se observó la extensión y apertura de la grieta principal en

sentido negativo de la cara norte, alcanzando una medición de 5 mm. De igual manera, se marcó la aparición de nuevas grietas para este paso.

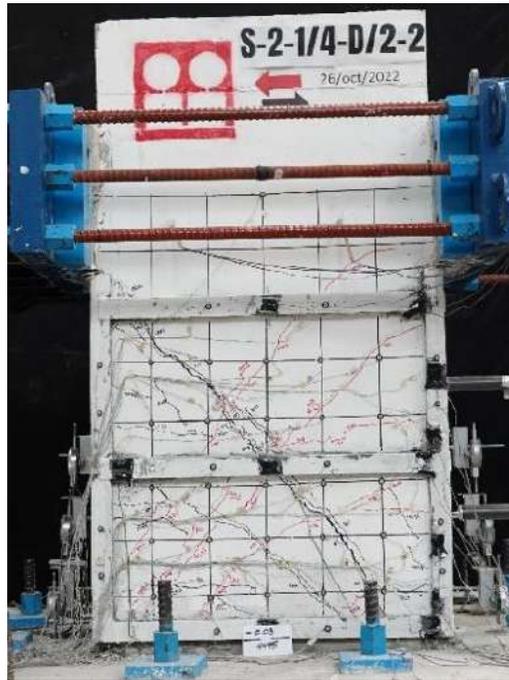


Fig. 3.3.124 Cara norte (R=-3%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En cuanto a la pausa de la distorsión de 3% (Fig. 3.3.125), se puede observar el desprendimiento considerable en la pintura a base de cal en la solera intermedia de la cara norte (Fig. 3.3.126). Cabe mencionar que, en la misma solera intermedia de la cara principal, en el grout comprendido entre la columna y el encamisado metálico se observan grietas (Fig. 3.3.127), que resultan del nivel de daño a este punto de la prueba. Se presume una aparente abertura de los estribos en la cara sur. Las grietas de la cara norte tuvieron un espesor de hasta 7 mm en este punto de la prueba.

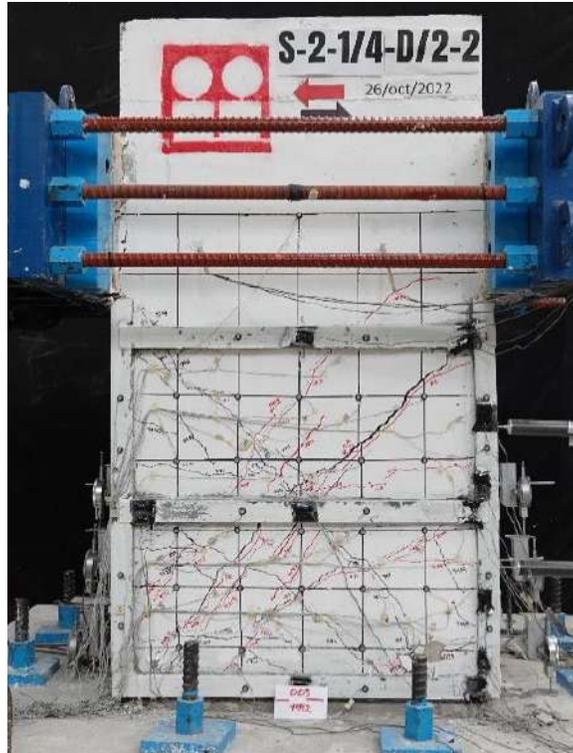


Fig. 3.3.125 Cara norte ($R=3\%$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.126 Desprendimiento de pintura a base de cal en la solera - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.127 Agrietamiento del grout en la solera intermedia - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Para la repetición de la distorsión negativa correspondiente a -3% , las grietas alcanzaron mediciones en las grietas principales en sentido negativo de 5 mm, mientras que en el sentido positivo hasta de 6 mm. Lo más destacado en esta pausa fue el notable desprendimiento de grout en la solera intermedia de la cara sur (Fig. 3.3.128 y Fig. 3.3.129), en la zona del desprendimiento del grout se observó la concentración del daño de la columna, lo que se muestra en las siguientes imágenes.



Fig. 3.3.128 Grout cara sur - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.129 Deslizamiento de grout - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

El espécimen no presentó algún cambio notable en la repetición de la distorsión positiva de 3%, sin embargo, después de este semiciclo se llevó la prueba a cero t de carga. En ese momento de la prueba, en la cara norte se replicó el comportamiento de la cara sur, pues se observó el deslizamiento grout-solera en la solera intermedia, así como una acumulación de daño en la zona en que ocurrió esto. En los extremos de la misma solera de la cara norte, se pudo observar el casi total desprendimiento de la pintura a base de cal en esta parte del elemento.

Conforme el agrietamiento creció, el concreto se expandió y las soleras se alargaron, provocando el agrietamiento transversal del grout porque no tuvo la capacidad de deformación del nuevo ancho de las soleras, lo que finalmente hizo que el grout se deslizará y finalmente se desprendiera.

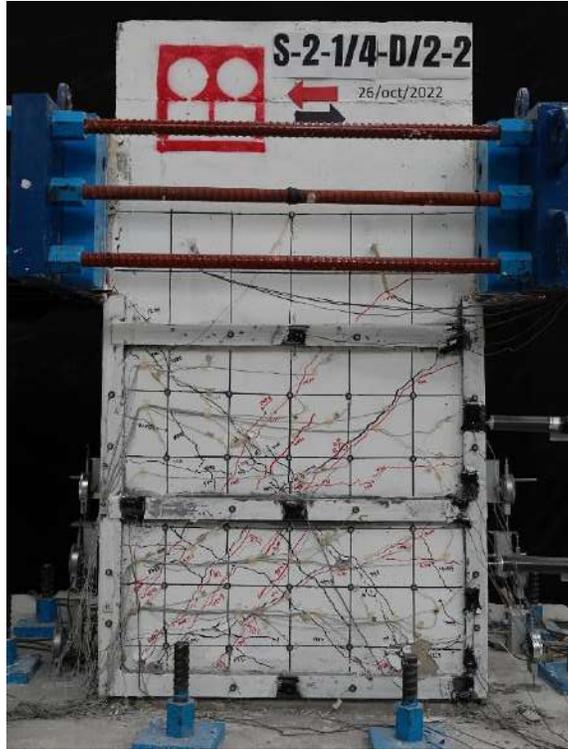


Fig. 3.3.130 Carga cero después de la distorsión del 3% - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

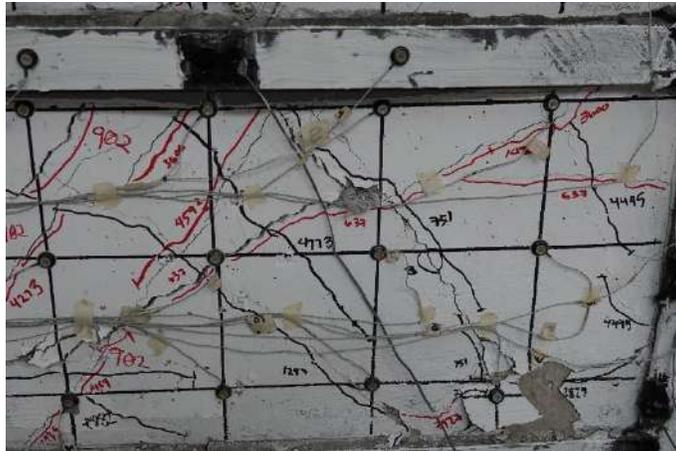


Fig. 3.3.131 Daño en cara norte - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.132 Grout cara norte - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.133 Desprendimiento de grout cara norte - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.134 Desprendimiento de pintura a base de cal - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.135 Desprendimiento total del grout cara sur - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

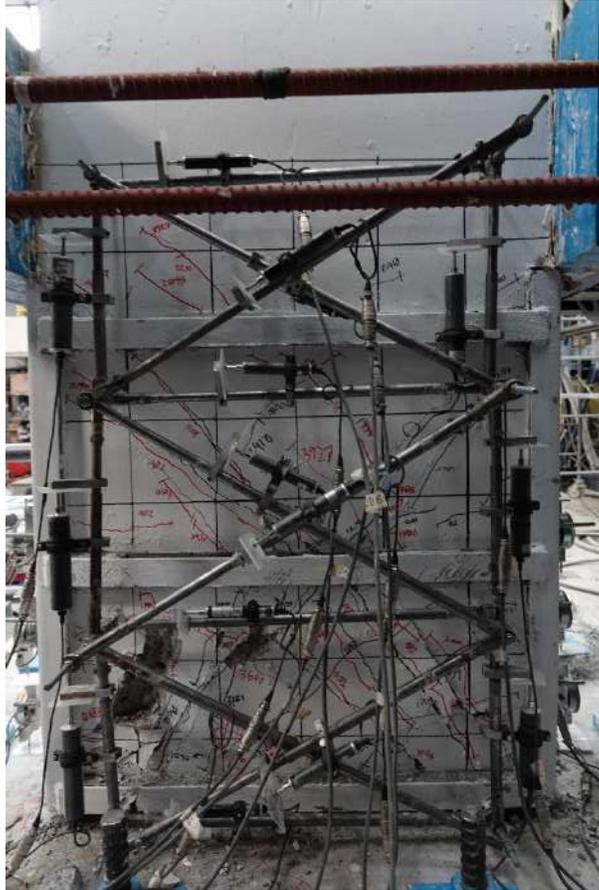


Fig. 3.3.136 Cara sur después de la distorsión de 3% - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

La siguiente pausa correspondió a un incremento negativo de -3.5%, donde no se observó particularidad alguna. Fue hasta después de la distorsión de 3.5%, a la llegada de cero t de carga (Fig. 3.3.137) donde se observó por primera vez el desprendimiento de concreto en las caras laterales. Las caras norte y sur alcanzaron aberturas de grietas de 9 y 6 mm respectivamente, mientras que en la cara este alcanzaron espesores de hasta de 2 mm.



Fig. 3.3.137 Daño después de la distorsión de- 3.5% - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Para el semiciclo inmediato positivo con distorsión de 3.5% (Fig. 3.3.138), el grout que unía la solera intermedia de la cara norte con la columna se desprendió en su totalidad (Fig. 3.3.139, Fig. 3.3.140 y Fig. 3.3.141). Al igual que en la cara sur (Fig. 3.3.142), se retiró debido al daño que podía ocasionar a los instrumentos.



Fig. 3.3.138 Cara norte (R=3.5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.141 Grout desprendido - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

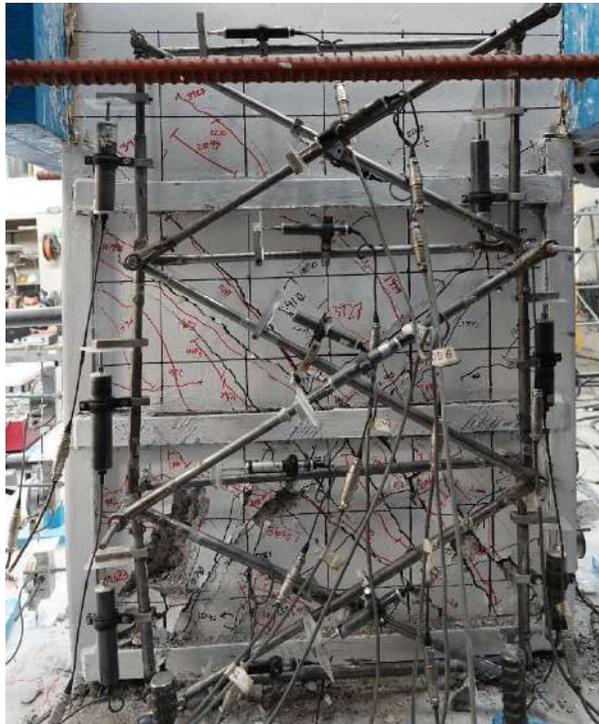


Fig. 3.3.142 Cara sur ($R=3.5\%$) - Columna C-2

En el semiciclo con distorsión negativa de -4% (Fig. 3.3.143, Fig. 3.3.144, Fig. 3.3.145 y Fig. 3.3.146), se observó el desprendimiento de concreto, el daño se concentraba en la parte inferior de las grietas principales de cortante, así como en el centro de la columna. Para este punto, la grieta de control en sentido negativo de la cara norte ya no era medible, por lo que se deja de

medir, sin embargo, se denomina otra grieta de control en esta misma dirección.

Se pudo observar la deformación y el confinamiento que los ángulos aportaron a la columna, esto es notable en la parte inferior del encamisado, en la zona inferior de la solera intermedia.



Fig. 3.3.143 Cara norte ($R=-4\%$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.144 Cara este ($R=4\%$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.145 Cara sur ($R=4\%$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

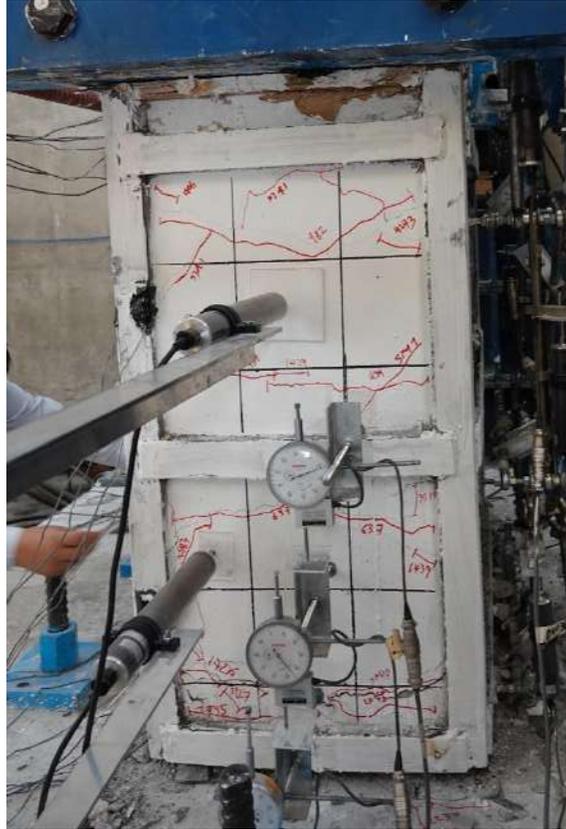


Fig. 3.3.146 Cara oeste (R=-4%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la distorsión inmediata positiva a 4%, se observó el desprendimiento de bloques de concreto en la cara sur (Fig. 3.3.148), de igual manera, la grieta principal en la cara norte en sentido positivo fue inmedible a partir de la pausa (Fig. 3.3.147). Se apreció que la cara norte presentó un daño considerable, comenzando a concentrar el daño en el centro del espécimen.

Cabe mencionar, que anteriormente el grout de las soleras intermedias en las caras norte y sur se desprendió en la parte central, sin embargo, fue hasta esta distorsión en la que se desprendió inclusive el grout de los extremos de las mismas soleras intermedias en ambas caras.

Las grietas de la cara norte llegaron hasta 8 mm, mientras que las caras laterales hasta 0.4 mm.

En la pausa de la distorsión de 4%, se apreció el aplastamiento de concreto en la base, focalizado en la cara este.

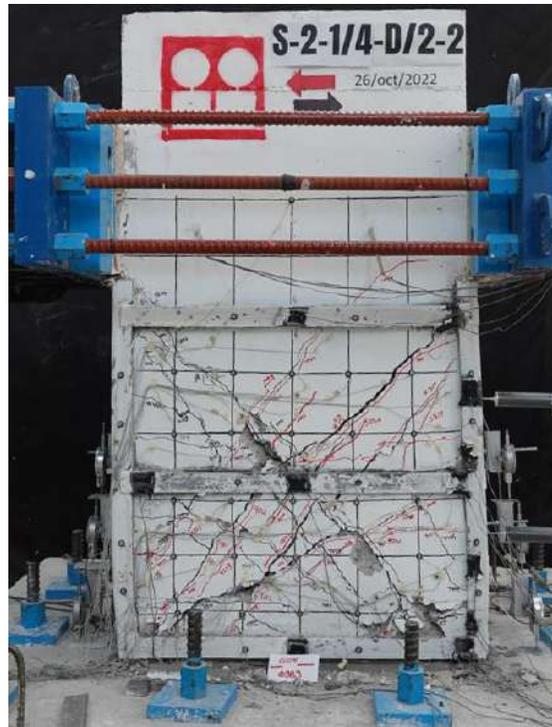


Fig. 3.3.147 Cara norte ($R=4\%$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.148 Cara sur ($R=4\%$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la pausa con cero t de carga después del semiciclo con repetición de la distorsión negativa de -4% (Fig. 3.3.149), se observó desprendimiento de concreto en la parte noroeste entre los ángulos y las soleras. En la cara norte las grietas alcanzaron 9 mm de espesor y las caras laterales hasta 0.4 mm.



Fig. 3.3.149 Cara norte en carga cero después de la repetición de -4% - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En el semiciclo con repetición de la distorsión positiva correspondiente a 4% (Fig. 3.3.150), se retiraron algunos transductores de desplazamiento debido a la falta de carrera de estos. La cara norte alcanzó grietas de hasta 8 mm y las laterales de 0.5 mm. Se observó el desprendimiento de concreto en la cara sur (Fig. 3.3.152), de igual manera, se apreció mayormente el confinamiento que el encamisado aporta a la columna, principalmente en la zona de los ángulos inferiores, área comprendida debajo de las soleras intermedias de las cuatro caras de los especímenes (Fig. 3.3.151, Fig. 3.3.155 y Fig. 3.3.156). En cuanto a la pintura a base de cal, se observó la presencia de grietas a lo largo de todas las soleras intermedias en las caras norte y sur.

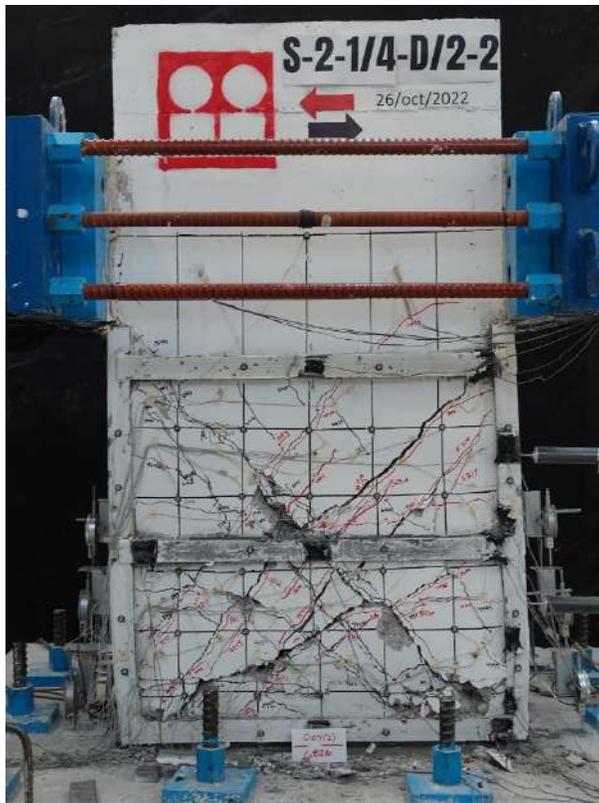


Fig. 3.3.150 Cara norte ($R=4\%(2)$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

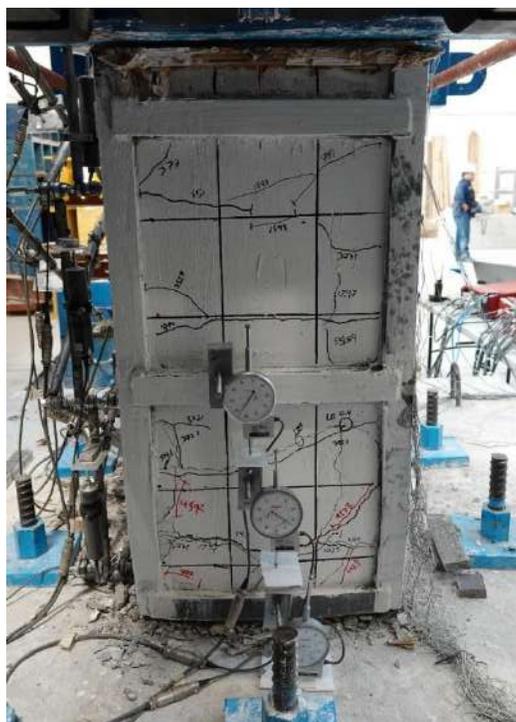


Fig. 3.3.151 Cara este ($R=4\%(2)$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.152 Cara sur ($R=4\%(2)$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.153 Solera intermedia cara sur ($R=4\%(2)$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.154 Solera intermedia cara sur ($R=4\%(2)$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.155 Confinamiento de los ángulos noreste - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

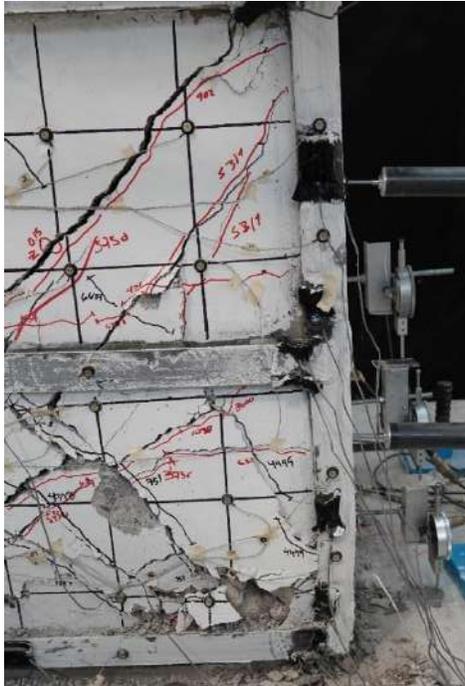


Fig. 3.3.156 Confinamiento de los ángulos noroeste - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la pausa inmediata con carga de cero t (Fig. 3.3.157), se midieron las grietas principales con 8 y 3 mm en la cara norte, mientras que en las caras laterales, se mantuvieron de 0.5 mm, medida que fue igual a la distorsión de la repetición positiva de 4%. El desprendimiento de concreto en las caras norte y sur fue en aumento en este semiciclo.



Fig. 3.3.157 Carga en cero posterior a los semiciclos de 4% - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Para la distorsión negativa de -5%, se escuchó un sonido proveniente del desprendimiento del concreto. Debido al daño presentado en el ensaye, diversos instrumentos de medición fueron retirados. Las grietas de control de la cara norte llegaron a 1.6 cm, mientras que las cargas laterales llegaron a 0.5 mm. Comparado con las distorsiones anteriores, se observa un daño severo, pues el desprendimiento del concreto en la cara norte en el área donde el encamisado cubre a la columna fue a tal grado que el acero de refuerzo del espécimen era visible.

De igual manera, se observó, como la columna se encontraba mayormente inclinada al lado oeste, esto debido al aplastamiento de concreto en la base.



Fig. 3.3.158 Cara norte (R=-5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la cara este de la misma distorsión de -5% se observó la contención del concreto a través de la camisa, la cual presentó una flexión fuera de plano de las soleras intermedias e inferiores, así como de la parte inferior a las soleras intermedias de los cuatro ángulos, denotando el confinamiento que aporta la camisa de elementos metálicos.



Fig. 3.3.159 Confinamiento de la camisa de acero ($R=-5\%$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.160 Flexión fuera de plano de solera en cara este - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Antes de la llegada a la pausa correspondiente a la distorsión positiva de 5%, se escuchó un sonido el cual se sospecha provino de un estribo. Para este semiciclo se observó la deformación de los ángulos, sin embargo, el daño en estos se notó mayormente en los ángulos noroeste y sureste de la columna. El desprendimiento de concreto continuó y fue más visible en las caras norte sur (Fig. 3.3.163) y este, pues el lado oeste fue el que presentó menor daño a este punto de la prueba.

Las grietas de control de la cara norte (Fig. 3.3.161) llegaron a 9 mm en la distorsión de 5%, mientras que en las caras este y oeste (Fig. 3.3.162 y Fig. 3.3.164) de 1.5 y 1.25 mm respectivamente.



Fig. 3.3.161 Cara norte (R=5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

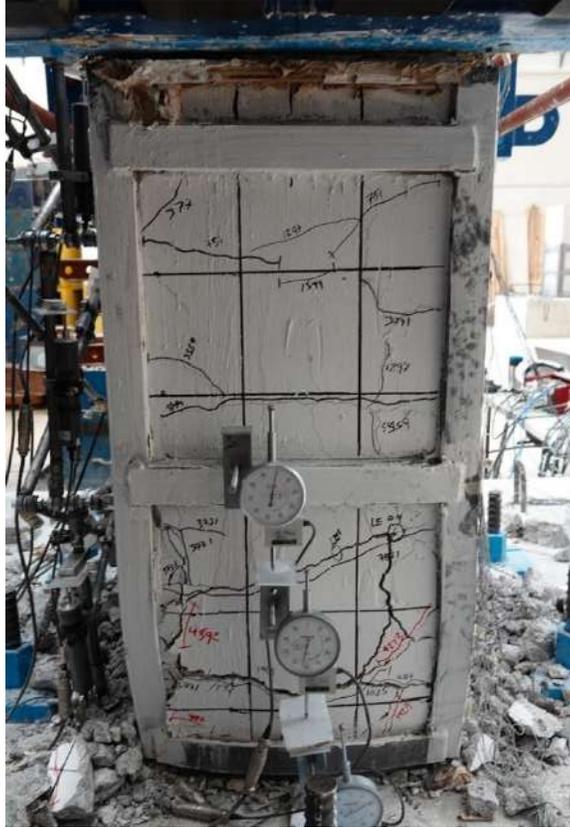


Fig. 3.3.162 Cara este ($R=5\%$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

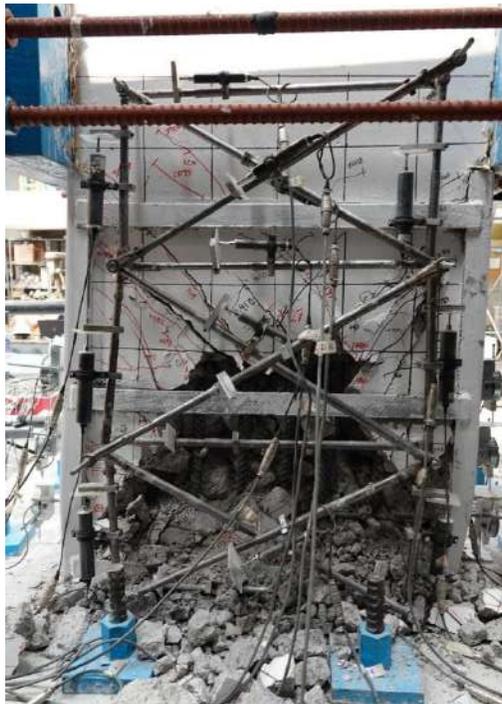


Fig. 3.3.163 Cara sur ($R=5\%$) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

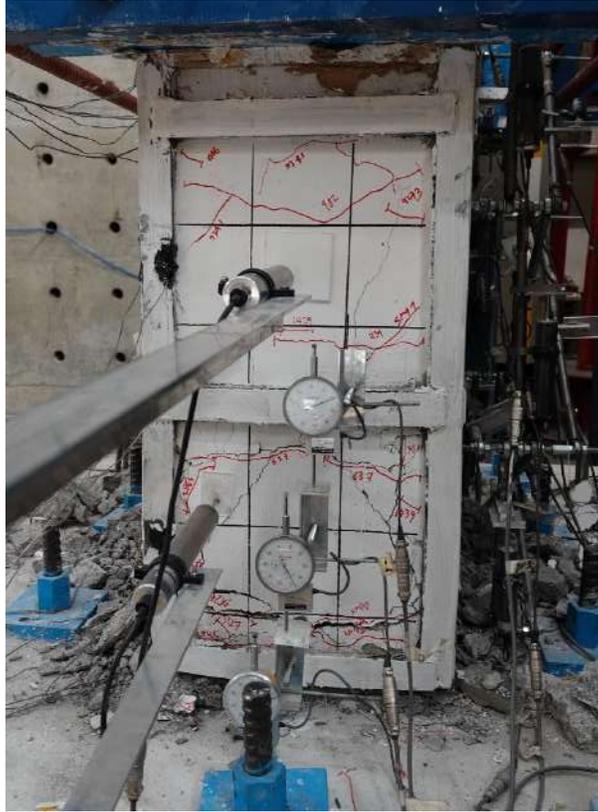


Fig. 3.3.164 Cara oeste (R=5%) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

El daño en el concreto continuó en los siguientes semiciclos, con el desprendimiento de este. Las últimas mediciones de grietas fueron en la repetición del semiciclo positivo de 5%, la cara norte tuvo grietas de hasta 9 mm, la cara este de 5 mm y la cara oeste de 3 mm. Cabe mencionar que la solera intermedia de la cara norte presentó un adelgazamiento aproximadamente a tercios de su longitud.

La columna llegó a la falla, se notó el evidente daño que a continuación se muestra.

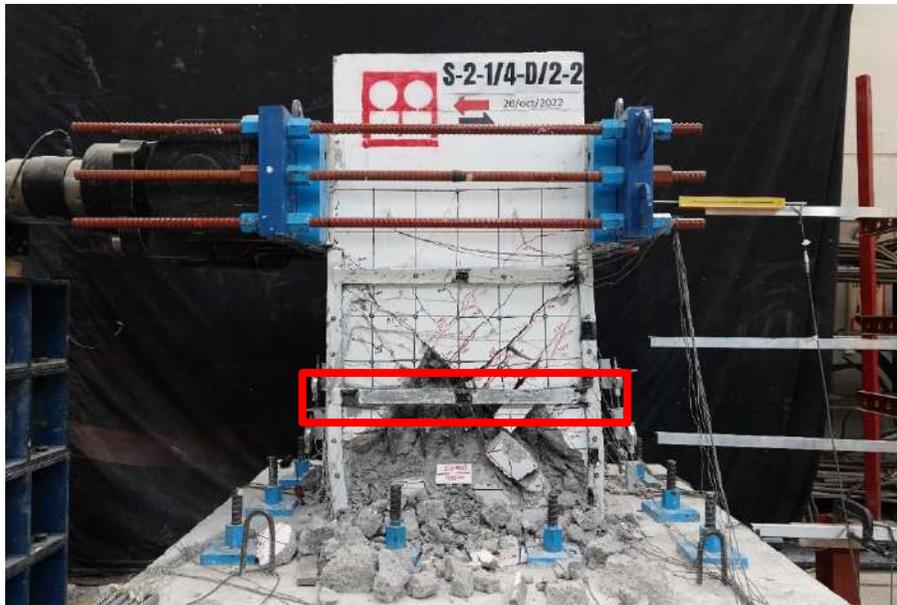


Fig. 3.3.165 Cara norte (R=5%(2)) - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.166 Detalle en solera y acero expuesto - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.167 Detalle en solera intermedia sección noroeste - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la pausa inmediata correspondiente a cero t (Fig. 3.3.168) de carga, se dejaron de medir grietas por el nivel de daño que presentó el espécimen. La columna se llevó a una distorsión de 6%, cumpliendo los semiciclos correspondientes y a los aumentos indicados en la historia de carga.



Fig. 3.3.168 Columna en cero t después de $R=5\%(2)$ - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

3.3.4.2 Estado final de daño

A continuación, se presentan imágenes (Fig. 3.3.169, Fig. 3.3.170, Fig. 3.3.171, Fig. 3.3.172, Fig. 3.3.173 y Fig. 3.3.174) que muestran el estado final del ensayo a su término.

Se pueden observar fracturas en el concreto en todas las caras, sin embargo el daño se concentró en las caras norte, este y sur. La columna se encontraba recargada hacia la cara oeste, debido al aplastamiento del concreto. En las caras norte y sur el acero de refuerzo era visible y el desplazamiento de las soleras y ángulos en un tercer plano fue notorio.



Fig. 3.3.169 Estado final del daño cara norte - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.170 Estado final del daño cara este - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.171 Estado final del daño noroeste - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.172 Estado final del daño, deformación de solera - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.173 Estado final del daño suroeste - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.174 Estado final del daño cara sur - Columna C-2 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

3.3.4.3 Comportamiento histerético

La Fig. 3.3.175 muestra la curva carga lateral-distorsión del modelo C-2. El ciclo de distorsión mayor aplicado a la columna fue de 6%. La gráfica muestra lazos histeréticos definidos que crecen en amplitud conforme aumenta la aplicación de la carga lateral.

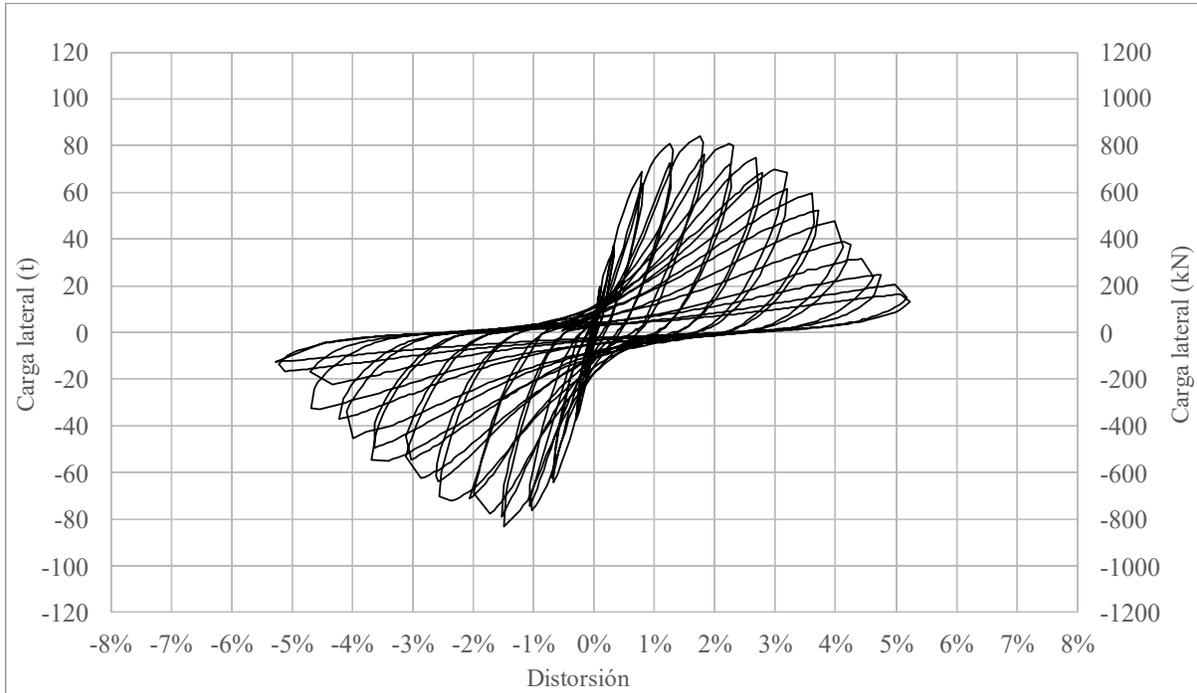


Fig. 3.3.175 Curva histerética general - Columna C-2

En la siguiente curva (Fig. 3.3.176), se muestra la gráfica histerética de la columna C-2 con los hitos más relevantes registrados y los semiciclos más destacados. Se aprecia una curva simétrica tanto en sentidos positivo como el negativo. Las primeras grietas aparecieron en el control por carga, cuando se aplicaron en sentido negativo 20 t. La columna C-2 mantuvo su rigidez hasta iniciar el ciclo 3 con 1% de distorsión, donde la abertura de los lazos histeréticos fue evidente. La resistencia máxima de la columna fue de 84.01 t en la aplicación del primer semiciclo con distorsión negativa de -2%, en el semiciclo inmediato después, la columna tuvo una pérdida de resistencia de 1% respecto a la mayor. Fue hasta el último semiciclo con distorsión positiva de 3% en el que el espécimen tuvo una pérdida del 24% respecto a la

máxima. En la última pausa de la prueba con distorsión del 6% la columna tuvo una pérdida de resistencia del 85%.

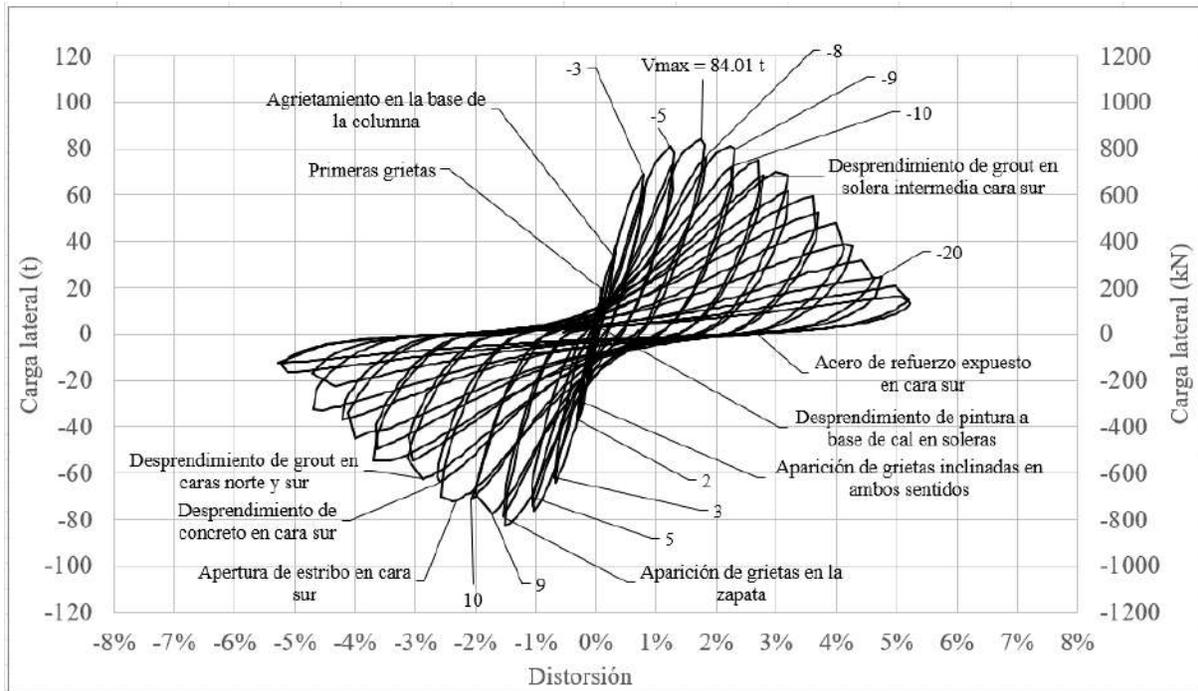


Fig. 3.3.176 Curva histerética detallada - Columna C-2

3.3.4.4 Rotación y curvatura

En esta sección se incluyen los valores registrados graficados de las rotaciones en cada región, medidos gracias a tres pares de transductores de carátula colocados en diferentes alturas.

A diferencia de los valores obtenidos en las columnas sin encamisado, los de la columna C-2 fueron mayores, sin embargo siempre cercanos a cero. A continuación, se resumen (Tabla 35) los valores máximos de las rotaciones obtenidos en cada región:

Tabla 35. Rotación - Columna C-2

| Región | Rotación máxima (mm/mm) |
|--------|-------------------------|
| 1 | 0.038 |
| 2 | 0.036 |
| 3 | 0.014 |

Primeramente se hará la descripción de la región 1 (Fig. 3.3.177), donde se observó una curva con lazos histeréticos amplios, los mayores valores estuvieron orientados a la parte negativa de la gráfica. Se apreció una pérdida de la rigidez a partir del término del control por carga de la columna. El valor máximo de la rotación registrado fue de 0.038 mm/mm, el cual se obtuvo en el primer semiciclo positivo con 0.5% de distorsión.

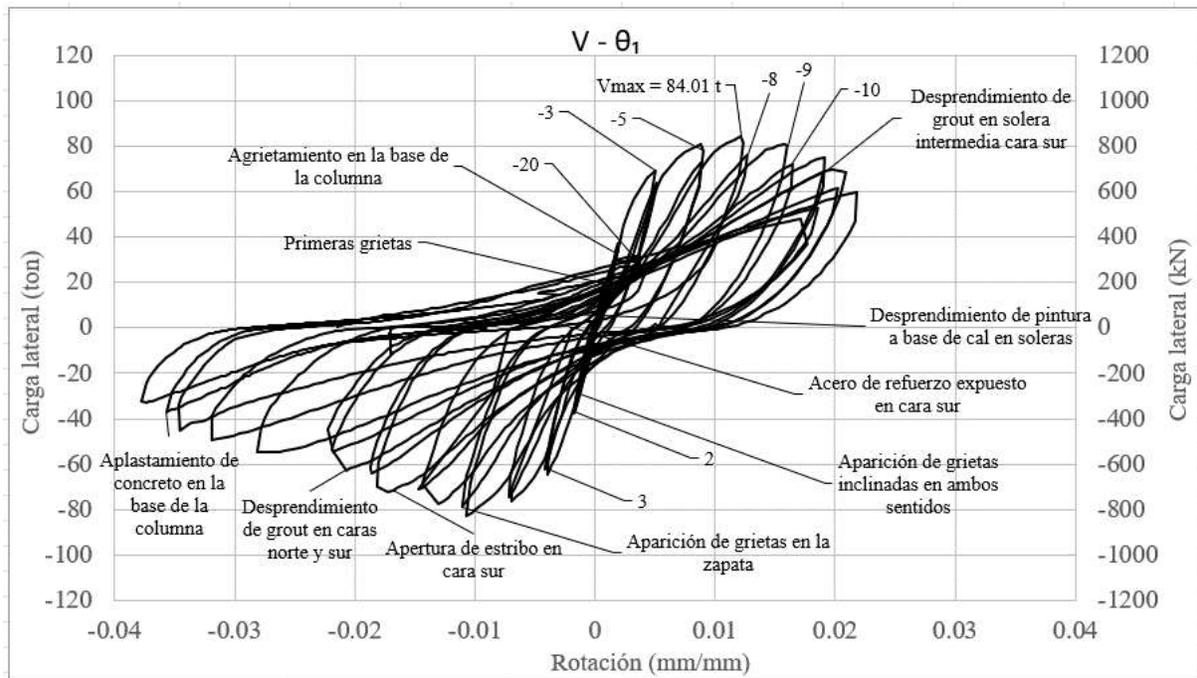


Fig. 3.3.177 Rotación de la región 1 - Columna C-2

La rotación de la segunda región correspondiente a la columna C-2 se observa en la Fig. 3.3.178. La curva obtenida fue poco simétrica respecto a la anterior, se aprecia que los valores de esta sección estuvieron orientados al lado derecho y que los valores negativos alcanzados fueron muy cercanos a cero, únicamente durante el control por carga. La rigidez observada se mantuvo hasta el ciclo 9 con distorsión de 2.5%. El valor máximo obtenido en las rotaciones fue de 0.036 mm/mm en la distorsión de 5%.

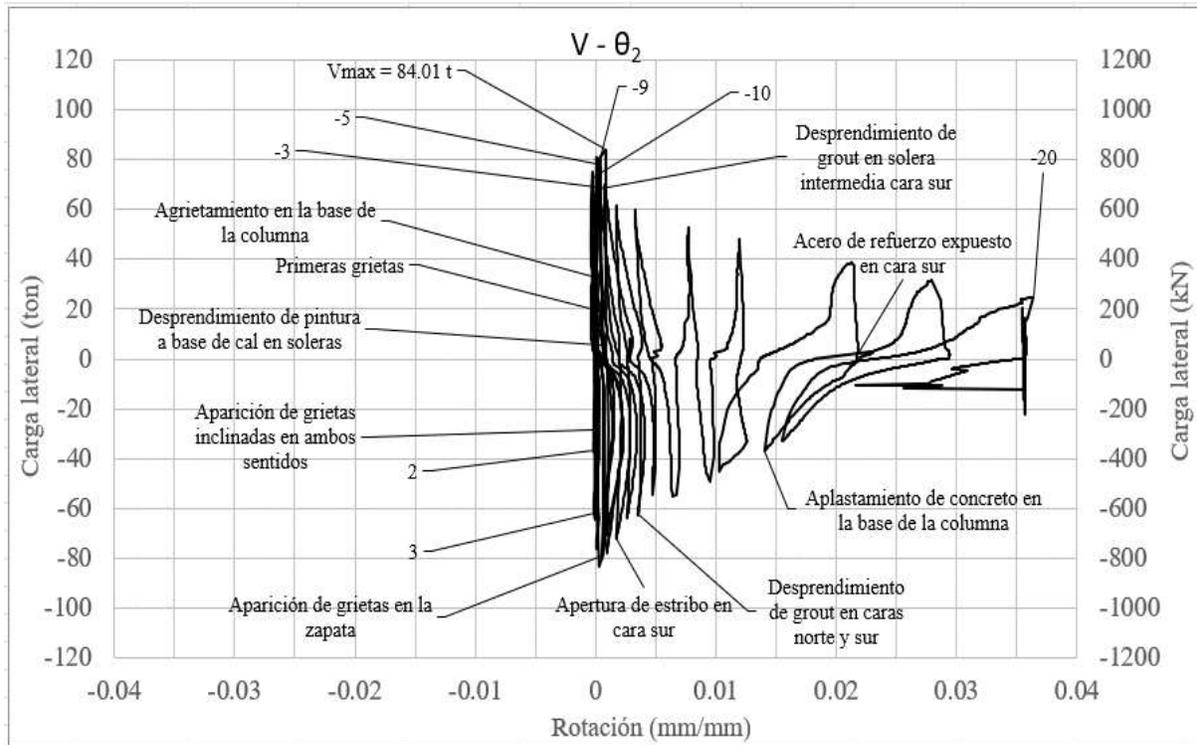


Fig. 3.3.178 Rotación de la región 2 - Columna C-2

Las rotaciones de la región 3 se observan en la Fig. 3.3.179, donde se aprecia una curva simétrica en los primeros semiciclos. La pérdida de rigidez fue evidente a partir de los ciclos con distorsión de 2.5%. El valor máximo de la rotación tenido fue de 0.014 mm/mm, ocurrido en la pausa del semiciclo con distorsión de 5.5%. De la tabla resumen (Tabla 35) se concluye que la región 3 fue la que registró menores rotaciones a lo largo del ensaye del espécimen C-2.

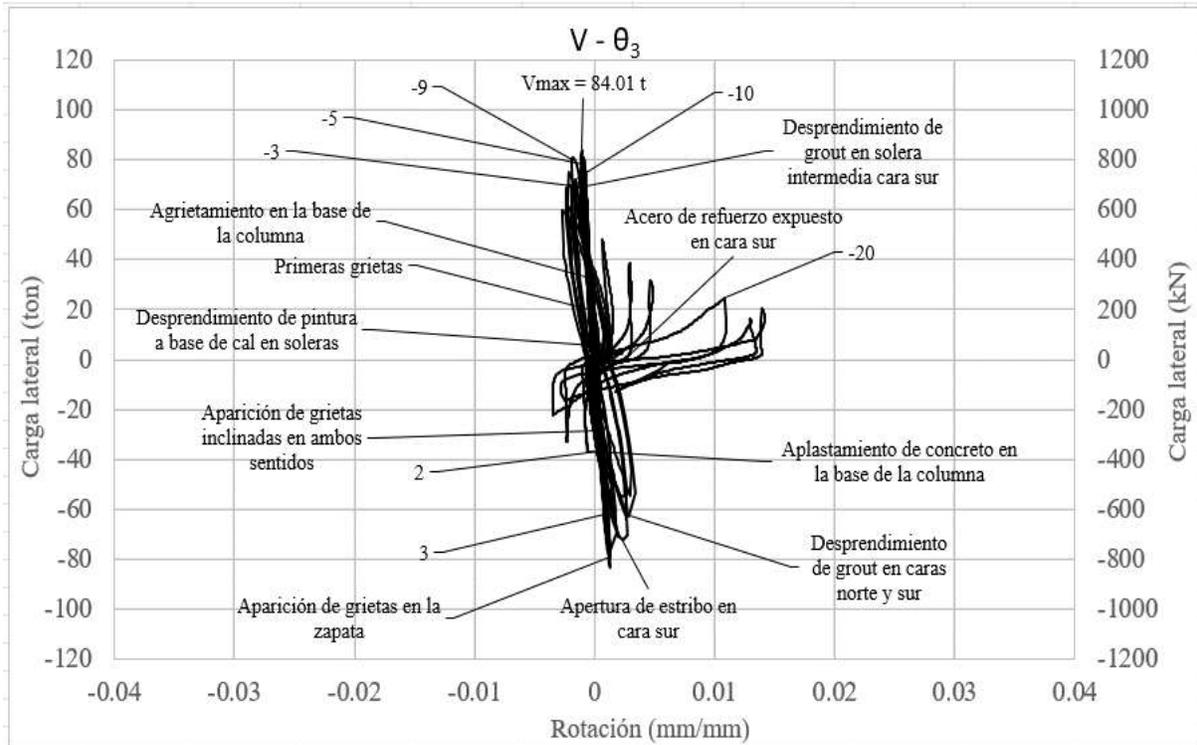


Fig. 3.3.179 Rotación de la región 3 - Columna C-2

Las curvaturas de las columnas ensayadas fueron obtenidas de la división de las rotaciones entre las alturas a la que estuvieron colocados los transductores en cada región.

La tendencia de los valores de la curvatura en las tres regiones fue su acercamiento a cero, lo que indicó un valor mínimo y despreciable en la prueba. Seguido, se incluye la Tabla 36 que resume los valores máximos de las curvaturas obtenidas:

Tabla 36. Curvatura - Columna C-2

| Región | Curvatura máxima (1/mm) |
|--------|-------------------------|
| 1 | 0.00027 |
| 2 | 0.00018 |
| 3 | 0.00008 |

Las curvas mostraron un comportamiento similar entre ellas. La máxima curvatura se registró en la región 1 y la menor en la región 3.

3.3.4.5 Deformación angular

La deformación angular se obtuvo de la suma de los valores absolutos de las mediciones obtenidas de los transductores diagonales en ambos sentidos en la cara sur. En la Tabla 37 se resumen los valores máximos registrados.

Tabla 37. Deformación angular - Columna C-2

| Región | Deformación angular (mm/mm) |
|--------|-----------------------------|
| 1 | 0.382 |
| 2 | 0.351 |
| 3 | 0.130 |

La primera gráfica se observa en la Fig. 3.3.180 la cual corresponde a la región 1. El valor máximo de la deformación angular obtenido fue de 0.382 mm/mm, registrado antes de llegar a la repetición del semiciclo positivo de 4.5%, donde se observó el aplastamiento de concreto en la base de la columna. Después de haber llegado a la mayor deformación angular, el transductor colocado en esta región en sentido positivo fue retirado debido al nivel del daño, lo que ocasionó que en la gráfica se viera un comportamiento plano. Esta región fue la que tuvo una mayor deformación angular.

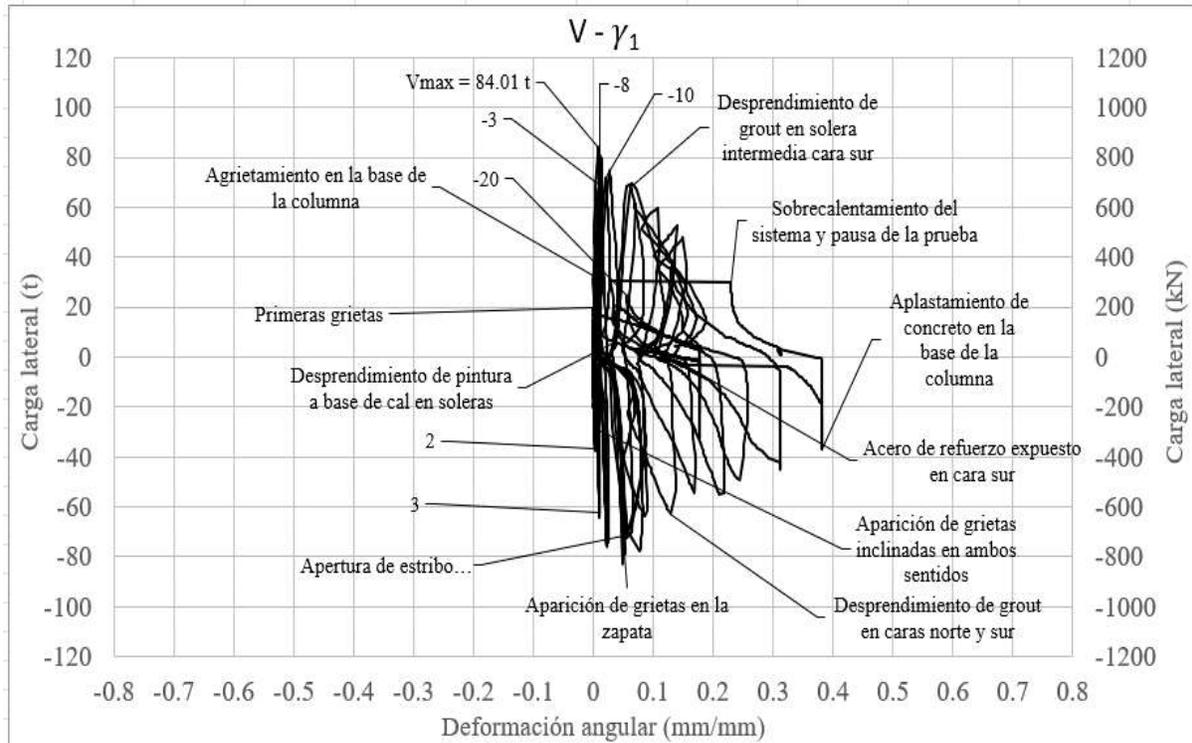


Fig. 3.3.180 Deformación angular región 1 - Columna C-2

En la Fig. 3.3.180 se aprecia la deformación angular de la región 2. El máximo valor obtenido fue de 0.351 mm/mm, número similar a la región 1. La curva muestra un comportamiento constante hasta el semiciclo con distorsión de 4.5%, pues después de la primera pausa por sobrecalentamiento del sistema se observaron anomalías que se ven reflejadas en el cambio de la trayectoria de la curva, como se observa en los lazos cercanos al hito marcado como la exposición del acero de refuerzo en la cara sur.

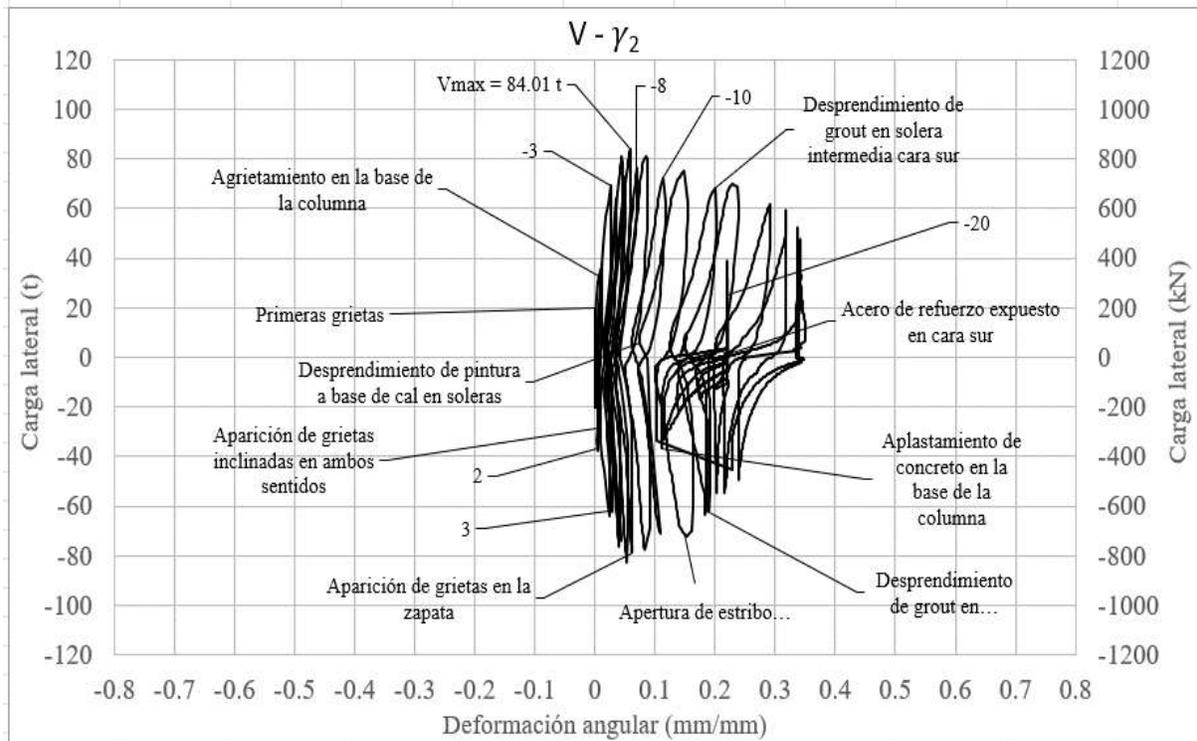


Fig. 3.3.181 Deformación angular región 2 - Columna C-2

La Fig. 3.3.182 muestra la gráfica de la curva correspondiente a la deformación angular de la tercera región. La máxima deformación angular registrada fue de 0.130 mm/mm, siendo la menor de todas las regiones, dicho valor fue registrado ocurrió en la pausa con cero t después de la repetición del semiciclo negativo de 5.5%. La curva muestra un comportamiento simétrico en la aplicación de la carga en ambos sentidos y lazos muy estrechos a lo largo de la prueba.

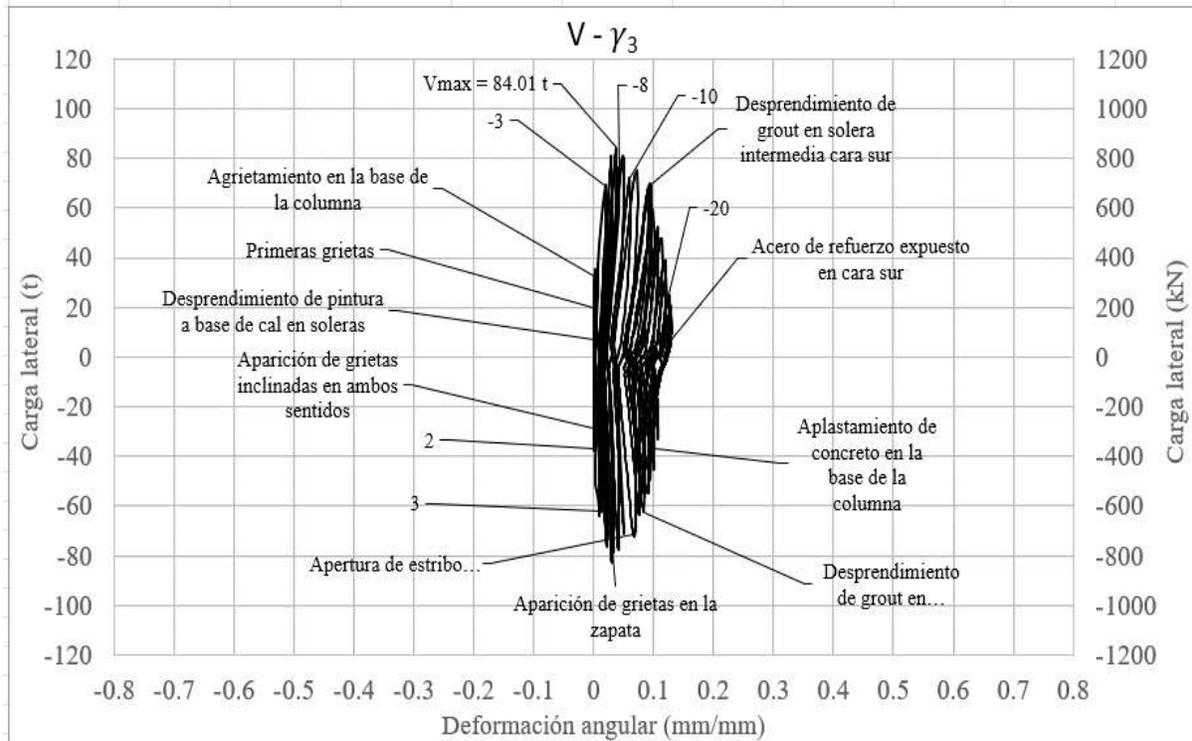


Fig. 3.3.182 Deformación angular región 3 - Columna C-2

3.3.4.6 Rotación y deslizamiento de la cimentación

En este apartado se abordan los parámetros de la rotación y el deslizamiento de la cimentación. El objeto de estudio es identificar los desplazamientos medidos mediante dos transductores de carátula colocados en las caras laterales de la zapata y un transductor de desplazamiento en la parte superior de esta.

La rotación máxima registrada en la zapata fue de 0.0027 mm/mm, mientras que el deslizamiento máximo fue de 0.87 mm (Fig. 3.3.183 y Fig. 3.3.184). El aumento en los valores del deslizamiento respecto a las columnas de control se debe en parte a que el espécimen fue sometido a mayores niveles de distorsión. Los valores registrados en la rotación fueron muy cercanos a cero a lo largo de toda la prueba.

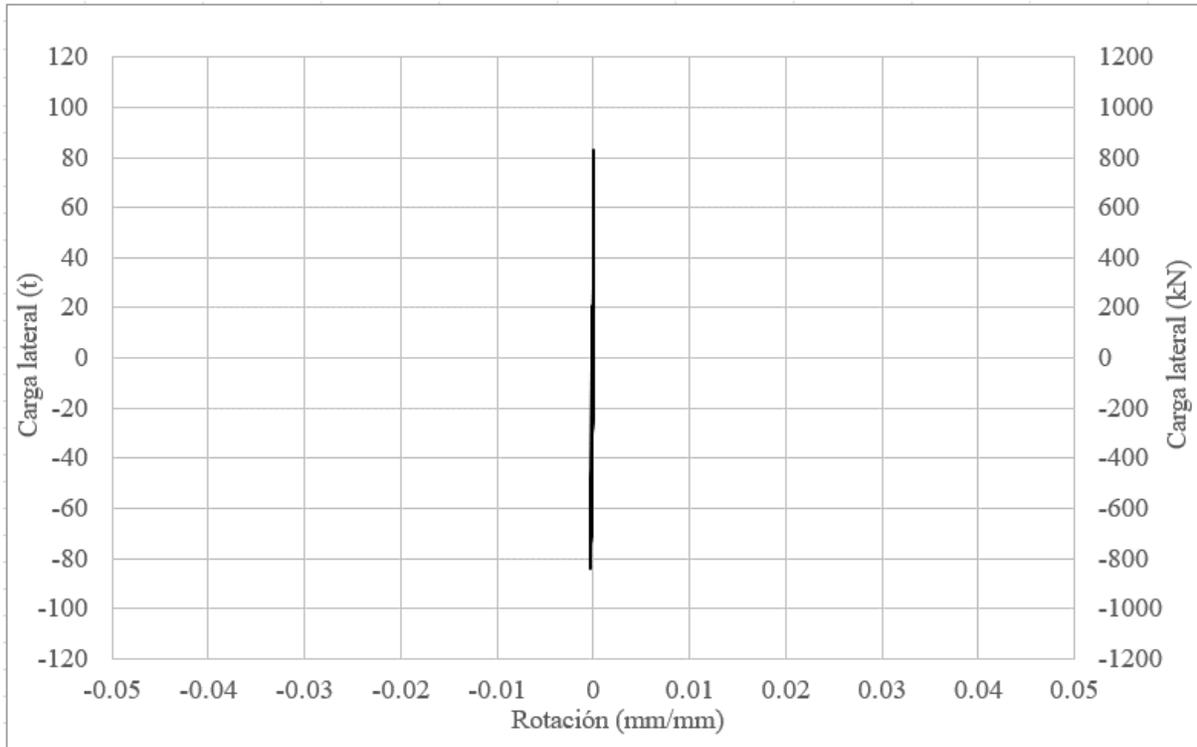


Fig. 3.3.183 Rotación en la zapata - Columna C-2

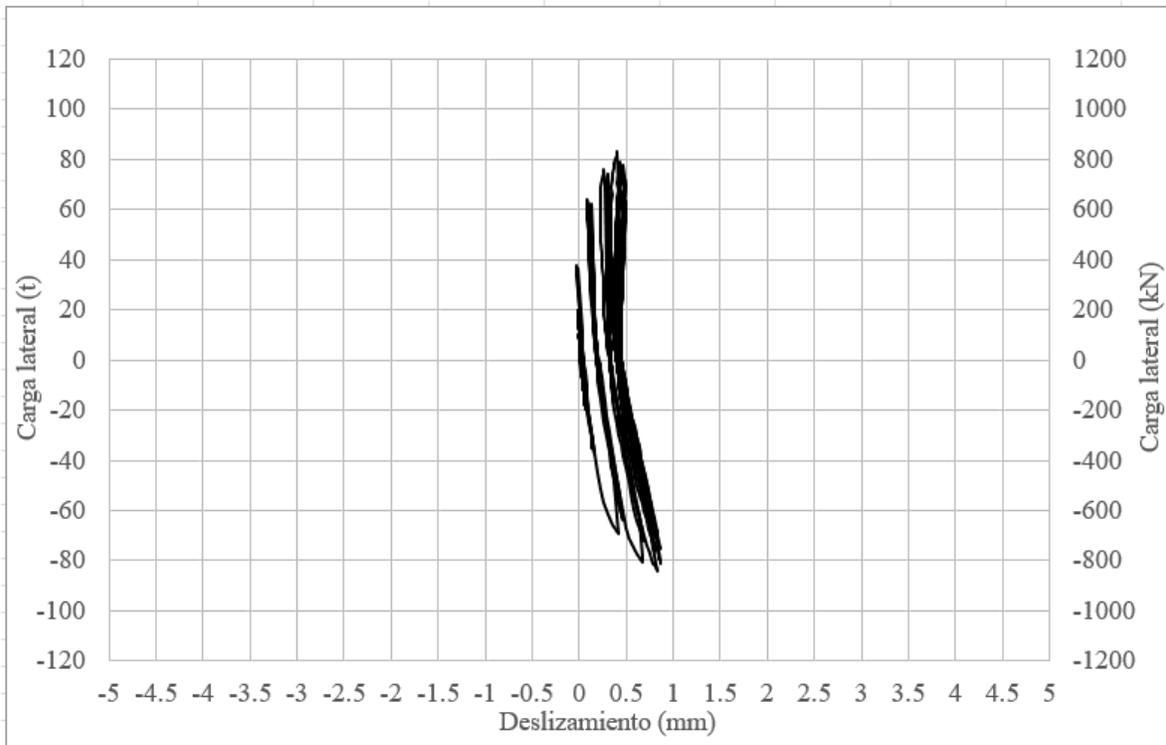


Fig. 3.3.184 Deslizamiento en la base de la columna - Columna C-2

3.3.5 Columna C-4

La columna C-4 es la segunda columna encamisada con elementos metálicos presentada en esta tesis. Está compuesta por ángulos de acero con ancho del ala del ángulo de 4 pulgadas los cuales fueron colocados en las esquinas de la columna. Además, la camisa fue completada con soleras de acero con espesor de 1/4 de pulgada y ancho de 2 pulgadas colocadas en los extremos superiores e inferiores del ángulo y separación simétrica de un cuarto de la altura efectiva del elemento.



Fig. 3.3.185 Modelo al inicio de la prueba – Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Se utilizó la misma estructura de acero de refuerzo en la zapata y la columna que se empleó en la columna de control. Para asegurar una buena adhesión y transferencia de fuerzas entre el encamisado y la columna, se aplicó mortero fluido tipo *grout* en el espacio que quedó entre ambos elementos. El espécimen fue construido simultáneamente a las columnas OR y C-2, con el mismo acero de refuerzo y en el mismo proceso de colado del concreto. La prueba siguió la misma historia de carga y desplazamiento, lo cual se explica en la sección 2.8. A lo largo de cada pausa de la prueba en los picos de los ciclos se marcó la formación y la extensión de las grietas, diferenciando los ciclos positivos y negativos, mediante colores negros y rojos

respectivamente, cabe mencionar que se mantuvo una bitácora exclusiva para esta columna donde se registró todo el comportamiento del espécimen, así como las particularidades más generales.

La prueba se realizó en dos días, debido al tiempo que requiere su ejecución.

3.3.5.1 Evolución del daño

A continuación, se muestran y describen las etapas a lo largo del daño acumulado en la prueba. En la columna C-4 se presentaron las primeras grietas en la carga de 20 t, éstas aparecieron en las caras norte y sur, mientras que en el semiciclo siguiente de -20 t, aparecieron grietas a flexión en las mismas caras en sentidos opuestos (Fig. 3.3.186). De igual manera, en el semiciclo de -20 t aparecieron las primeras grietas en las caras este y oeste.

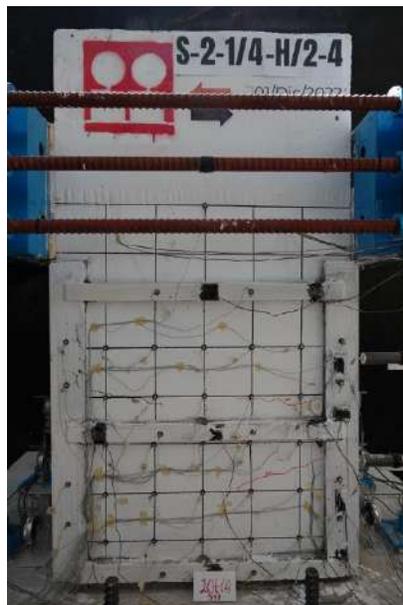


Fig. 3.3.186 Aparición de las primeras grietas - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Al iniciar el control por distorsión del espécimen, se observó que en el semiciclo negativo de -0.5% se registraron dos grietas inclinadas pronunciadas, las cuales se denominaron las primeras grietas de control; A con espesor de 0.6 mm y Z con espesor de 0.5 mm. Se observó en el pico con distorsión positiva de 0.5% que el comportamiento de la cara norte es replicado en la cara sur, así como el de la cara este en la oeste.

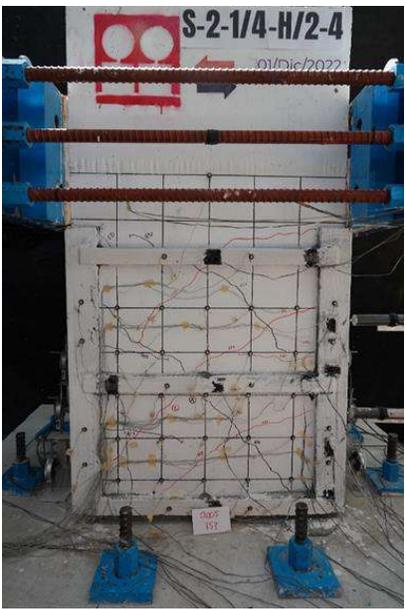


Fig. 3.3.187 Cara norte ($R=0.5\%$) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.188 Cara sur ($R=0.5\%$) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.189 Cara este ($R=0.5\%$) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.190 Cara oeste ($R=0.5\%$) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En los siguientes semiciclos, se observó la aparición y extensión de grietas, aumentando conforme la prueba avanzaba. Lo anterior puede apreciarse en la Fig. 3.3.191.

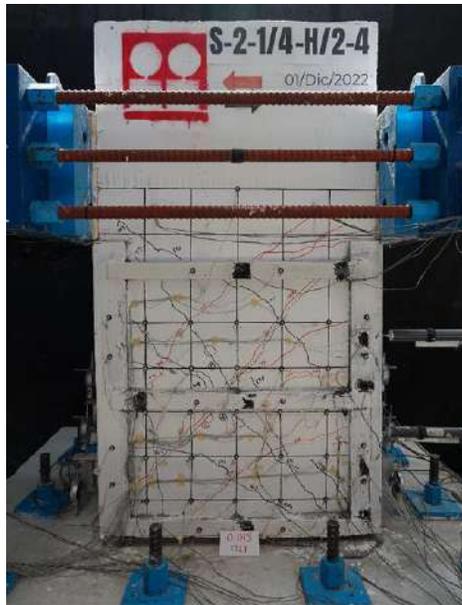


Fig. 3.3.191 Aparición y extensión de grietas ($R=1.5\%$) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la distorsión de -2.5% (Fig. 3.3.192) se observó desprendimiento de la pintura a base de cal en los extremos de la solera central de la cara norte.



Fig. 3.3.192 . Desprendimiento de la pintura a base de cal ($R=-2.5\%$) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En el semiciclo positivo con distorsión de 3% , se escuchó un leve crujido del concreto, para este momento, las grietas tenían anchos de hasta 1.25 mm . De igual manera, se observaron las primeras grietas en la zapata (Fig. 3.3.193),

así como también el primer desprendimiento comprendido entre el grout y la solera inferior de la cara sur.



Fig. 3.3.193 Evolución del daño (R=3%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la Fig. 3.3.194 se observó aplastamiento en la base de la columna, lo cual fue más evidente conforme la prueba avanzó.



Fig. 3.3.194 Aplastamiento de la columna (R=3%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la repetición de la distorsión a 4% (Fig. 3.3.195) se observó el deslizamiento de grout en la solera intermedia de la cara norte, así como la caída de la

pintura a base de cal en este mismo elemento, previo a la observación de esto, se escuchó un sonido, se supone que fue debido a la caída del grout.

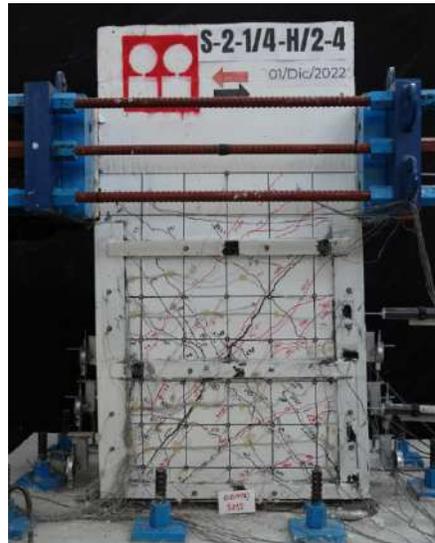


Fig. 3.3.195 Columna norte (R=4%(2)) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la distorsión -4.5%, se escucharon crujidos en el concreto. Cabe mencionar que el concreto tuvo un desprendimiento apreciable en el centro de la columna de las caras norte y sur. De igual manera, el ángulo derecho en la cara sur presentó una deformación visible en la parte inferior de éste.

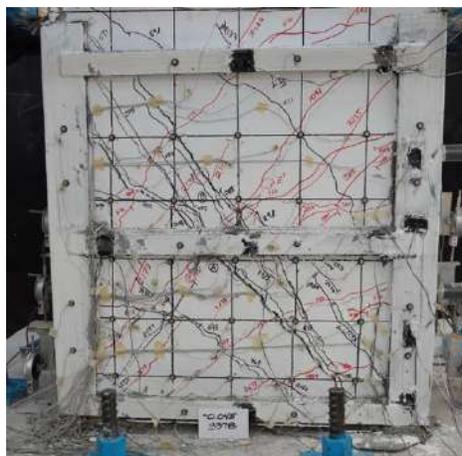


Fig. 3.3.196 Desprendimiento de concreto y deformación del ángulo - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Posteriormente, en la deformación 4.5% (Fig. 3.3.197), las soleras intermedias de la cara norte se flexionaron en un plano z (Fig. 3.3.198). Cabe mencionar

que también se observó una expansión del concreto en la parte inferior de la columna.

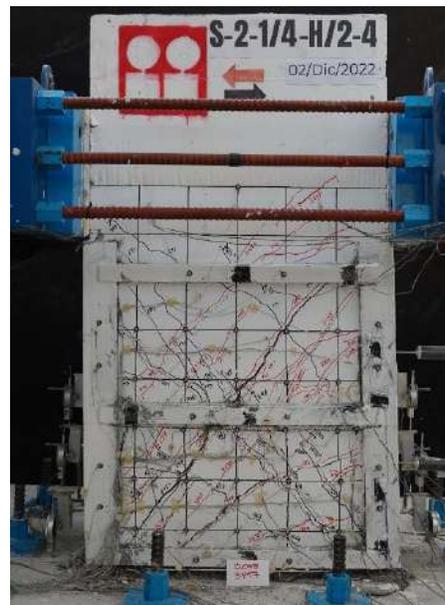


Fig. 3.3.197 Cara norte (R=4.5%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

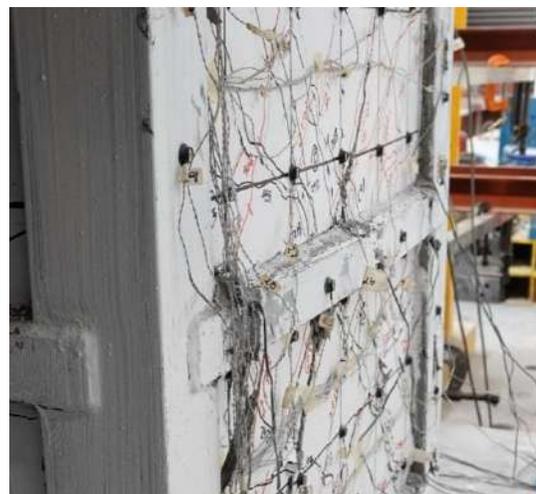


Fig. 3.3.198 Deformación de la solera intermedia cara norte - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En el siguiente semiciclo con distorsión de -4.5% (Fig. 3.3.199), se observó desprendimiento de cal en los extremos de la solera inferior e intermedia. En esta pausa, también se pudo notar la caída de concreto en el centro de la cara norte debajo de la solera intermedia.

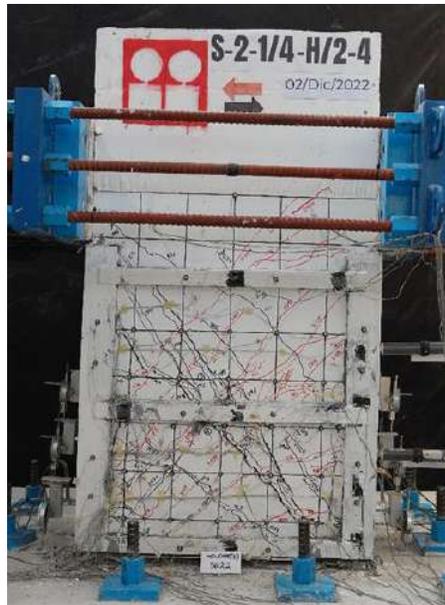


Fig. 3.3.199 Cara norte ($R=-4.5\%$) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

En la siguiente pausa (Fig. 3.3.200 y Fig. 3.3.201) se apreció la deformación en las soleras, así como la separación comprendida entre la columna y el grout de la solera intermedia.



Fig. 3.3.200 Cara norte pausa posterior a $R=-4.5\%$ - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.201 Deformación en solera intermedia cara norte - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

A partir del primer semiciclo con deformación de -5%, la grieta de control Z fue inmedible debido al daño en la zona que estuvo relacionado con el desprendimiento de concreto en la zona de medición. Otro acontecimiento notable es que, para esta pausa, la solera y el grout que tuvieron un desplazamiento considerable en el eje z anteriormente, se observaron sin dicha separación entre la columna y el grout.

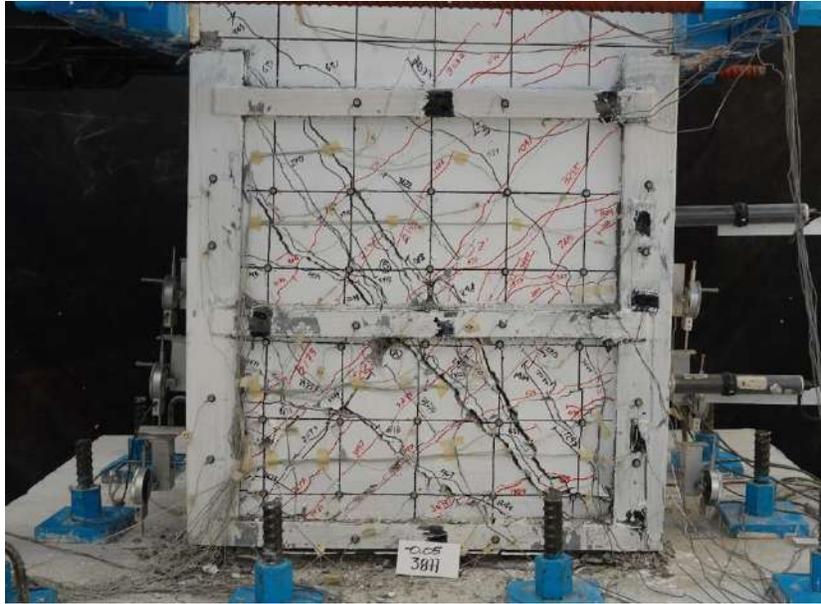


Fig. 3.3.202 Cara norte ($R=-5\%$) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.203 Estado del grout ($R=-5\%$) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

Antes de llegar al segundo semiciclo con desplazamiento de -5% , se escuchó un sonido proveniente del acero el cual se le atribuyó a la fractura de una barra longitudinal. Al término del ensaye se verificó que no se rompió. La prueba continuó sin mayores observaciones notables, más que la extensión y aparición de nuevas grietas.

Para el primer ciclo de 5.5% (Fig. 3.3.204 y Fig. 3.3.205), se observó que el sonido previo atribuido a una barra longitudinal provino de la solera inferior en la cara sur (Fig. 3.3.206 y Fig. 3.3.207), pues ésta se fracturó debido al efecto de la carga lateral aplicada y a la colocación de una barra roscada en ella.

La resistencia última de la falla de la solera tomando en cuenta el agujero de la barra roscada se hace de la siguiente manera:

$$P_{falla} = \text{área}_n * f_u$$

$$\text{área}_n = \left(2 \text{ in} - \frac{1}{2} \text{ in}\right) * \frac{1}{2} \text{ in} = \frac{3}{4} \text{ in}^2$$

$$f_u = 5098.28 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{falla} = 4.8 \text{ cm}^2 * 5098.28 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 24\ 471.74 \text{ kg} = 24.47 \text{ t}$$

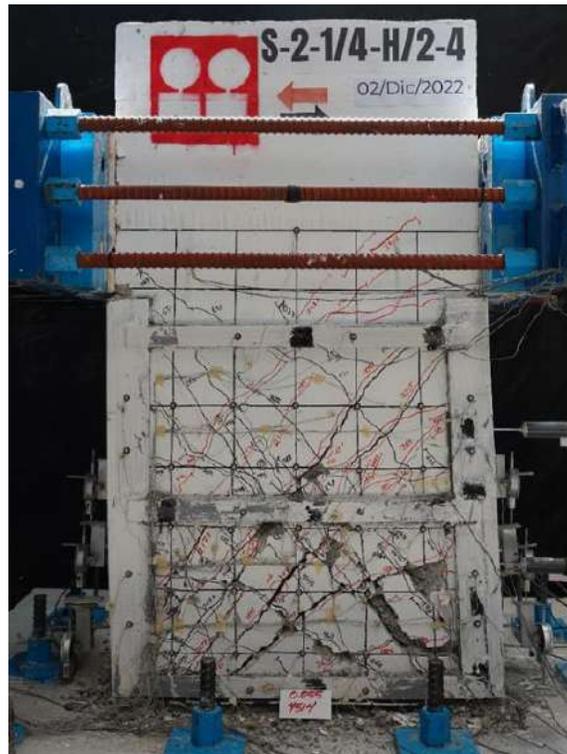


Fig. 3.3.204 Cara norte (R=5.5%) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.205 Cara sur ($R=5.5\%$) - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.206 Detalle en la fractura de la solera - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.207 Solera inferior fracturada - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)



Fig. 3.3.208 Solera fracturada - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

La prueba continuó hasta el primer semiciclo con deformación de -6% para después volver a cero y dar fin a la prueba.

3.3.5.2 Estado final de daño

Al término de la prueba, se observó el daño en la columna, lo cual se apreció a través de las grietas y los bloques de concreto caídos a lo largo de la prueba, así como el funcionamiento de la camisa de acero a través de la deformación de este elemento.

Las caras este y sur fueron las que presentaron mayor daño, pues el desprendimiento de concreto, la extensión y el espesor de grietas fueron indicadores de ello. Se observó muy poca deformación en los ángulos colocados en la camisa de acero. Con excepción de la solera fracturada por el marco realizado con barra roscada que atravesó el elemento, las soleras no presentaron un mayor daño, se pudo observar el desprendimiento de pintura a base de cal.

En las Fig. 3.3.209, Fig. 3.3.210, Fig. 3.3.211 y Fig. 3.3.212, se observa el estado final del daño del espécimen C-4.

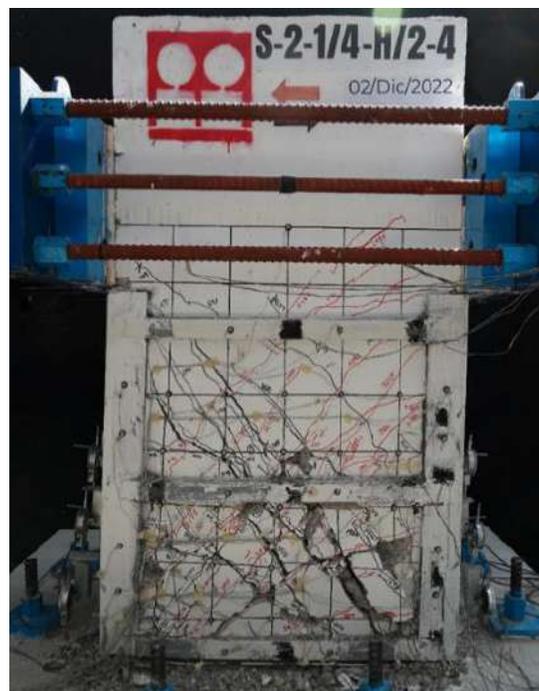


Fig. 3.3.209 Estado final del daño cara norte - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

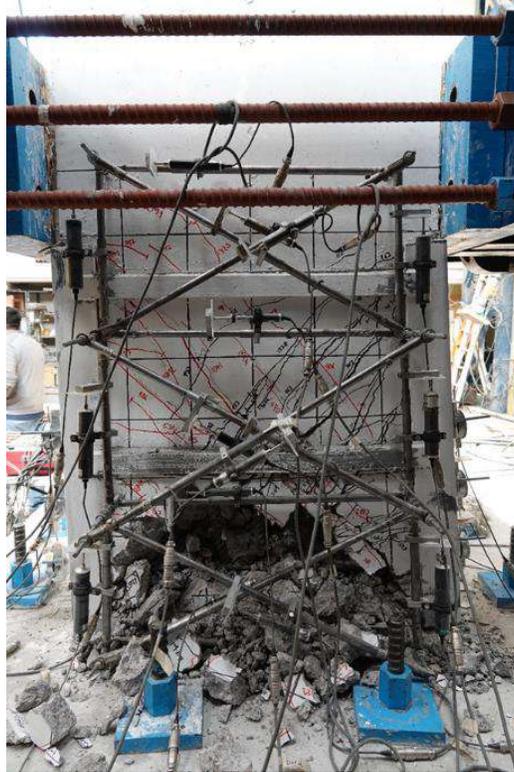


Fig. 3.3.210 Estado final del daño cara sur - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

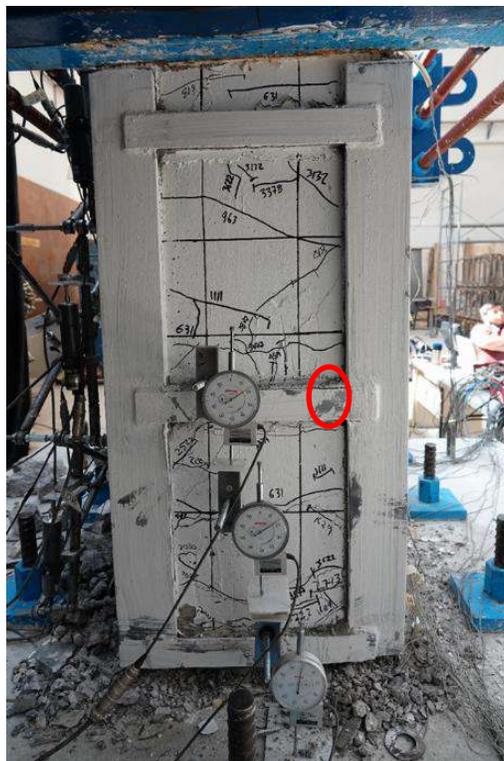


Fig. 3.3.211 Estado final del daño cara este - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

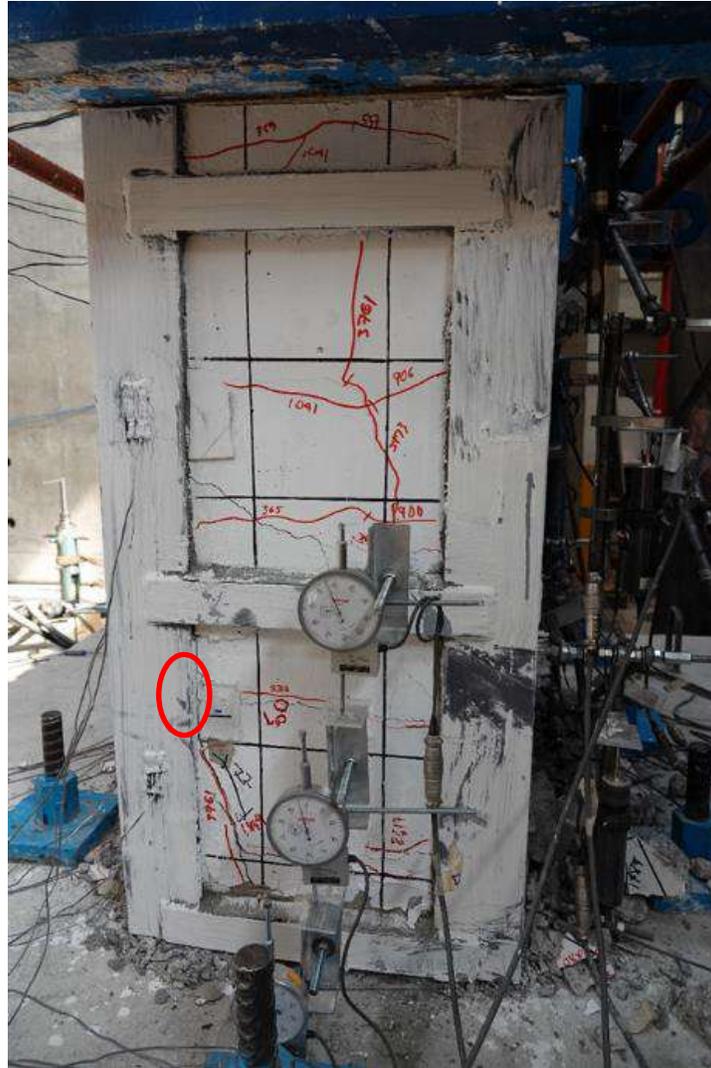


Fig. 3.3.212 Estado final del daño cara oeste - Columna C-4 (Instituto de Ingeniería, 2021 - 2023)

3.3.5.3 Comportamiento histerético

En la Fig. 3.3.213 se muestra la curva carga lateral-distorsión. La distorsión mayor aplicada a la columna C-2 fue de 6%. Se observa una curva estable con lazos histeréticos amplios después de sus primeros ciclos. En la sección positiva de la gráfica se observó una anomalía perceptible en su comportamiento que se describirá en el siguiente párrafo.

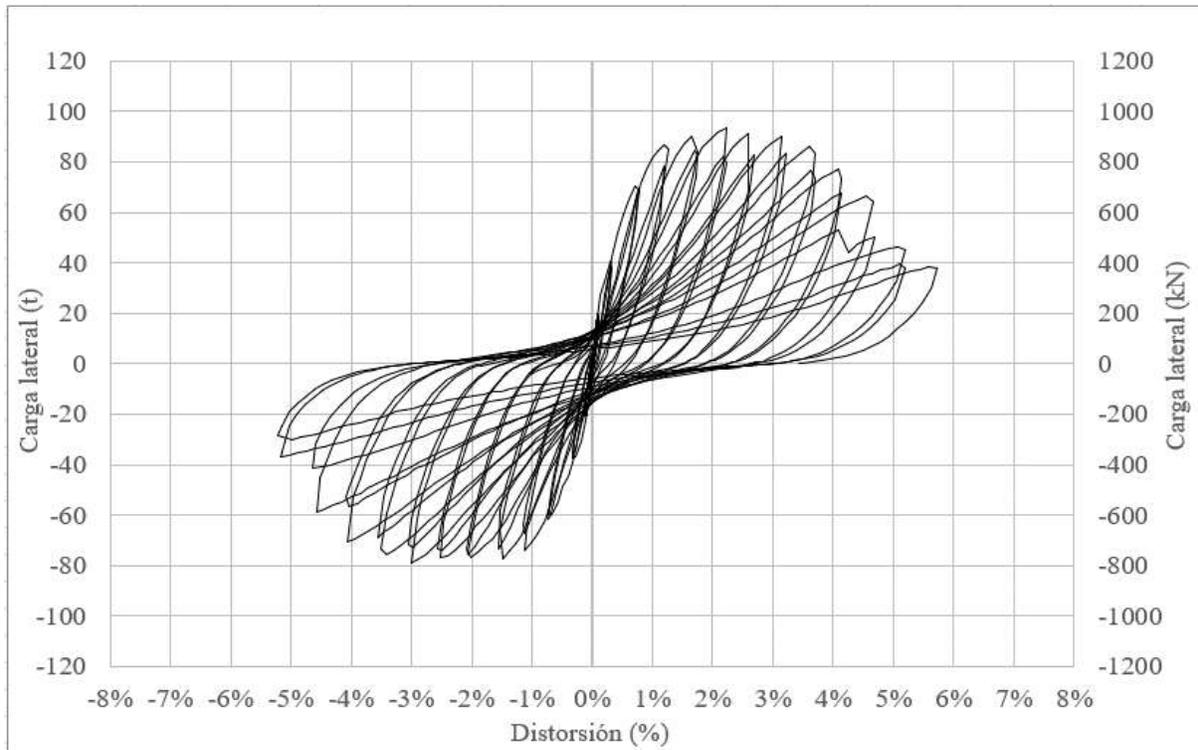


Fig. 3.3.213 Curva histerética general - Columna C-4

La siguiente curva (Fig. 3.3.214) es la misma que la anterior con la diferencia que incluye comentarios haciendo referencia a los hitos y los semiciclos más destacados observados. En cuanto a la simetría de la curva histerética se aprecian lazos muy similares en sus partes positivas y negativas. Las primeras grietas de la columna aparecieron en el semiciclo positivo con carga de 20 t. Fue hasta la aparición de grietas inclinadas en ambos sentidos en la pausa con distorsión negativa de 0.5% cuando se notó la pérdida de rigidez en la columna y los lazos histeréticos comenzaron a ser más amplios. En la curva se observó una anomalía en la parte positiva que se debió a la fractura de la solera inferior en la cara sur ocurrida antes de alcanzar el segundo semiciclo negativo con distorsión de -5.5%. La resistencia máxima registrada fue de 93.78 t en el primer semiciclo con distorsión negativa de -2.5%, en el semiciclo inmediato se registró una pérdida de resistencia del 21% respecto a la máxima. La carga última alcanzó un valor de 38.2 t, lo que representó una pérdida de 59% comparada con la resistencia más alta registrada.

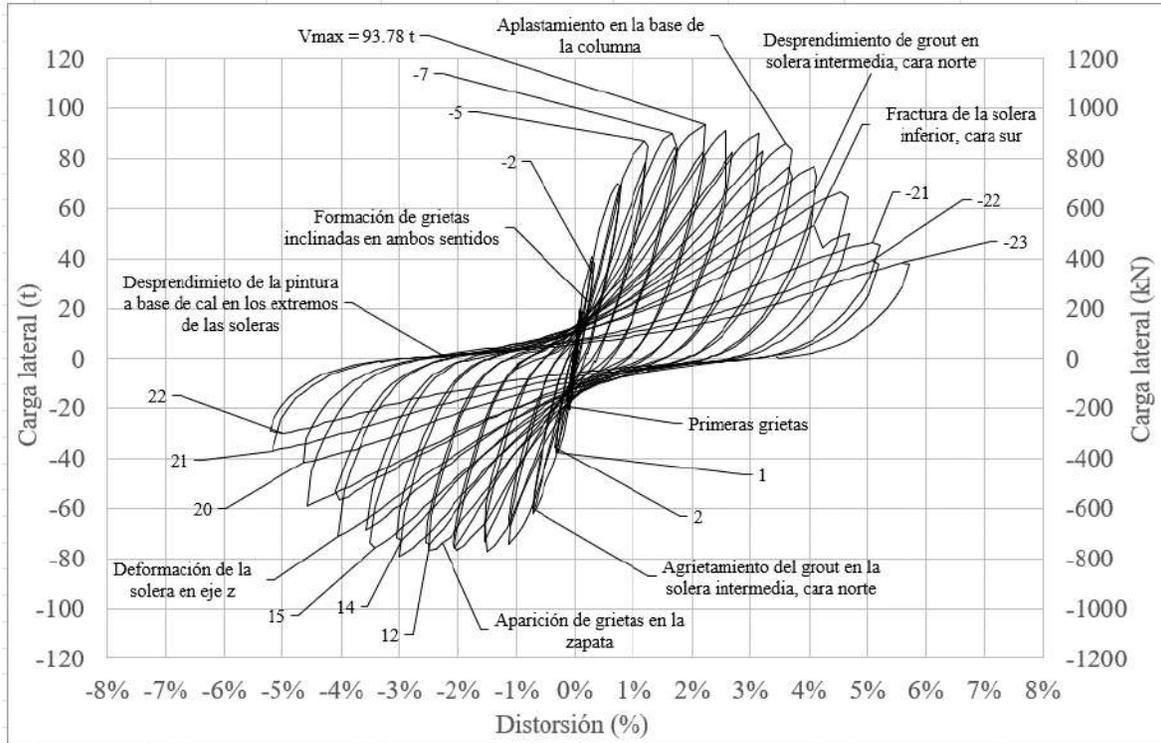


Fig. 3.3.214 Curva histerética detallada – Columna C-4

3.3.5.4 Rotación y curvatura

Primeramente, en esta sección se desglosa la rotación medida en la columna gracias a 6 transductores de carátula colocados en pares en diferentes alturas.

Los valores registrados fueron al igual que la columnas anteriores muy cercanos a cero. En Tabla 38 se muestran las rotaciones máximas de cada una de las regiones.

Tabla 38. Rotación - C-4

| Región | Rotación máxima (mm/mm) |
|--------|-------------------------|
| 1 | 0.032 |
| 2 | 0.003 |
| 3 | 0.003 |

La rotación de la región 1 se aprecia en la Fig. 3.3.215 donde se observa una curva con lazos muy amplios, muy similar a la curva histerética de la columna.

Los valores mayores se presentaron en la parte positiva. Al igual que en la curva histerética, la pérdida de la rigidez ocurre a partir de la formación de grietas inclinadas en ambos sentidos. El valor máximo de la rotación en esta región fue de 0.0316 mm/mm, el cual fue el mayor de todo el espécimen.

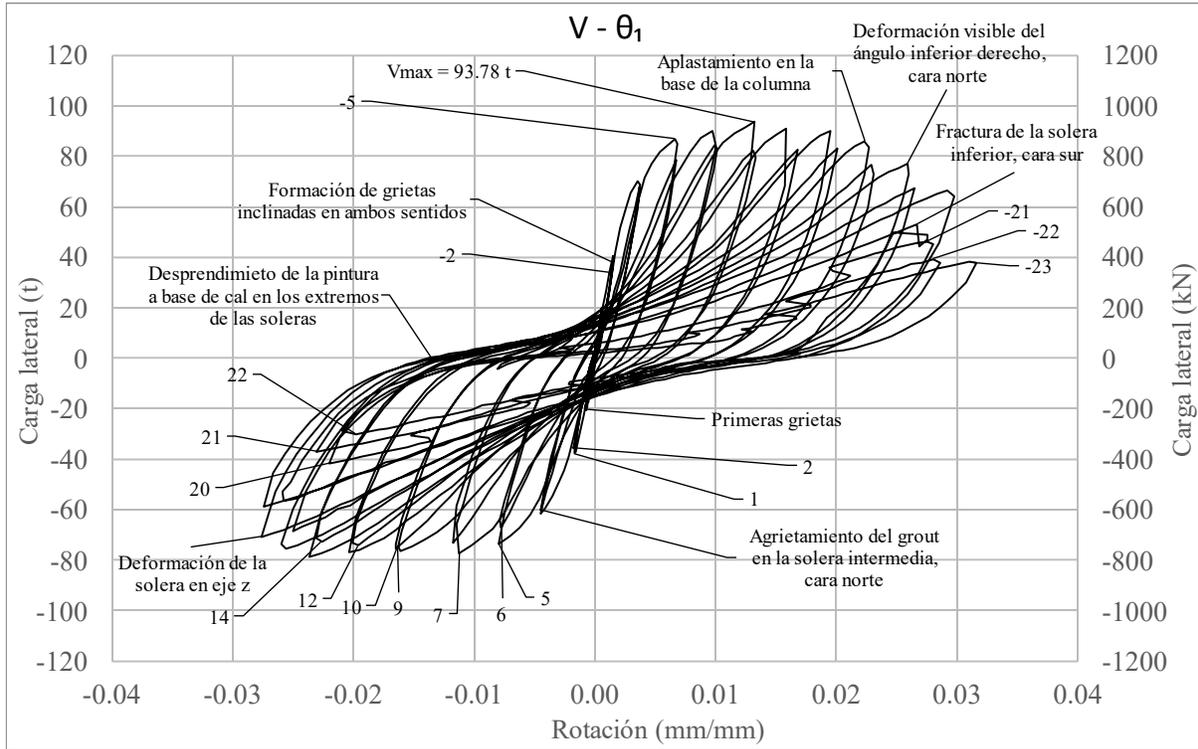


Fig. 3.3.215 Rotación de la región 1 - Columna C-4

La segunda región del espécimen C-4 (Fig. 3.3.216), mostró una curva con lazos más estrechos y con menor amplitud en toda la prueba. Los mayores valores de las rotaciones se registraron para las cargas positivas. La rigidez de la segunda región se mantuvo constante en prácticamente toda la prueba. El valor máximo de la rotación registrado fue de 0.0032 mm/mm en el primer ciclo con distorsión de 3%.

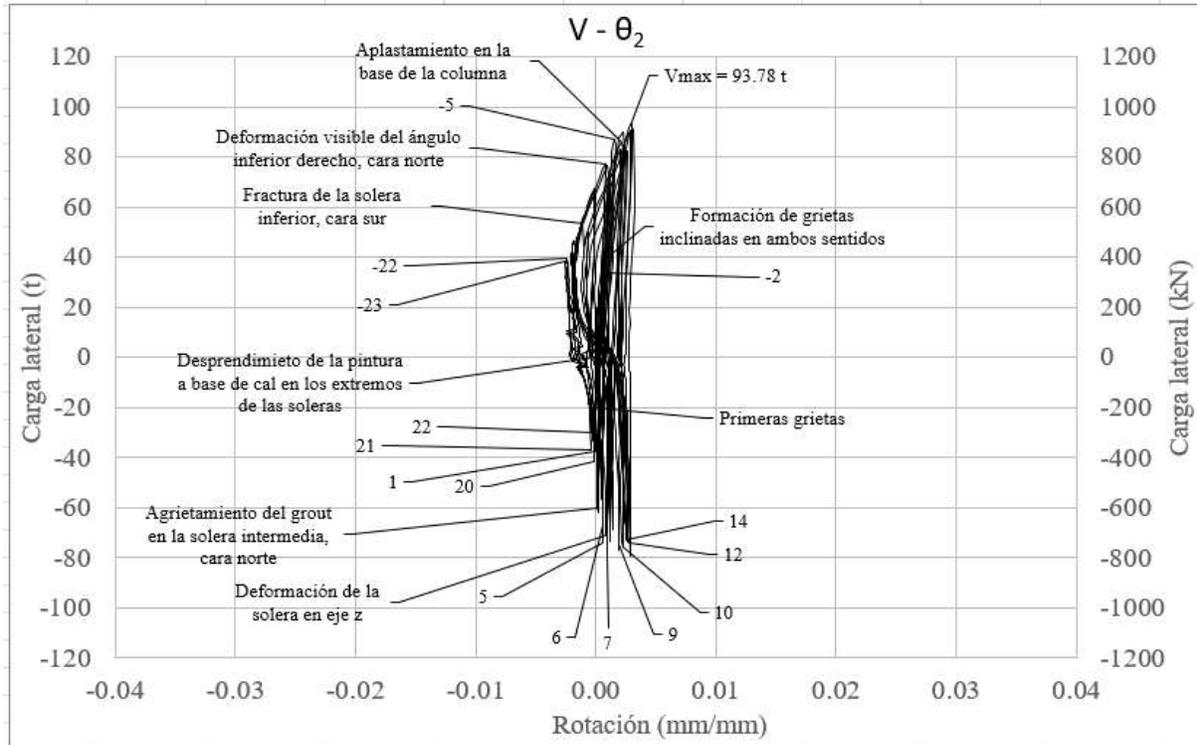


Fig. 3.3.216 Rotación de la región 2 - C-4

La gráfica de la región 3 es añadida en la Fig. 3.3.217. Esta curva es la que tuvo los menores valores de las tres, registrando un valor máximo de 0.0029 mm/mm obtenido en el primer semiciclo con signo negativo con distorsión de -5.5%. Al igual que en la primera región, se observa una pérdida de rigidez significativa después de la fractura de la solera sur.

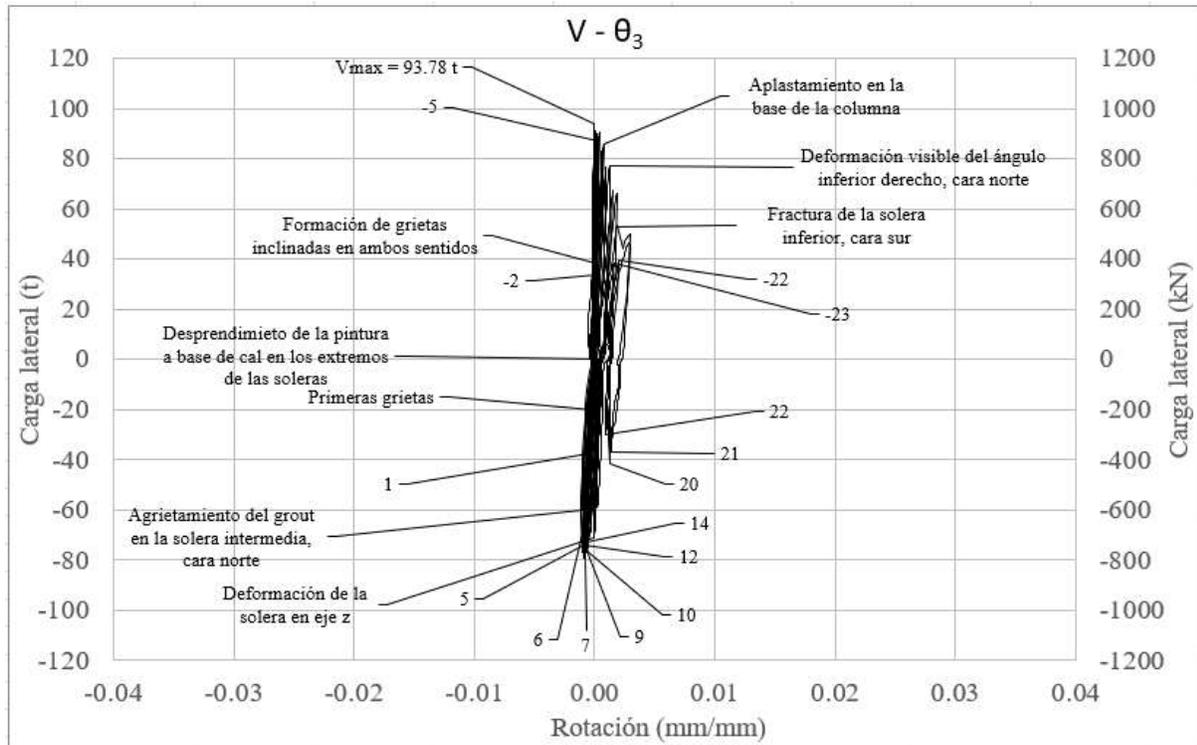


Fig. 3.3.217 Rotación de la región 3 - Columna C-4

Las curvaturas de las columnas fueron obtenidas gracias a los valores previamente registrados de las rotaciones que fueron divididos entre las tres alturas de cada región. Los valores de las curvaturas al igual que en las columnas anteriores fueron prácticamente cero.

En la siguiente tabla (Tabla 39), se reportan los valores máximos de las curvaturas en cada región:

Tabla 39. Curvatura - Columna C-4

| Región | Curvatura máxima (1/mm) |
|--------|-------------------------|
| 1 | 0.00020 |
| 2 | 0.00014 |
| 3 | 0.00011 |

3.3.5.5 Deformación angular

La deformación angular se refiere a la suma de las mediciones absolutas registradas en la cara sur por los transductores de desplazamiento colocados en ambos sentidos de manera diagonal.

En la Tabla 40, se reportan los valores máximos de las deformaciones angulares en cada región:

Tabla 40. Deformación angular - Columna C-4

| Región | Deformación angular (mm/mm) |
|--------|-----------------------------|
| 1 | 0.259 |
| 2 | 0.171 |
| 3 | 0.114 |

La Fig. 3.3.218 refleja la gráfica de los valores de la deformación angular contra la carga lateral. La deformación angular máxima registrada fue de 0.259 mm/mm en el primer semiciclo positivo aplicado con distorsión de 5.5%, una vez alcanzado dicho valor, este permaneció constante debido al daño presentado en la columna en esta región. El comportamiento de la curva tuvo lazos muy estrechos hasta alcanzar la resistencia máxima, pues después de este hito la gráfica comenzó a registrar lazos más amplios. Los mayores valores de la deformación angular fueron reportados en esta región.

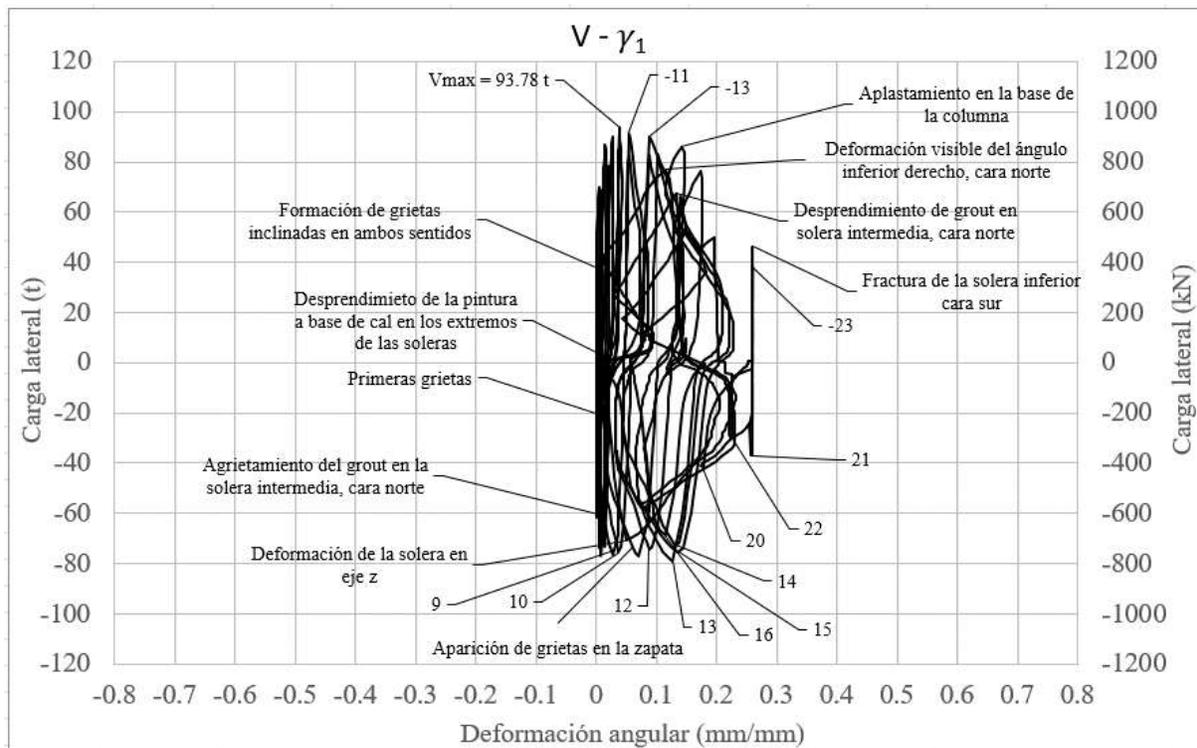


Fig. 3.3.218 Deformación angular región 1 - Columna C-4

La deformación angular de la segunda región correspondiente al espécimen C-4 se observa en la Fig. 3.3.219. El mayor valor de la deformación angular fue de 0.171 mm/mm registrado antes de llegar a la pausa del primer semiciclo positivo con distorsión de 5.5%. La curva presentó un comportamiento similar a la región anterior, sin embargo, los lazos fueron menos amplios y los valores registrados menores.

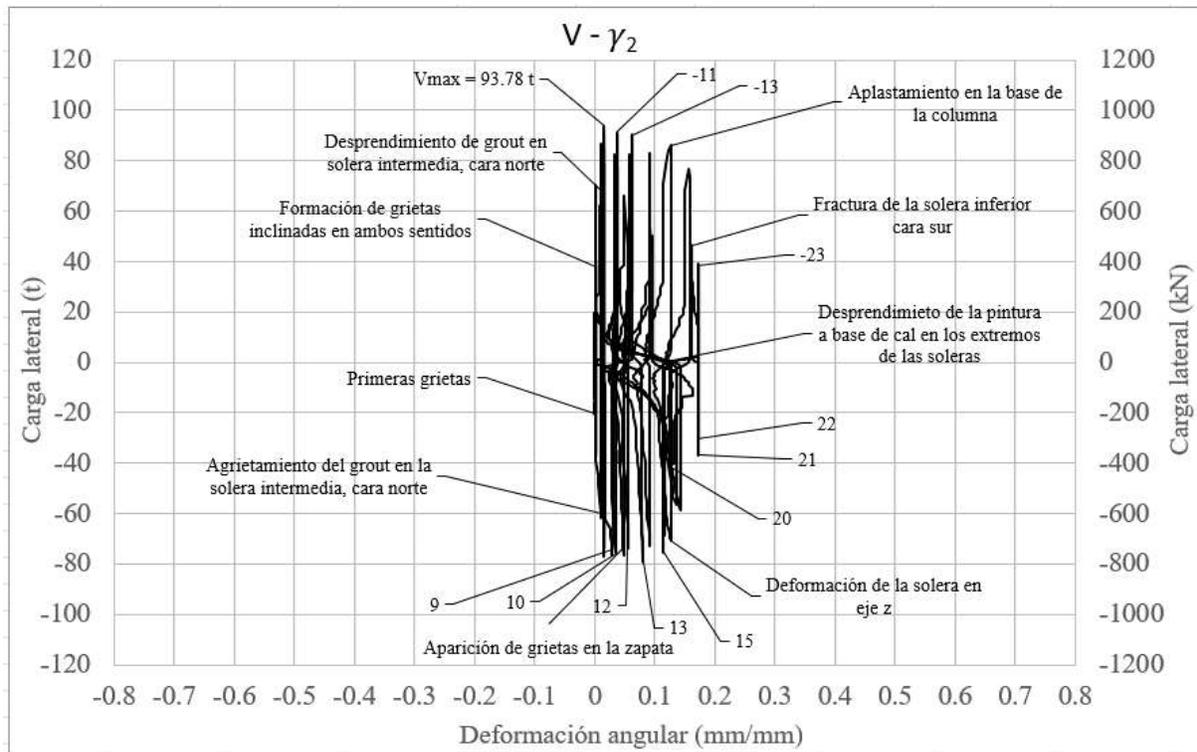


Fig. 3.3.219 Deformación angular región 2 - Columna C-4

La región 3 de la columna se muestra en la Fig. 3.3.220, donde el mayor valor de la deformación angular obtenido fue de 0.114 mm/mm en el último semiciclo aplicado en toda la prueba el cual tuvo una distorsión negativa de -6%. Se observó una curva con lazos muy estrechos y con los menores valores de la columna correspondientes a este parámetro.

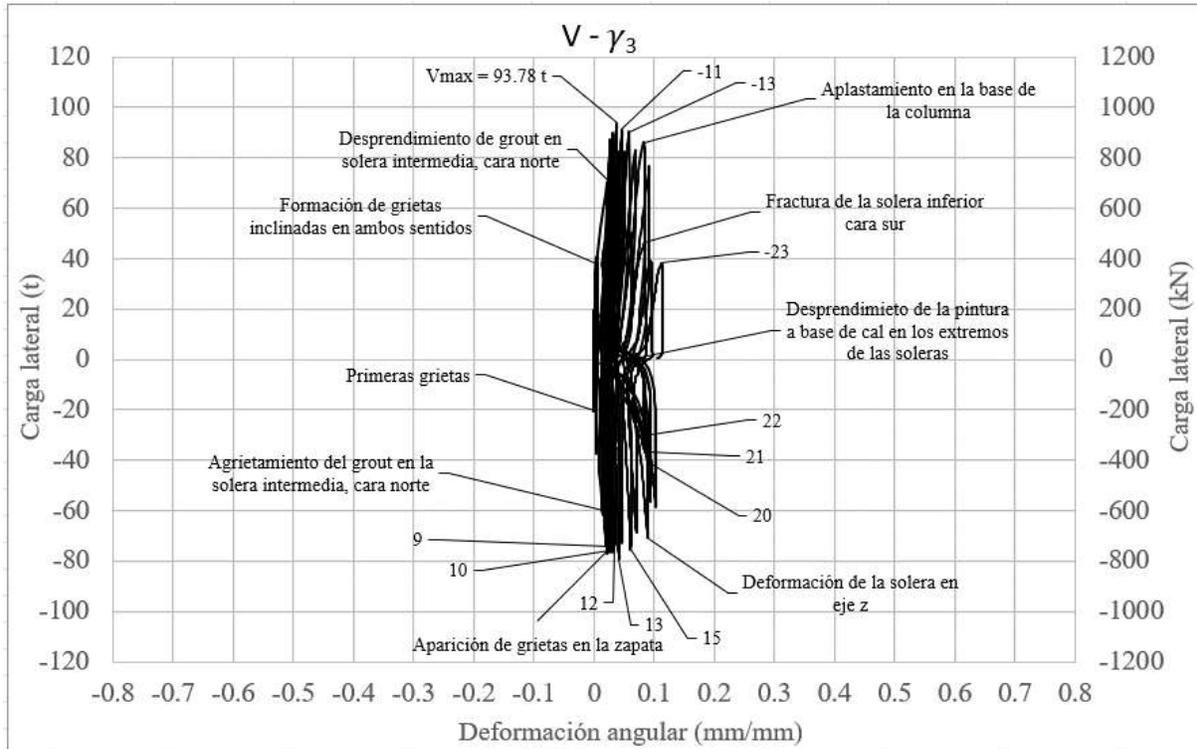


Fig. 3.3.220 Deformación angular región 3 - C-4

3.3.5.6 Rotación y deslizamiento de la cimentación

En esta sección se aborda la rotación y el deslizamiento en la parte de la cimentación de la columna C-4. La medición de las rotaciones de la zapata se realizó a través de un par de transductores de carátula colocados en la parte inferior de este elemento, cada uno en una cara lateral. Para el deslizamiento medido en la base de la columna, se colocó un transductor de desplazamiento en la parte superior de la zapata.

El mayor valor de la rotación registrado fue de 0.0005209 mm/mm, mientras que el del deslizamiento en la base de la columna fue de 1.615 mm. El comportamiento de la curva se debe al efecto de confinamiento aportado por los ángulos y las soleras.

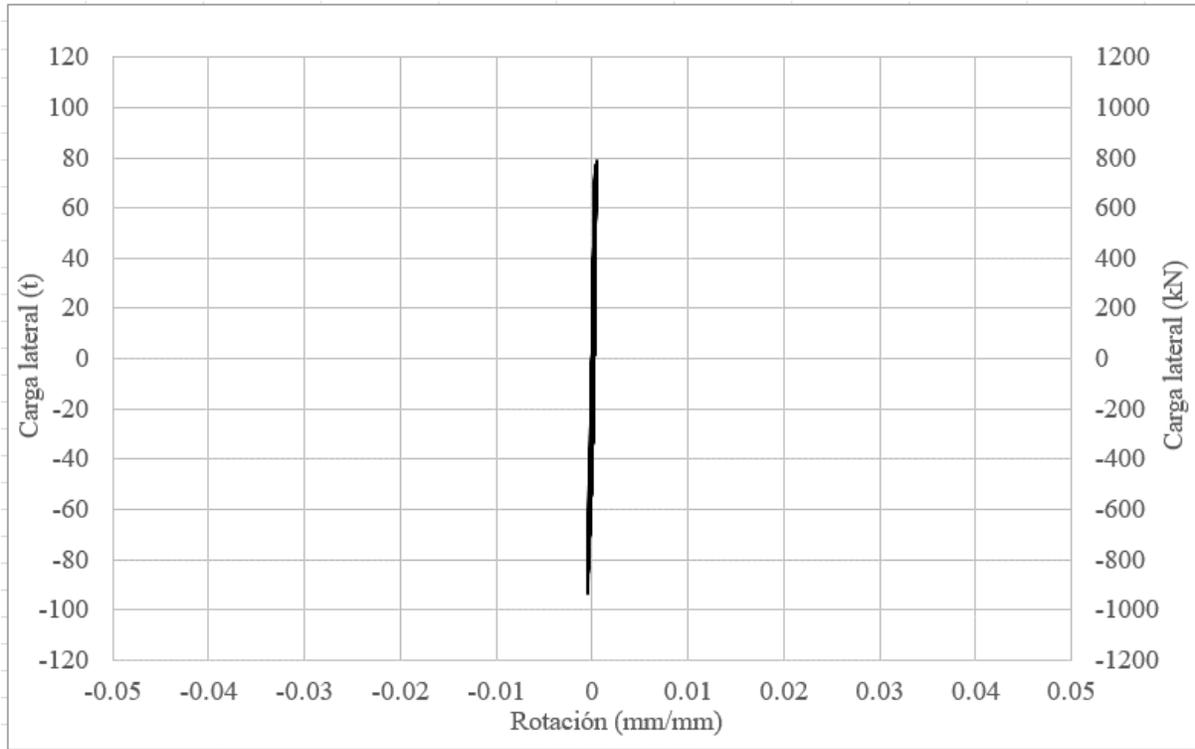


Fig. 3.3.221 Rotación de la zapata - Columna C-4

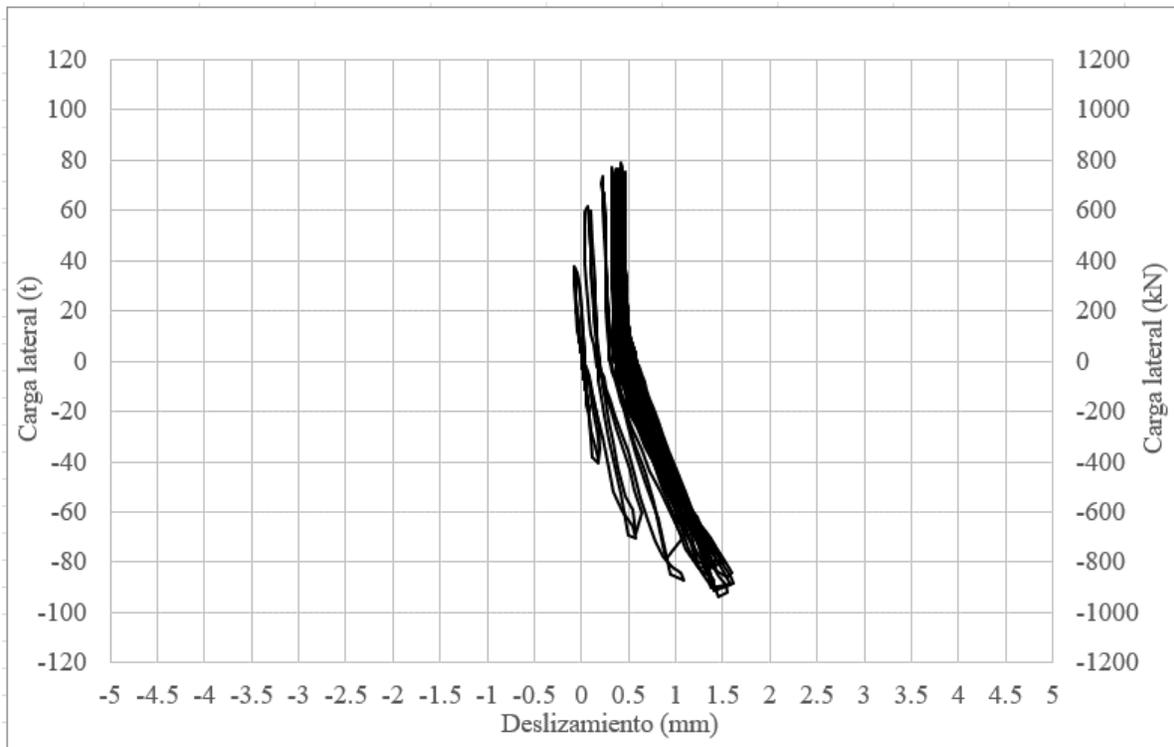


Fig. 3.3.222 Deslizamiento en la base de la columna - Columna C-4

3.3.6 Resumen

En esta sección se incluyen tablas con el fin de concentrar los valores máximos y ubicar en que región se presentaron de ser el caso los siguientes parámetros:

- Rotación
- Curvatura
- Deformación angular
- Rotación en la zapata
- Deslizamiento en la zapata.

Las celdas resaltadas en cada tabla corresponden a las columnas con valores máximos de cada indicador.

Tabla 41. Resumen de las rotaciones máximas

| Columna | Rotación máxima (mm/mm) | Región |
|---------|-------------------------|--------|
| O | 0.0071 | 3 |
| OR | 0.0161 | 1 |
| O* | 0.0194 | 1 |
| C-2 | 0.0378 | 1 |
| C-4 | 0.0316 | 1 |

Tabla 42. Resumen de las curvaturas máximas

| Columna | Curvatura máxima (1/mm) | Región |
|---------|-------------------------|--------|
| O | 0.0000157 | 1 |
| OR | 0.0000363 | 1 |
| O* | 0.0000918 | 1 |
| C-2 | 0.0002736 | 1 |
| C-4 | 0.0002004 | 1 |

Tabla 43. Resumen de las deformaciones angulares máximas

| Columna | Curvatura máxima (1/mm) | Región |
|---------|-------------------------|--------|
| O | - | - |
| OR | 0.3505 | 2 |
| O* | 0.2787 | 2 |

| | | |
|-----|--------|---|
| C-2 | 0.3816 | 1 |
| C-4 | 0.2596 | 1 |

Tabla 44. Resumen de las rotaciones en la zapata

| Columna | Rotación máxima (mm/mm) |
|---------|-------------------------|
| O | 0.0000651 |
| OR | 0.0017953 |
| O* | 0.0001256 |
| C-2 | 0.0002791 |
| C-4 | 0.0005209 |

Tabla 45. Resumen del deslizamiento en la base de las columnas

| Columna | Deslizamiento máximo (mm) |
|---------|---------------------------|
| O | 0.18 |
| OR | 0.15 |
| O* | 0.18 |
| C-2 | 0.87 |
| C-4 | 1.61 |

4 COMPORTAMIENTO DETALLADO

4.1 Introducción

En el capítulo 4 se estudia el comportamiento del acero de refuerzo de las cinco columnas mediante deformímetros que de esta sección en adelante se hará referencia a ellos como deformímetros internos. La descripción del comportamiento de los deformímetros internos se divide en dos apartados por columna; refuerzo longitudinal y transversal. De igual manera, con los datos de las grietas recabados en las bitácoras, se define el comportamiento de grietas en las caras norte, este y oeste de los especímenes.

Los esfuerzos y deformaciones unitarias obtenidas mediante los deformímetros internos permiten conocer el comportamiento del acero de refuerzo de los modelos y brindan información que complementa el entendimiento de los modos de falla en cada modelo.

4.2 Consideraciones sobre el análisis de deformímetros

Para realizar un adecuado análisis del comportamiento detallado de los deformímetros internos es necesario considerar ciertos aspectos que se describen en las siguientes líneas.

Primeramente, se consideró el valor obtenido del promedio de las deformaciones propias de las barras mencionado en 2.6.2.1 para indicar los límites a los que fluyó el acero. El valor límite establecido es de 2300 $\mu\text{m}/\text{mm}$ microdeformaciones.

Otro aspecto importante, es la identificación de cada deformímetro interno. La siguiente tabla (Tabla 46) describe el nombre de los instrumentos, la cual fue retomada de Alcocer y otros (2023):

Tabla 46. Nomenclatura - Deformímetros Internos (Alcozer y otros, 2023)

| Nombre | Descripción |
|--------|---|
| SLN80 | Deformímetro (S) en barra longitudinal (L) de la cara norte (N), octava barra de derecha a izquierda (8), primer deformímetro en la barra de abajo para arriba (0). |
| SLN81 | Deformímetro (S) en barra longitudinal (L) de la cara norte (N), octava barra de derecha a izquierda (8), segundo deformímetro en la barra de abajo para arriba (1). |
| SLN82 | Deformímetro (S) en barra longitudinal (L) de la cara norte (N), octava barra de derecha a izquierda (8), tercer deformímetro en la barra de abajo para arriba (2). |
| SLN83 | Deformímetro (S) en barra longitudinal (L) de la cara norte (N), octava barra de derecha a izquierda (8), cuarto deformímetro en la barra de abajo para arriba (3). |
| SLN10 | Deformímetro (S) en barra longitudinal (L) de la cara norte (N), primera barra de derecha a izquierda (1), primer deformímetro en la barra de abajo para arriba (0). |
| SLN11 | Deformímetro (S) en barra longitudinal (L) de la cara norte (N), primera barra de derecha a izquierda (1), segundo deformímetro en la barra de abajo para arriba (1). |
| SLN12 | Deformímetro (S) en barra longitudinal (L) de la cara norte (N), primera barra de derecha a izquierda (1), tercer deformímetro en la barra de abajo para arriba (2). |
| SLN13 | Deformímetro (S) en barra longitudinal (L) de la cara norte (N), primera barra de derecha a izquierda (1), cuarto deformímetro en la barra de abajo para arriba (3). |
| SLN60 | Deformímetro (S) en barra longitudinal (L) de la cara norte (N), sexta barra de derecha a izquierda (6), primer deformímetro en la barra de abajo para arriba (0). |
| SLN30 | Deformímetro (S) en barra longitudinal (L) de la cara norte (N), tercera barra de derecha a izquierda (3), primer deformímetro en la barra de abajo para arriba (0). |
| SLS81 | Deformímetro (S) en barra longitudinal (L) de la cara sur (S), octava barra de derecha a izquierda (8), primer deformímetro en la barra de abajo para arriba (1). |
| SLS11 | Deformímetro (S) en barra longitudinal (L) de la cara sur (S), primera barra de derecha a izquierda (1), primer deformímetro en la barra de abajo para arriba (1). |
| STN1 | Deformímetro (S) en barra transversal (T) de la cara norte (N), primer estribo de abajo para arriba (1). |

| Nombre | Descripción |
|--------|---|
| STN2 | Deformímetro (S) en barra transversal (T) de la cara norte (N), segundo estribo de abajo para arriba (2). |
| STS1 | Deformímetro (S) en barra transversal (T) de la cara sur (S), primer estribo de abajo para arriba (1). |
| STS2 | Deformímetro (S) en barra transversal (T) de la cara sur (S), segundo estribo de abajo para arriba (2). |

Cabe mencionar que a lo largo del programa experimental, ciertos deformímetros pudieron ser dañados en algún punto de la prueba o previo a su inicio, por lo que en las gráficas que muestran las deformaciones internas, se puede ver que los instrumentos dejan de marcar datos o en el caso de estar dañados previos a la prueba, se indicará y se acotará.

Las gráficas de deformaciones obtenidas mediante los deformímetros internos serán las siguientes:

Refuerzo longitudinal

- SLN80 – SLN10
- SLN81 – SLN11
- SLN 60 – SLN30
- SLN71
- SLS81 – SLS11
- SLN82 – SLN12
- SLN83 – SLN13

Refuerzo transversal

- STN1 – STS1
- STN2 – STS2

En cuanto a los deformímetros externos colocados únicamente sobre el acero de las columnas encamisadas. En cada uno de los apartados se indicarán sus ubicaciones específicas. El valor de la fluencia del acero se tomará cuando los deformímetros superen las 1779 microdeformaciones en mm/mm.

4.3 Columna O

La columna O () fue el primer modelo ensayado en el marco del programa experimental de esta tesis. En este espécimen fueron colocados 17 deformímetros internos en el acero de refuerzo, su configuración se observa en la Fig. 4.3.2. Con los deformímetros presentes en la columna se realiza el análisis de esta sección.

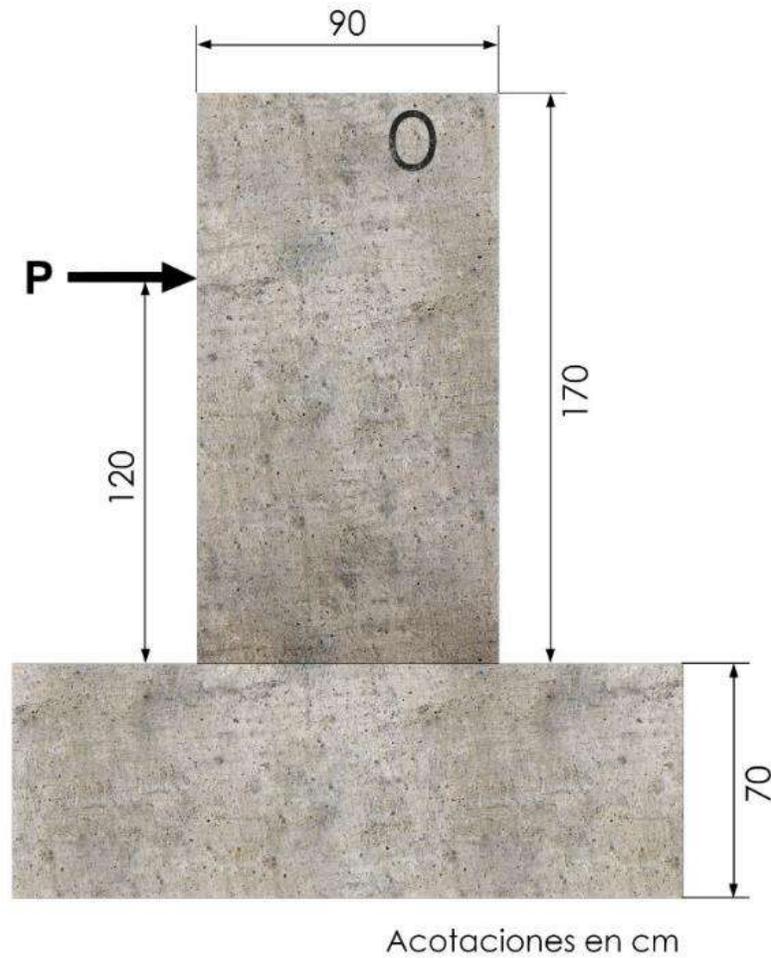


Fig. 4.3.1 Vista frontal - Columna O

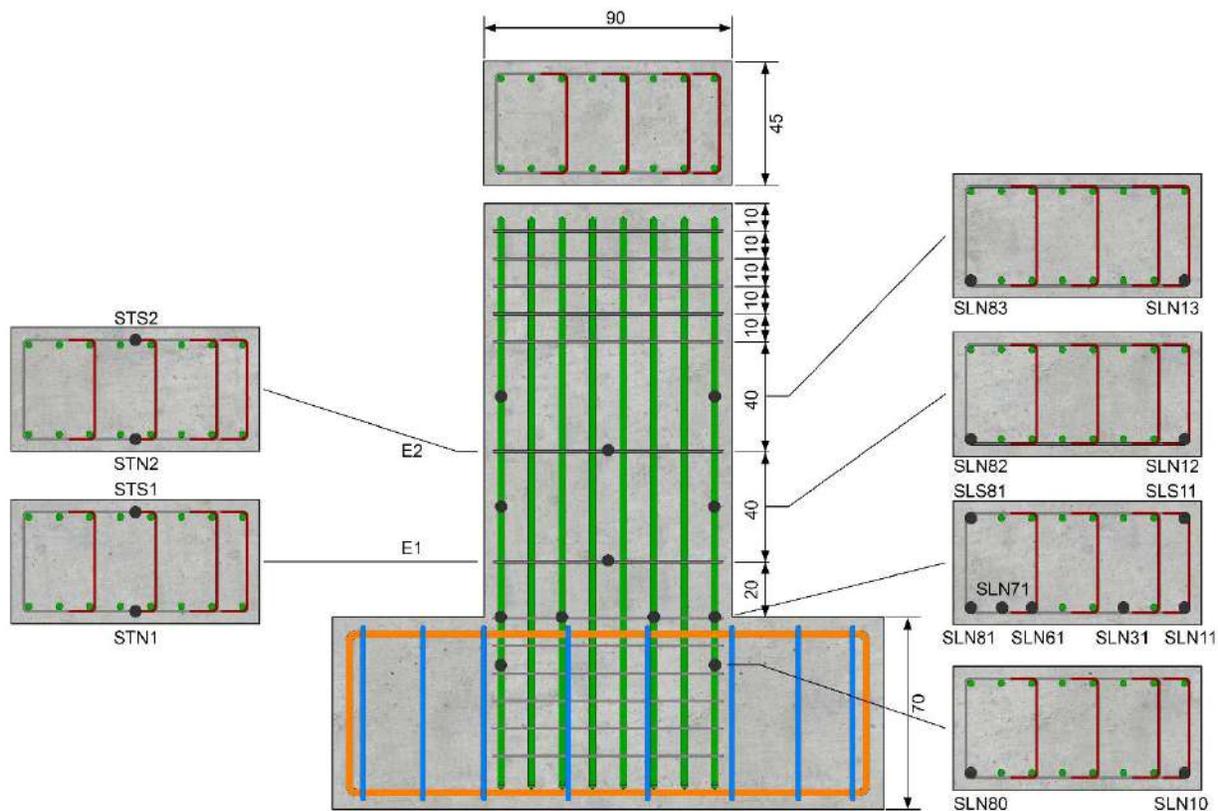


Fig. 4.3.2 Deformímetros internos - Columna O

4.3.1 Análisis de deformímetros internos

La instrumentación realizada con los deformímetros internos se muestra en las siguientes gráficas. Con el fin de comparar deformímetros colocados en sitios estratégicos y similares en orientación, las curvas correspondientes se harán en pares.

En la Tabla 47 se realiza una revisión de los deformímetros internos y de su funcionamiento previo a la prueba. En caso de mencionar "Correcto", se atribuye que el instrumento estaba en buenas condiciones para medir datos, de otra manera "-" indica que los deformímetros no funcionaron.

Tabla 47. Funcionamiento deformímetros internos - Columna O

| Deformímetro | Funcionamiento previo a la prueba |
|--------------|-----------------------------------|
| SLN80 | Correcto |
| SLN10 | Correcto |
| SLN81 | Correcto |
| SLN11 | - |
| SLN60 | Correcto |
| SLN30 | Correcto |
| SLS81 | - |
| SLS11 | - |
| SLN71 | - |
| SLN82 | Correcto |
| SLN12 | - |
| SLN83 | Correcto |
| SLN13 | - |
| STN1 | - |
| STS1 | - |
| STN2 | - |
| STS2 | - |

A continuación se observan las gráficas correspondientes a las deformaciones de los deformímetros internos mencionados en 4.2. En caso de que ninguno del par de instrumentos por gráfica haga mediciones, no se hará inclusión de dichas curvas. Después de la inserción de las gráficas se incluirá una tabla resumen donde se indicará cuales deformímetros internos fluyeron.

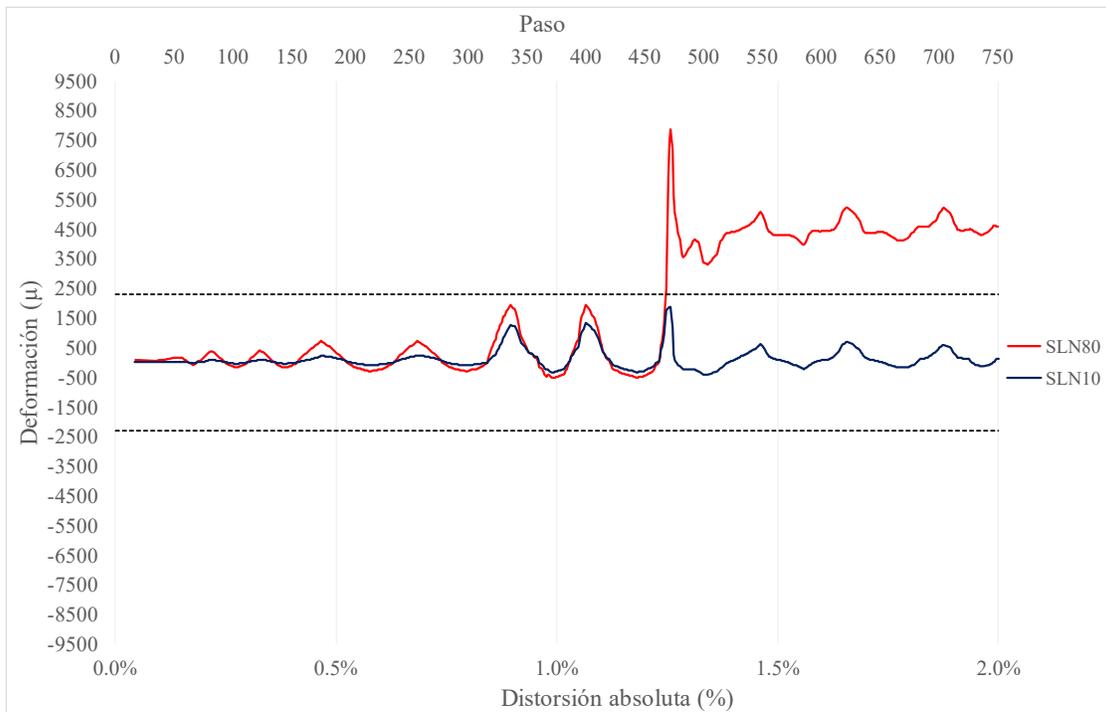


Fig. 4.3.3 Deformaciones SLN80 - SLN10 – Columna O

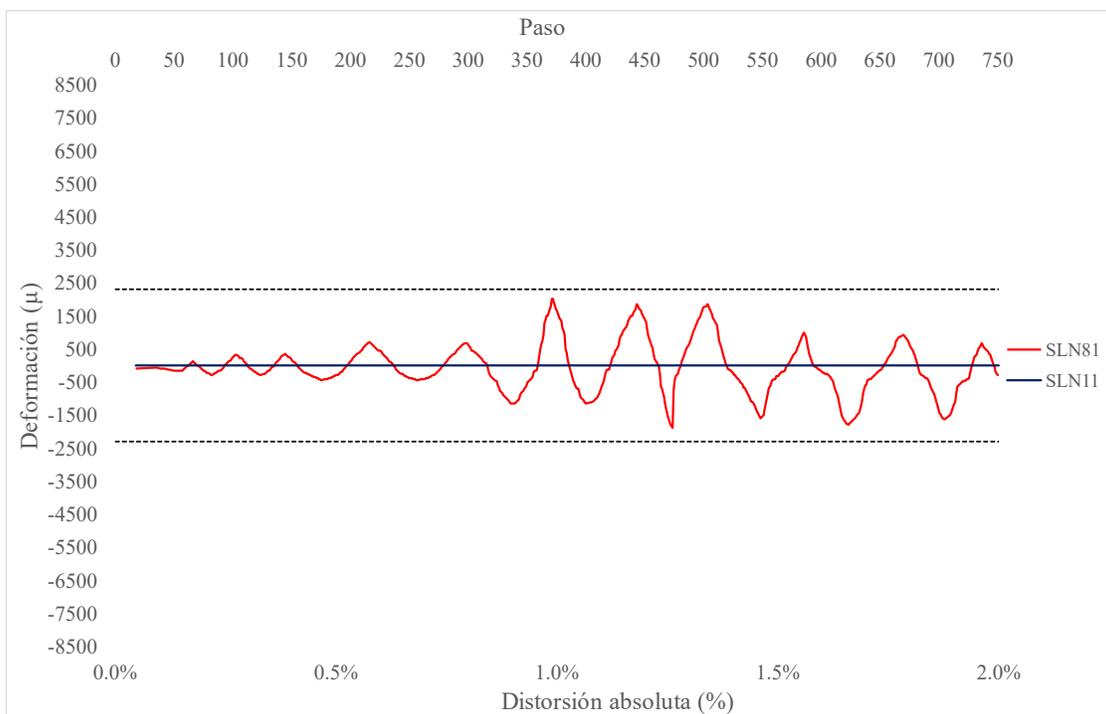


Fig. 4.3.4 Deformaciones SLN81 - SLN11 – Columna O

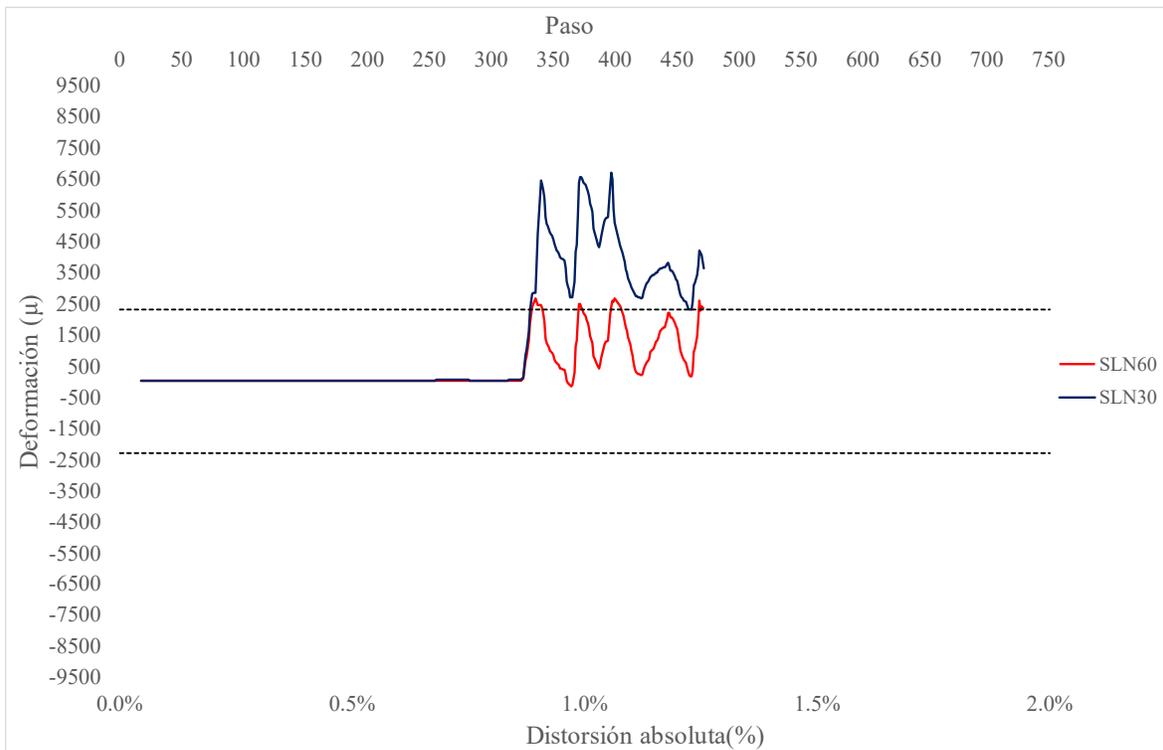


Fig. 4.3.5 Deformaciones SLS60 - SLN30 – Columna O

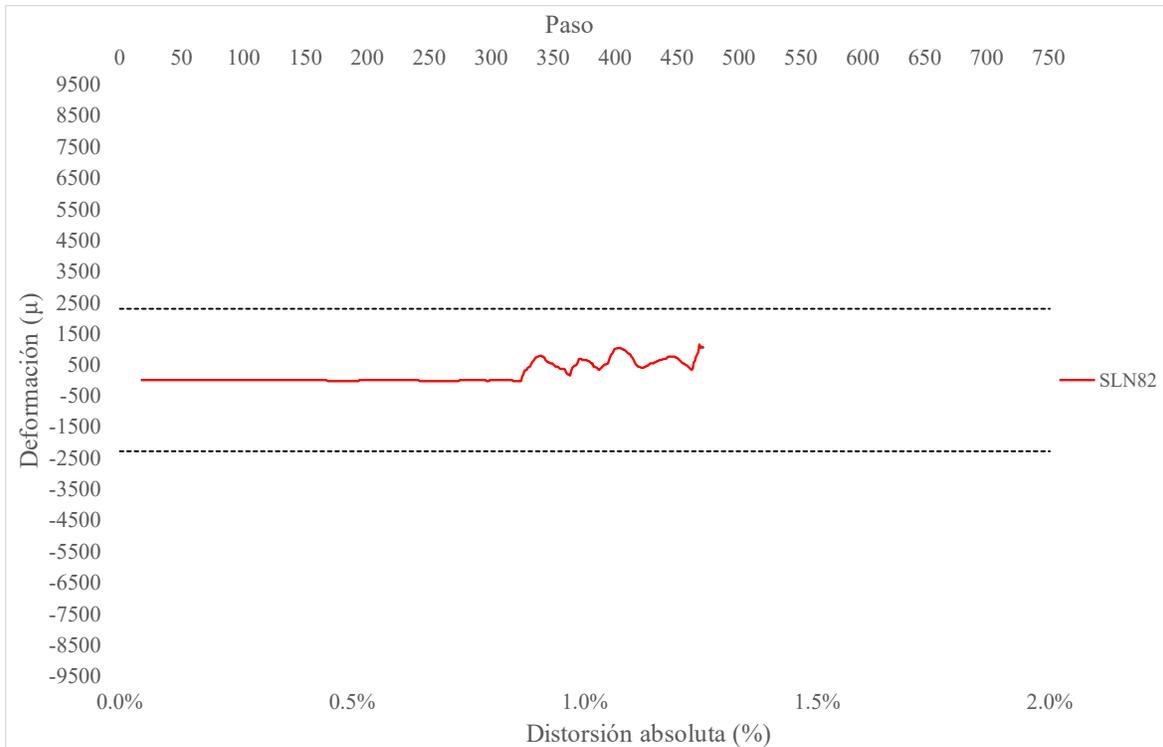


Fig. 4.3.6 Deformaciones SLN82 - SLN12 – Columna O

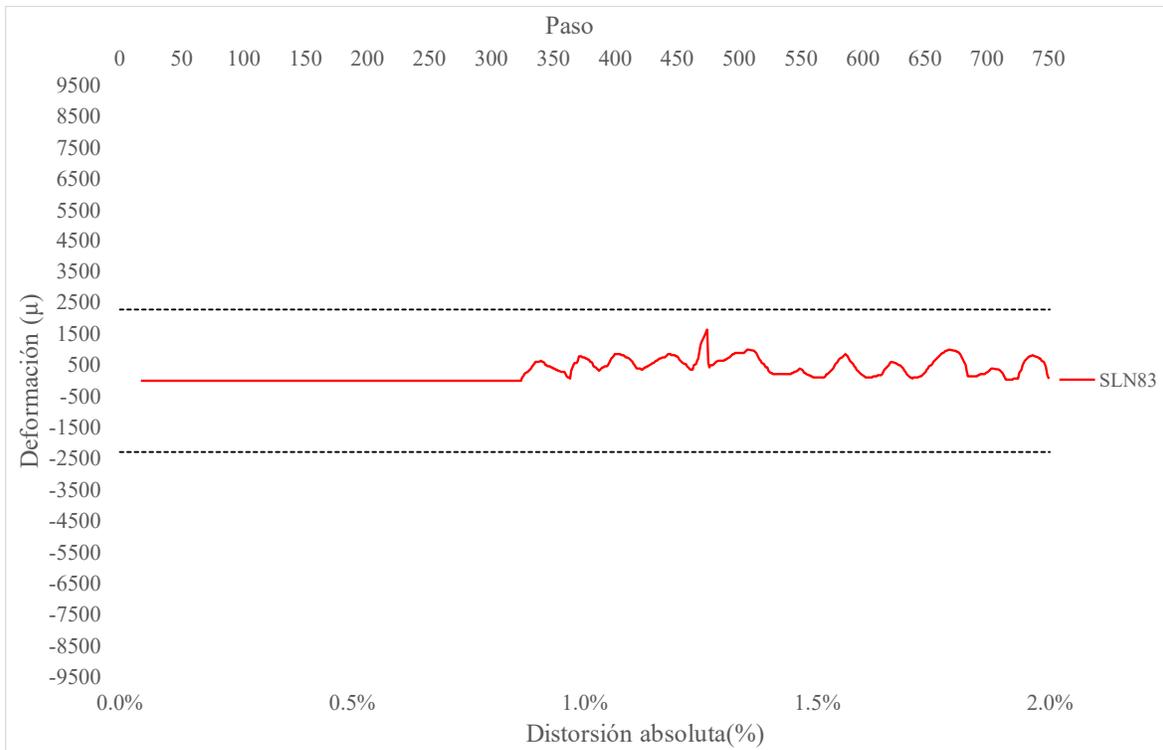


Fig. 4.3.7 Deformaciones SLN83 - SLN13 – Columna O

Tabla 48. Resumen de la primera fluencia - Columna O

| Deformímetro | Fluencia | Distorsión de fluencia | Comentarios |
|--------------|----------|------------------------|--|
| SLN80 | SÍ | 1% | La primera fluencia ocurrió cuando el deformímetro llegó a la primera distorsión positiva de 1% |
| SLN10 | NO | - | |
| SLN81 | NO | - | |
| SLN60 | NO | - | |
| SLN30 | SÍ | -0.5% | El registro de la primera fluencia fue en la pausa del primer semiciclo de la prueba con distorsión de -0.5% |
| SLN82 | NO | - | |
| SLN83 | NO | - | |

Se observó que únicamente los deformímetros internos fluyeron a lo largo de la prueba, pese a que la fluencia no ocurrió en los mismos semiciclos, sí se presentó en la misma distorsión de 0.5%.

4.3.2 Comportamiento de grietas

En este apartado se muestran los resultados obtenidos gracias a la medición de la abertura de las grietas registradas en las bitácora de la columna O.

A continuación se incluye la gráfica correspondiente a la cara norte, la cual fue la única de la que se tuvo registro durante el ensayo en la bitácora. Para la elaboración de la gráfica, se tomaron los valores absolutos de distorsión de la prueba y se graficaron los valores máximos del espesor de las grietas en cada distorsión. La gráfica construida brindó información sobre en qué sentido se registró la mayor abertura de grietas. Los íconos colocados en la derecha hacen alusión al comportamiento de empujón y jalón de la prueba, los cuales fueron acotados mediante los colores rojo y negro, sin embargo, para el caso se usaron rojo y azul respectivamente.

La Fig. 4.3.8 grafica los datos obtenidos en la bitácora de los valores de la distorsión en porcentaje contra el espesor de las grietas en mm y cm.

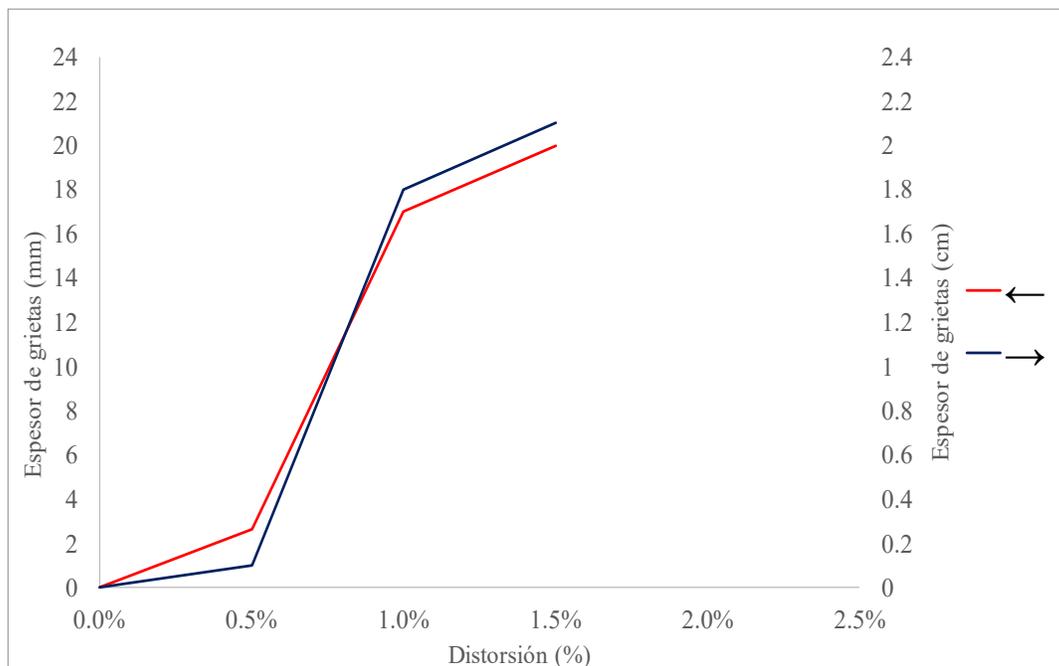


Fig. 4.3.8 Evolución del agrietamiento cara norte - Columna O

Los valores máximos que alcanzó la columna O fueron de 20 mm para las grietas en color rojo y de 21 mm en color azul. Las grietas se dejaron de medir cuando el daño en la columna ya no lo permitió, lo cual de acuerdo con la gráfica ocurrió en la distorsión del 1.5%.

4.4 COLUMNA OR

La columna OR se refiere a la columna original rehabilitada, la cual fue sometida a la misma historia de carga. En este modelo fueron colocados 16 deformímetros internos.

En las siguientes figuras (Fig. 4.4.1 y Fig. 4.4.2) se incluye la configuración y la vista frontal del espécimen.

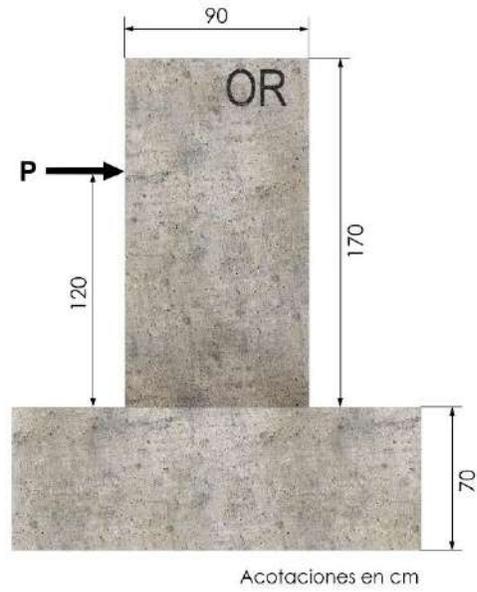


Fig. 4.4.1 Vista frontal - Columna OR

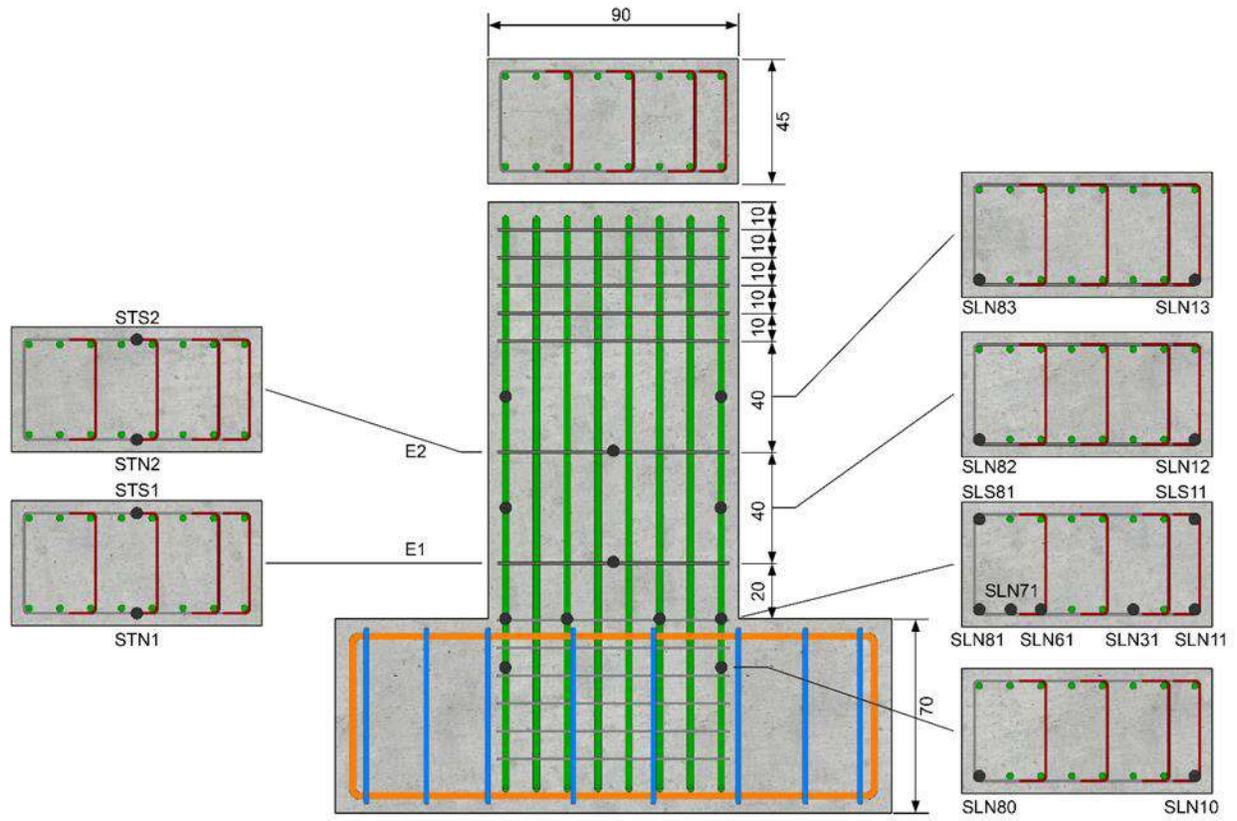


Fig. 4.4.2 Deformímetros internos - Columna OR

4.4.1 Análisis de deformímetros internos

Las siguientes gráficas observadas se realizaron en función de los valores obtenidos de las deformaciones registradas por los deformímetros internos.

En la Tabla 49 se hace un resumen del funcionamiento de los instrumentos antes de iniciar la prueba, indicando si fue correcto o nulo.

Tabla 49. Funcionamiento deformímetros internos - Columna OR

| Deformímetro | Funcionamiento previo a la prueba |
|--------------|-----------------------------------|
| SLN80 | - |
| SLN81 | Correcto |
| SLN82 | - |
| SLN83 | Correcto |
| SLN60 | Correcto |
| SLN30 | Correcto |
| SLN10 | Correcto |
| SLN11 | Correcto |
| SLN12 | - |
| SLN13 | - |
| SLS81 | Correcto |
| SLS11 | Correcto |
| STN1 | - |
| STS1 | Correcto |
| STN2 | - |
| STS2 | - |
| SLN71 | Correcto |

A continuación, se muestran las gráficas correspondientes a los pares de deformímetros internos comparables descritos en 4.2. En la última parte de esta sección se incluirá un resumen sobre la primera fluencia del acero y la distorsión en la que se presentó.

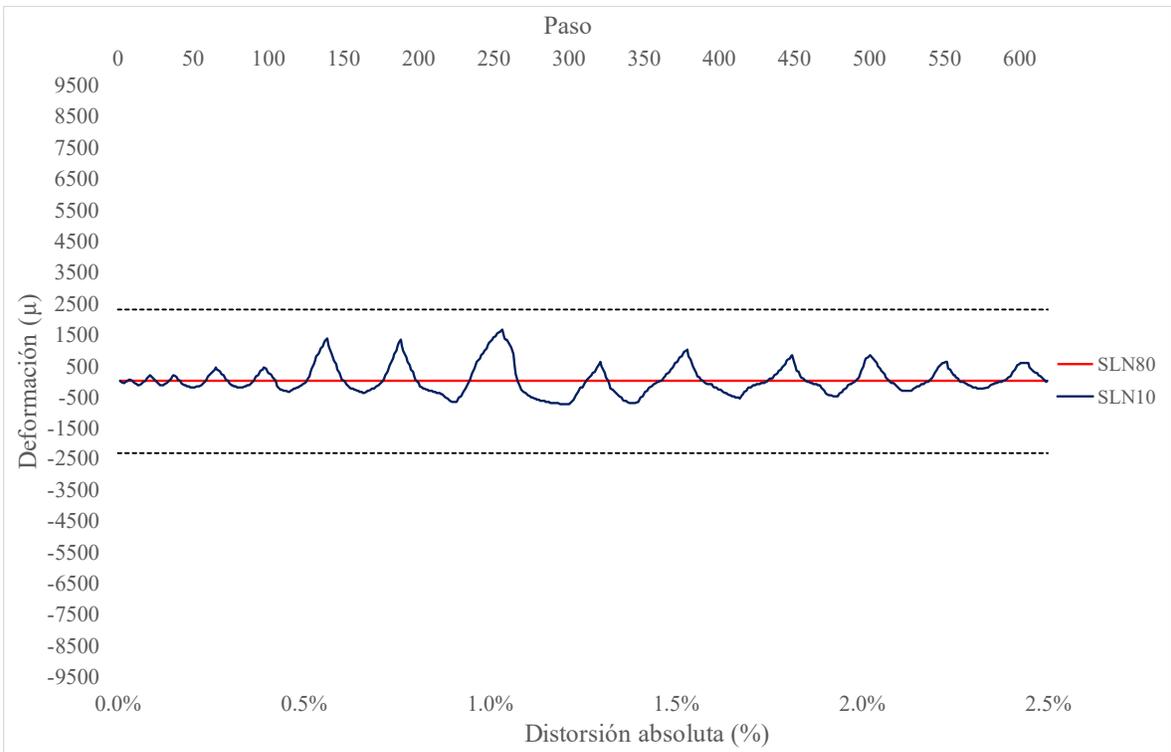


Fig. 4.4.3 Deformaciones SLN80 - SLN10 – Columna OR

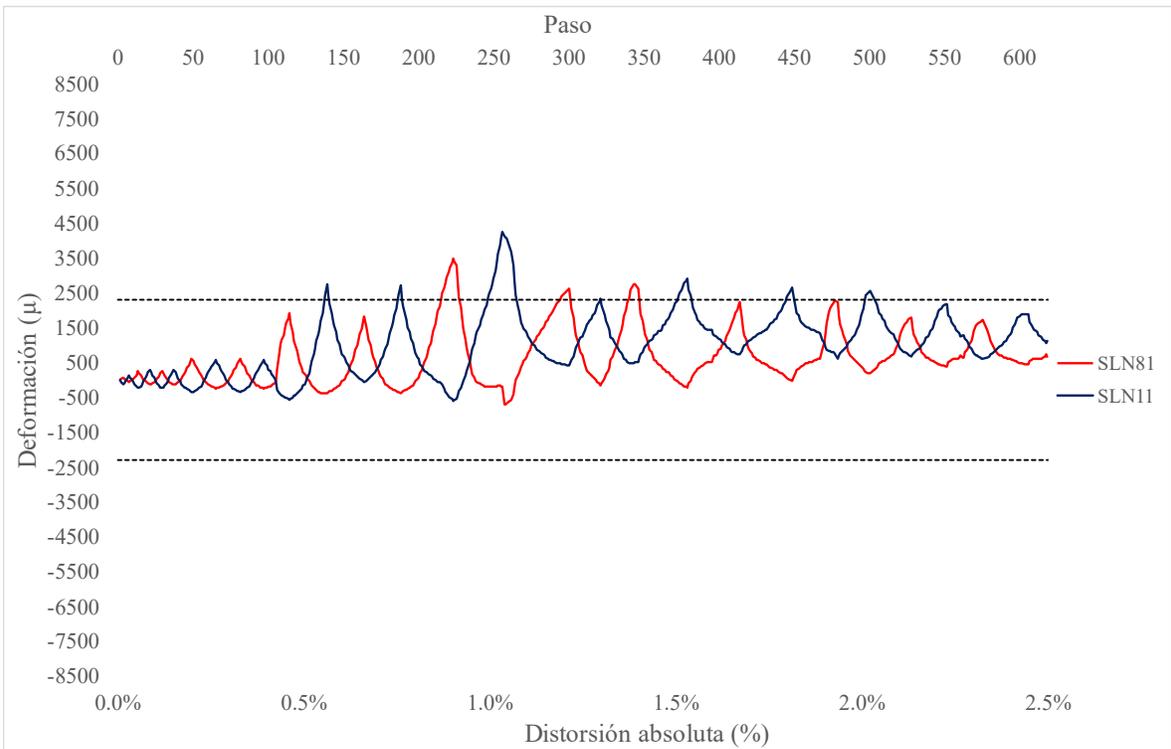


Fig. 4.4.4 Deformaciones SLN81 - SLN11 – Columna OR

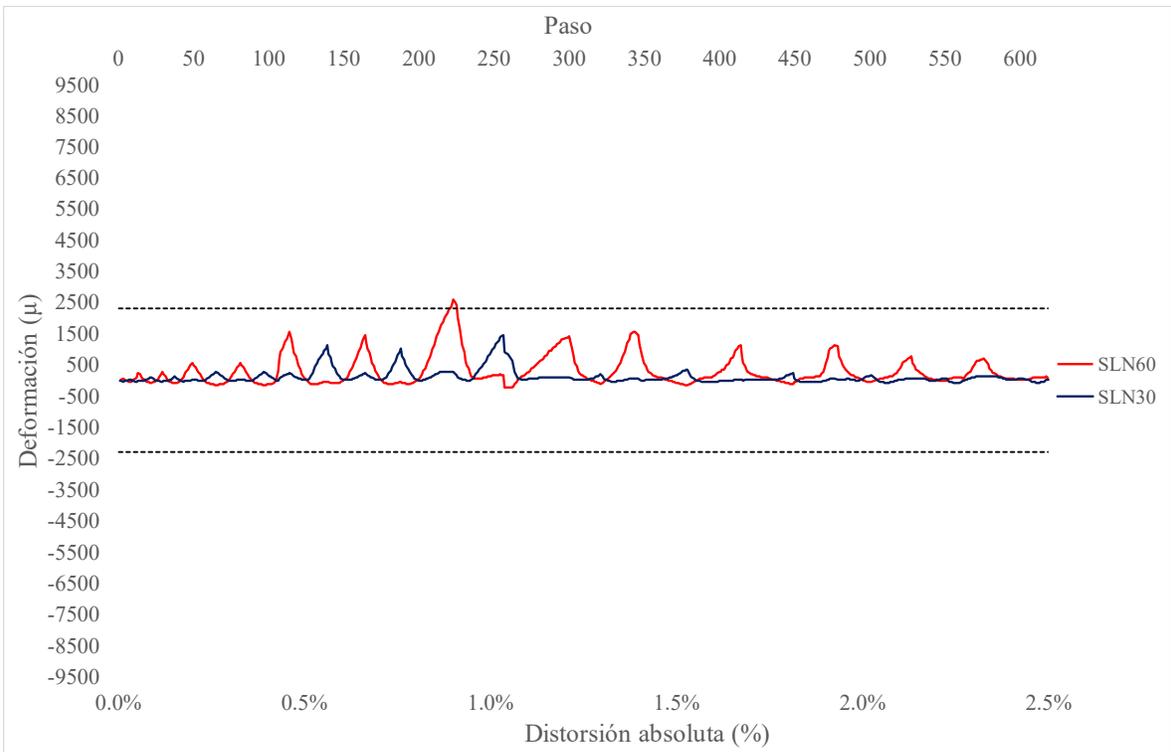


Fig. 4.4.5 Deformaciones SLN60 - SLN30 – Columna OR

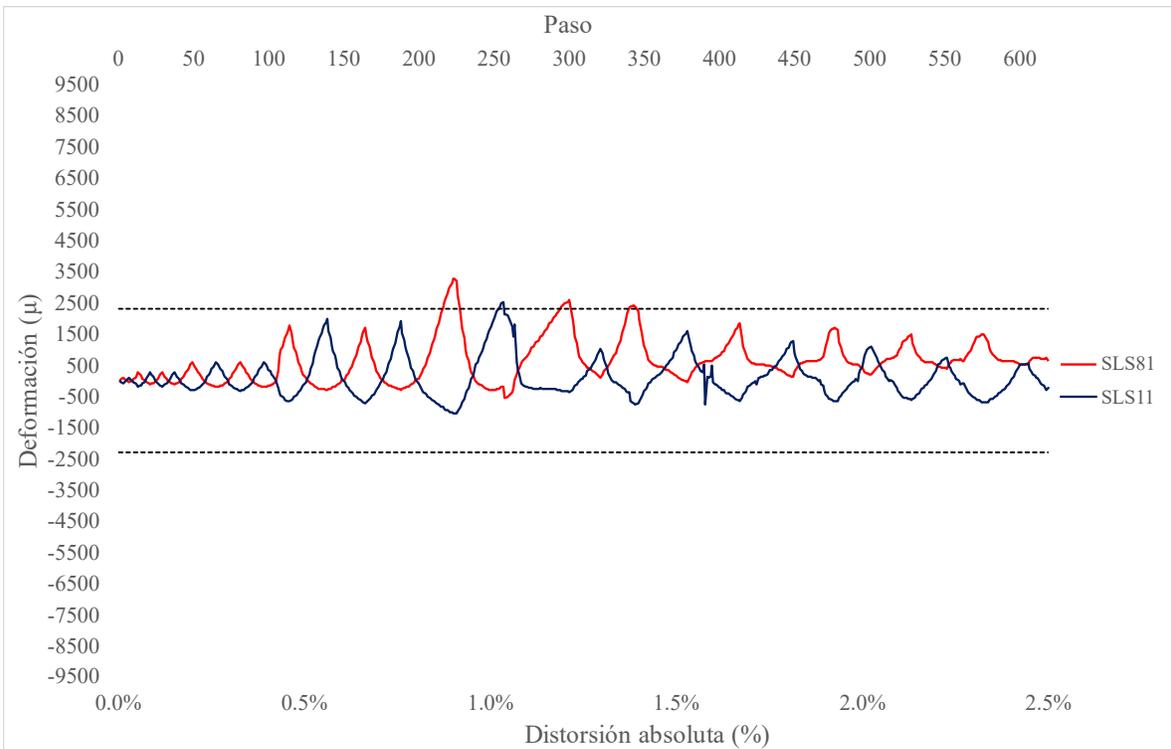


Fig. 4.4.6 Deformaciones SLS81 - SLS11 – Columna OR

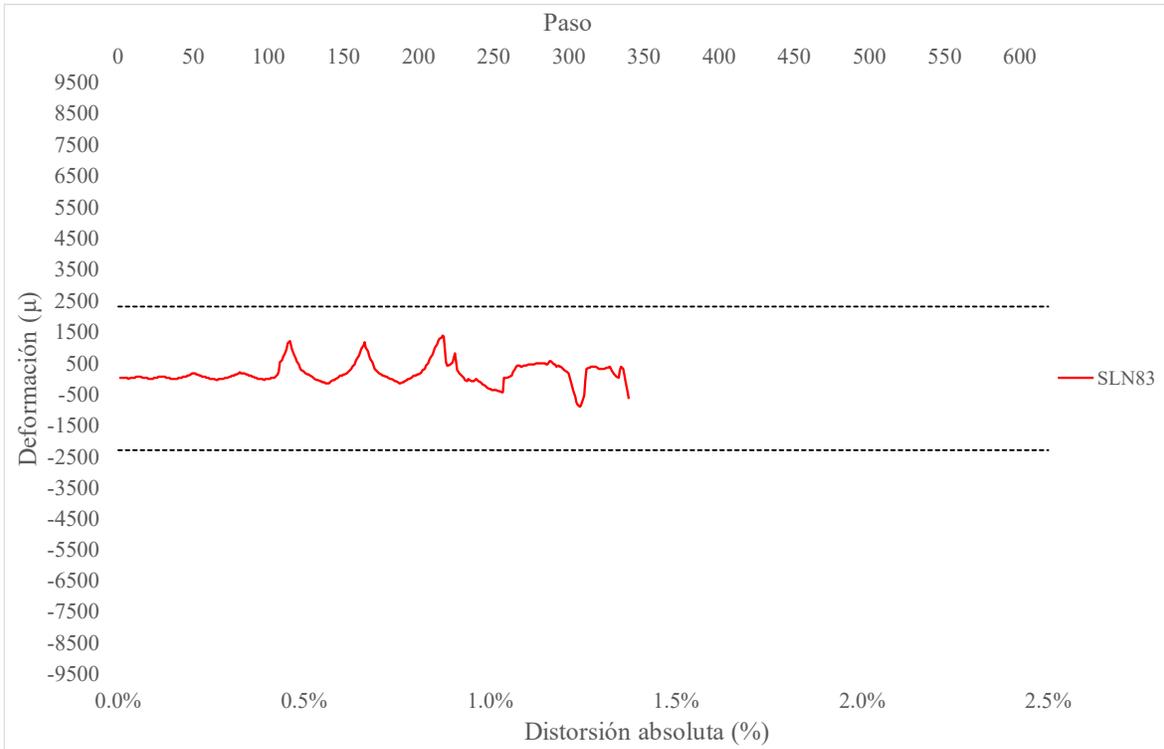


Fig. 4.4.7 Deformaciones SLN83 - SLN13 – Columna OR

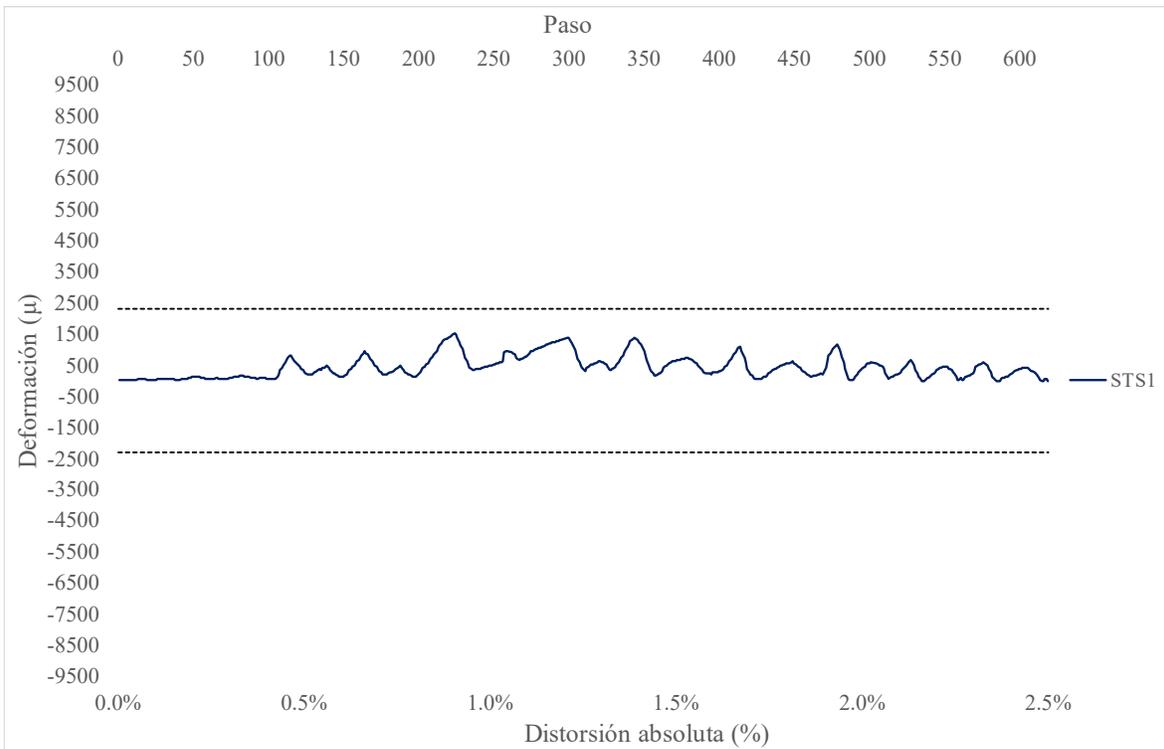


Fig. 4.4.8 Deformaciones STN1 - STS1 – Columna OR

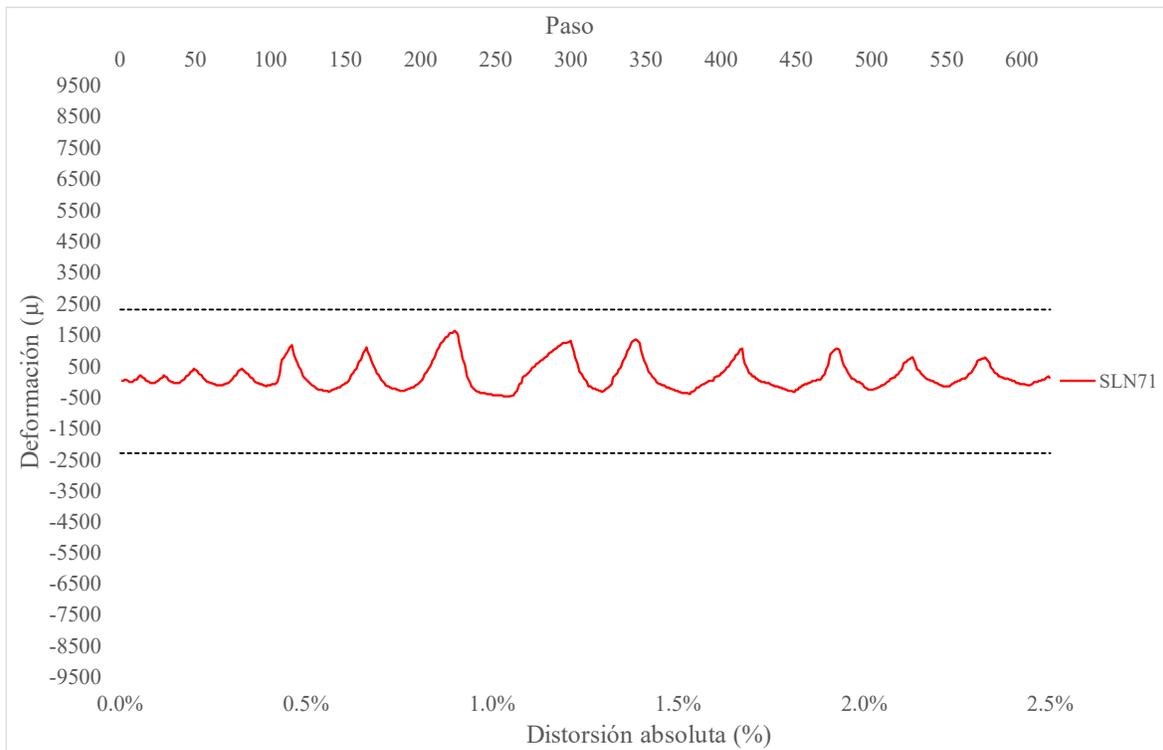


Fig. 4.4.9 Deformaciones SLN71 – Columna OR

Tabla 50. Resumen de la primera fluencia - Columna OR

| Deformímetro | Fluencia | Distorsión de fluencia | Comentarios |
|--------------|----------|------------------------|---|
| SLN80 | NO | - | |
| SLN81 | SÍ | 1% | La fluencia ocurrió en el primer semiciclo positivo con distorsión de 1%. Cabe mencionar que el valor establecido como E_y fue superado anteriormente, sin embargo, no se cumplió que las deformaciones residuales fueran diferentes a cero |
| SLN11 | NO | - | |
| SLN60 | NO | - | |
| SLN30 | NO | - | |
| SLS81 | NO | - | |
| SLS11 | SÍ | -0.5% | La primera fluencia fue registrada en el primer semiciclo con distorsión de -0.5% |
| SLN83 | NO | - | |
| STS1 | NO | - | |
| SLN71 | NO | - | |

Los deformímetros internos en funcionamiento colocados en la columna OR, mostraron un comportamiento similar entre ellos. Pese, a superar las 2000 microdeformaciones en algún momento de la prueba, se concluye que ninguno de los deformímetros internos fluyó, debido a que el registro de las deformaciones no cumplió con la condición de mantener una deformación cercana o superior a 2000 microdeformaciones y que las deformaciones residuales fueran diferentes a cero.

4.4.2 Comportamiento de grietas

En este apartado se muestra la evolución del comportamiento del agrietamiento de la columna OR, la cual correspondió al segundo modelo ensayado sin encamisado metálico.

La curva observada en la Fig. 4.4.10 muestra la gráfica construida a partir de los datos de la bitácora llevada en la prueba. Los valores de las distorsiones se tomaron en absolutos. La notación de las flechas es la misma que en 4.3.2.

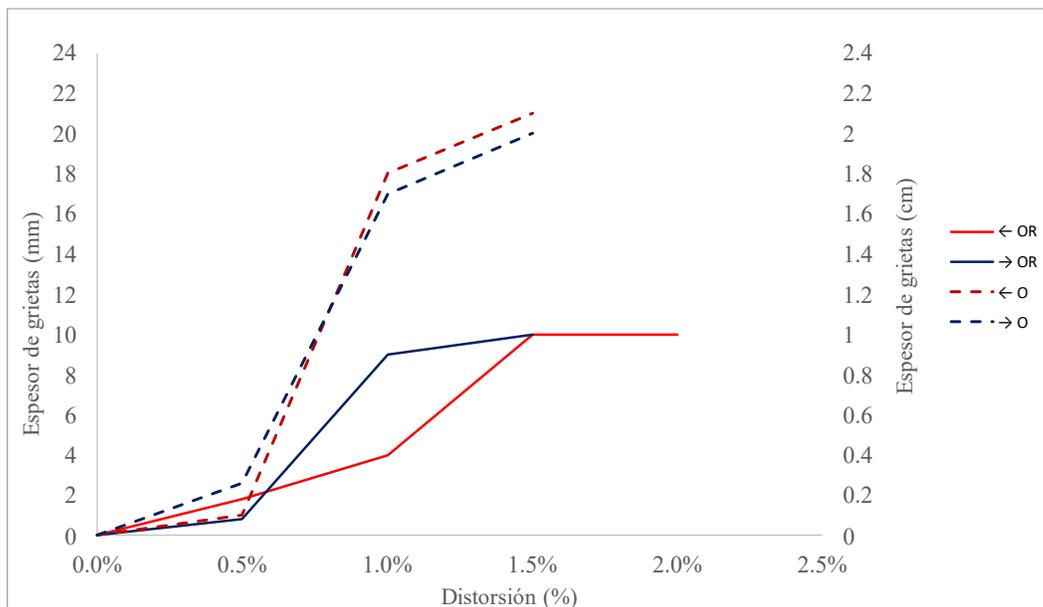


Fig. 4.4.10 Evolución del agrietamiento cara norte - Columna OR

Como fue observado en la figura anterior, la grieta principal en color azul fueron medidas hasta la distorsión de 1.5% y su valor máximo registrado fue de 10 mm. La grieta roja fue medida hasta una distorsión de 2% y al igual que la grieta azul, la medición máxima de la abertura fue de 10 mm. Se observó que los valores de las grietas de la columna O presentaron mayor abertura que las de la columna OR.

4.5 COLUMNA O*

La columna estudiada en este apartado es el modelo O*, la cual al igual que las anteriores fue una columna de control sin encamisado metálico. Seguido, se muestran dos figuras (Fig. 4.5.1 y Fig. 4.5.2), una con la vista frontal del espécimen y la otra con la ubicación de los deformímetros internos.

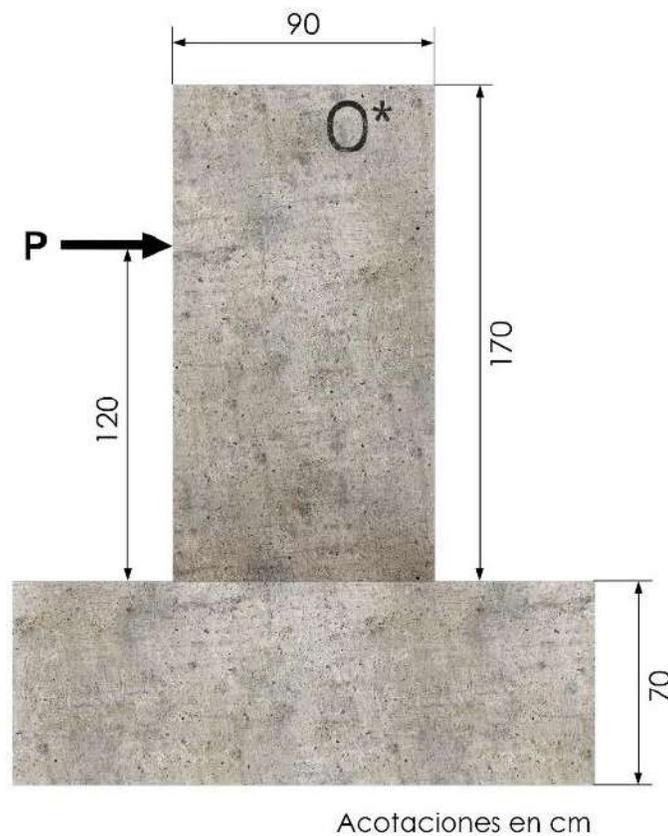


Fig. 4.5.1 Vista frontal - Columna O*

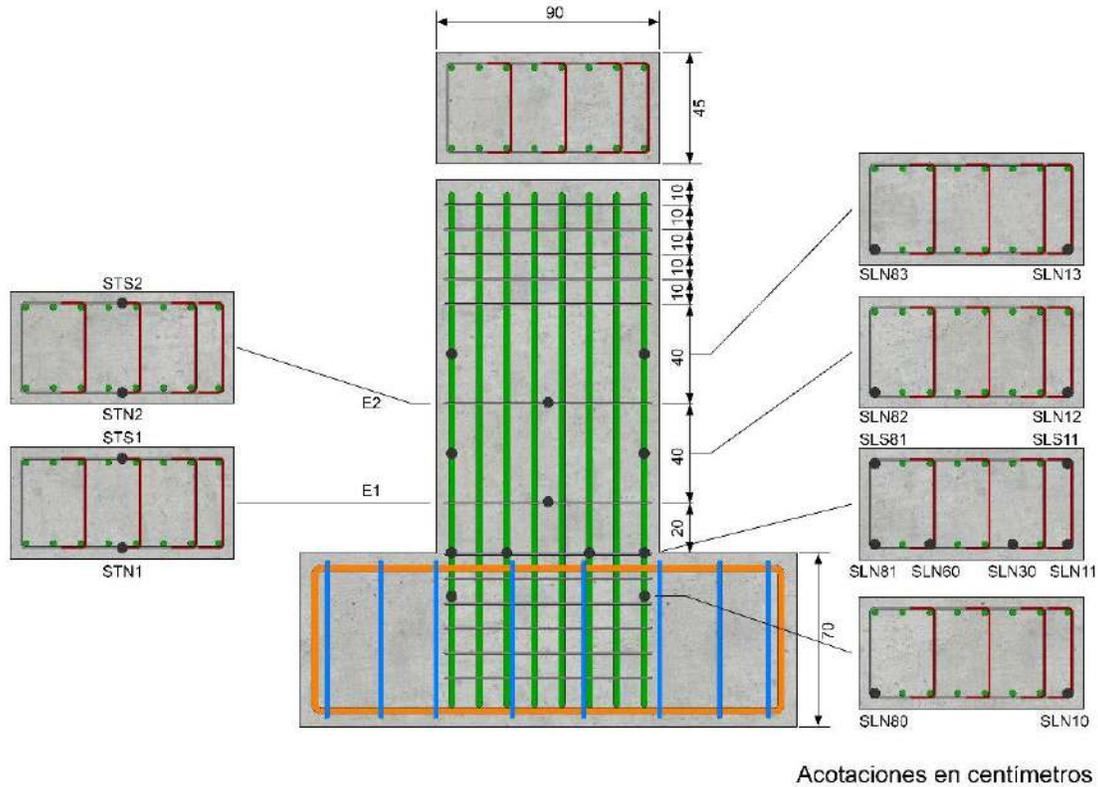


Fig. 4.5.2 Deformímetros internos - Columna O*

4.5.1 Análisis de deformímetros internos

A continuación, se insertar las curvas resultadas de graficar las deformaciones obtenidas a lo largo del ensaye. En la Tabla 51 se incluye un listado de los deformímetros internos colocados en la columna O* y se determina el estado de su funcionamiento previo a la prueba. Después de las gráficas, se incluye un resumen que incluye información de la primera fluencia en los deformímetros funcionales.

Tabla 51. Funcionamiento deformímetros internos - Columna O*

| Deformímetro | Funcionamiento previo a la prueba |
|--------------|-----------------------------------|
| SLN80 | Correcto |
| SLN81 | Correcto |
| SLN82 | Correcto |

| Deformímetro | Funcionamiento previo a la prueba |
|--------------|-----------------------------------|
| SLN83 | Correcto |
| SLN60 | Correcto |
| SLN30 | Correcto |
| SLN10 | - |
| SLN11 | Correcto |
| SLN12 | Correcto |
| SLN13 | Correcto |
| SLS81 | Correcto |
| SLS11 | Correcto |
| STN1 | Correcto |
| STS1 | Correcto |
| STN2 | Correcto |
| STS2 | Correcto |

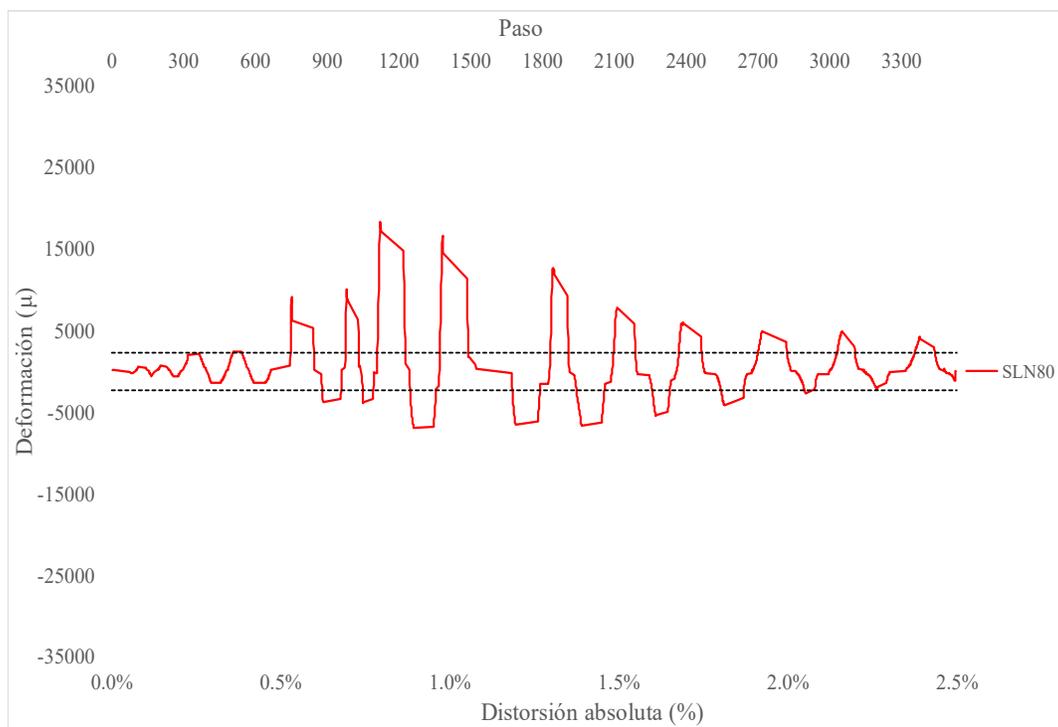


Fig. 4.5.3 Deformaciones SLN80 - SLN10 – Columna O*

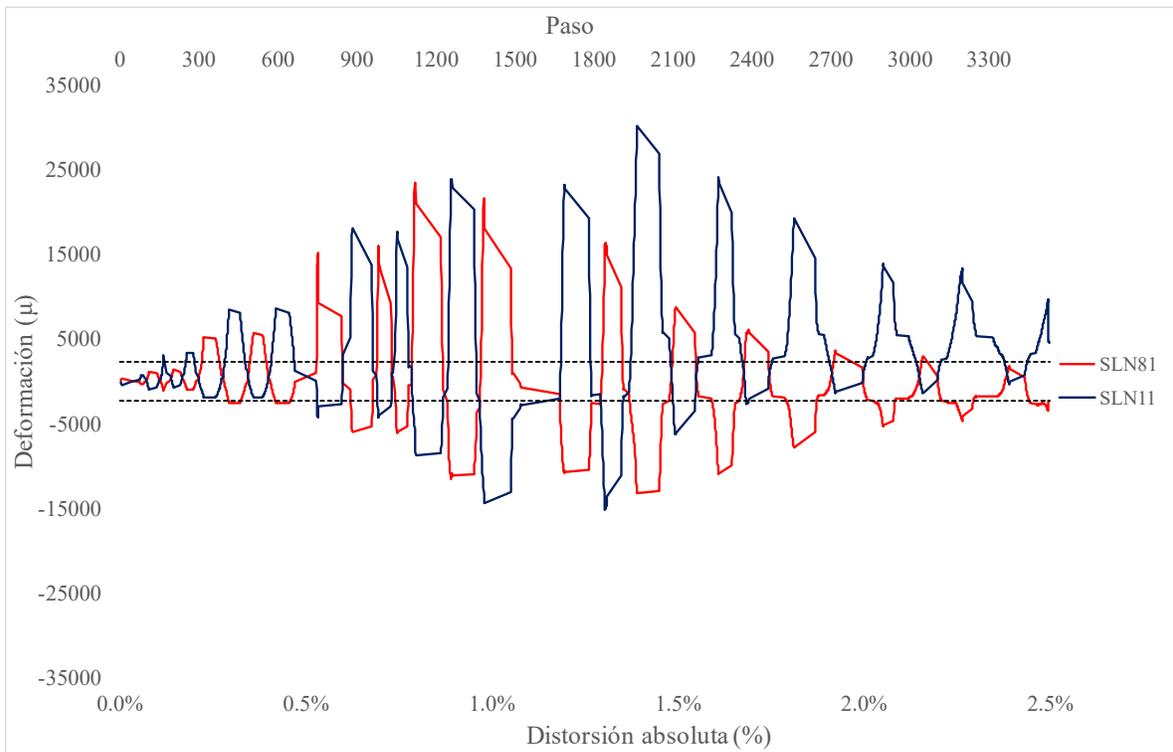


Fig. 4.5.4 Deformaciones SLN81 - SLN11 – Columna O*

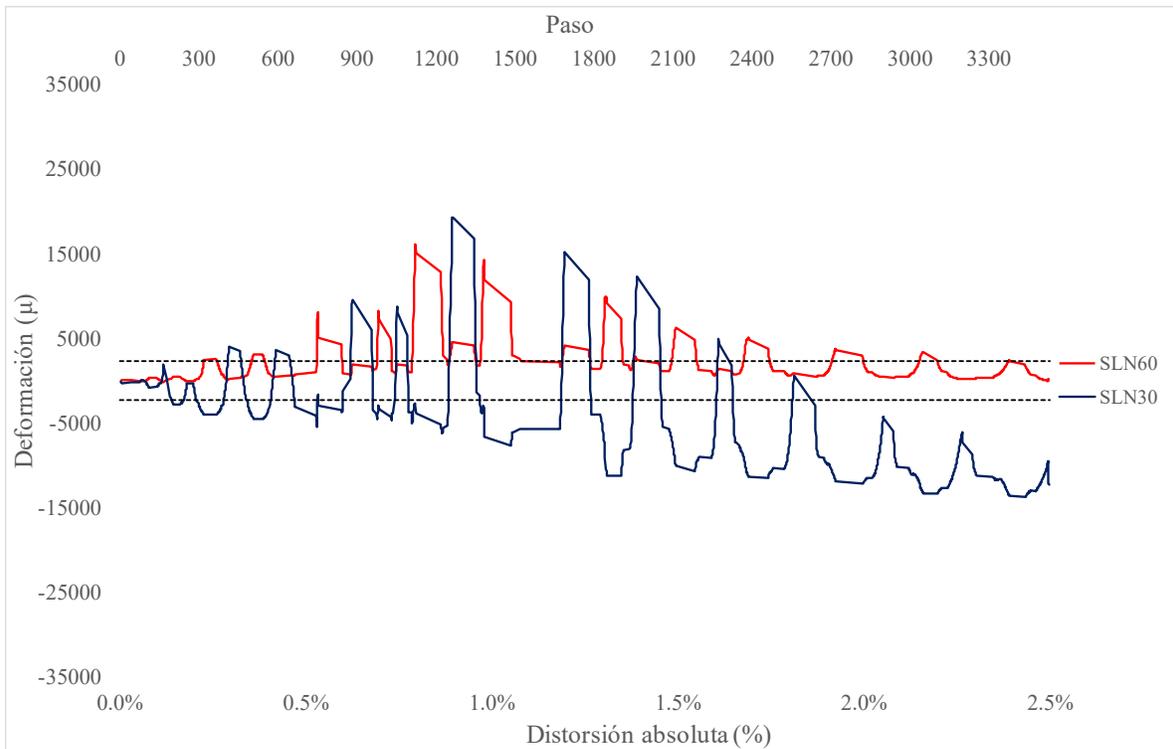


Fig. 4.5.5 Deformaciones SLN60 - SLN30 – Columna O*

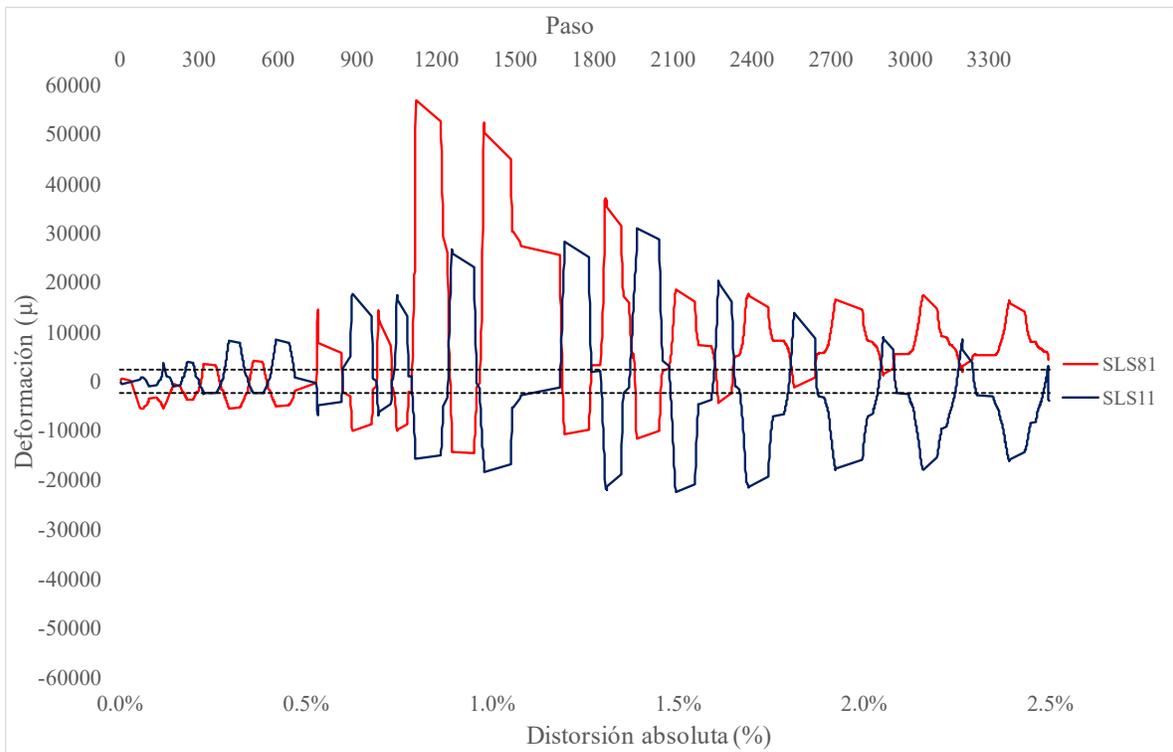


Fig. 4.5.6 Deformaciones SLS81 - SLS11 – Columna O*

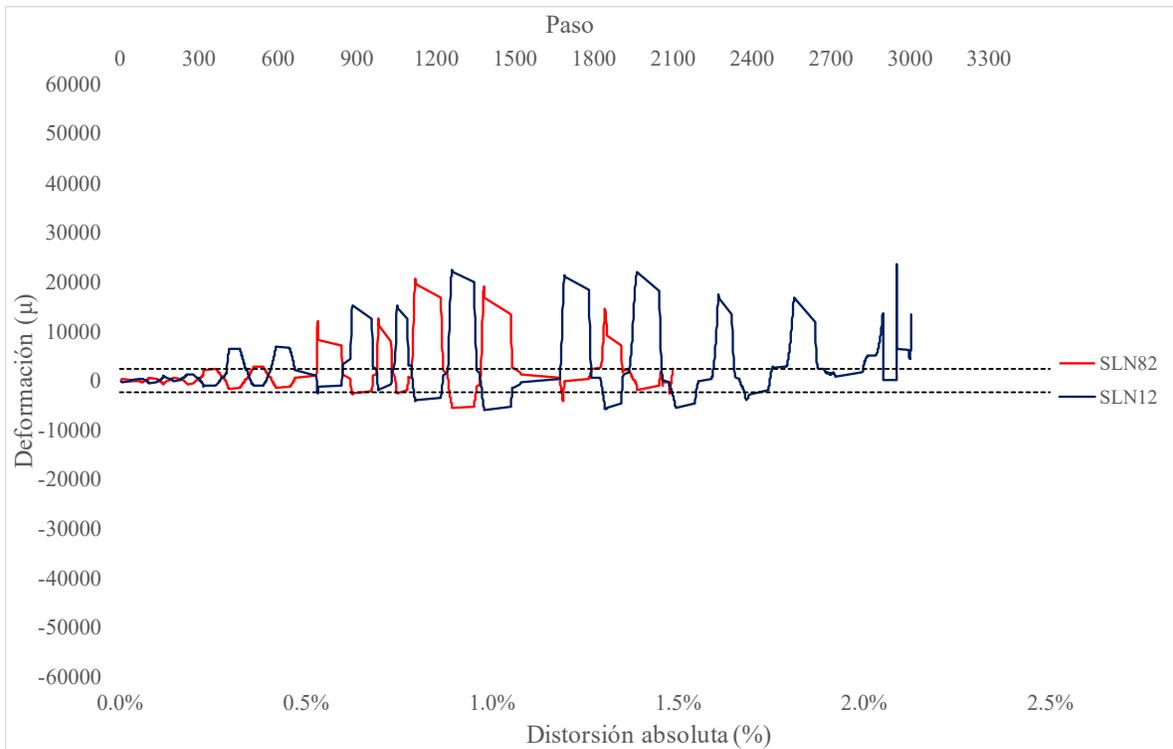


Fig. 4.5.7 Deformaciones SLN82 - SLN12 – Columna O*

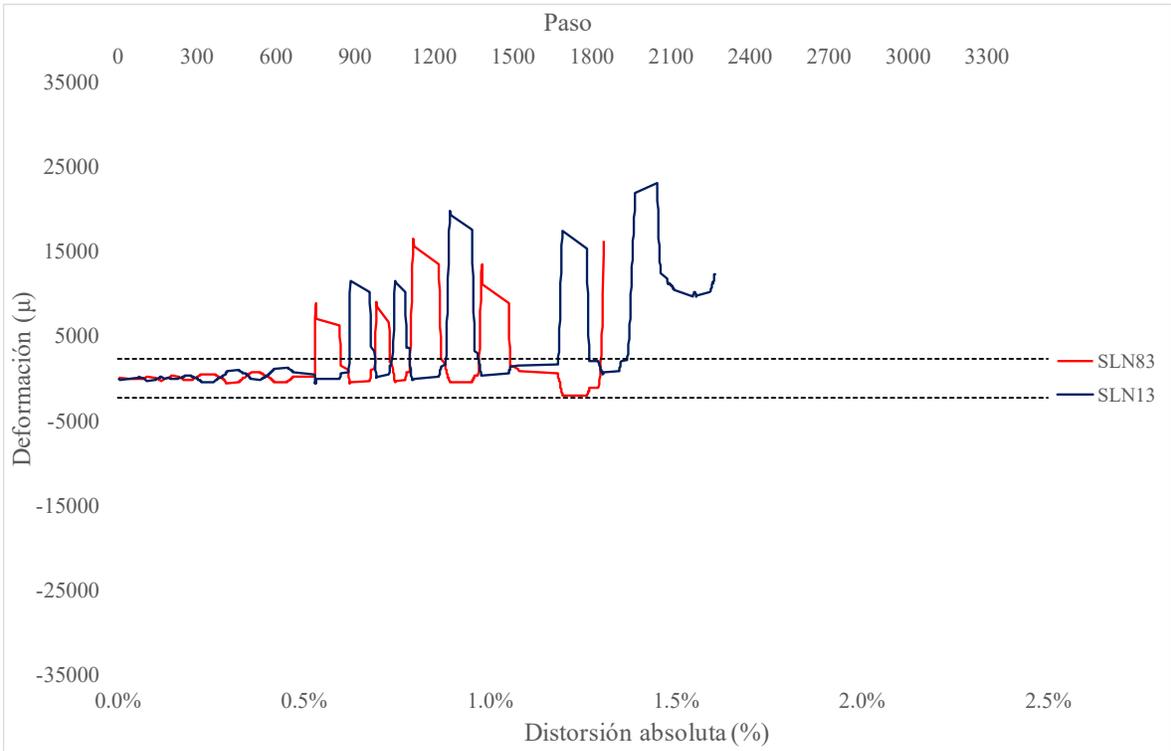


Fig. 4.5.8 Deformaciones SLN83 - SLN13 – Columna O*

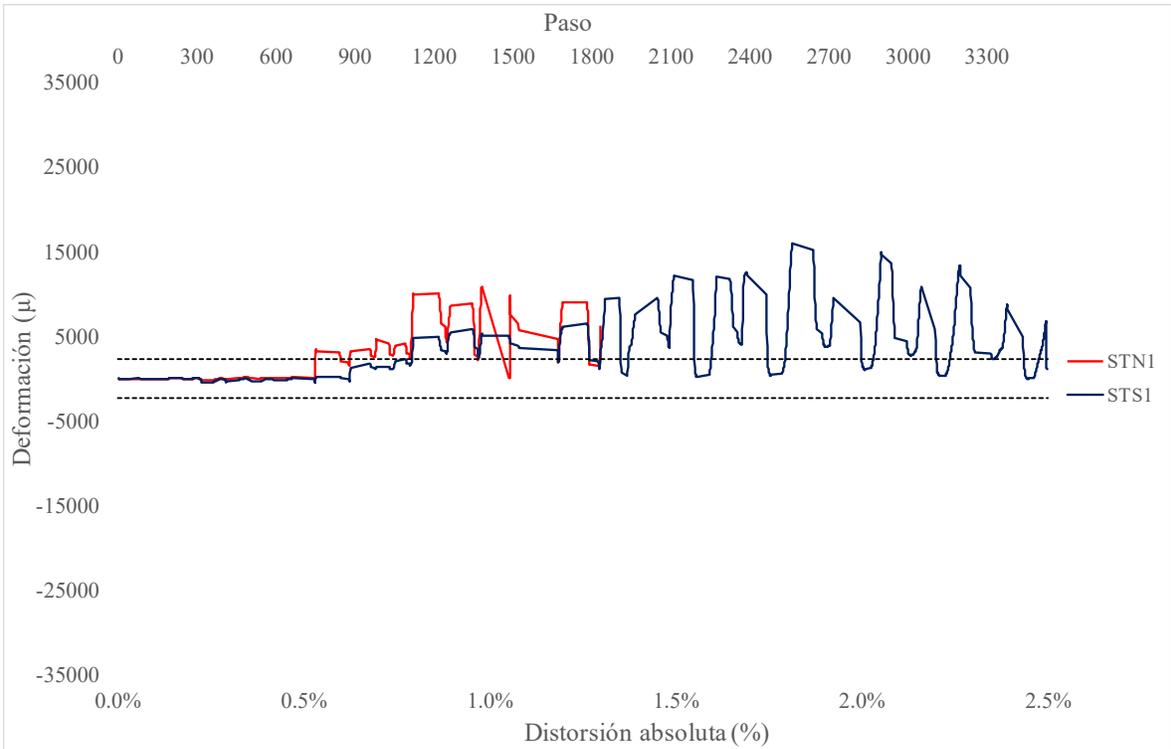


Fig. 4.5.9 Deformaciones STN1 - STS1 – Columna O*

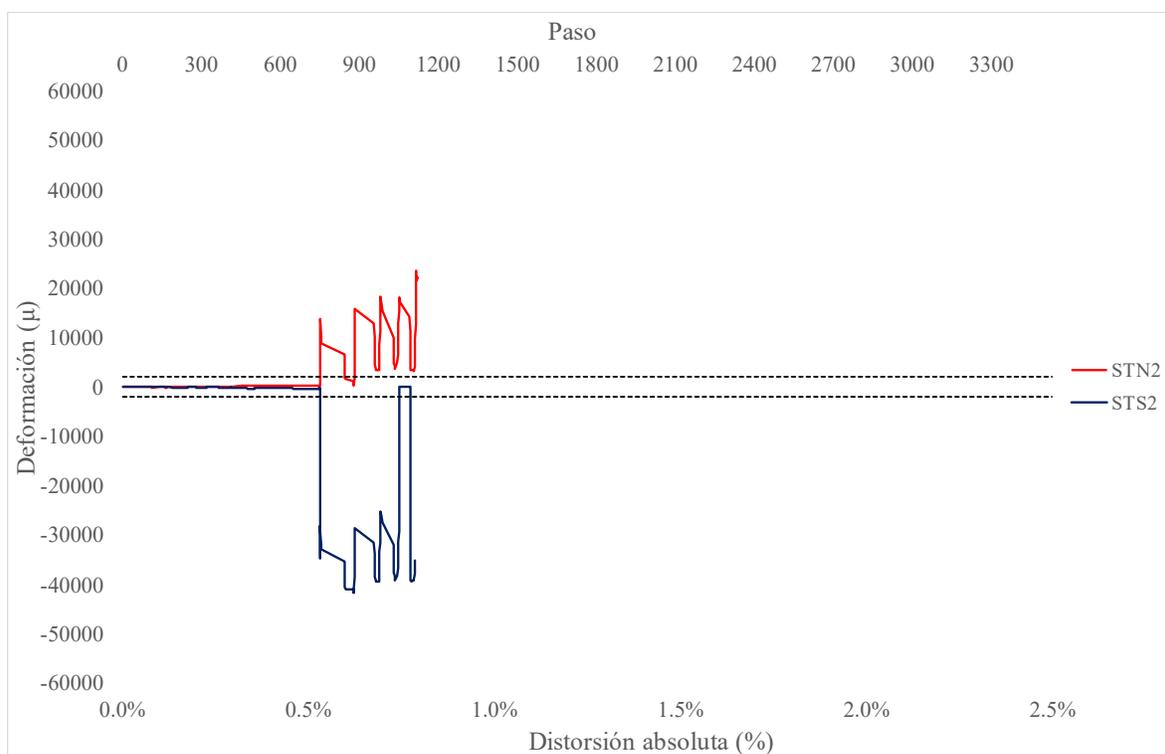


Fig. 4.5.10 Deformaciones STN2 - STS2 – Columna O*

Tabla 52. Resumen de la primera fluencia - Columna O*

| Deformímetro | Fluencia | Distorsión de fluencia | Comentarios |
|--------------|----------|------------------------|---|
| SLN80 | NO | - | |
| SLN81 | NO | - | |
| SLN82 | SÍ | -0.5% | Ocurrió en el primer semiciclo por desplazamiento |
| SLN83 | NO | - | |
| SLN60 | SÍ | 0.28% (2) | Se presentó en el segundo semiciclo en el control por carga de 20 t |
| SLN30 | SÍ | -0.27% | La primera fluencia se registró en el mismo instante que en SLN81 |
| SLN11 | NO | - | |
| SLN12 | SÍ | 0.27% | Al igual que el deformímetro SLN11, la primera fluencia se registró en el primer semiciclo positivo de 20 t |
| SLN13 | SÍ | 0.5% | La primera fluencia ocurrió en el mismo momento que en el SLN30 |
| SLS81 | SÍ | -0.27% | Fue el primer deformímetro interno que registró la primera fluencia en el primer semiciclo negativo con -20 t |

| Deformímetro | Fluencia | Distorsión de fluencia | Comentarios |
|--------------|----------|------------------------|--|
| SLS11 | Sí | -0.5% | La primer fluencia en esta barra fue registrada en el primer semiciclo con distorsión negativa de -0.5% |
| STN1 | Sí | -0.5% | Al observar la primera fluencia de las barras, el primer semiciclo negativo con distorsión de -0.5% fue el más común |
| STS1 | Sí | -1% | La fluencia de este instrumento fue registrada en el primer semiciclo negativo de -1% |
| STN2 | Sí | -0.5% | Se registró en el primer semiciclo del control por desplazamiento |
| STS2 | Sí | -0.5% | La primera fluencia se reportó en el mismo semiciclo que STN2 |

De los deformímetros colocados en la columna O*, los únicos que no fluyeron fueron el SLN80 y SLN83, el resto de los instrumentos manifestaron una primera fluencia desde el control por carga de 10 t hasta el primer semiciclo negativo de -1% según el deformímetro.

4.5.2 Comportamiento de grietas

A continuación se incluyen las Fig. 4.5.11 y Fig. 4.5.12 que corresponden al comportamiento del espesor de las grietas del espécimen O*. A diferencia de las columnas de concreto sin encamisado anteriores, para este modelo se recabaron datos de las grietas principales de las caras norte, este y oeste.

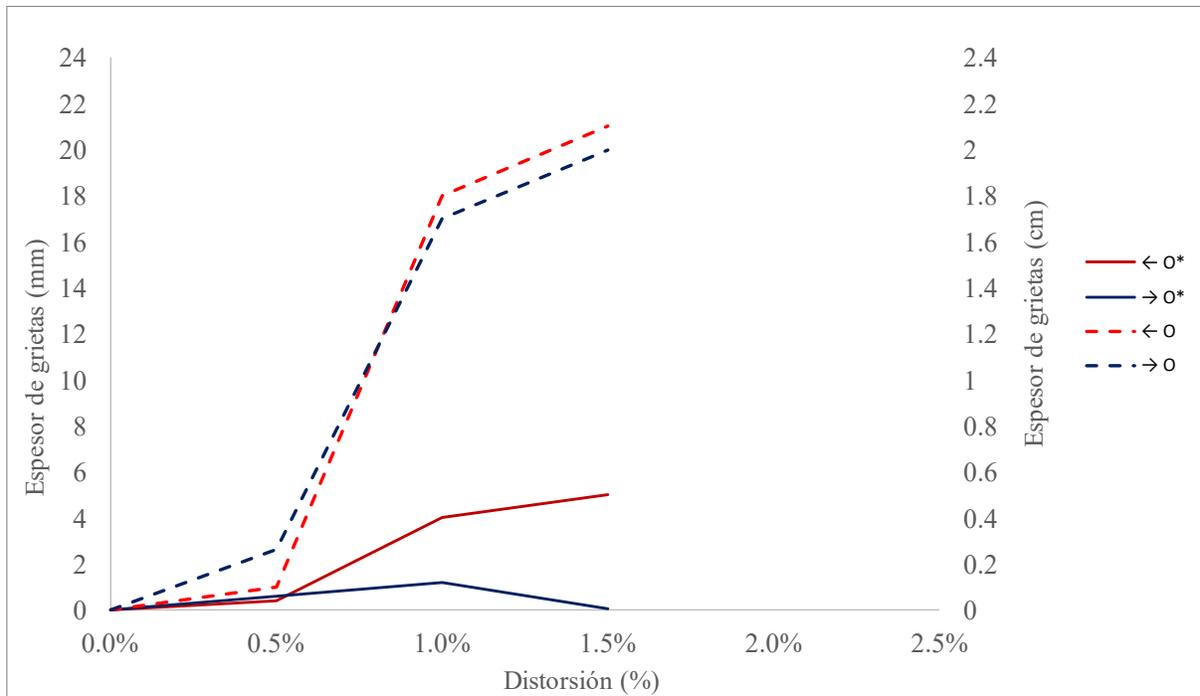


Fig. 4.5.11 Evolución del agrietamiento cara norte – Columna O y O*

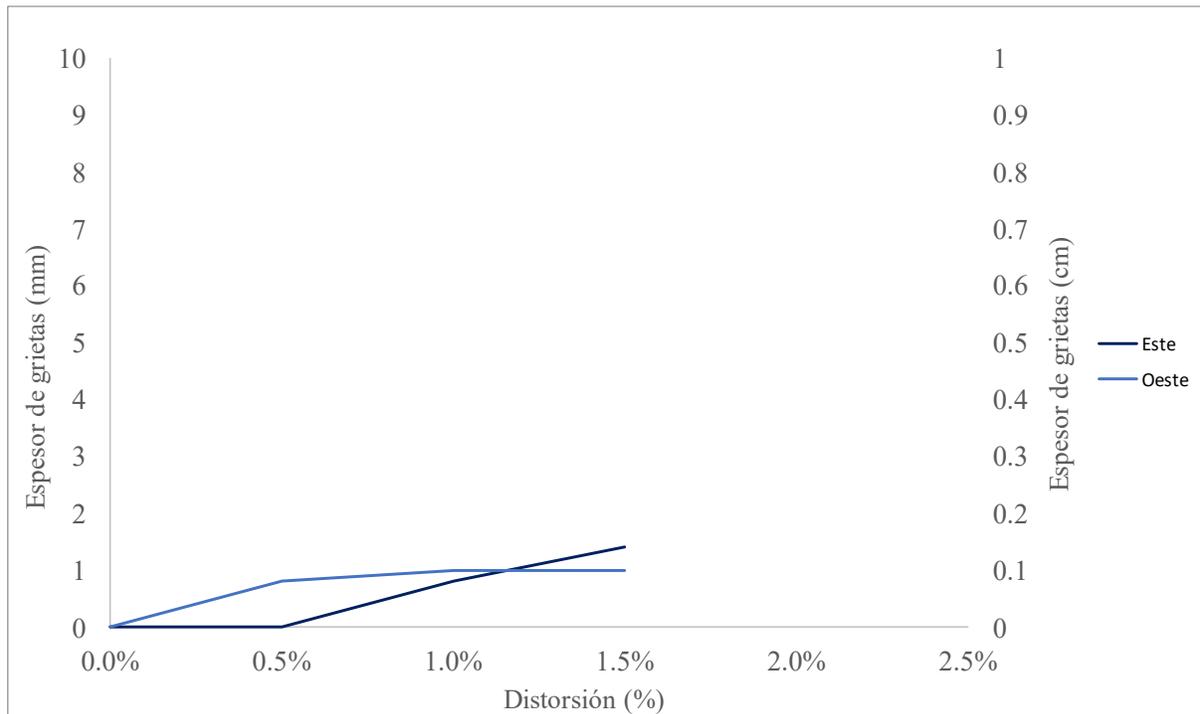


Fig. 4.5.12 Evolución del agrietamiento caras laterales - Columna O*

Los datos de los espesores de las grietas se registraron hasta los ciclos con distorsión de 1.5%. Los valores máximos obtenidos en la prueba en la cara norte de color rojo fueron de 5 mm y en color negro de 1.2 mm, mientras que para la cara este de 1.4 mm y la cara oeste de 1 mm.

4.6 Columna C-2

La columna C-2 es el primer modelo encamisado con soleras y ángulos metálicos. La peculiaridad del espécimen es el ancho del ala del ángulo de 2 pulgadas. En esta columna se colocaron 16 deformímetros internos.

A diferencia de las columnas anteriores, al tener un encamisado metálico, se colocaron deformímetros en puntos estratégicos que permitieron medir su desempeño.

Posteriormente, se observan cuatro figuras (Fig. 4.6.1) que muestran la vista frontal del modelo, la distribución de los deformímetros internos, así como la ubicación de los deformímetros en la camisa metálica.

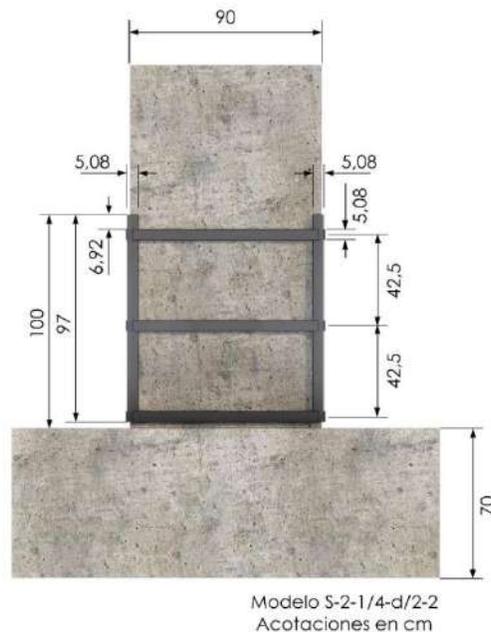


Fig. 4.6.1 Vista frontal - Columna C-2

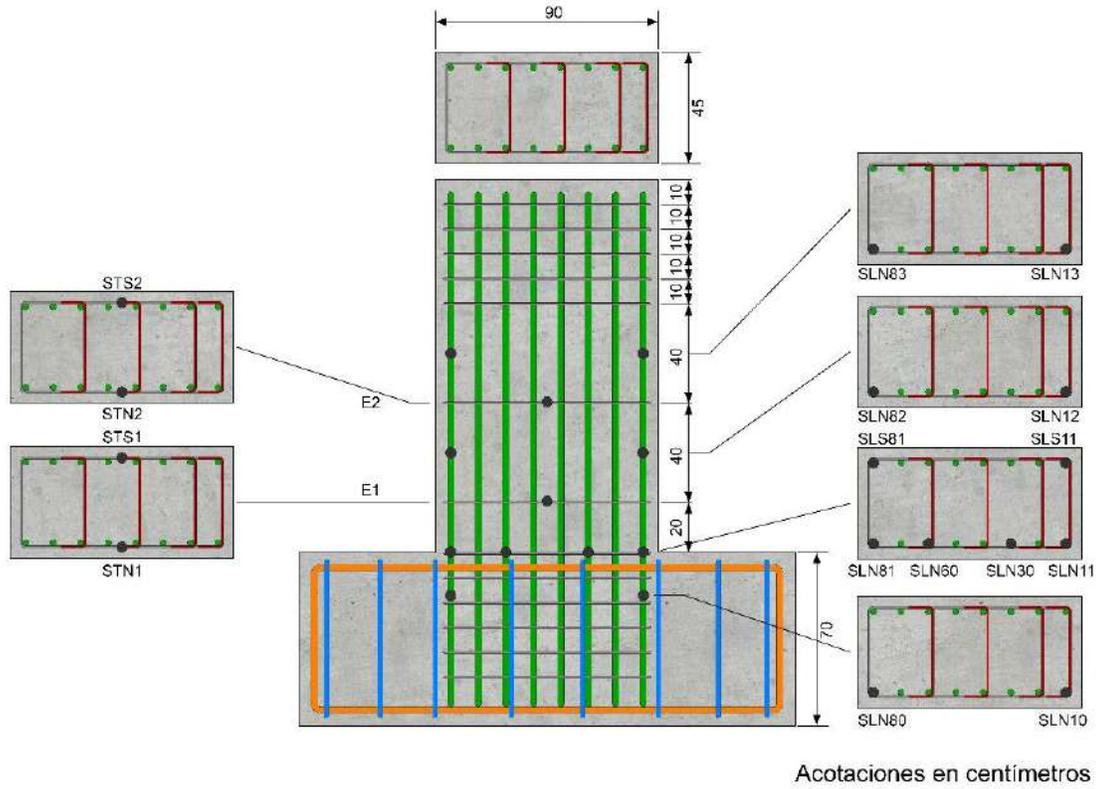


Fig. 4.6.2 Deformímetros internos - Columna C-2

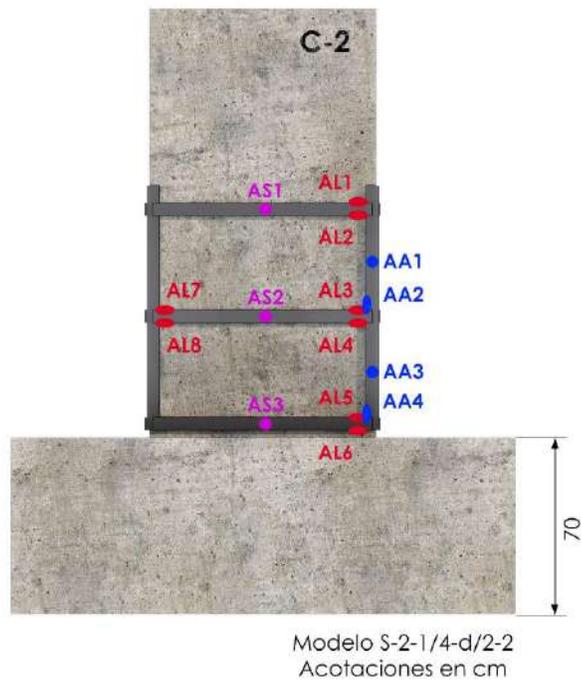


Fig. 4.6.3 Deformímetros en el encamisado metálico cara norte - Columna C-2

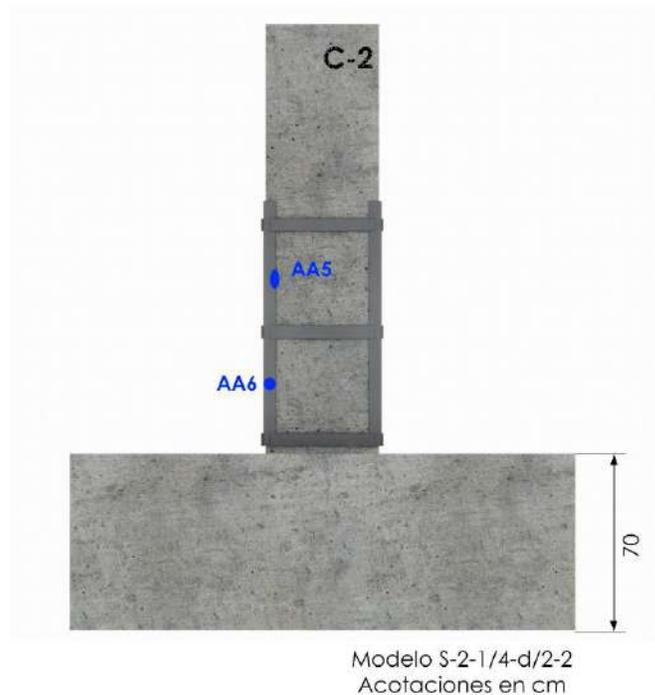


Fig. 4.6.4 Deformímetros en el encamisado metálico cara oeste - Columna C-2

4.6.1 Análisis de deformímetros internos

En esta sección primeramente se incluye una tabla (Tabla 53) que conjunta todos los deformímetros colocados y evalúa su funcionamiento antes del inicio de la prueba. Después, se incluyen todas las gráficas realizadas con los deformímetros que registraron datos a lo largo del ensaye.

Por último, se anexa una tabla que incluye información de la primera fluencia del acero en el que se colocó cada deformímetro, así como el instante haciendo referencia a la distorsión o a la carga respectiva.

Tabla 53. Funcionamiento deformímetros internos - C-2

| Deformímetro | Funcionamiento previo a la prueba |
|--------------|-----------------------------------|
| SLN80 | Correcto |
| SLN81 | Correcto |
| SLN82 | Correcto |
| SLN83 | Correcto |
| SLN60 | - |

| Deformímetro | Funcionamiento previo a la prueba |
|--------------|-----------------------------------|
| SLN30 | - |
| SLN10 | Correcto |
| SLN11 | Correcto |
| SLN12 | Correcto |
| SLN13 | Correcto |
| SLS81 | Correcto |
| SLS11 | Correcto |
| STN1 | Correcto |
| STS1 | Correcto |
| STN2 | Correcto |
| STS2 | Correcto |

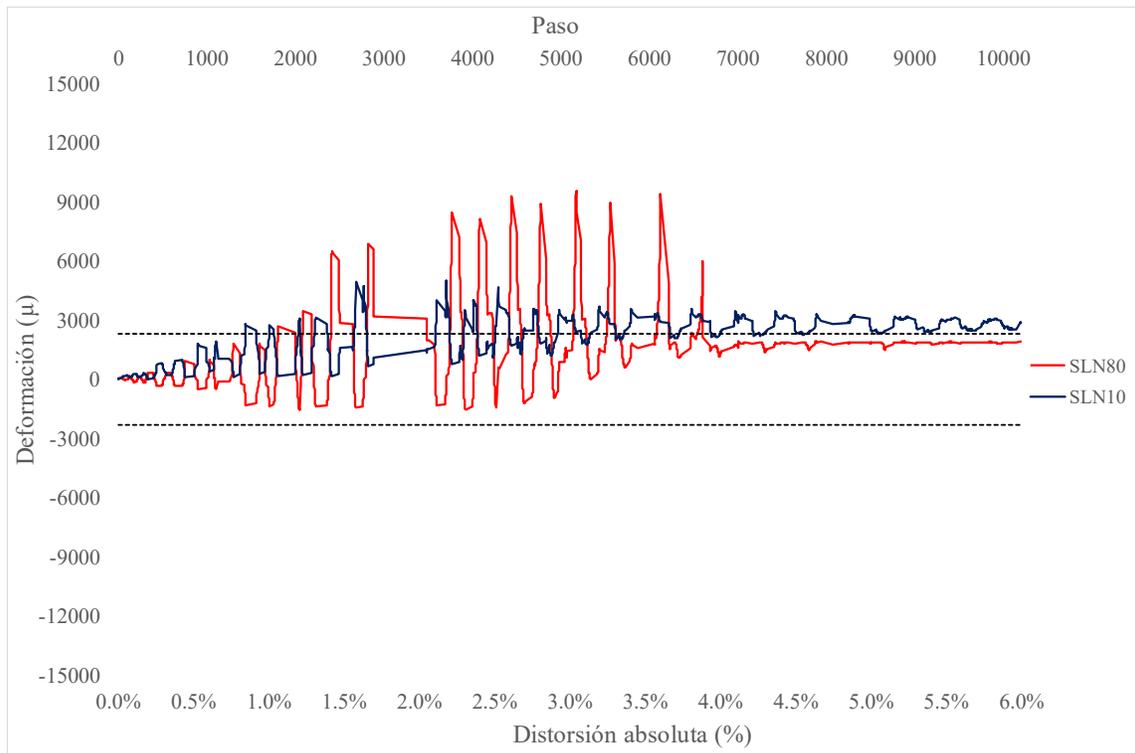


Fig. 4.6.5 Deformaciones SLN80 - SLN10 – Columna C-2

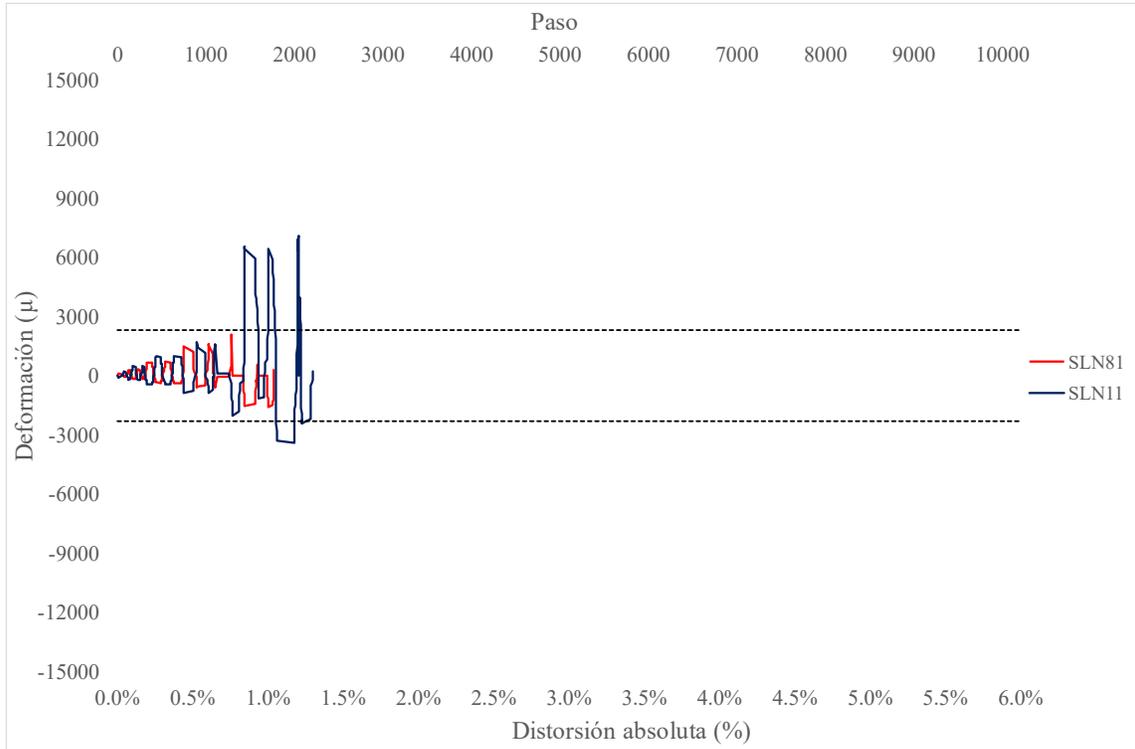


Fig. 4.6.6 Deformaciones SLN81 - SLN11 - Columna C-2

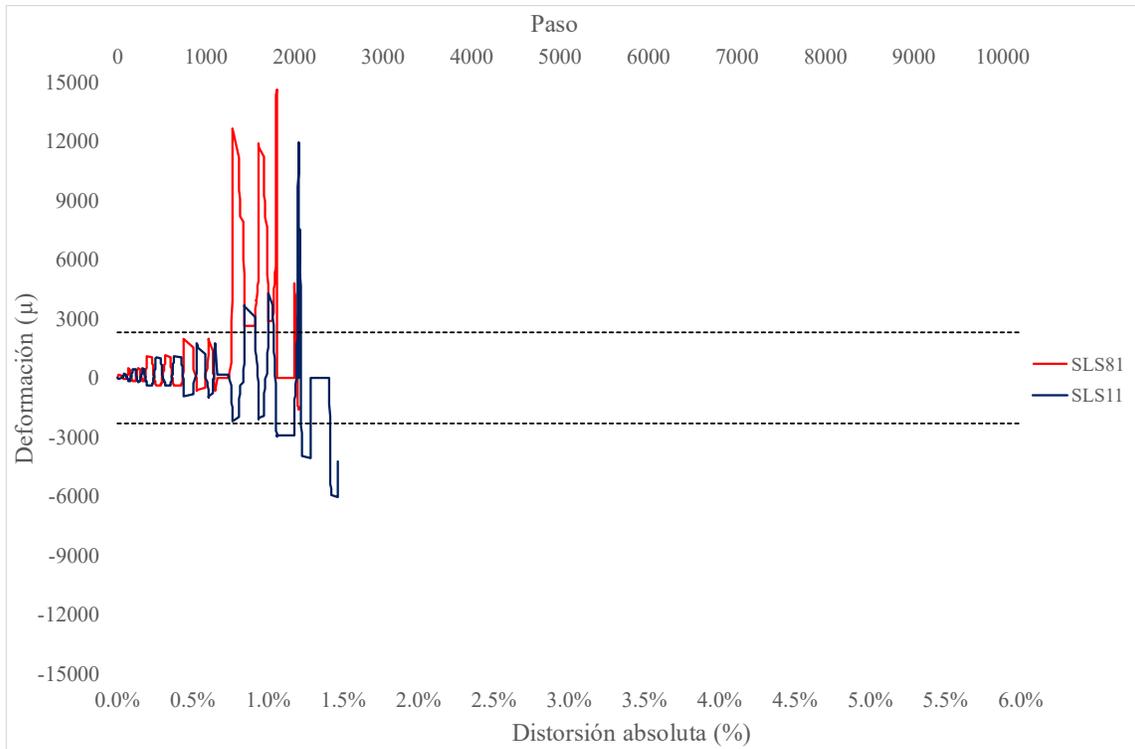


Fig. 4.6.7 Deformaciones SLS81 - SLS11 - Columna C-2

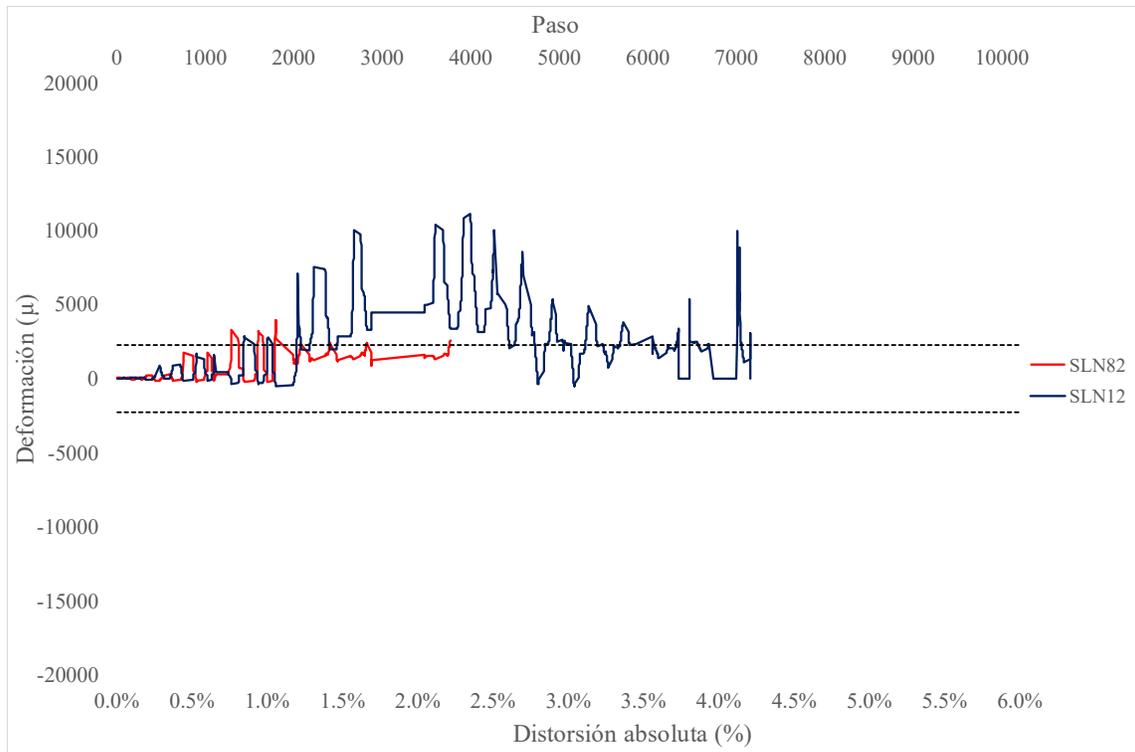


Fig. 4.6.8 Deformaciones SLN82 - SLN12 – Columna C-2

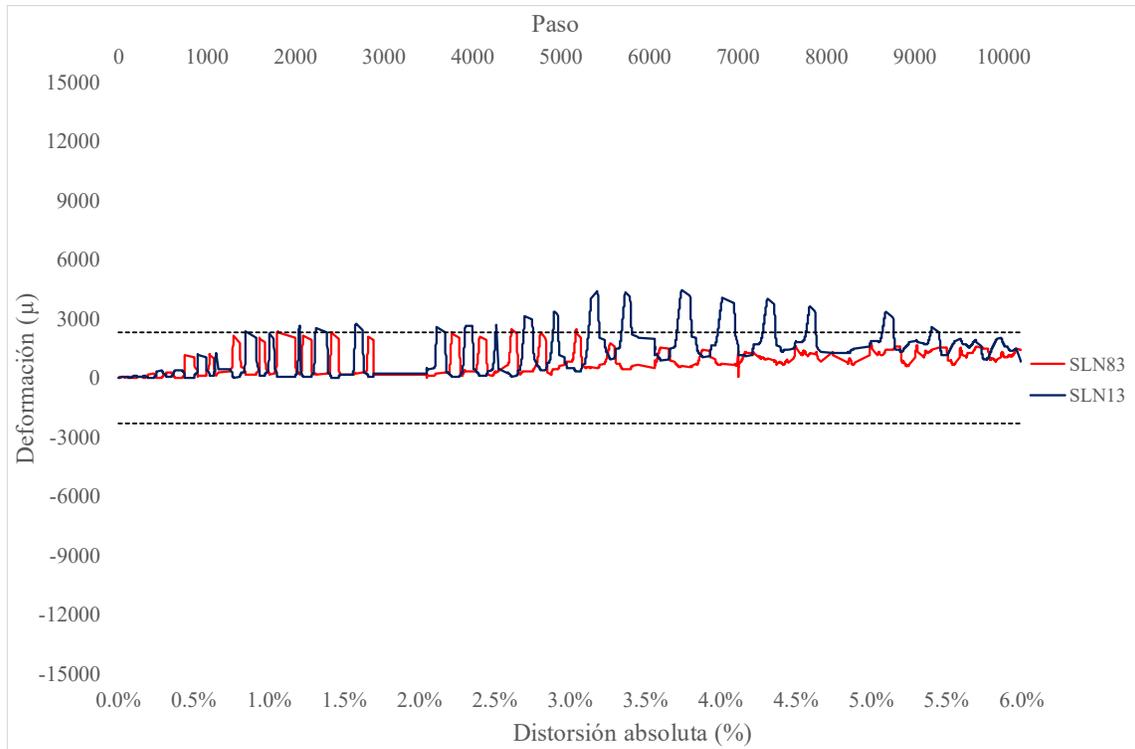


Fig. 4.6.9 Deformaciones SLN83 - SLN13 – Columna C-2

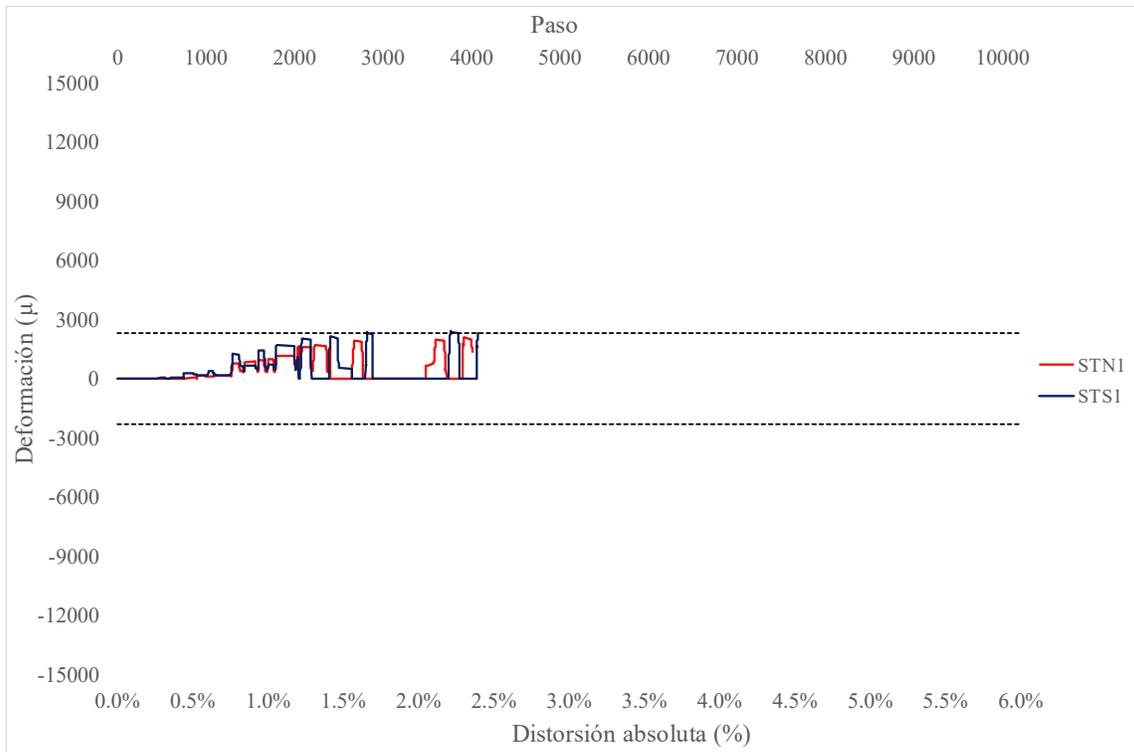


Fig. 4.6.10 Deformaciones STN1 - STS1 – Columna C-2

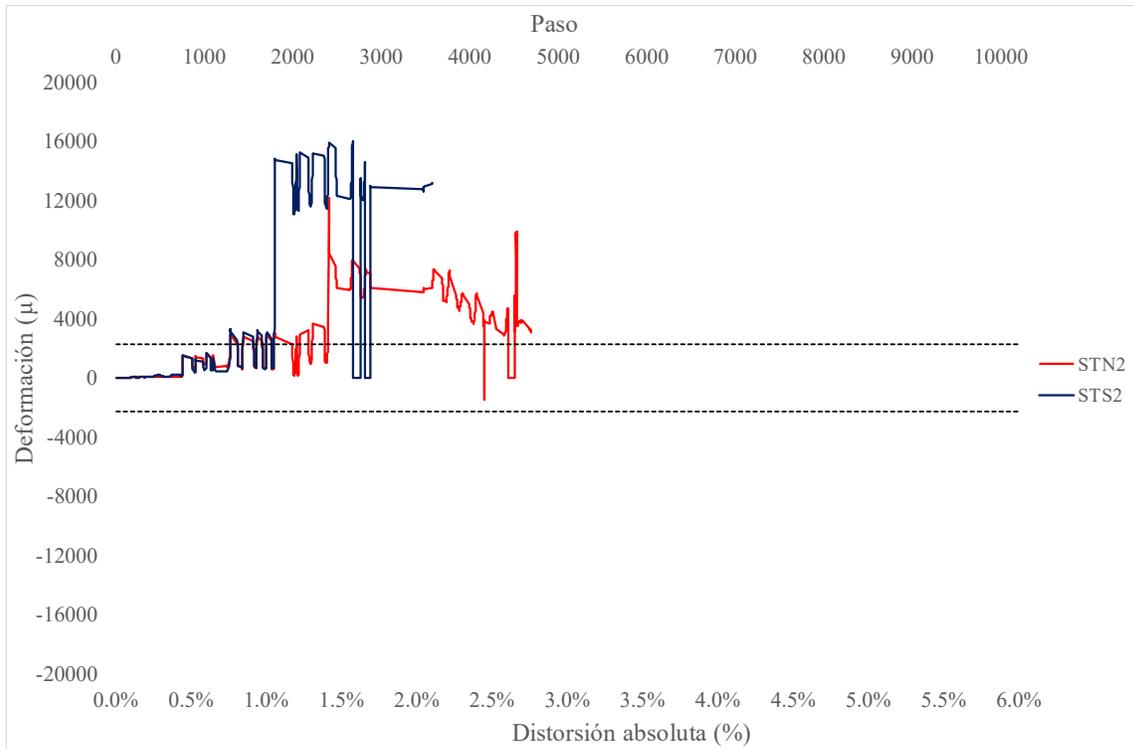


Fig. 4.6.11 Deformaciones STN2 - STS2 – Columna C-2

Tabla 54. Resumen de la primera fluencia deformímetros internos - Columna C-2

| Deformímetro | Fluencia | Distorsión de fluencia | Comentarios |
|--------------|----------|------------------------|--|
| SLN80 | SÍ | -1.5% | Se registró la primera fluencia en el primer semiciclo negativo con distorsión de 1.5% |
| SLN81 | NO | - | |
| SLN82 | NO | - | |
| SLN83 | NO | - | |
| SLN10 | SÍ | 1% | La primera fluencia se presentó en la primera pausa del semiciclo positivo con distorsión de 1% |
| SLN11 | NO | - | |
| SLN12 | SÍ | 1% | Al igual que los dos deformímetros anteriores, se presentó la primera fluencia en el primer semiciclo positivo de 1% |
| SLN13 | SÍ | 2.5% | El deformímetro SLN13 fluyó a partir de la primera distorsión positiva de 2.5% |
| SLS81 | SÍ | 1% | El primer valor mayor a 2000 deformaciones se presentó en la distorsión de 1% |
| SLS11 | SÍ | 1% | El instrumento SLS11 al igual que los anteriores registró una primera fluencia en 1% |
| STN1 | NO | | |
| STS1 | NO | | |
| STN2 | SÍ | 1% | STN2 y STS2, que fueron analizados en pares, presentaron su primera fluencia en la distorsión positiva de 1% |
| STS2 | SÍ | -1%(2) | Los comentarios a este instrumento coinciden con los hechos en STN2 pero en el semiciclo negativo inmediato |

Los deformímetros analizados muestran que cinco de los instrumentos que registraron datos presentaron su primera fluencia en la pausa del primer semiciclo con distorsión positiva de 1%, mientras que los tres restantes, la primera fluencia se presentó en la primera distorsión negativa -1.5% y de -1% (2) y 2.5%.

4.6.2 Análisis de deformímetros en encamisado metálico

El análisis de deformímetros externos fue colocado sobre la camisa metálica, por lo que la columna C-2 fue la primera en tener este tipo de instrumentación. Al igual que la colocación de los deformímetros internos, se buscó ubicar los instrumentos en puntos estratégicos que permitieran conocer datos sobre el comportamiento del acero.

A continuación se anexa la Tabla 55 que indica los 17 deformímetros externos colocados y valida su correcto funcionamiento previo a la prueba:

Tabla 55. Funcionamiento deformímetros externos - Columna C-2

| Deformímetro | Funcionamiento previo a la prueba |
|--------------|-----------------------------------|
| AS1 | Correcto |
| AS2 | Correcto |
| AS3 | Correcto |
| AA1 | Correcto |
| AA2 | Correcto |
| AA3 | Correcto |
| AA4 | Correcto |
| AA5 | Correcto |
| AA6 | Correcto |
| AL1 | Correcto |
| AL2 | Correcto |
| AL3 | Correcto |
| AL4 | Correcto |
| AL5 | Correcto |
| AL6 | Correcto |
| AL7 | Correcto |
| AL8 | Correcto |

Seguido, se incluyen las gráficas que indican el comportamiento de los deformímetros comparables y diagramas que permiten entender de mejor manera la ubicación de cada instrumento.

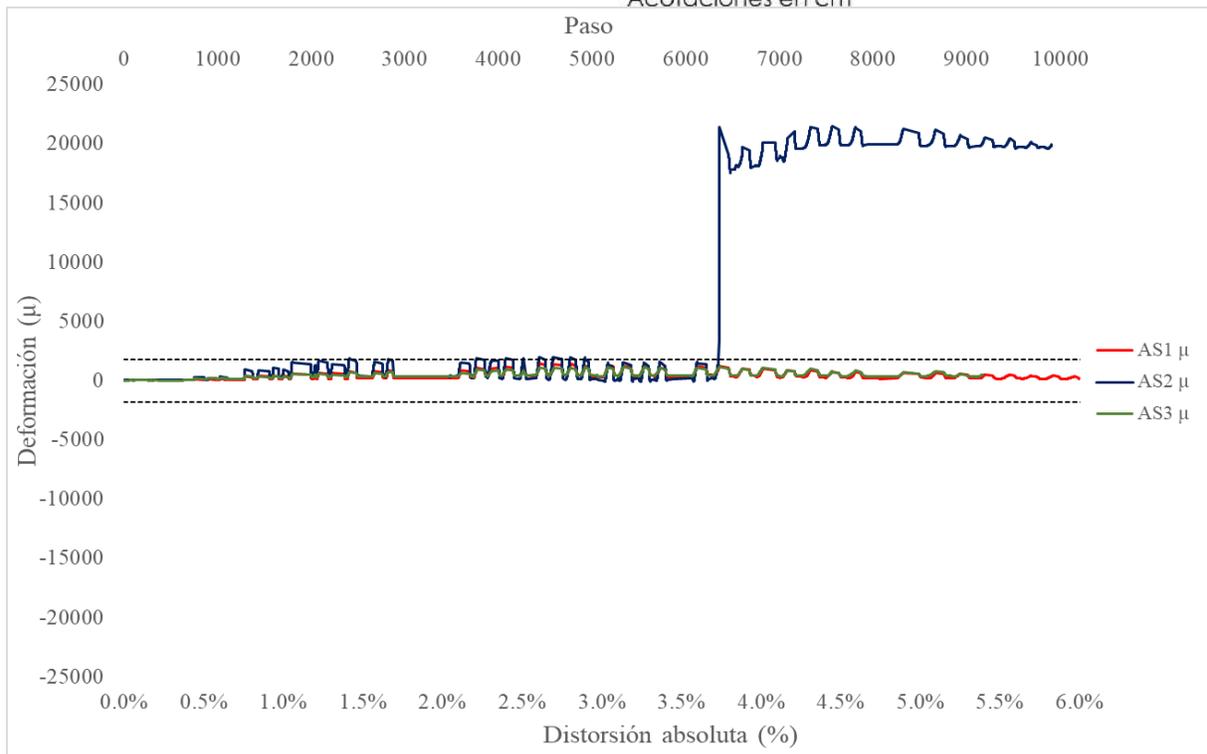
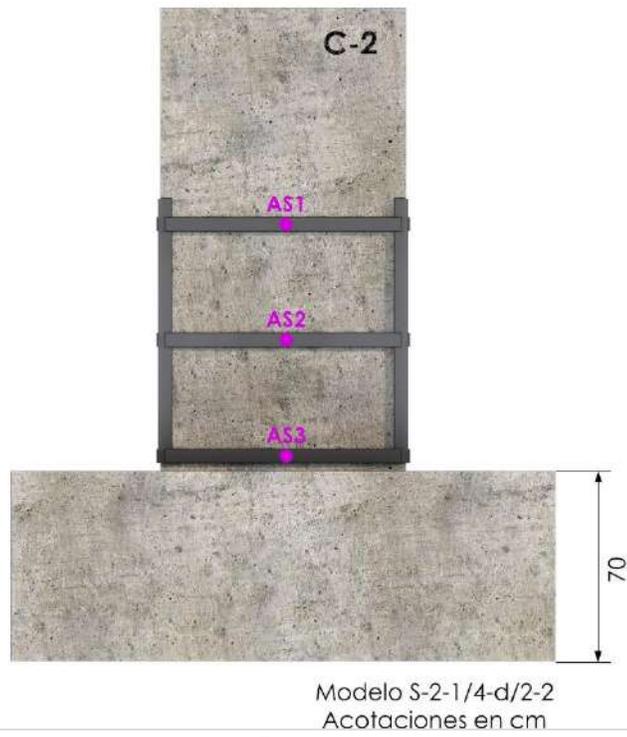


Fig. 4.6.12 Deformaciones AS1-AS2-AS3 – Columna C-2

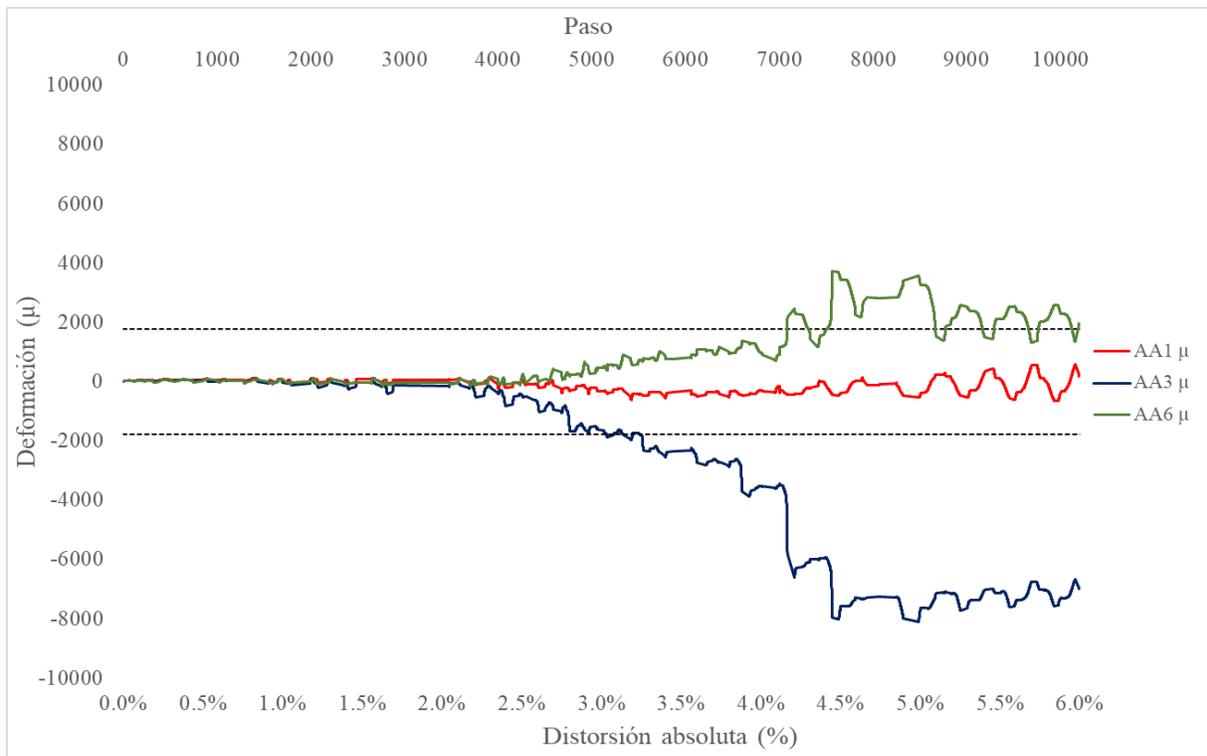
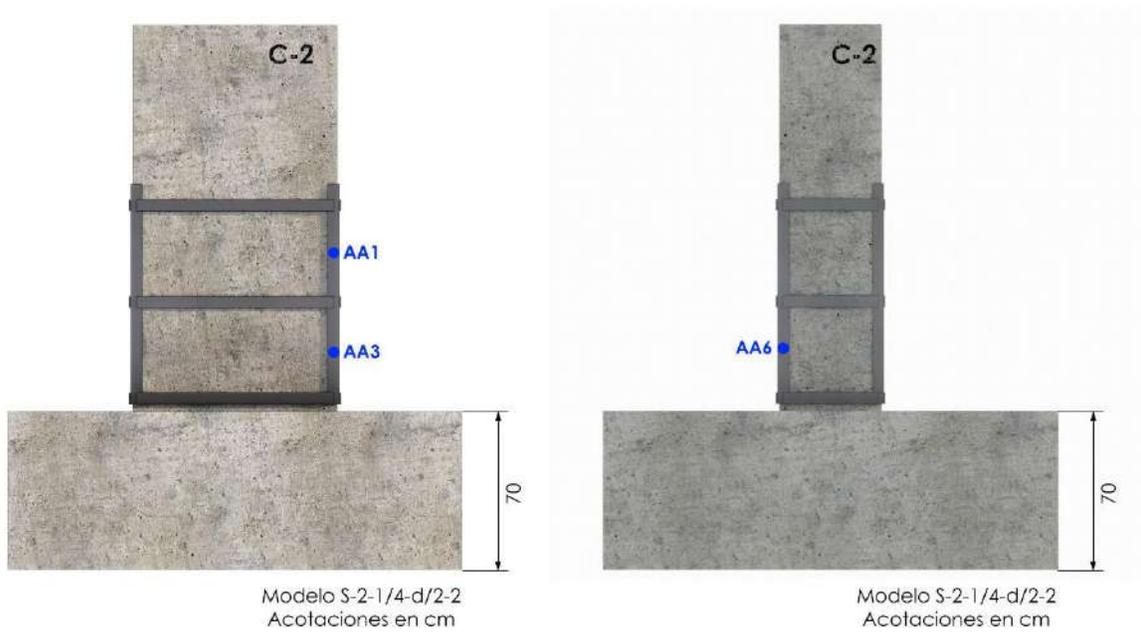


Fig. 4.6.13 Deformaciones AA1-AA3-AA6 – Columna C-2

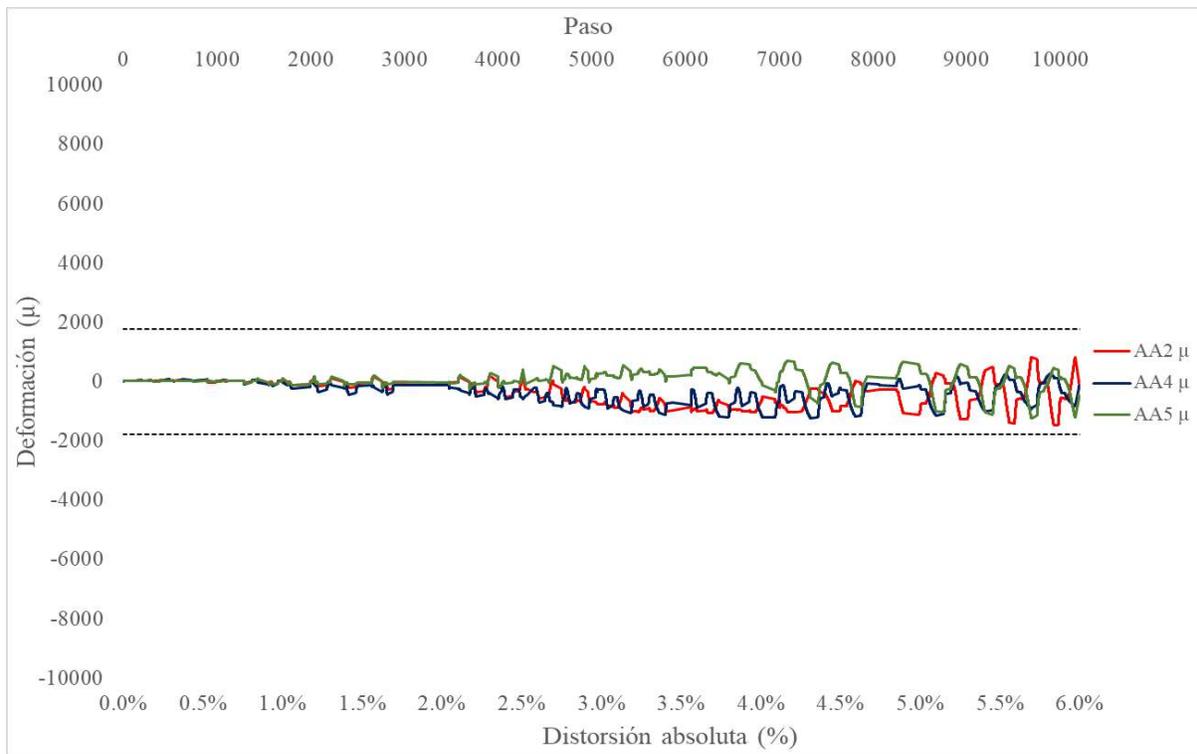
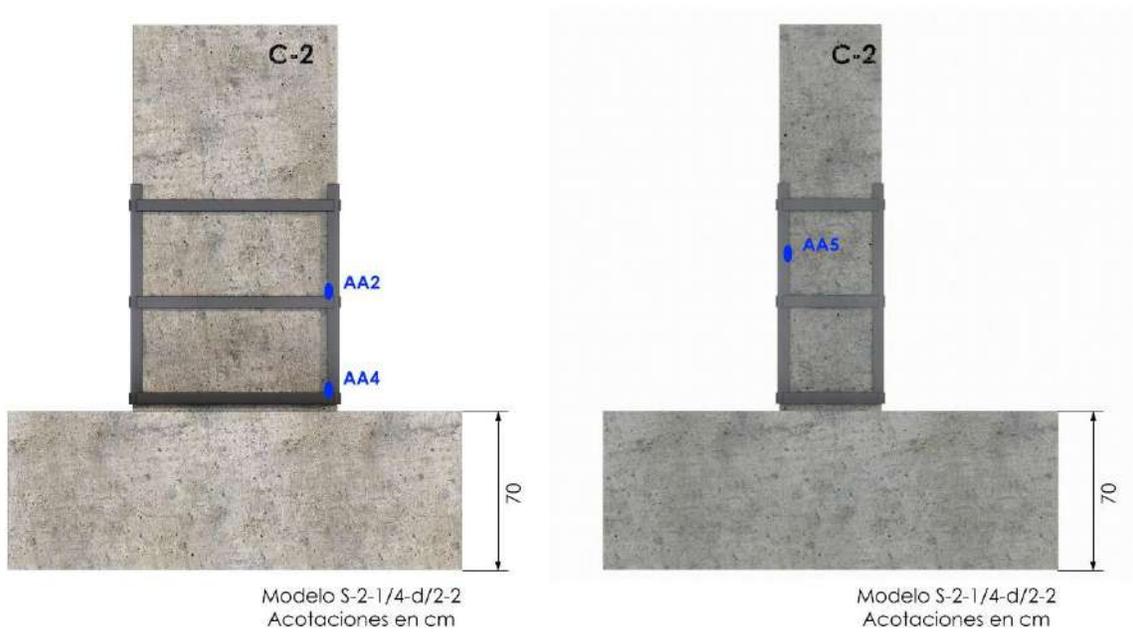


Fig. 4.6.14 Deformaciones AA2-AA4-AA5 – Columna C-2

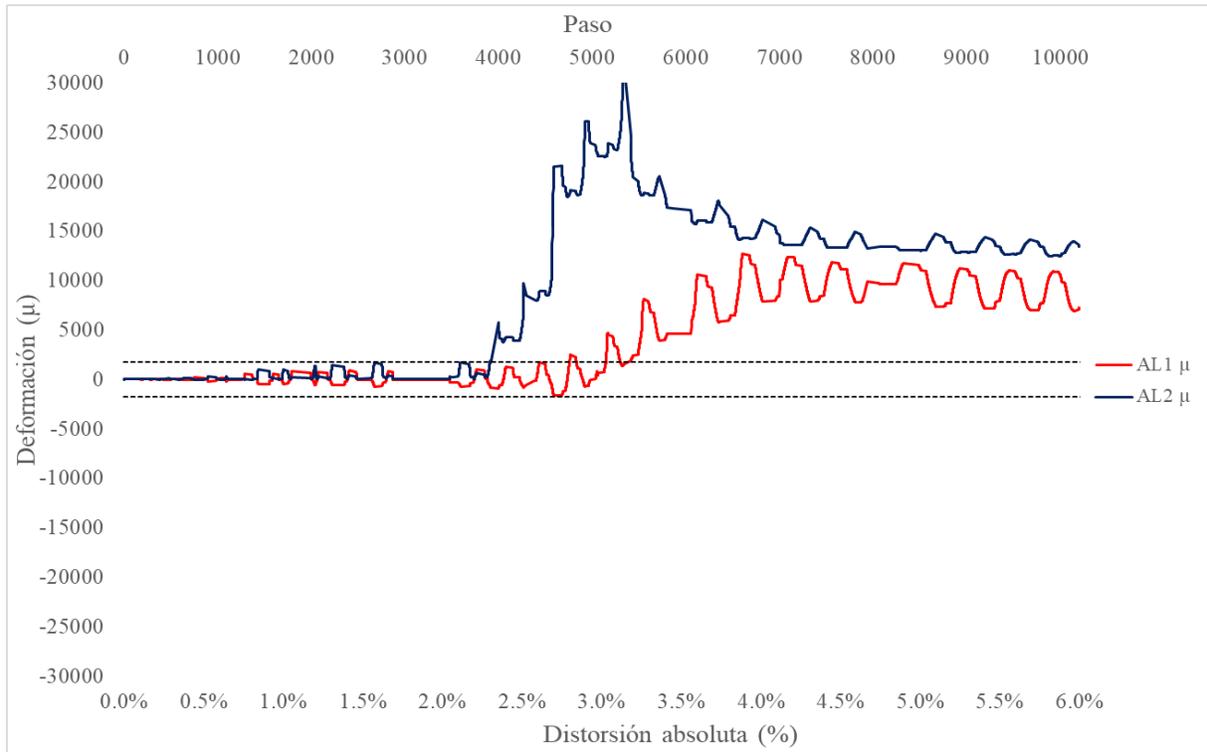
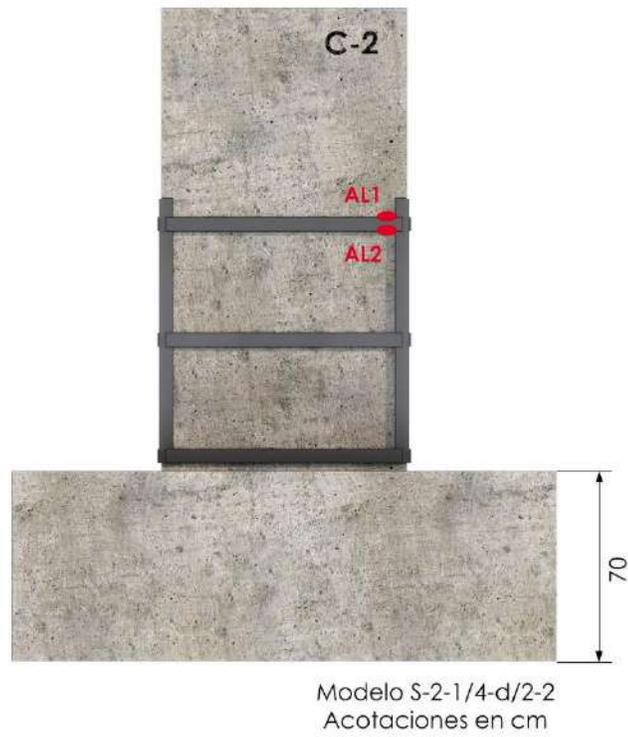


Fig. 4.6.15 Deformaciones AL1-AL2 – Columna C-2

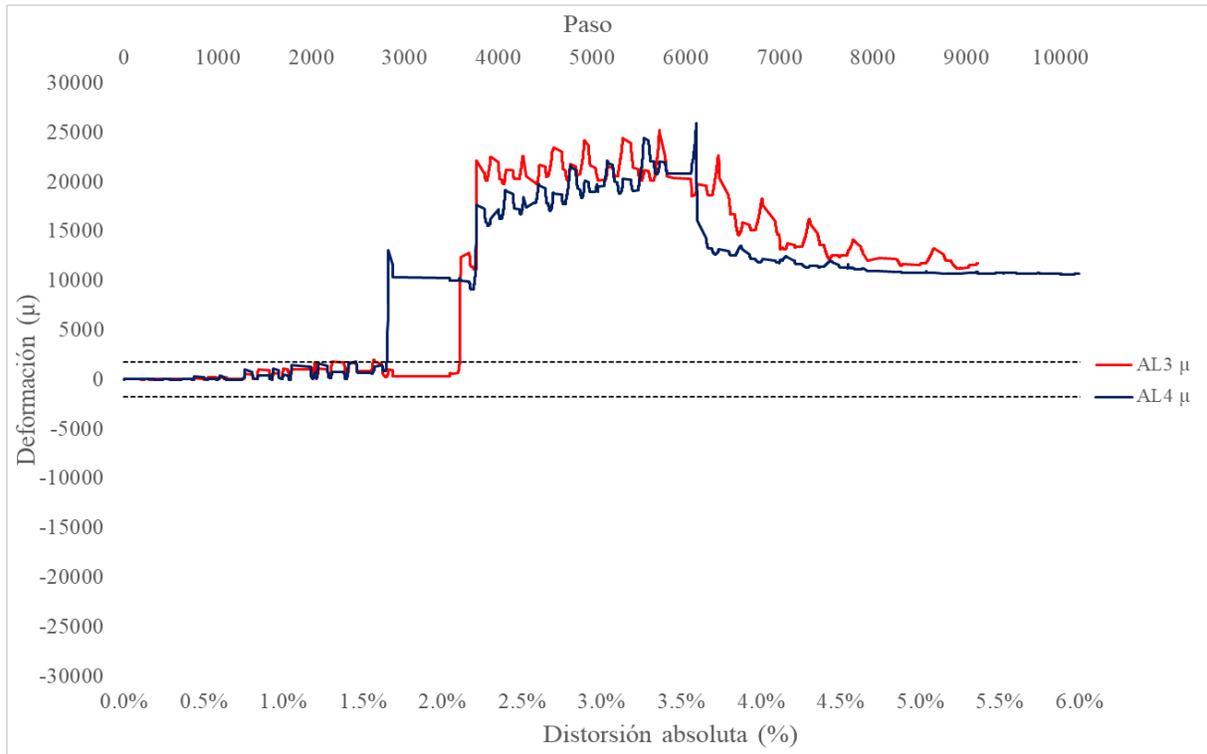
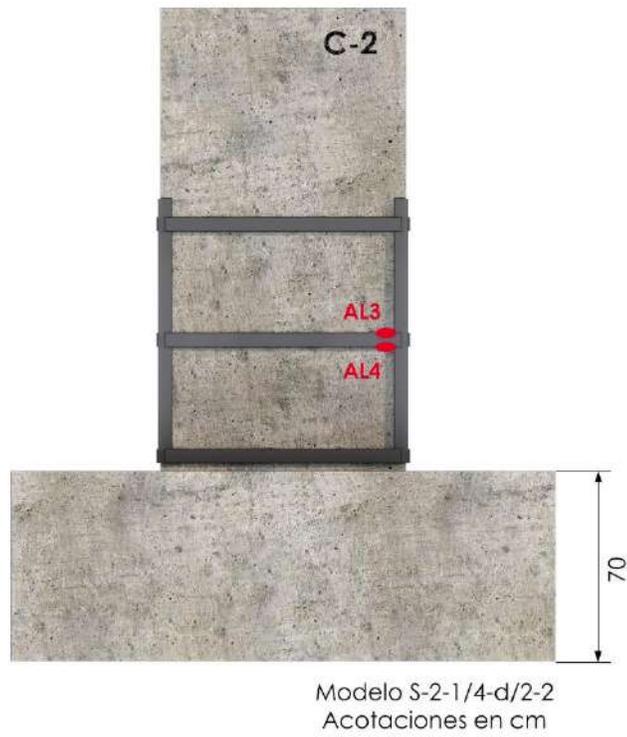


Fig. 4.6.16 Deformaciones AL3-AL4 – Columna C-2

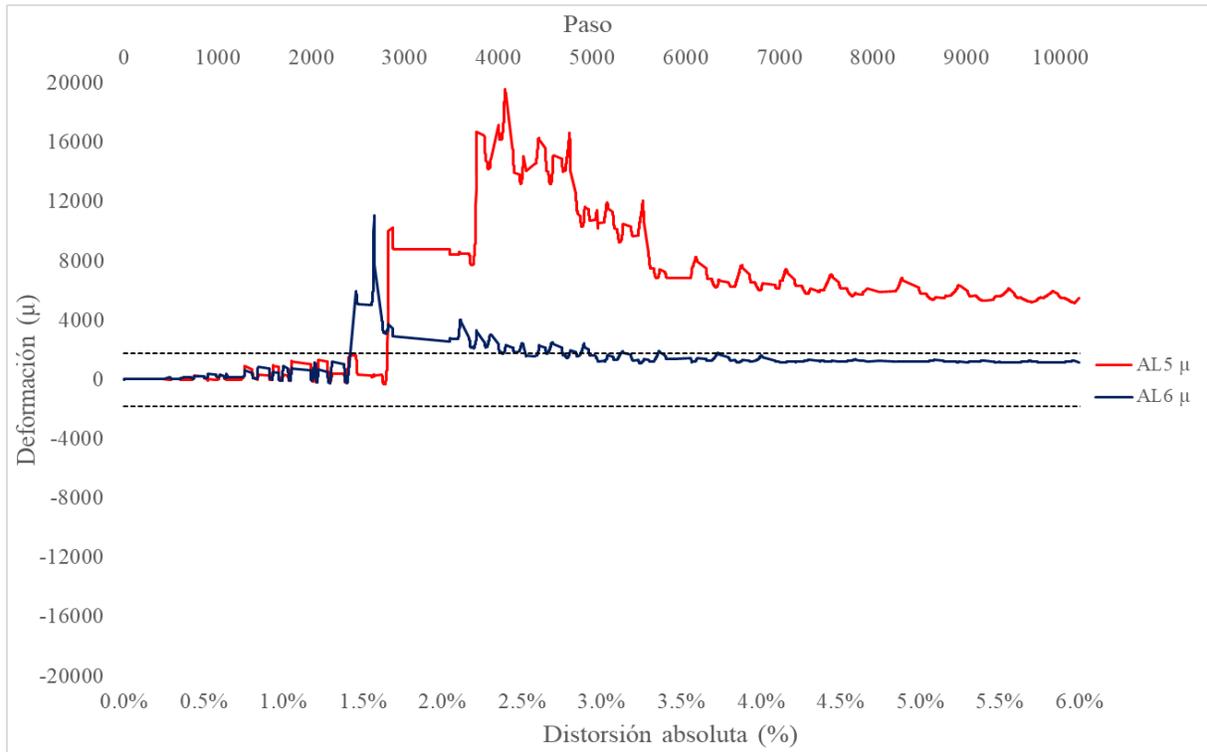
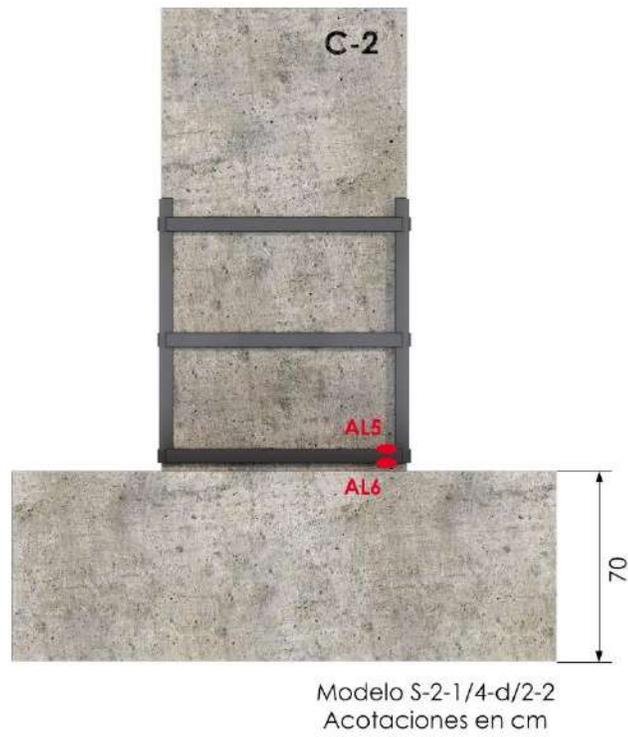


Fig. 4.6.17 Deformaciones AL5-AL6 – Columna C-2

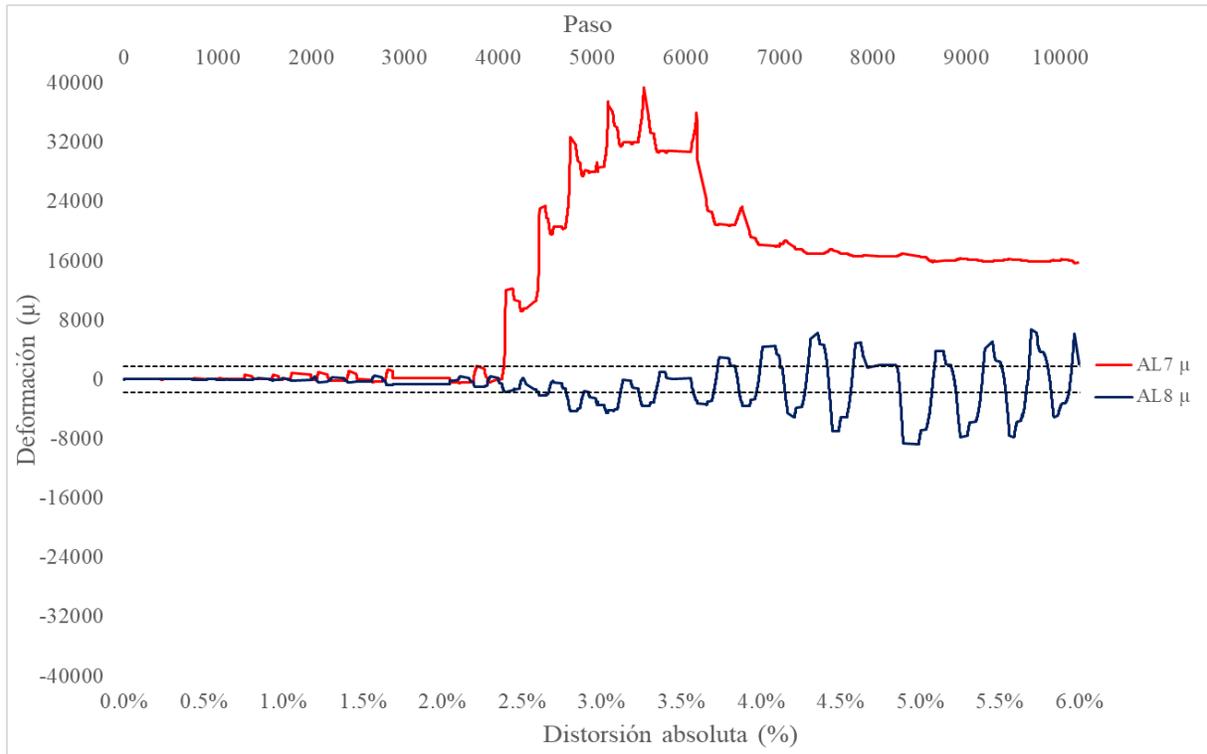
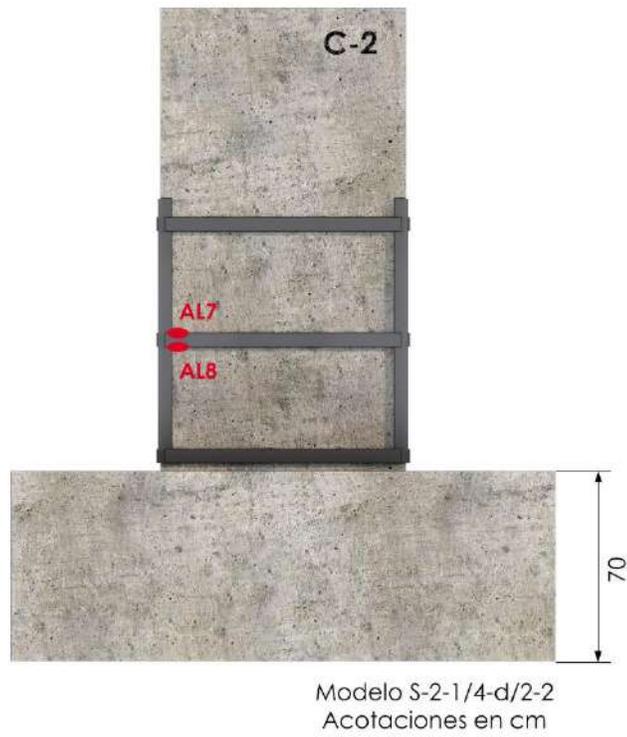


Fig. 4.6.18 Deformaciones AL7-AL8 – Columna C-2

Tabla 56. Resumen de la primera fluencia deformímetros externos - Columna C-2

| Deformímetro | Fluencia | Distorsión de fluencia | Comentarios |
|--------------|----------|------------------------|--|
| AS1 | NO | - | |
| AS2 | SÍ | 4% | La fluencia de este deformímetro ocurrió en la pausa del primer semiciclo positivo con distorsión de 4% |
| AS3 | NO | - | |
| AA1 | NO | - | |
| AA2 | NO | - | |
| AA3 | SÍ | -3.5% (2) | Se presentó después de haber alcanzado el segundo semiciclo con distorsión de 3.5%, cuando la prueba iba rumbo a cero t de carga |
| AA4 | NO | - | |
| AA5 | NO | - | |
| AA6 | SÍ | -4.5% | Es la mayor distorsión a la que fluyó un deformímetro de la camisa |
| AL1 | SÍ | 3.5% | La fluencia se registró pasos antes de llegar al primer ciclo positivo de 3.5%, por lo que prácticamente fluyó en dicha distorsión |
| AL2 | SÍ | 2.5% | Se presentó en la primera pausa con distorsión positiva de 2.5% |
| AL3 | SÍ | 2% (2) | La primera fluencia se registró en el último semiciclo de la distorsión de 2% |
| AL4 | SÍ | -2% (2) | Se registró la primera fluencia en un semiciclo anterior al instrumento AL3 |
| AL5 | SÍ | -2% (2) | Primera fluencia en el mismo semiciclo que AL4 |
| AL6 | SÍ | -2% | El deformímetro AL6 superó los límites en el primer semiciclo negativo de 2% |
| AL7 | SÍ | -2.5% (2) | La primera fluencia ocurrió en el último semiciclo negativo de la distorsión de 2.5% |
| AL8 | NO | - | |

Los datos obtenidos y reportados mediante las gráficas anteriores muestran que 10 deformímetros de los 17 colocados fluyeron a lo largo de la prueba. Fueron 4 instrumentos que presentaron su primera fluencia en la distorsión de 2%, 2 en 2.5%, 2 en 3.5%, 1 en 4% y finalmente 1 en 4.5%.

4.6.3 Comportamiento de grietas

En esta sección se describe el comportamiento de las grietas registradas en la columna C-2, la cual corresponde al primer espécimen encamisado de esta tesis.

Se llevó el mismo procedimiento con los datos obtenidos de la bitácora que en los puntos 4.3.2 y 4.4.2. A continuación se muestran las curvas realizadas con la información recabada.

La Fig. 4.6.19 muestra la evolución del espesor de las grietas en la cara norte, mientras que en la Fig. 4.6.20 se observan las curvas de las caras laterales; este y oeste. En el eje x, se incluyen las distorsiones absolutas a la que se llevó el espécimen encamisado, mientras que el eje y incluye el espesor de las grietas en mm y cm.

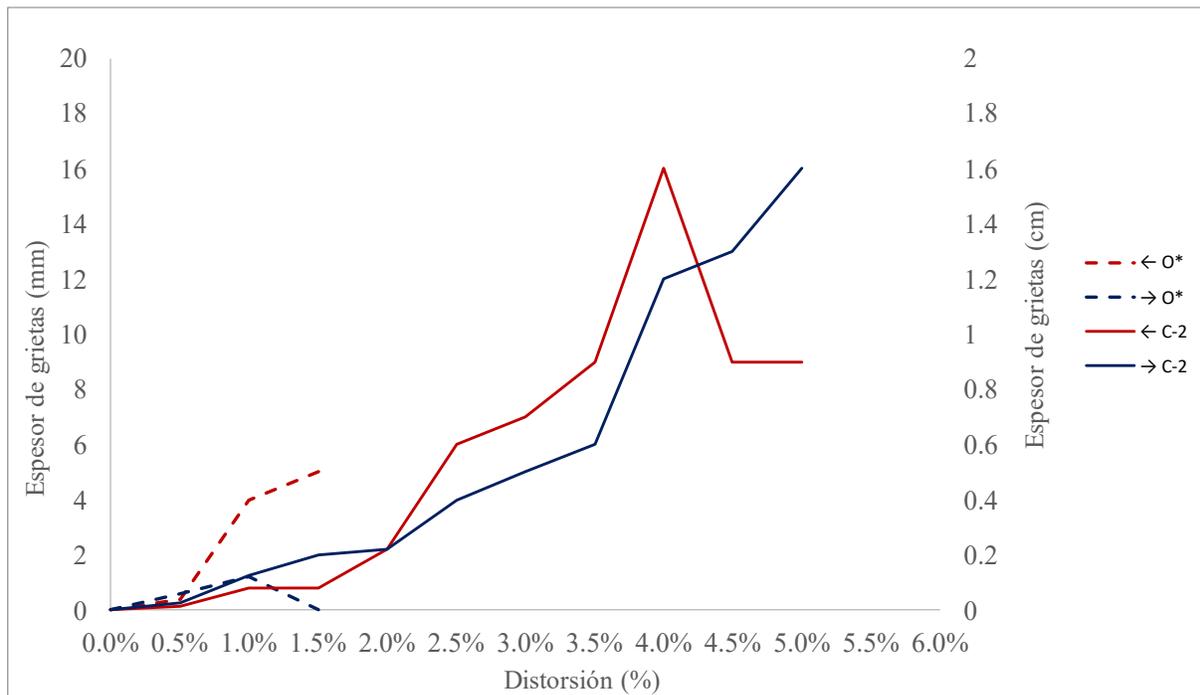


Fig. 4.6.19 Evolución del agrietamiento cara norte – Columna C-2 y Columna O*

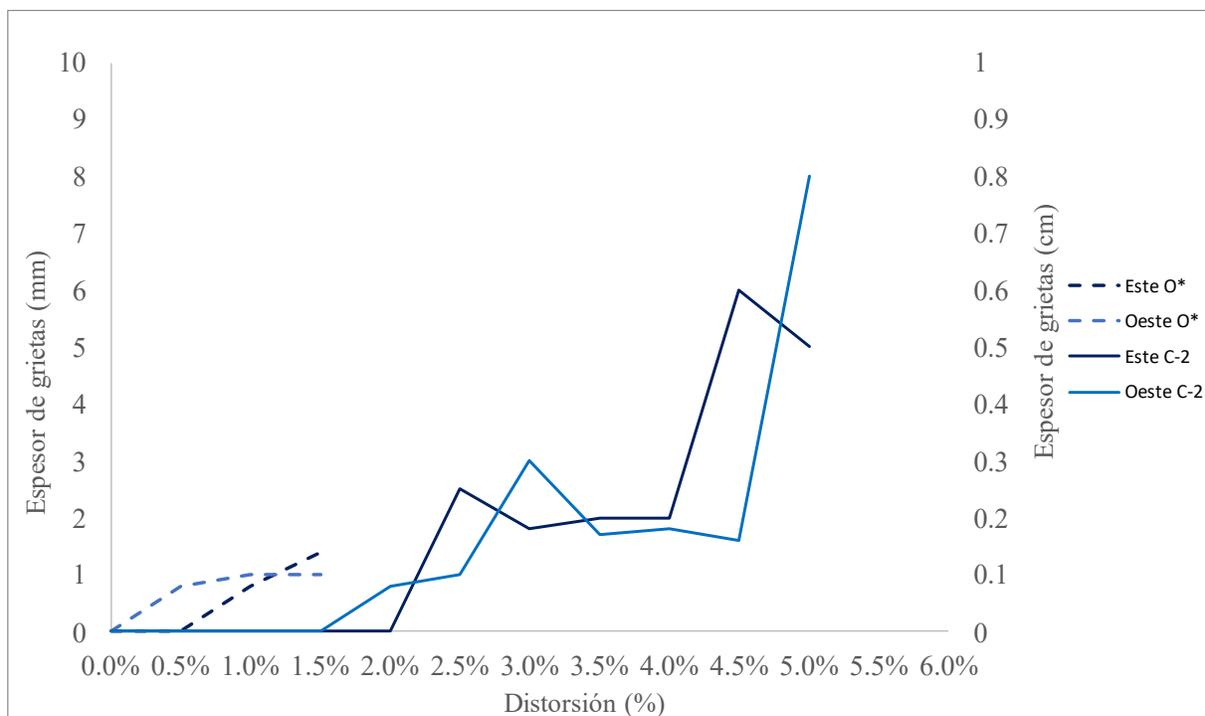


Fig. 4.6.20 Evolución del agrietamiento caras laterales - C-2

Las grietas en ambos sentidos de la cara norte se midieron hasta una distorsión de 5%, en los ciclos posteriores, el daño impidió la medición de las grietas. Los valores máximos medidos fueron en color rojo y azul de 16 mm. En cuanto a las caras laterales las mediciones también se hicieron hasta los ciclos con distorsión de 5%. El valor máximo del espesor de grietas en la cara este fue de 6 mm y en la cara oeste de 8 mm.

Se observó que los valores de las grietas de C-2 aparecieron en distorsiones mayores y el espesor de grietas también fue mayor que el registrado en O*.

4.7 Columna C-4

La última columna que se analizará en este capítulo es la columna C-4, la cual es la segunda encamisada con elementos metálicos. La característica más destacada de esta columna es el ancho del ala del ángulo de 4 pulgadas, cabe mencionar que las dimensiones de las soleras, así como su espaciado tiene las mismas características que la columna C-2.

Al ser una columna encamisada, se realizarán dos análisis de deformímetros: uno interno y otro referente a los instrumentos colocados en la camisa. Finalmente, gracias a un análisis del espesor de las grietas principales, se formaron curvas que permiten entender su comportamiento.

Las siguientes figuras (Fig. 4.7.1) muestran una vista frontal del espécimen y las ubicaciones de los deformímetros internos, así como de los colocados en la camisa metálica.

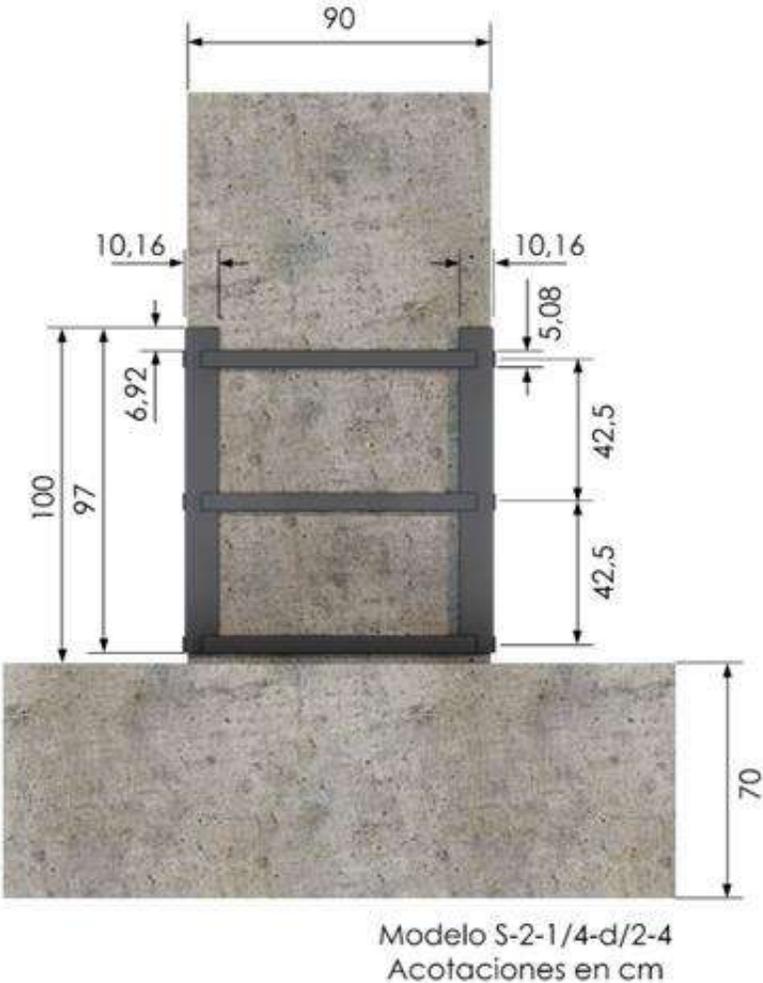


Fig. 4.7.1 Vista frontal - Columna C-4

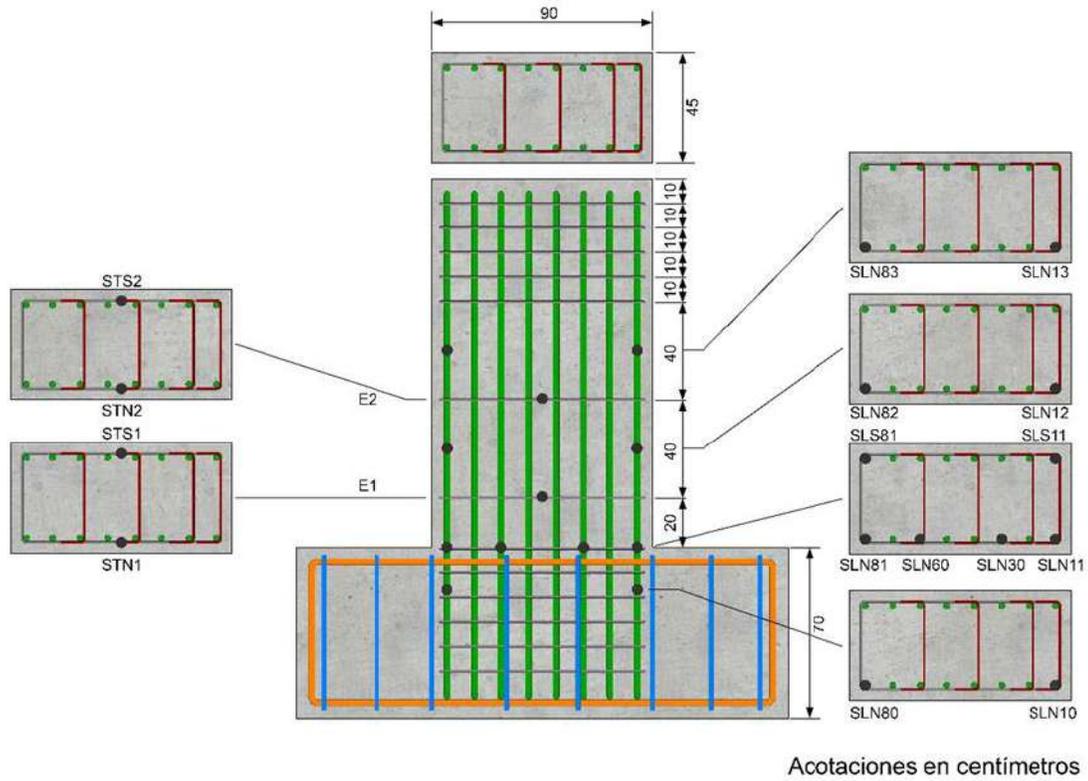


Fig. 4.7.2 Deformímetros internos - Columna C-4

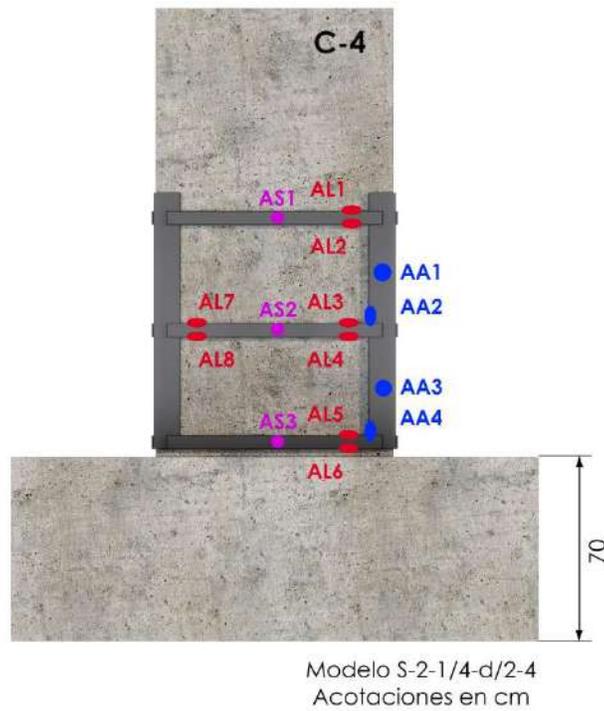


Fig. 4.7.3 Deformímetros en el encamisado metálico cara norte - Columna C-4

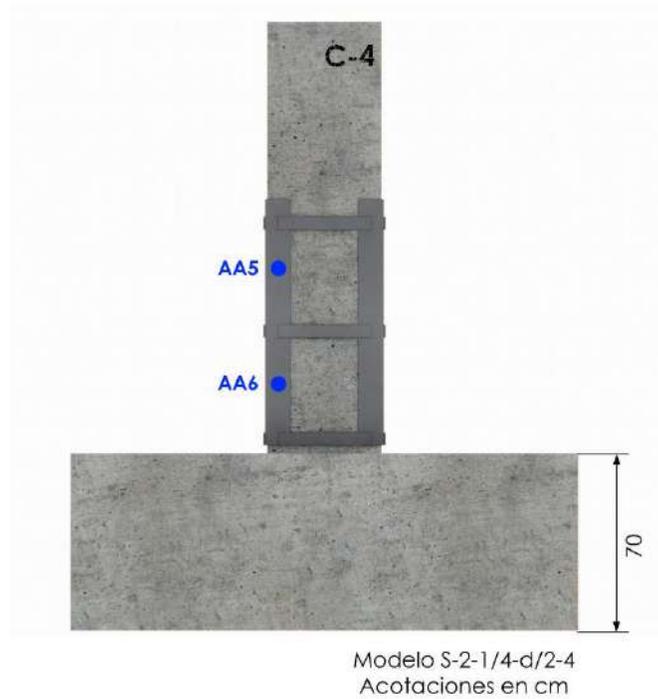


Fig. 4.7.4 Deformímetros en el encamisado metálico cara oeste - Columna C-4

4.7.1 Análisis de deformímetros internos

En esta sección se ahonda en los deformímetros colocados en el acero de refuerzo de la columna C-4. Primeramente se incluye una tabla (Tabla 57) que indica si los deformímetros internos no sufrieron algún daño y se encontraban en buenas condiciones para medir las deformaciones. Posteriormente, se anexan las gráficas obtenidas gracias a los datos registrados por cada par de deformímetro y por último, se hace el resumen del momento en el que de ser el caso, el instrumento arrojó un valor con la primera fluencia del acero.

Tabla 57. Funcionamiento deformímetros internos - Columna C-4

| Deformímetro | Funcionamiento previo a la prueba |
|--------------|-----------------------------------|
| SLN80 | Correcto |
| SLN81 | Correcto |
| SLN82 | Correcto |
| SLN83 | Correcto |
| SLN60 | Correcto |
| SLN30 | Correcto |

| Deformímetro | Funcionamiento previo a la prueba |
|--------------|-----------------------------------|
| SLN10 | Correcto |
| SLN11 | Correcto |
| SLN12 | Correcto |
| SLN13 | Correcto |
| SLS81 | Correcto |
| SLS11 | Correcto |
| STN1 | - |
| STS1 | Correcto |
| STN2 | - |
| STS2 | Correcto |

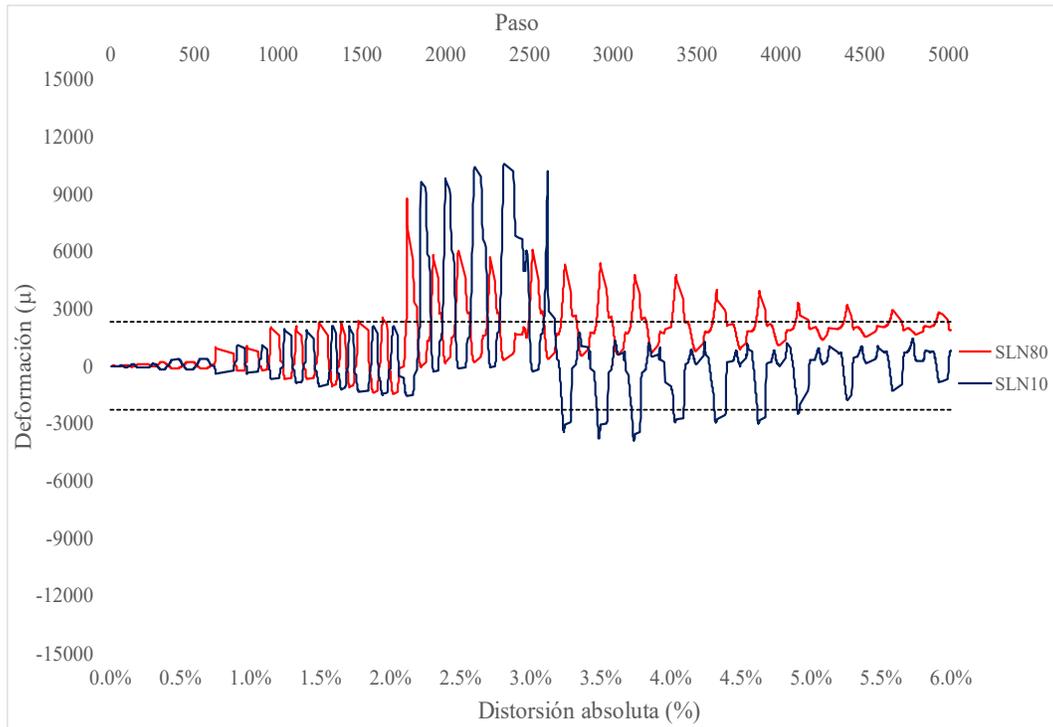


Fig. 4.7.5 Deformaciones SLN80 - SLN10 – Columna C-4

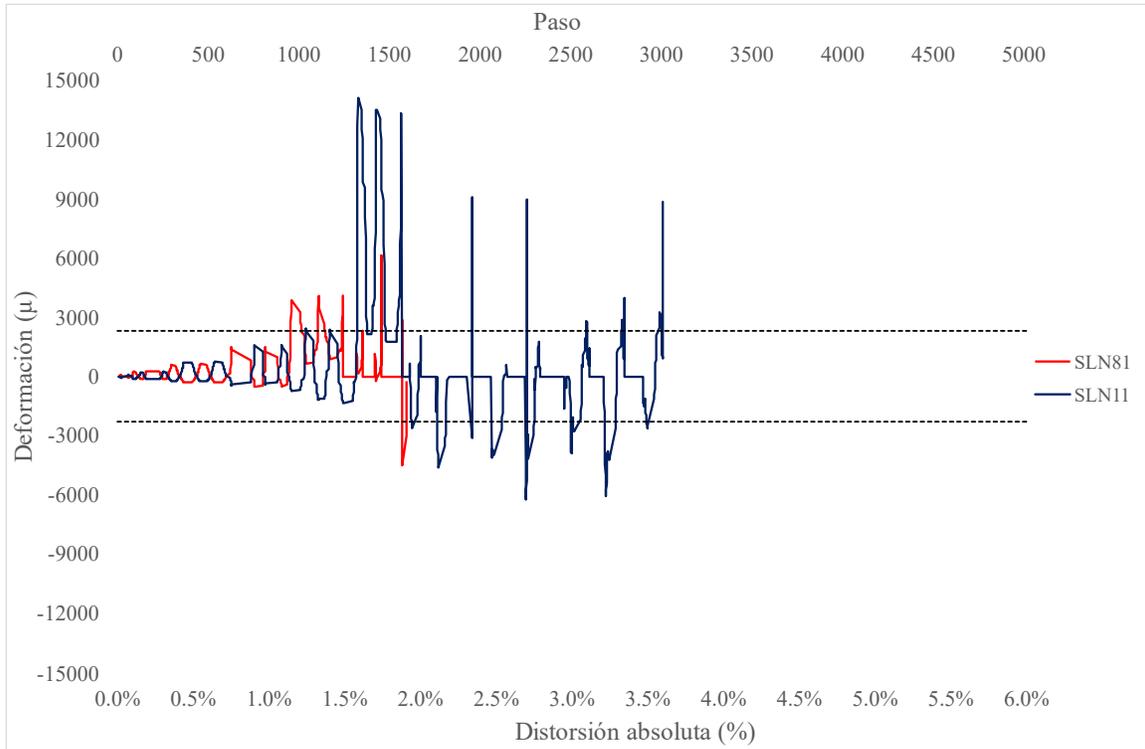


Fig. 4.7.6 Deformaciones SLN81 - SLN11 - Columna C-4

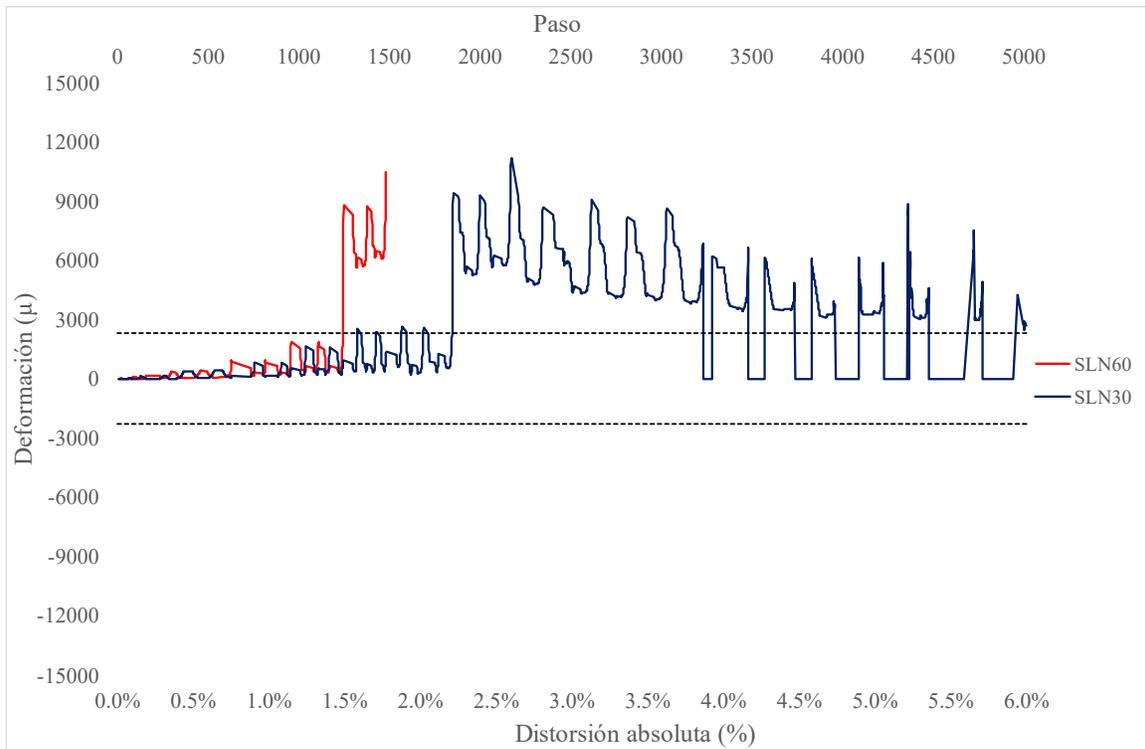


Fig. 4.7.7 Deformaciones SLN60 - SLN30 - Columna C-4

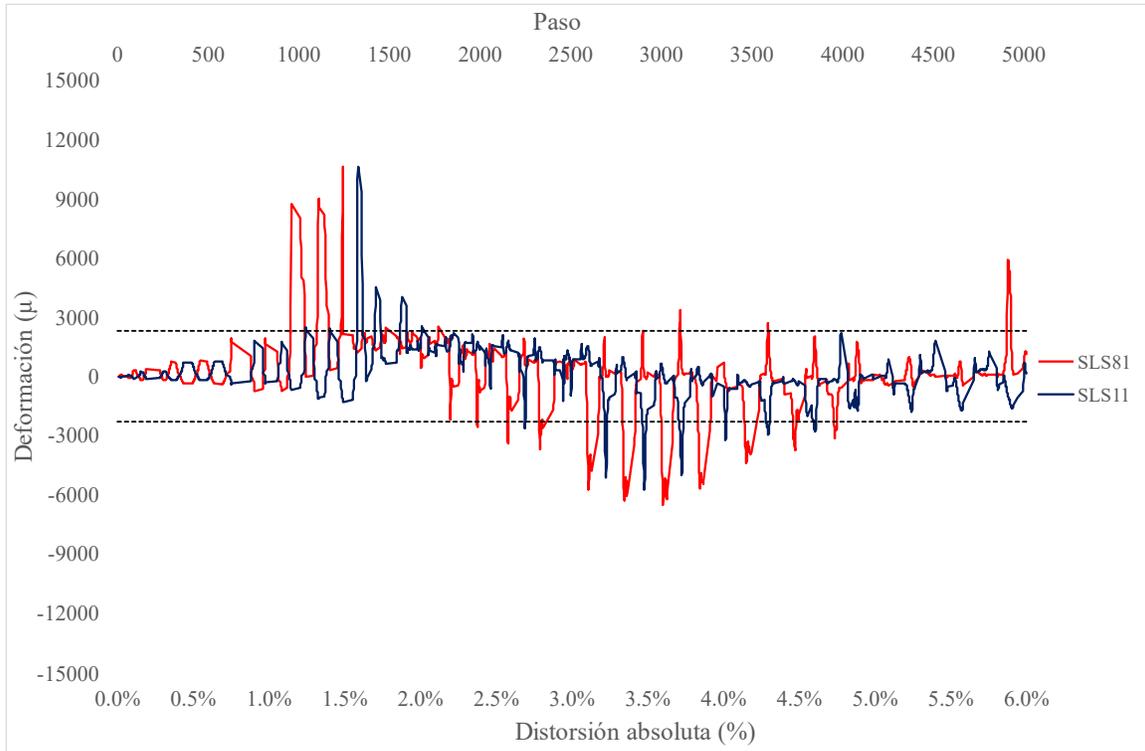


Fig. 4.7.8 Deformaciones SLS81 - SLS11 – Columna C-4

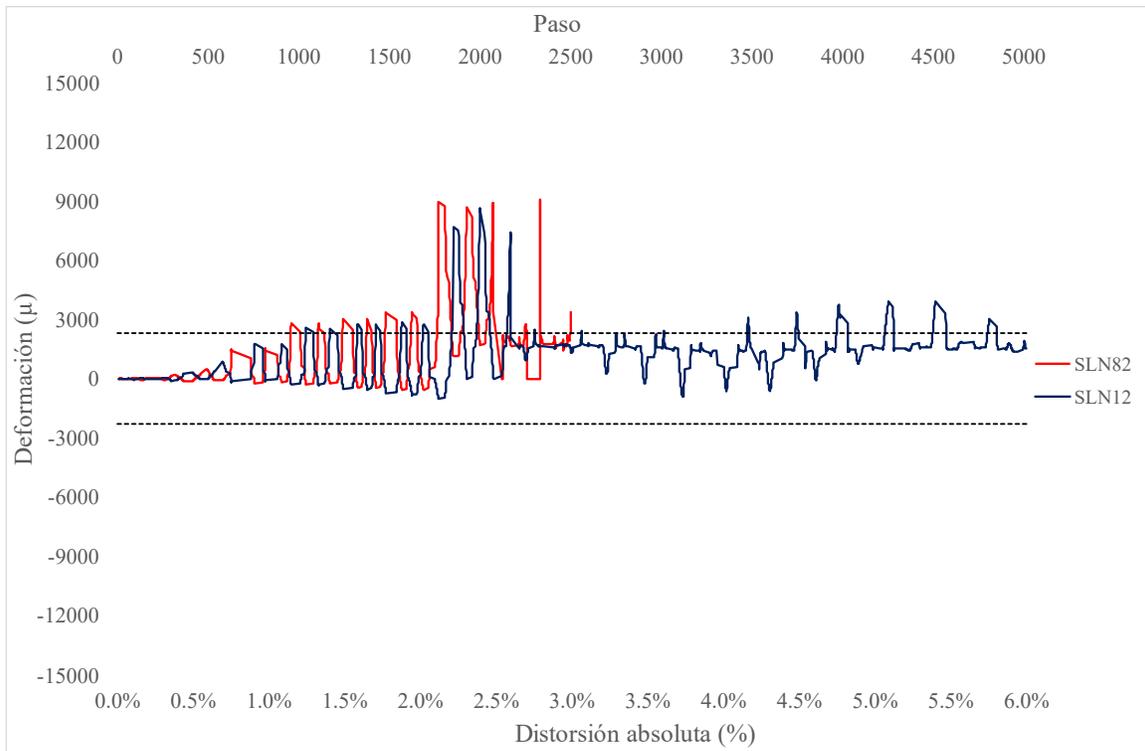


Fig. 4.7.9 Deformaciones SLN82 - SLN12 – Columna C-4

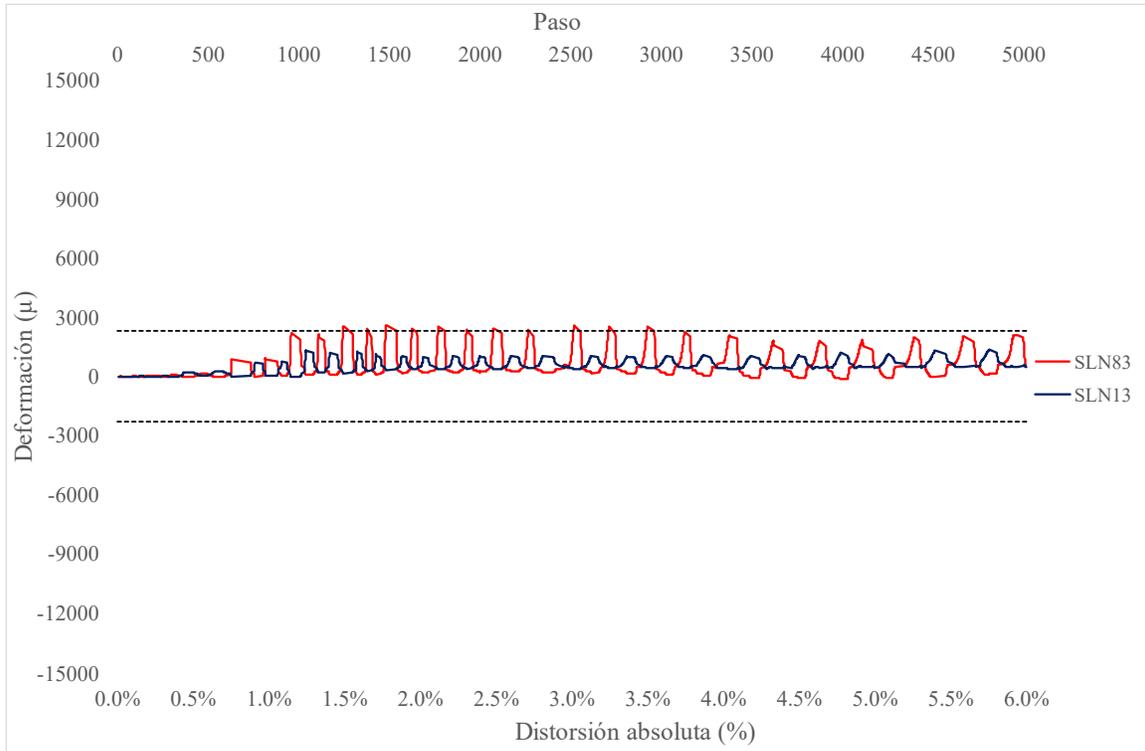


Fig. 4.7.10 Deformaciones SLN83 - SLN13 – Columna C-4

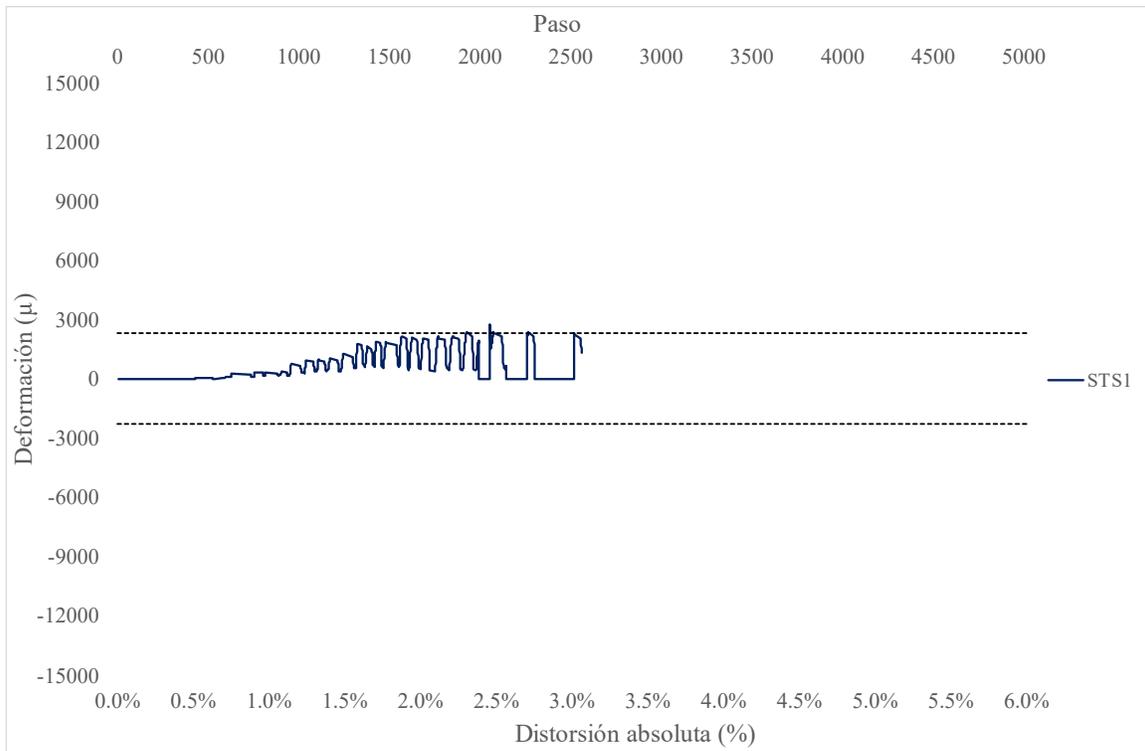


Fig. 4.7.11 Deformaciones STN1 - STS1 – Columna C-4

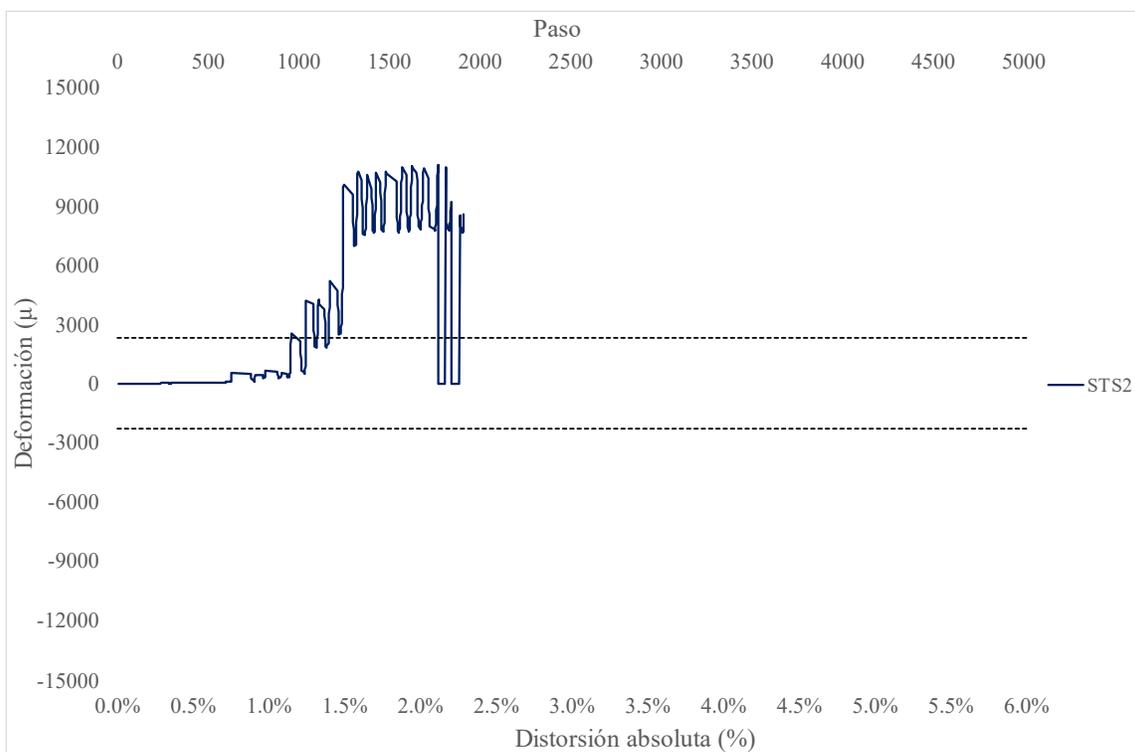


Fig. 4.7.12 Deformaciones STN2 - STS2 – Columna C-4

Tabla 58. Resumen de la primera fluencia - Columna C-4

| Deformímetro | Fluencia | Distorsión de fluencia | Comentarios |
|--------------|----------|------------------------|---|
| SLN80 | SÍ | -1.5% | La primera fluencia apareció en la pausa con distorsión de -1.5%, la cual correspondió al semiciclo posterior al agrietamiento de grout en la solera intermedia de la cara norte |
| SLN81 | NO | - | |
| SLN82 | SÍ | 2% | Al igual que el deformímetro anterior, la fluencia fue en la primera distorsión positiva de 2% |
| SLN83 | NO | - | |
| SLN60 | SÍ | -1.5% | La fluencia fue la misma que en el deformímetro SLN80 |
| SLN30 | SÍ | 2.5% | Se observó que previamente, el deformímetro superó las 2300 microdeformaciones, sin embargo, fue hasta el semiciclo con distorsión positiva de 2.5%, cuando la curva se mantuvo y presentó valores residuales |

| Deformímetro | Fluencia | Distorsión de fluencia | Comentarios |
|--------------|----------|------------------------|---|
| SLN10 | SÍ | 2.5% | Se presentó el mismo caso que en el deformímetro SLN30 |
| SLN11 | NO | - | |
| SLN12 | SÍ | 2.5% | El comportamiento de este deformímetro fue similar al del SLN30 |
| SLN13 | NO | - | |
| SLS81 | NO | - | |
| SLS11 | NO | - | |
| STS1 | NO | - | |
| STS2 | SÍ | 1% | Fue el único instrumento que registró su primera fluencia en el semiciclo con distorsión positiva de 1% |

Finalmente, fluyeron 7 de 16 deformímetros internos, de los cuales sólo 1 en la distorsión positiva de 1%, 2 en el semiciclo negativo de la distorsión de -1.5%, 1 en la distorsión de 2% y 3 deformímetros en la distorsión de 2.5%.

4.7.2 Análisis de deformímetros en encamisado metálico

En esta sección se reportan los datos obtenidos de los deformímetros externos colocados en la camisa metálica de la columna C-4. Al igual que en la columna encamisada anterior, también se colocaron 16 instrumentos, variando únicamente la ubicación de uno de ellos en la cara oeste.

Seguido, se presenta el listado (Tabla 59) de los deformímetros externos y la validación del correcto funcionamiento de estos previo al ensayo.

Tabla 59. Funcionamiento de deformímetros externos - Columna C-4

| Deformímetro | Funcionamiento previo a la prueba |
|--------------|-----------------------------------|
| AS1 | Correcto |
| AS2 | Correcto |
| AS3 | Correcto |
| AA1 | Correcto |
| AA2 | Correcto |
| AA3 | Correcto |
| AA4 | Correcto |

| Deformímetro | Funcionamiento previo a la prueba |
|--------------|-----------------------------------|
| AA5 | Correcto |
| AA6 | Correcto |
| AL1 | Correcto |
| AL2 | Correcto |
| AL3 | Correcto |
| AL4 | Correcto |
| AL5 | Correcto |
| AL6 | Correcto |
| AL7 | Correcto |
| AL8 | Correcto |

A continuación se presentan todas las gráficas de los deformímetros colocados:

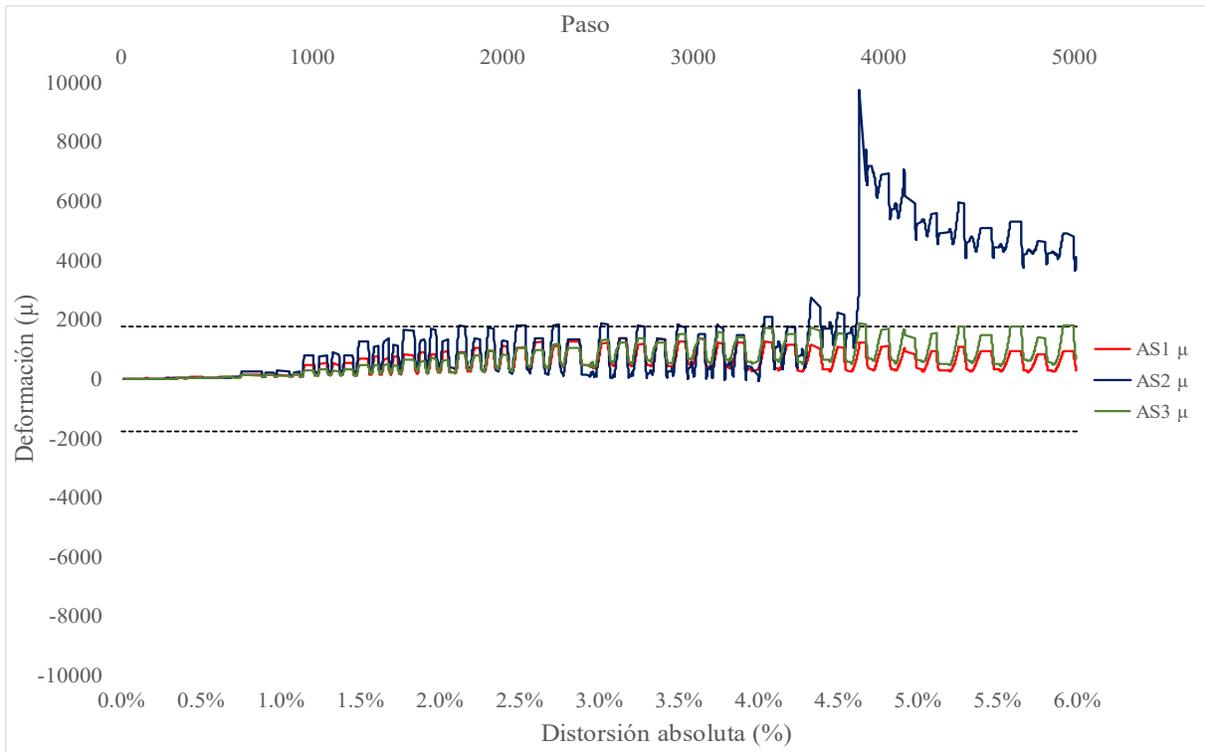
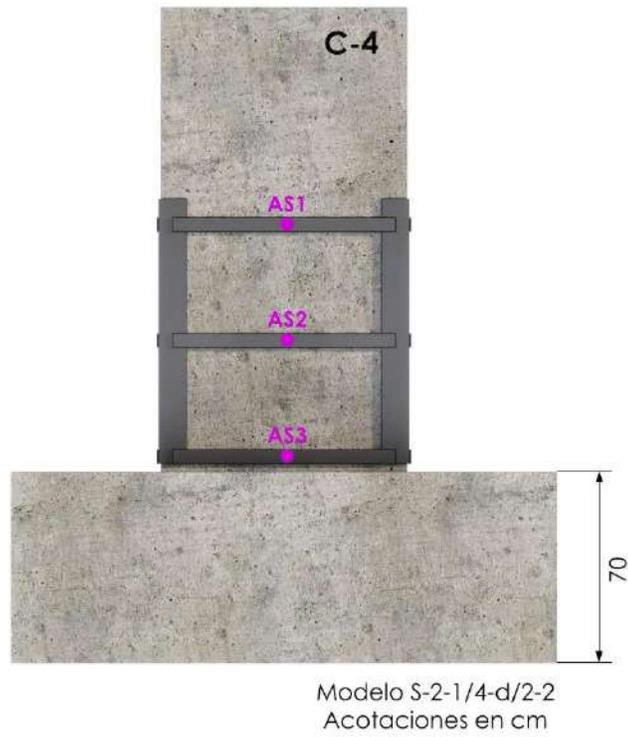


Fig. 4.7.13 Deformaciones AS1-AS2-AS3 – Columna C-4

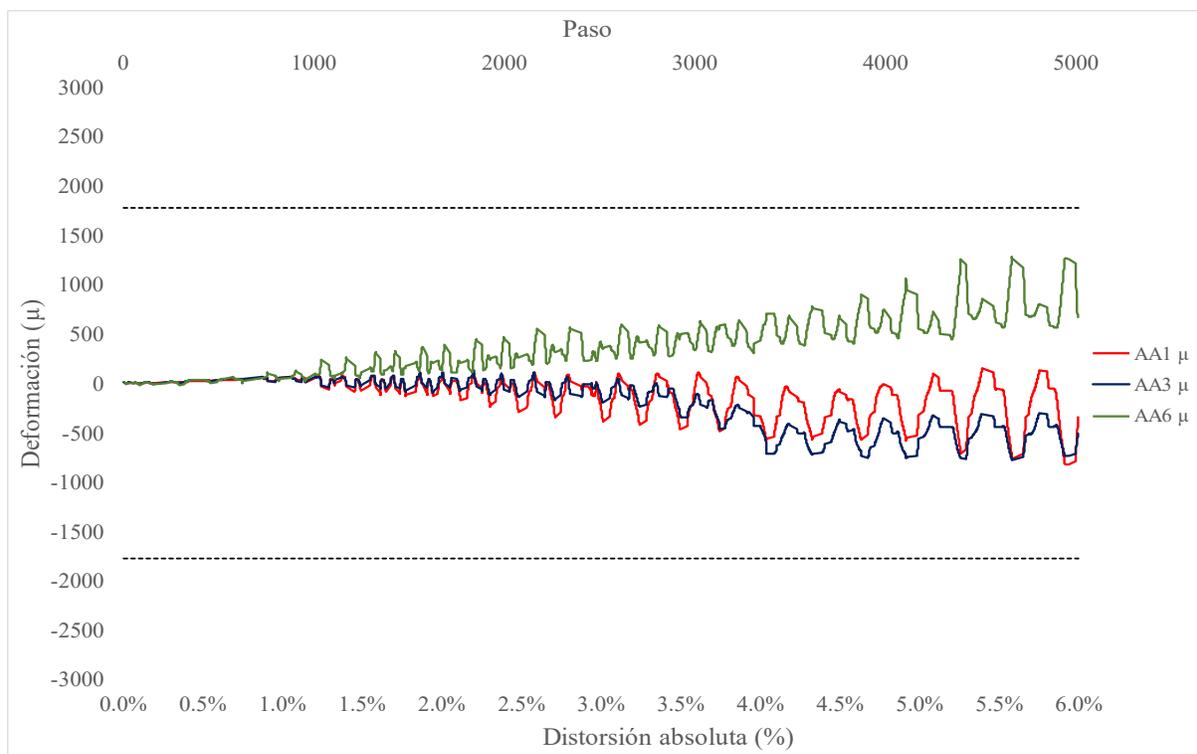
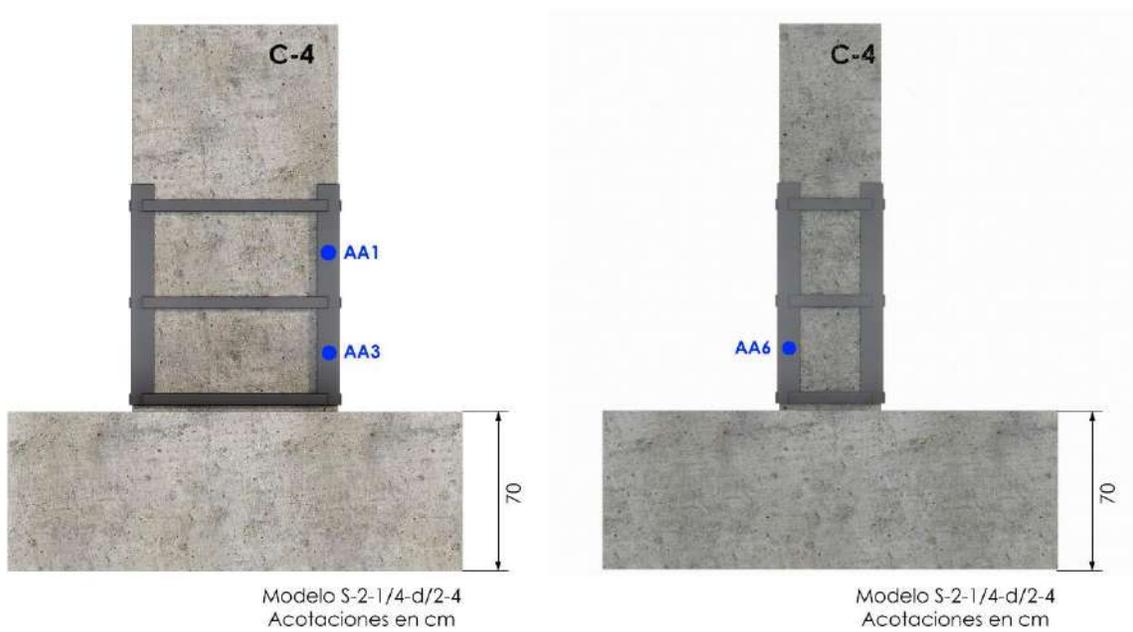


Fig. 4.7.14 Deformaciones AA1-AA3-AA6 – Columna C-4

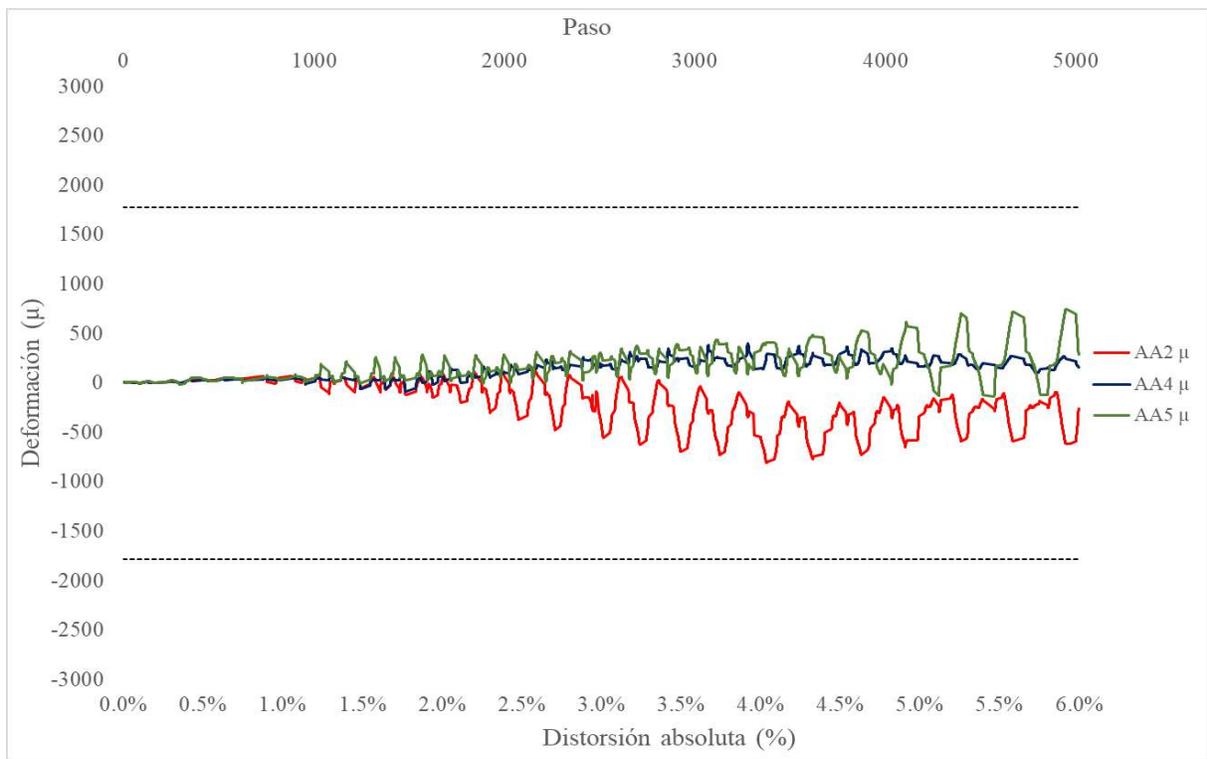
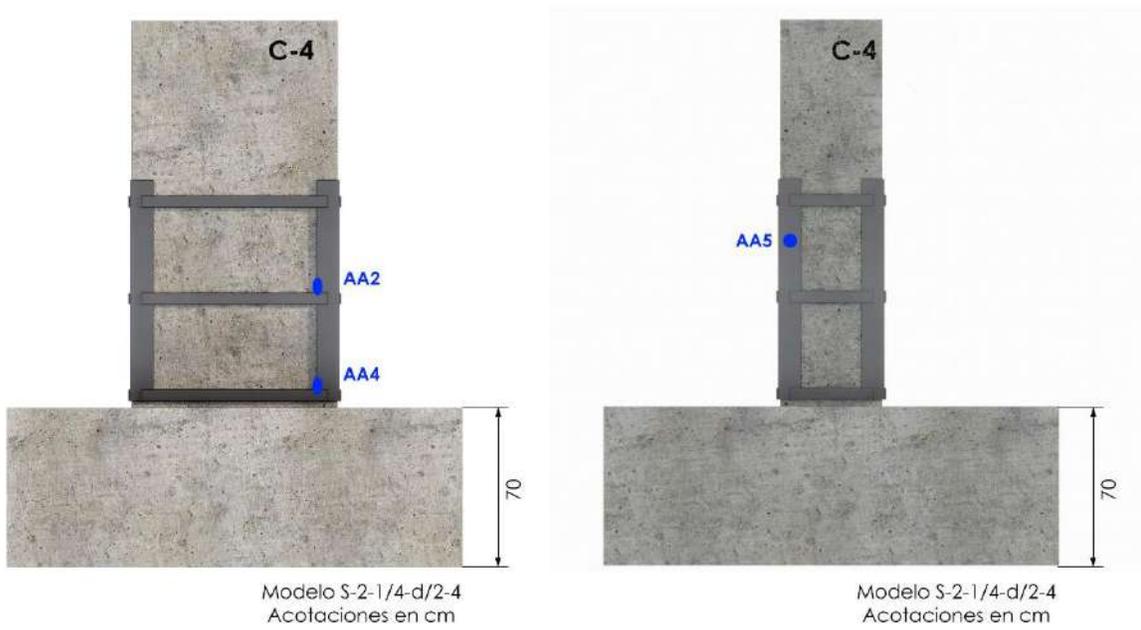


Fig. 4.7.15 Deformaciones AA2-AA4-AA5 – Columna C-4

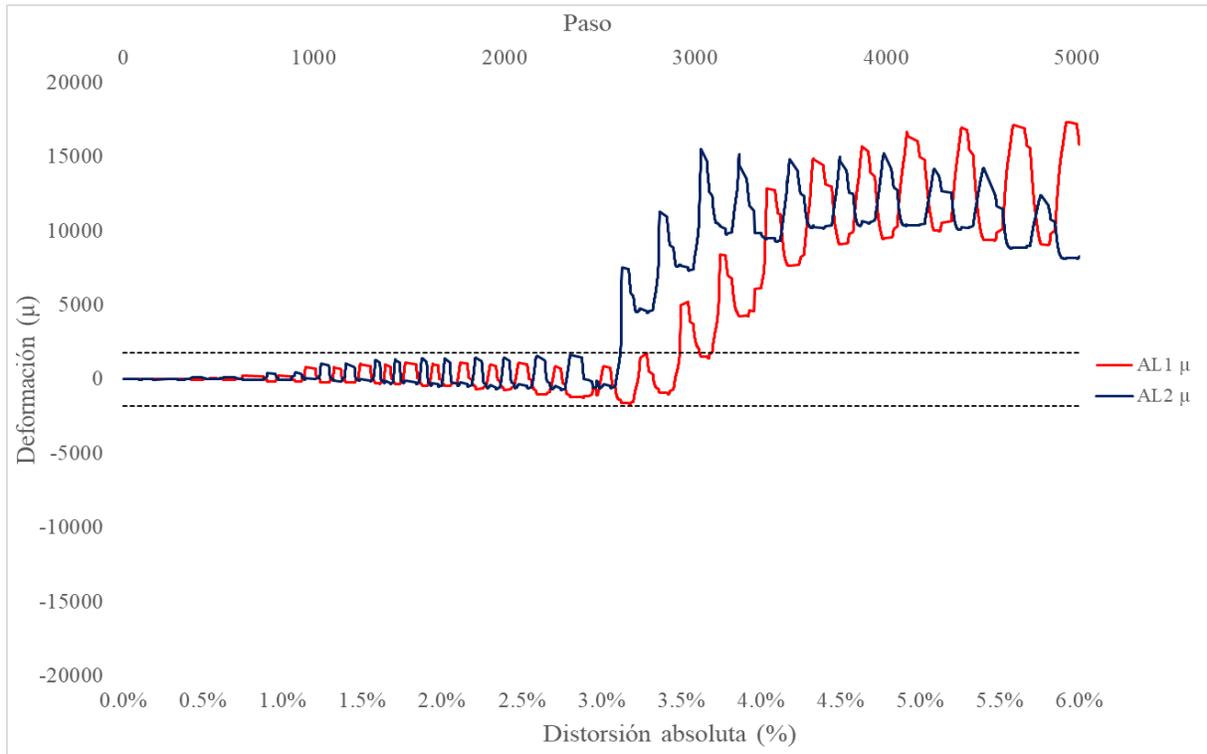
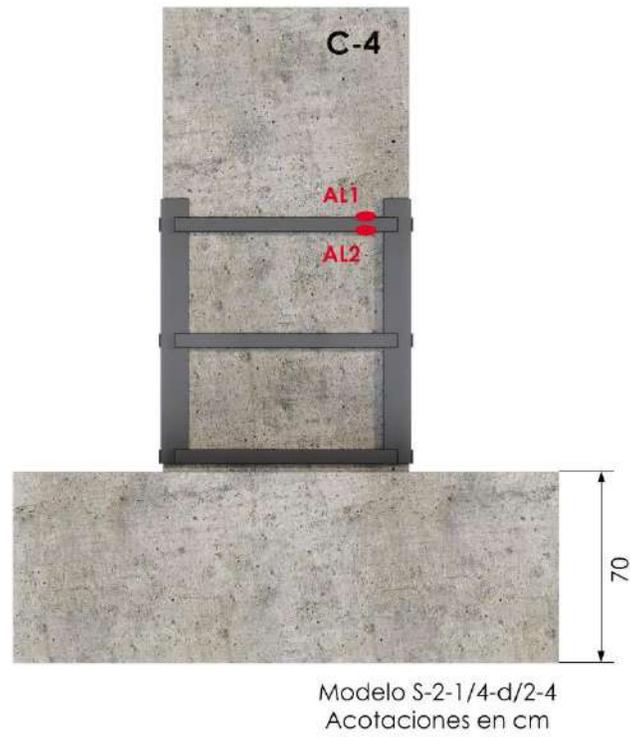


Fig. 4.7.16 Deformaciones AL1-AL2 – Columna C-4

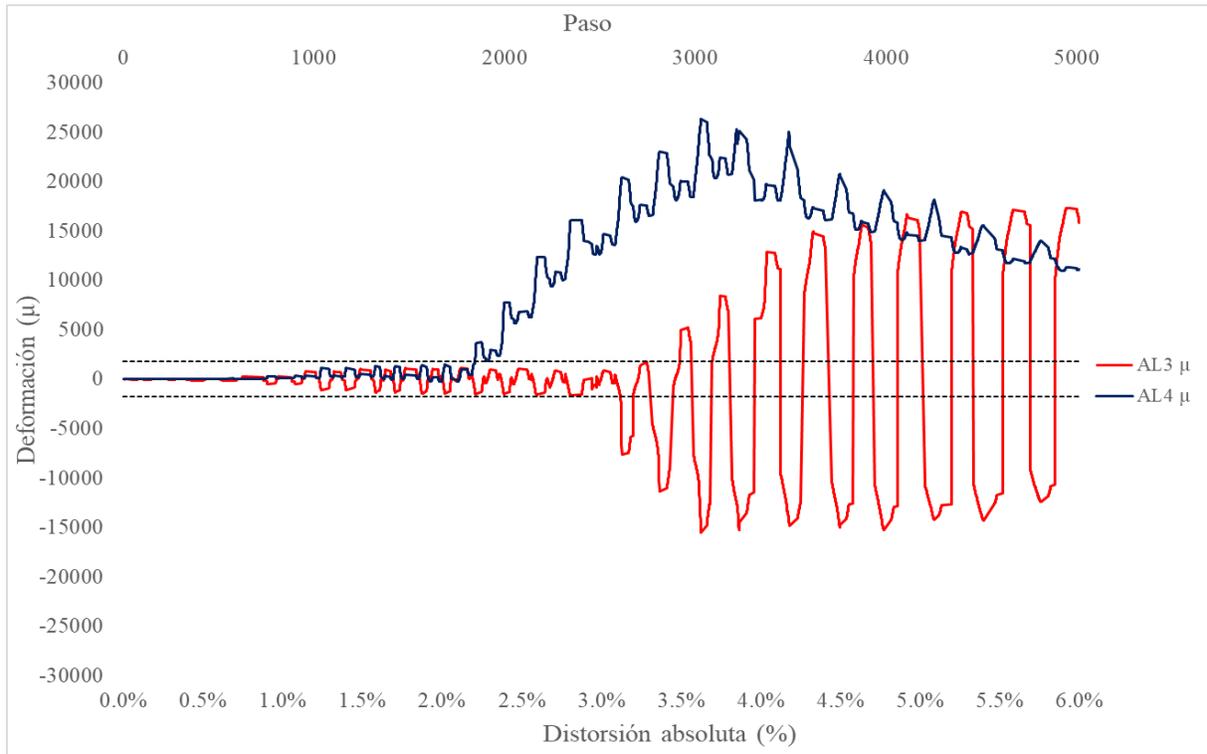
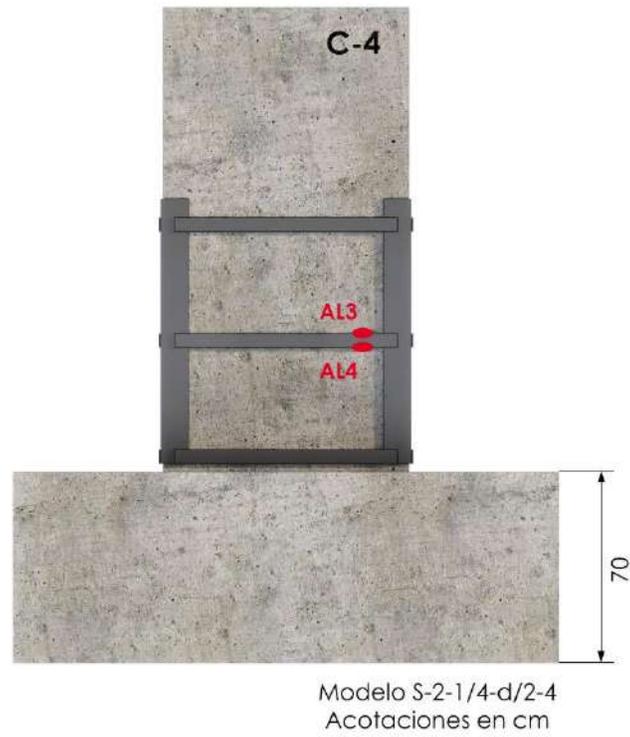


Fig. 4.7.17 Deformaciones AL3-AL4 – Columna C-4

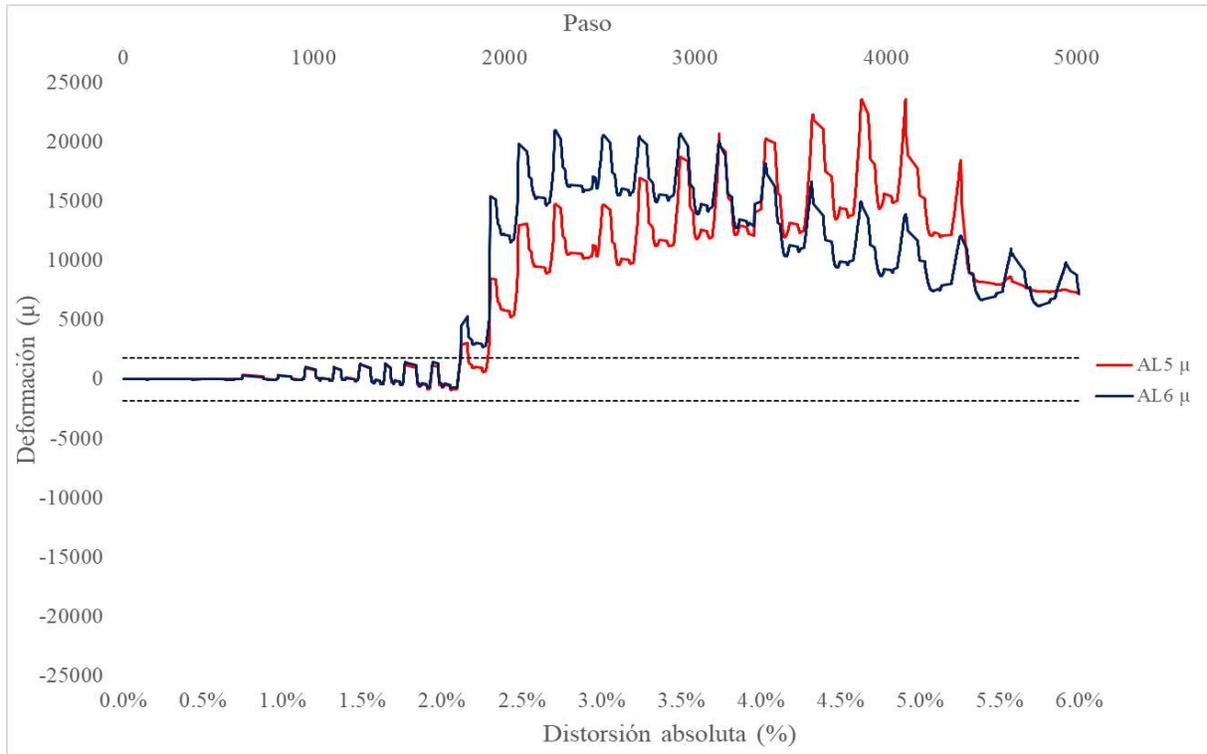
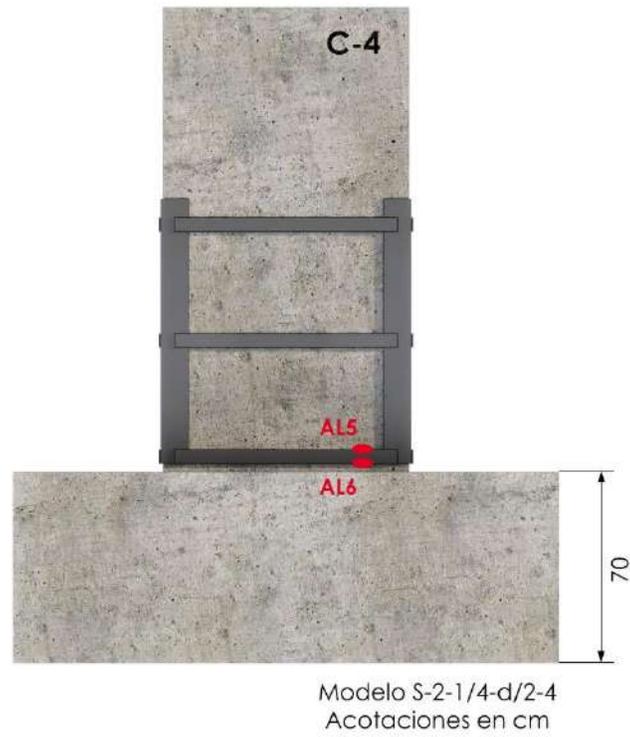


Fig. 4.7.18 Deformaciones AL5-AL6 - Columna C-4

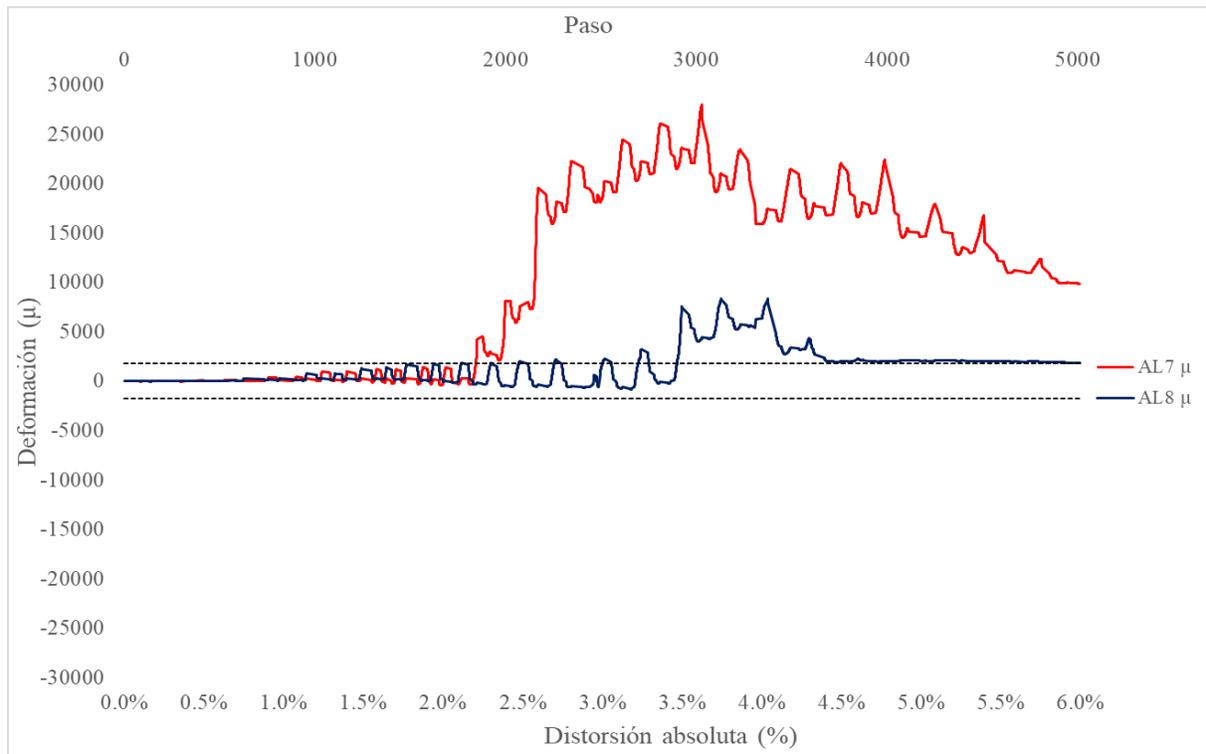
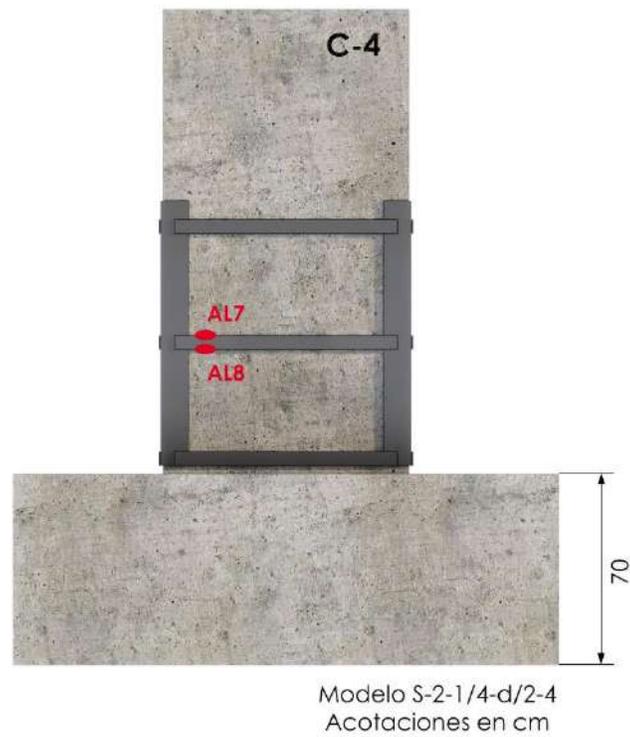


Fig. 4.7.19 Deformaciones AL7-AL8 – Columna C-4

Tabla 60. Resumen de la primera fluencia deformímetros externos - Columna C-4

| Deformímetro | Fluencia | Distorsión de fluencia | Comentarios |
|--------------|----------|------------------------|---|
| AS1 | NO | - | |
| AS2 | SÍ | -5% | El deformímetro AS2 fue el que tuvo la mayor deformación en su primera fluencia, antes de llegar a la primera distorsión negativa del -5% |
| AS3 | NO | - | |
| AA1 | NO | - | |
| AA2 | NO | - | |
| AA3 | NO | - | |
| AA4 | NO | - | |
| AA5 | NO | - | |
| AA6 | NO | - | |
| AL1 | SÍ | 3.5% | La primera fluencia ocurrió en el primer semiciclo con distorsión positiva de 3.5 |
| AL2 | SÍ | 3% | En la distorsión del primer semiciclo positivo se presentó la primera fluencia de 3% |
| AL3 | SÍ | 3% | La fluencia de AL3 coincidió con la de AL2 |
| AL4 | SÍ | 2.5% | La fluencia de este y los siguientes 3 deformímetros ocurrió en el primer ciclo de la distorsión de 2.5% |
| AL5 | SÍ | -2.5% | |
| AL6 | SÍ | -2.5% | |
| AL7 | SÍ | -2.5% | |
| AL8 | SÍ | 3.5% | La fluencia se reportó en el primer semiciclo positivo de 3.5% |

En la columna C-4, fueron 9 de los 17 deformímetros los que fluyeron a lo largo del ensayo. La primera fluencia de 4 instrumentos fue registrada en la distorsión 2.5%, 2 en 3%, 2 en 3.5% y por último 1 en -5%.

4.7.3 Comportamiento de grietas

Las siguientes figuras (Fig. 4.7.20 y Fig. 4.7.21) muestran las curvas realizadas de los datos obtenidos en la bitácora de la columna C-4.

Se transformaron los valores de la distorsión a absolutos y tanto en mm como en cm es que se acotaron las gráficas que incluyeron información del agrietamiento en la cara norte y en las caras laterales.

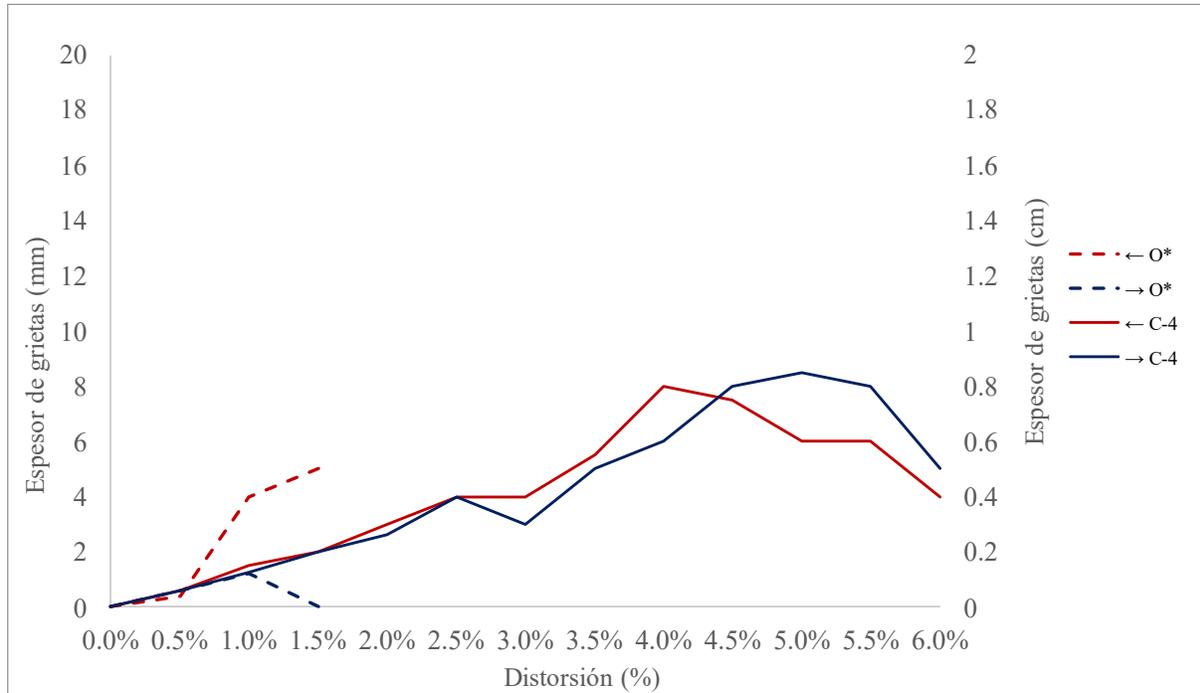


Fig. 4.7.20 Evolución agrietamiento cara norte - Columna C-4 y Columna O*

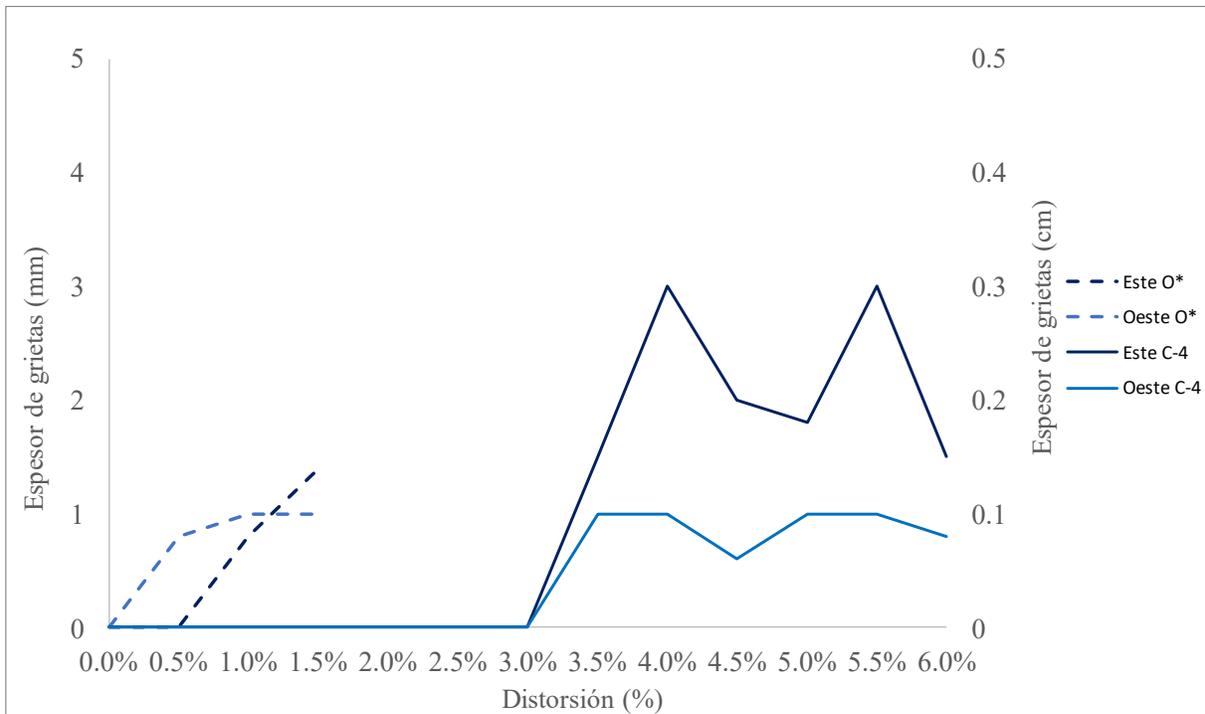


Fig. 4.7.21 Evolución agrietamiento caras laterales - Columna C-4

Los registros de las mediciones de los espesores de grietas en todas las caras se hicieron hasta el término de la prueba en la distorsión correspondiente al 6%, fue la única de las 5 columnas analizadas en las que fue posible.

En cuanto a los valores máximos registrados en la cara norte, en color rojo este fue de 8.5 mm, mientras que para el color azul fue de 8 mm. Las caras laterales marcaron valores de 3 y 1 mm en las caras este y oeste respectivamente.

Se pudo apreciar que los valores de los espesores de las grietas fueron mayores que O*, pero menores que C-2.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Introducción

En el presente capítulo se aborda un análisis aspectos fundamentales resultados del ensaye de las cinco columnas de concreto ensayadas. Se exploran y discuten varios puntos cruciales que influyen en el comportamiento de los especímenes y su capacidad de respuesta ante cargas.

El apartado 5.2 se centra en la resistencia de estas columnas, con especial énfasis en las envolventes de respuesta y la evolución de la resistencia en los especímenes. Se examina en detalle cómo estas columnas responden a las cargas aplicadas a lo largo de las pruebas y cómo su resistencia evoluciona.

El análisis de la rigidez en 5.3 es otro elemento crucial en esta tesis. Se profundiza en la degradación de la rigidez y se desglosa la rigidez de ciclo. Además, se investiga la disipación de energía en 5.4 en estos elementos, mediante energía acumulada en cada uno de los ciclos aplicados en cada columna. El apartado 5.5 incluye las curvas idealizadas carga-distorsión construidas a partir de los datos obtenidos en los ensayos. Finalmente, se lleva a cabo un detallado examen en 5.6 del tipo de falla que se observa en los especímenes a partir de las curvas idealizadas de la sección anterior, proporcionando una comprensión y resolución de los escenarios de fallo en estos elementos estructurales.

En resumen, este capítulo busca ofrecer un análisis detallado que contribuya a una comprensión más profunda del comportamiento estructural de las columnas de concreto de control y de las columnas de concreto encamisadas con elementos metálicos.

5.2 Resistencia

Las columnas fueron sometidas a una aplicación de carga lateral cíclica, definida por la historia de carga (véase 2.8). Cada espécimen registró su carga máxima, la cual representa la resistencia de las columnas.

Antes, durante y después de que los especímenes alcanzaran su resistencia, se registraron valores tales como la carga aplicada, la distorsión asociada y los hitos más relevantes. La resistencia proporciona información sobre el rendimiento de los encamisados metálicos y permite la comparación de estos modelos con las columnas de concreto sin revestimiento.

Los siguientes apartados contienen información adicional que facilita la evaluación de la resistencia de las columnas a lo largo de los ensayos.

5.2.1 Envoltentes de respuesta

A continuación se presentan las envoltentes de respuesta de cada curva histerética registrada al graficar carga lateral en t y distorsión en porcentaje. Las envoltentes de las curvas definen el límite externo del conjunto de datos. En términos más simples, son curvas que rodean o encapsulan a otras curvas, abarcando los límites extremos o máximos de los datos, mostrando el límite máximo o mínimo de sus variaciones.

Son útiles para visualizar la tendencia general o el comportamiento extremo de un conjunto de datos representados. En la Fig. 5.2.1 se muestran las cinco curvas de las columnas ensayadas para el fin de esta tesis. De igual manera, en la Tabla 61 se incluyen los valores de la resistencia máxima de cada espécimen.

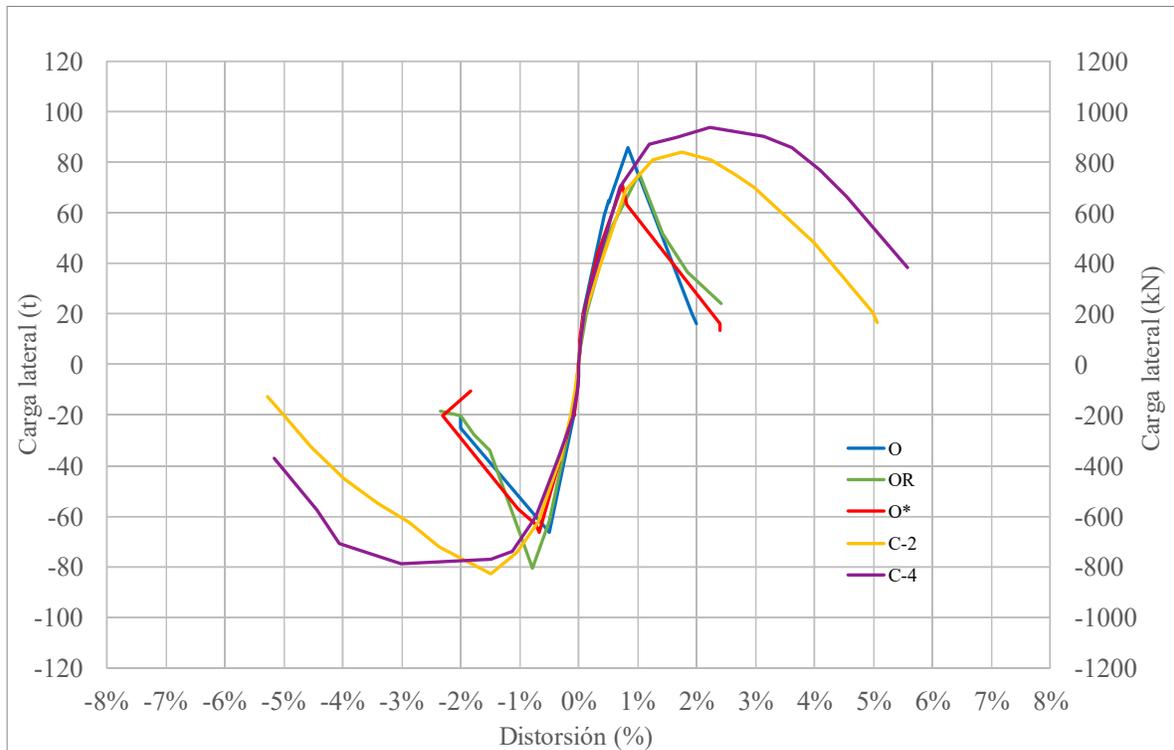


Fig. 5.2.1 Envoltura de los especímenes

Tabla 61. Resumen de la resistencia de las columnas ensayadas

| Columna | $V_{m\acute{a}x}$ [t] |
|---------|-----------------------|
| O | 86.05 |
| OR | 80.60 |
| O* | 71.35 |
| C-2 | 84.01 |
| C-4 | 97.78 |

En la gráfica anterior, se apreciaron tres etapas del comportamiento de los modelos ensayados. La primera etapa, demostró una relación directa entre la carga aplicada y la distorsión, culminando poco después de la aparición de las primeras grietas. La fase intermedia se distingue tras la formación de esas primeras grietas y coincide con la resistencia máxima del modelo. La tercera fase se caracterizó por las deformaciones después de haber alcanzado la resistencia máxima a la que se sometieron los especímenes, marcando así una disminución en la resistencia de estos.

Las resistencias máximas alcanzadas de los modelos O y OR se presentaron en semiciclos con distorsiones negativas, mientras que el resto de los modelos registró su carga máxima en los semiciclos con distorsiones positivas.

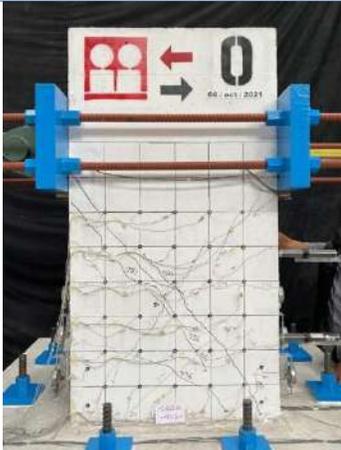
5.2.2 Evolución de la resistencia en los especímenes

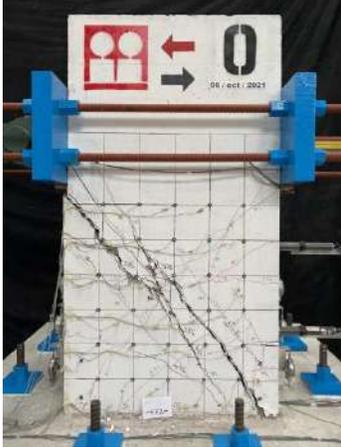
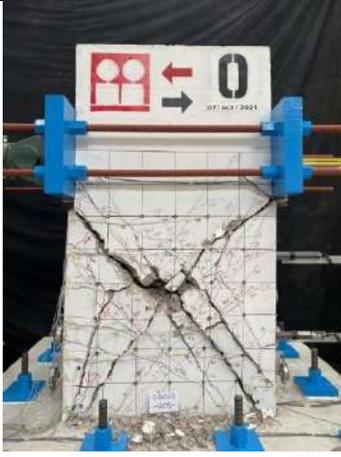
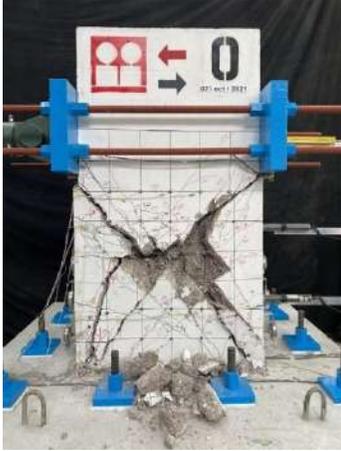
En este apartado se aborda mediante tablas, el resumen del daño de las columnas, la resistencia máxima asociada distorsiones relevantes en absoluto a consideración de la autora y una imagen que representa el daño presentado en dicho instante. En negritas y con bordes externos se acota en las tablas la distorsión en la que las columnas alcanzaron su resistencia máxima.

De acuerdo con la NTC de Evaluación y Rehabilitación Estructural de Edificios Existentes (2023), la rehabilitación se diseña para $Q=2$, lo que implica una distorsión de 2%.

Columna O

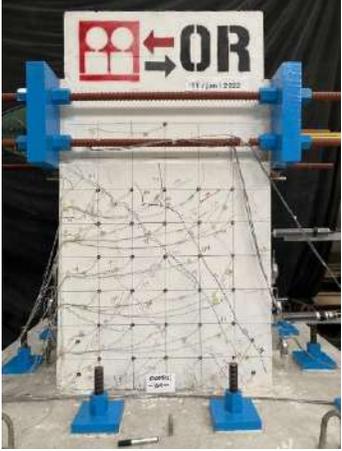
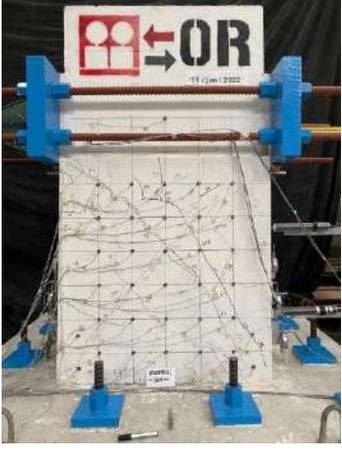
Tabla 62. Evolución de la resistencia – Columna O

| Distorsión (%) | $V_{m\acute{a}x}$ (t) | Estado del daño |
|----------------|-----------------------|--|
| 0.5% | 66.28 |  |

| Distorsión (%) | $V_{m\acute{a}x}$ (t) | Estado del da\~no |
|-------------------------|-----------------------|--|
| 1% | 86.05 |  |
| 2% | 25.05 |  |
| Estado final del da\~no | - |  |

Columna OR

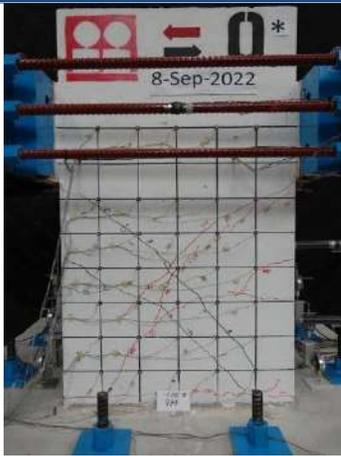
Tabla 63. Evolución de la resistencia - Columna OR

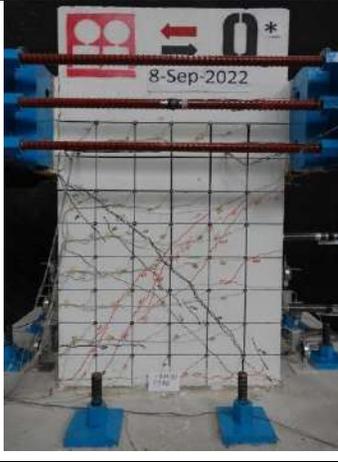
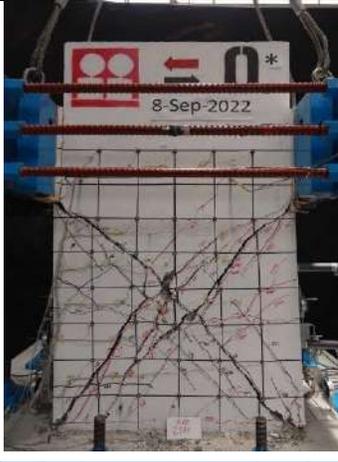
| Distorsión (%) | V _{máx} (t) | Estado del daño |
|----------------|----------------------|--|
| 0.5% | 66.15 |  |
| 1% | 80.6 |  |
| 2% | 36.7 |  |

| Distorsión (%) | $V_{m\acute{a}x}$ (t) | Estado del da\~{n}o |
|----------------|-----------------------|---|
| 2.5% | 24.1 |  |
| Estado Final | - |  |

Columna O*

Tabla 64. Evoluci3n de la resistencia - Columna O*

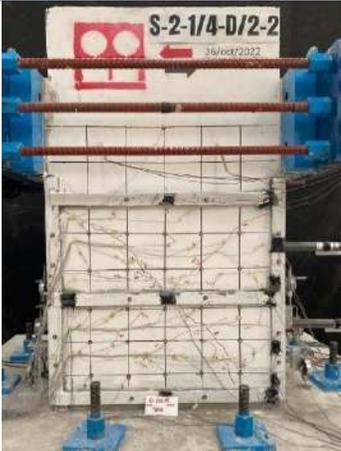
| Distorsi3n (%) | $V_{m\acute{a}x}$ (t) | Estado del da\~{n}o |
|----------------|-----------------------|--|
| 0.5% | 43.64 |  |

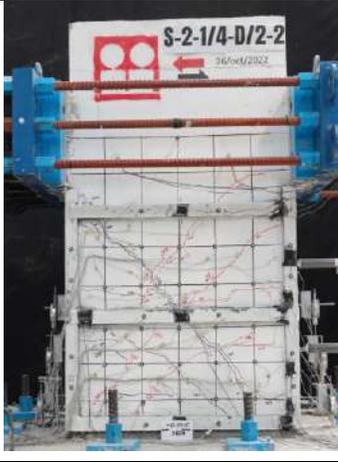
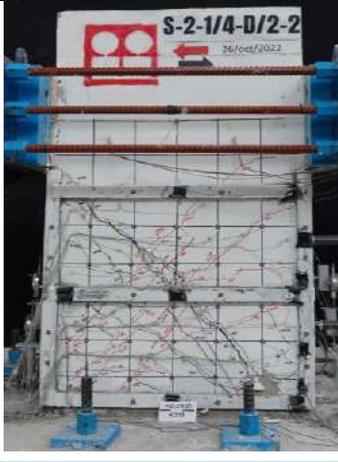
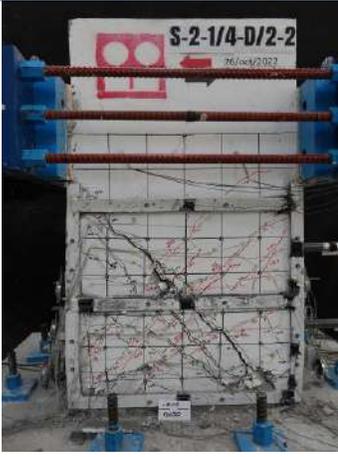
| Distorsión (%) | $V_{\text{máx}}$ (t) | Estado del daño |
|----------------|----------------------|--|
| 1% | 71.35 |  |
| 2% | 40.87 |  |
| 2.5% | 20.33 |  |

| Distorsión (%) | V _{máx} (t) | Estado del daño |
|----------------|----------------------|--|
| Estado Final | - |  |

Columna C-2

Tabla 65. Evolución de la resistencia - Columna C-2

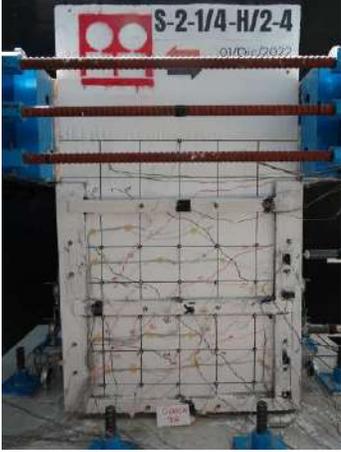
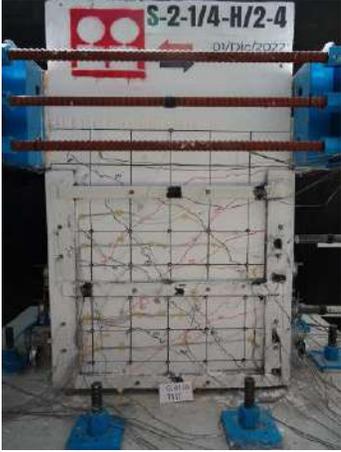
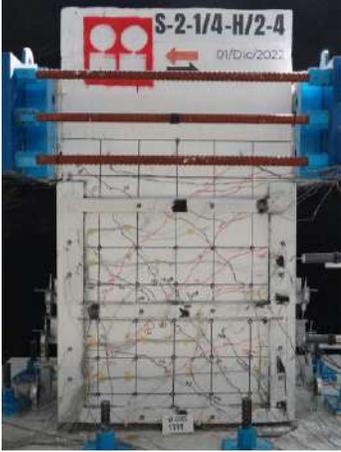
| Distorsión (%) | V _{máx} (t) | Estado del daño |
|----------------|----------------------|--|
| 0.5% | 37.64 |  |
| 1% | 69.06 |  |

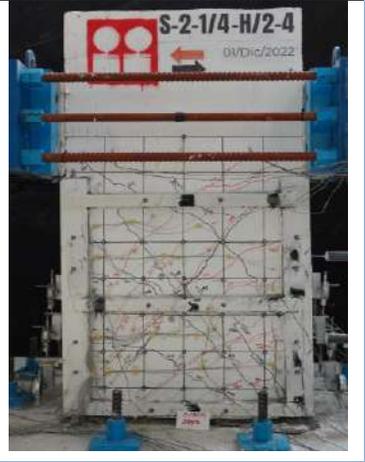
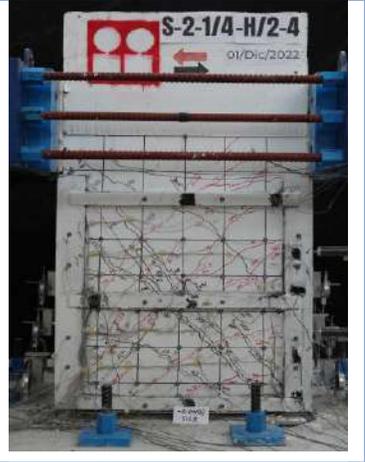
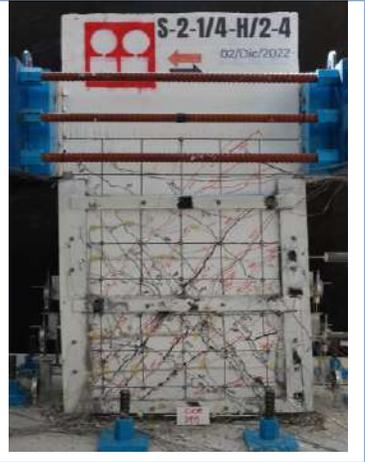
| Distorsión (%) | $V_{\text{máx}}$ (t) | Estado del daño |
|----------------|----------------------|--|
| 2% | 84.01 |  |
| 3% | 74.95 |  |
| 4% | 59.59 |  |

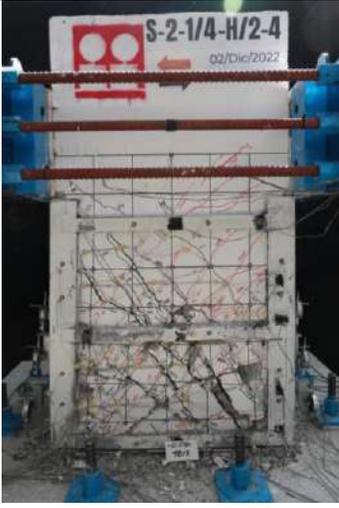
| Distorsión (%) | $V_{\text{máx}}$ (t) | Estado del daño |
|----------------|----------------------|--|
| 5% | 32.84 |  |
| 6% | 13.13 |  |
| Estado Final | - |  |

Columna C-4

Tabla 66. Evolución de la resistencia - Columna C-4

| Distorsión (%) | V _{máx} (t) | Estado del daño |
|----------------|----------------------|--|
| 0.5% | 40.79 |  |
| 1% | 70.21 |  |
| 2.5% | 93.78 |  |

| Distorsión (%) | $V_{m\acute{a}x}$ (t) | Estado del da\~no |
|----------------|-----------------------|--|
| 3% | 91.18 |  |
| 4% | 86.03 |  |
| 5% | 66.37 |  |

| Distorsión (%) | $V_{m\acute{a}x}$ (t) | Estado del da\~{n}o |
|----------------|-----------------------|---|
| 6% | 38.19 |  |
| Estado Final | - |  |

5.3 Rigidez

La rigidez se refiere a la capacidad de la columna para resistir deformaciones bajo la carga lateral aplicada. Se define como la relaci3n entre la carga lateral y la distorsi3n de la columna.

Una columna r\~{i}gida tender\~{a} a experimentar una menor deformaci3n bajo una carga determinada, manteniendo su forma y resistencia en mayor medida. Por otro lado, una columna menos r\~{i}gida se deforma m\~{a}s f\~{a}cilmente lo que puede afectar su estabilidad y resistencia. Una columna m\~{a}s r\~{i}gida ser\~{a} capaz de resistir cargas mayores sin sufrir da\~{n}os significativos.

La rigidez se puede calcular como la pendiente de la curva carga-distorsión. Los resultados de este estudio experimental sobre la rigidez de los especímenes ensayados pueden ser utilizados para desarrollar modelos analíticos para predecir la respuesta de elementos estructurales ante cargas similares.

5.3.1 Degradación de la rigidez

La degradación de rigidez es la disminución de la rigidez de la columna a medida que se aplica la carga lateral repetidamente.

Dentro de los factores que producen la degradación de la rigidez están:

- El agrietamiento del concreto: el agrietamiento del concreto reduce la sección transversal efectiva de la columna, lo que reduce su rigidez.
- La fluencia del acero de refuerzo: la fluencia del acero de refuerzo reduce la resistencia del refuerzo, lo que también reduce la rigidez de la columna.

La degradación de rigidez puede tener un impacto significativo en la capacidad de una columna para resistir cargas laterales. Una columna con una rigidez degradada puede ser incapaz de resistir cargas laterales tan grandes como una columna que no ha experimentado degradación de rigidez.

5.3.1.1 Rigidez de ciclo

Para poder observar de mejor manera la degradación de la rigidez, se hace el análisis de la rigidez de ciclo, que evalúa este parámetro en cada ciclo de carga. En búsqueda de realizar las curvas correspondientes a este método, se aplica la siguiente ecuación para aplicar el mismo procedimiento que en el Informe Técnico Parcial del estudio experimental de columnas de concreto (Alcocer y otros, 2023).

$$k_c = \frac{V^+ + |V^-|}{R^+ + |R^-|}$$

k_c rigidez de cada ciclo

V^+ carga lateral máxima del semiciclo positivo

V^- carga lateral máxima del semiciclo negativo

R^+ distorsión asociada a la carga lateral máxima del semiciclo positivo V^+

R^- distorsión asociada a la carga lateral máxima del semiciclo negativo V^-

A continuación se muestra la Fig. 5.3.1 que detalla la degradación de rigidez por ciclo de cada una de las columnas ensayadas:

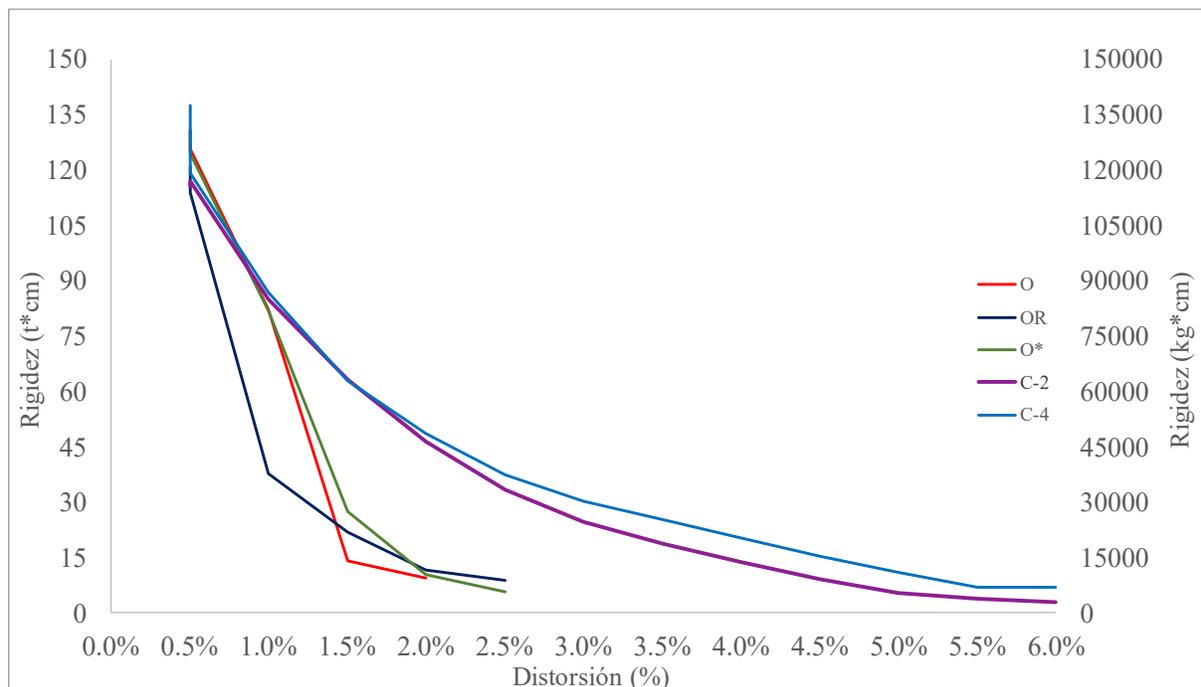


Fig. 5.3.1 Rigidez de ciclo del programa experimental

La figura anterior permite observar que las columnas de control sin camisas presentaron un deterioro de la rigidez similar, lo cual se repite con las columnas encamisadas, se aprecian curvas con pequeñas variaciones en los valores de la rigidez al término de la prueba.

A continuación, en la Tabla 67 se muestra la evolución de la degradación de la rigidez a lo largo de las distorsiones aplicadas en el ensaye. Se consideró la máxima rigidez en el ciclo con distorsión de 0.5%, por lo que en la primera degradación de rigidez se tomará como 0% por ser el valor original y posteriormente los valores indicarán que porcentaje respecto al valor máximo se conservó.

Tabla 67. Resumen de la degradación de rigideces

| Distorsión (%) | O | OR | O* | C-2 | C-4 |
|-----------------------|----------|-----------|-----------|------------|------------|
| 0.5% | | | | | |
| 1% | 63% | 31% | 63% | 74% | 63% |
| 1.5% | 11% | 18% | 21% | 55% | 46% |
| 2% | 7% | 9% | 8% | 40% | 35% |
| 2.5% | - | 7% | 4% | 29% | 27% |
| 3% | - | - | - | 21% | 22% |
| 3.5% | - | - | - | 16% | 18% |
| 4% | - | - | - | 12% | 15% |
| 4.5% | - | - | - | 8% | 11% |
| 5% | - | - | - | 4% | 8% |
| 5.5% | - | - | - | 3% | 5% |
| 6% | - | - | - | 2% | 5% |

Al evaluar los resultados, se observa que de las columnas de concreto simples, la que mayor degradación de la rigidez tuvo fue la O*, conservando sólo 4% de su rigidez al final de la prueba. En cuanto a las columnas encamisadas, la columna C-2 tuvo una mayor pérdida de rigidez, lo cual se le puede atribuir a la colocación de un ángulo con ancho de ala menor respecto a la columna C-4, que al final del ensaye conservó el 5% de su rigidez

5.4 Disipación de energía

Este apartado sigue la misma metodología que la indicada en la tesis titulada: "Efecto del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería confinada ante cargas laterales" (Aguilar, 1997).

Según Gerardo Aguilar, la interpretación gráfica de la energía de deformación se obtiene a través del cálculo del área delimitada por la envolvente en cada ciclo aplicado a los especímenes. A diferencia de la propuesta hecha por Aguilar (1997), se optó por realizar los cálculos de la siguiente manera, respetando el principio del cálculo del área en las envolventes:

- Primeramente se trazó la curva envolvente de cada ciclo, la cual fue formada por dos curvas; una positiva y una negativa (Fig. 5.4.1).

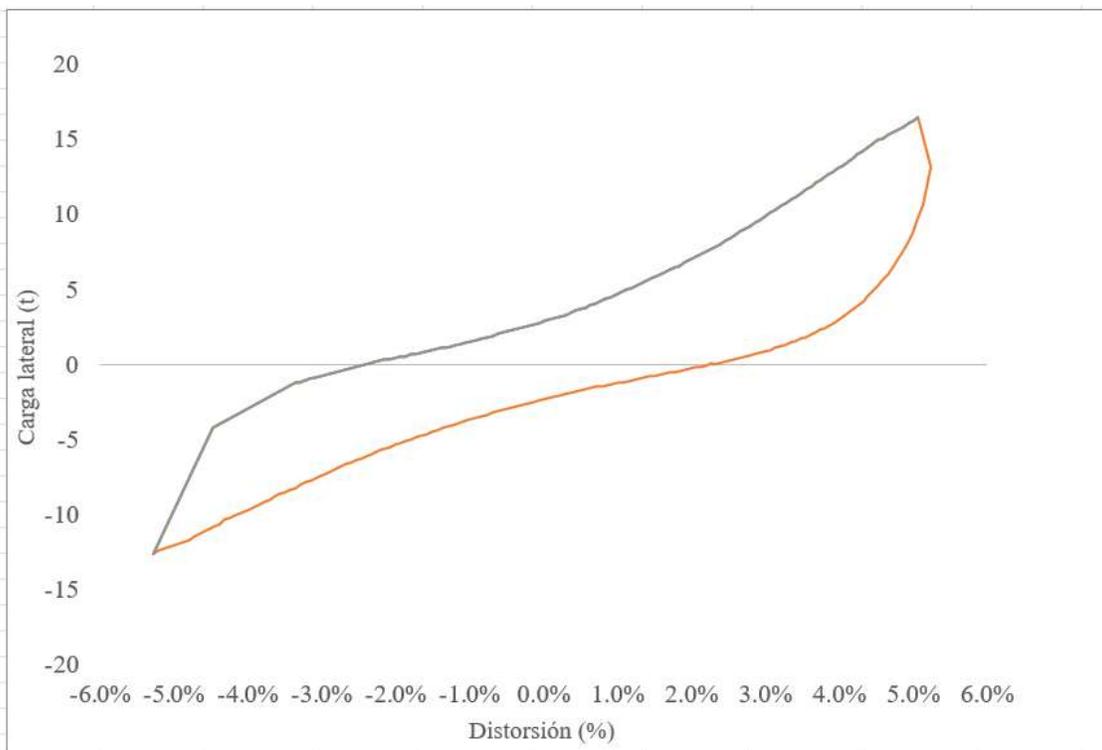


Fig. 5.4.1 Ejemplo del trazo de ciclo – Disipación de energía

- Con ayuda de las herramientas de Excel, se procedió a trazar y calcular la ecuación de las líneas de tendencia de las dos curvas envolventes (Fig. 5.4.2).

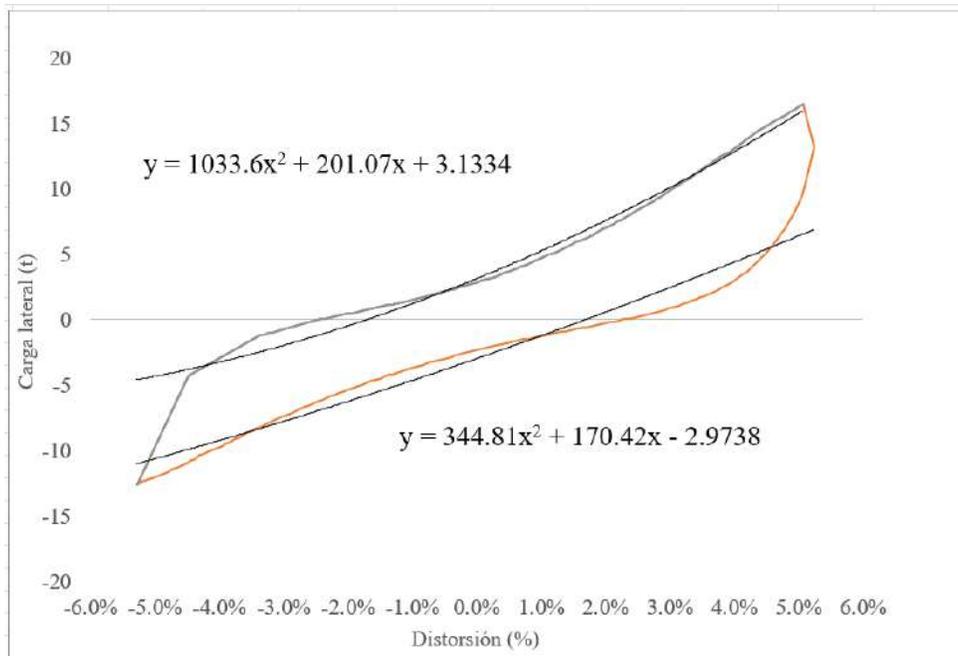


Fig. 5.4.2 Ecuación y líneas de tendencia - Disipación de energía

- Después se ubicaron las distorsiones máximas en sentido negativo y positivo (Fig. 5.4.3).

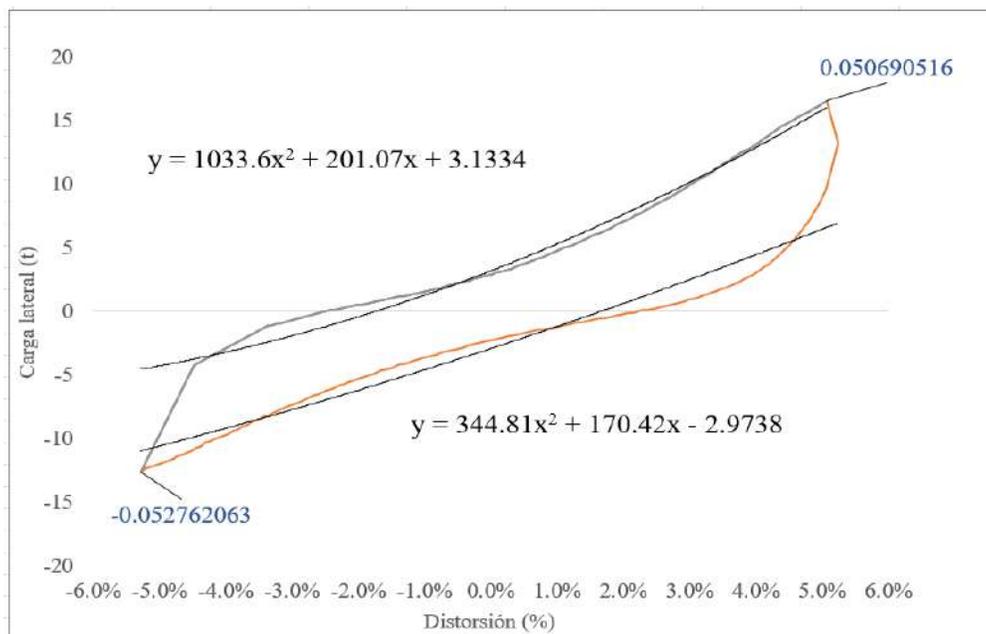


Fig. 5.4.3 Distorsiones máximas - Disipación de energía

- Posteriormente, se procedió a realizar el cálculo del área bajo las dos curvas con ayuda de integrales definidas, resueltas con valores iniciales y finales las distorsiones máximas ubicadas en cada ciclo, cabe mencionar que para hacer más precisos los cálculos se parte a la mitad cada curva. Lo anterior se puede observar a continuación:

-

Curva 1

$$\int_0^{0.050690516} 1033.64x^2 + 201.7x + 3.13 = 0.45169 \text{ t} * \text{mm}$$

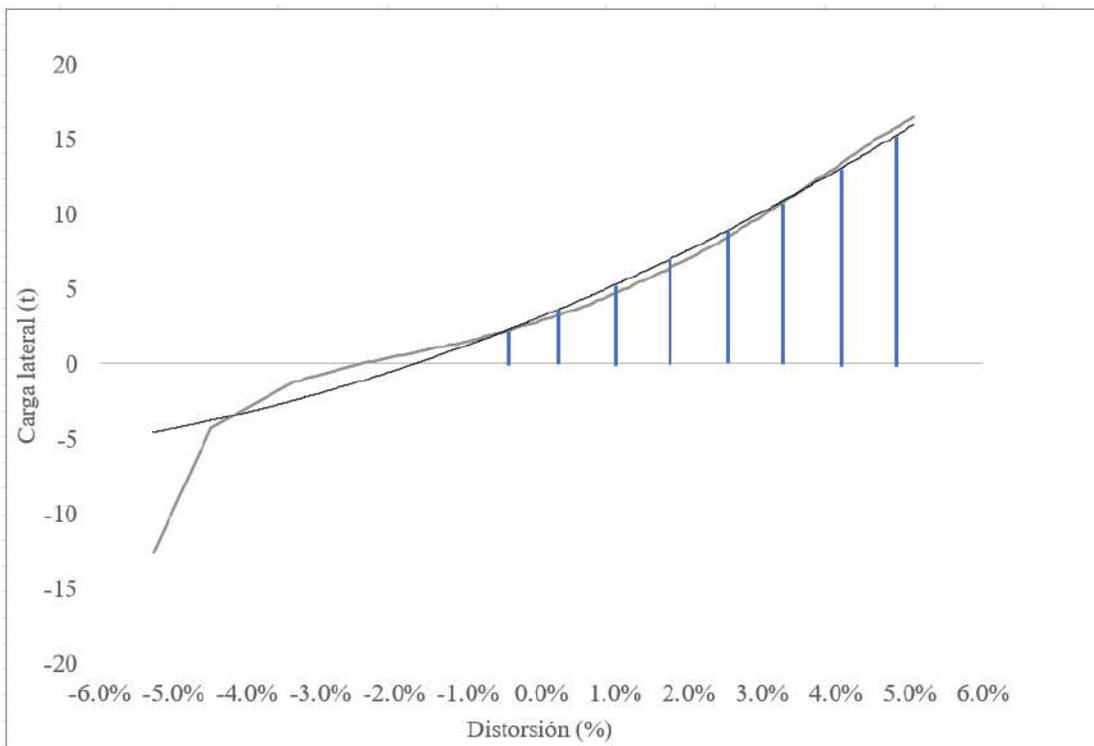


Fig. 5.4.4 Primera parte del área bajo la curva 1 – Disipación de energía

$$\int_{-0.052762063}^0 1033.64x^2 + 201.7x + 3.13 = 0.06499 \text{ t} * \text{mm}$$

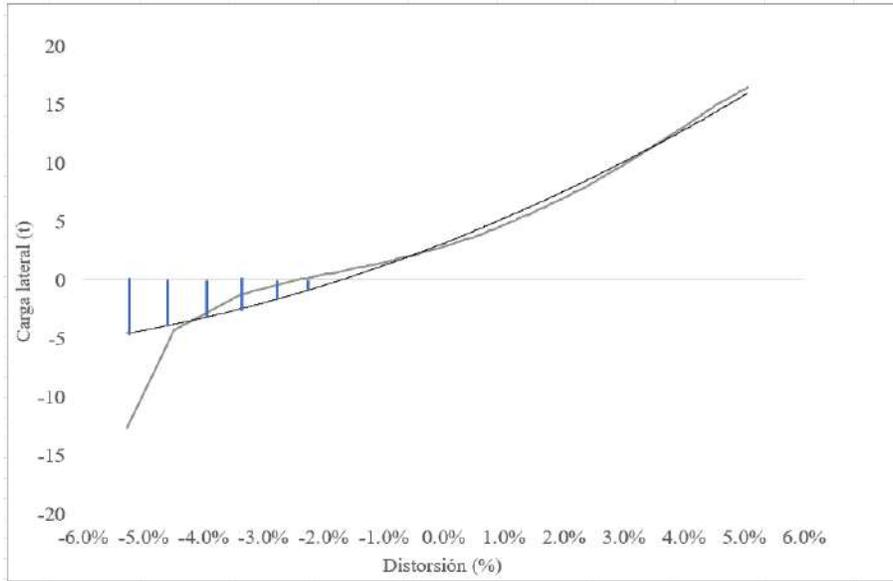


Fig. 5.4.5 Segunda parte del área bajo la curva 2 – Disipación de energía

Curva 2

$$0.050690516 \int_0^{\quad} 344.81x^2 + 170.42x - 2.97 = 0.08336 t * mm$$

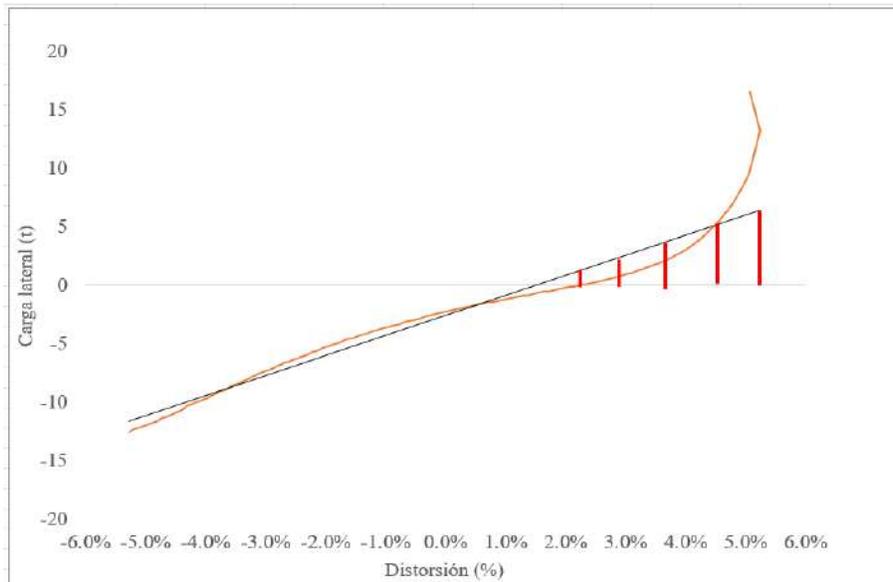


Fig. 5.4.6 Primera parte del área bajo la curva 2 – Disipación de energía

$$\int_{-0.502762063}^0 344.81x^2 + 170.42x - 2.97 = -0.37703 t * mm$$

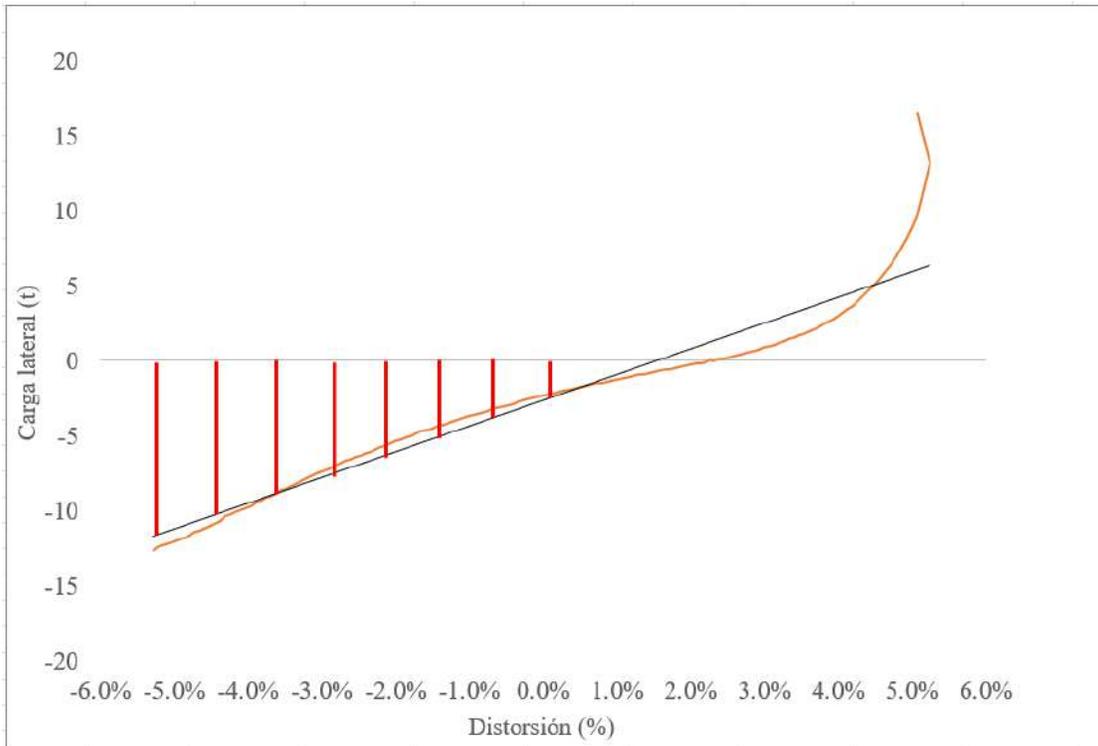


Fig. 5.4.7 Segunda parte del área bajo la curva 2 – Disipación de energía

- Con las áreas ubicadas, se procede a realizar la diferencia de áreas de la siguiente manera:

Se le resta la segunda parte del área bajo la curva 1 a la segunda parte del área bajo la curva 2 (Fig. 5.4.8 y Fig. 5.4.13).

$$\text{Área 1} = (-0.37703 t * mm) - (0.06499 t * mm) = -0.44202 t * mm$$

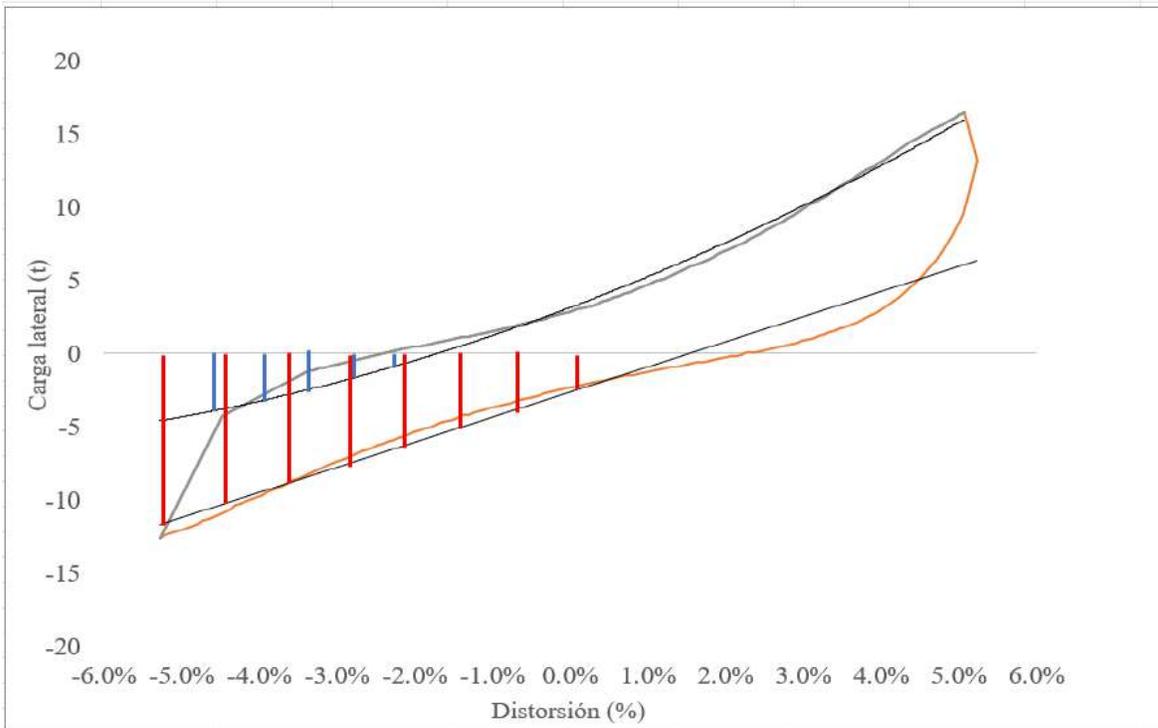


Fig. 5.4.8 Diferencia de las áreas bajo la curva sección 1 - Disipación de energía

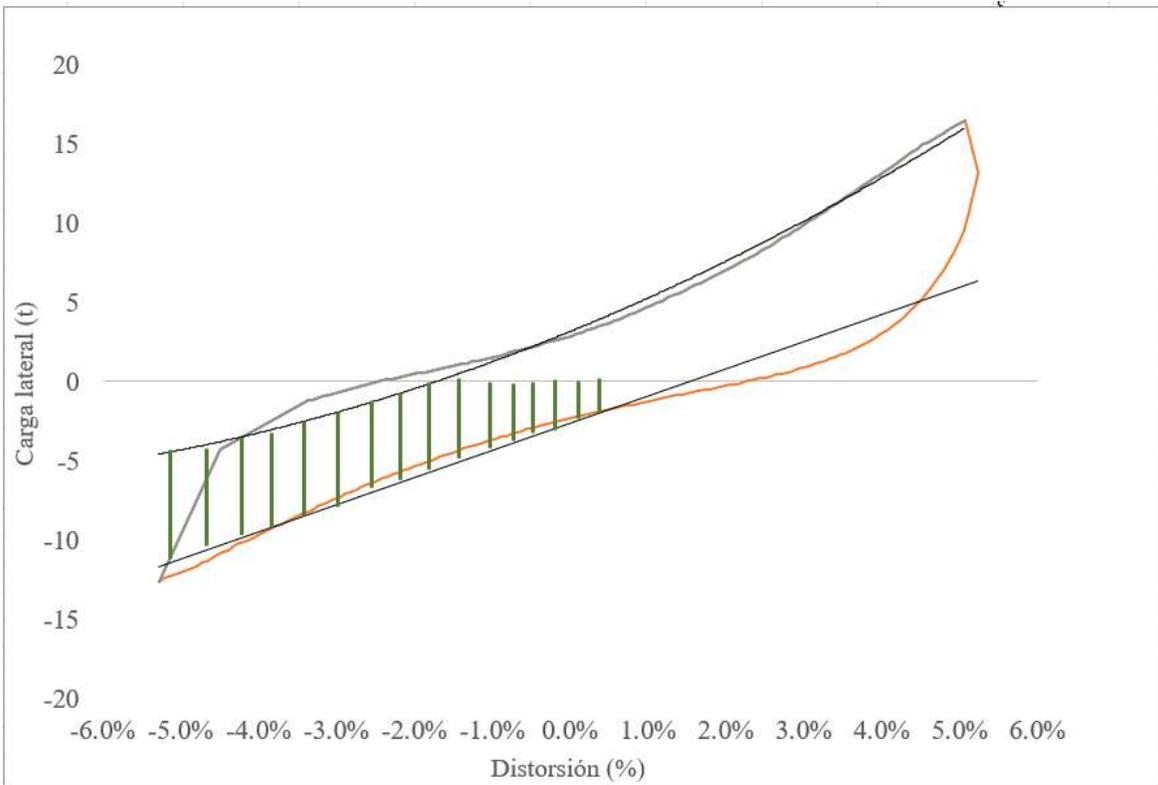


Fig. 5.4.9 Área de la primera sección - Disipación de la energía

En la segunda parte de las curvas, se aplica el mismo procedimiento que en la primera parte, sin embargo ahora la resta se invierte, restándole el área bajo la segunda curva a la primera.

$$\text{Área 2} = (0.45169 \text{ t} * \text{mm}) - (0.08336 \text{ t} * \text{mm}) = 0.36833 \text{ t} * \text{mm}$$

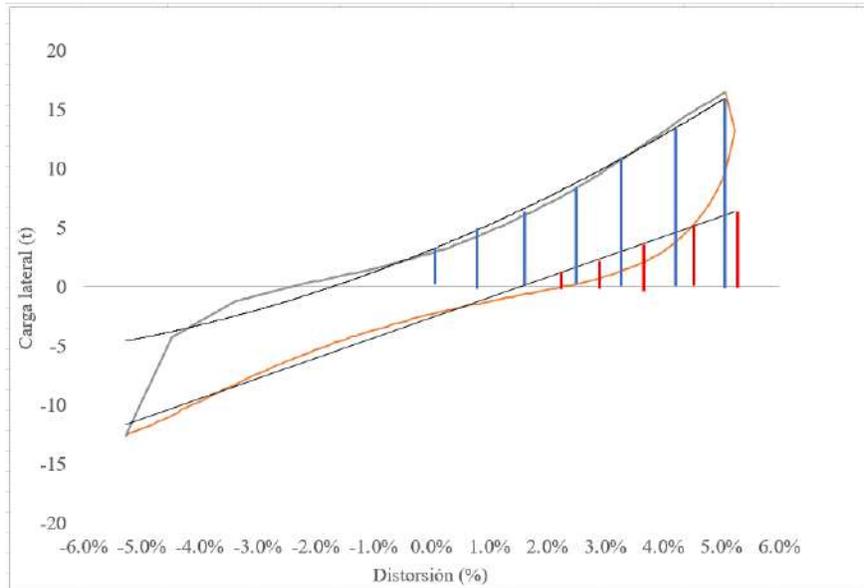


Fig. 5.4.10 Diferencia de las áreas bajo la curva sección 2 - Disipación de energía

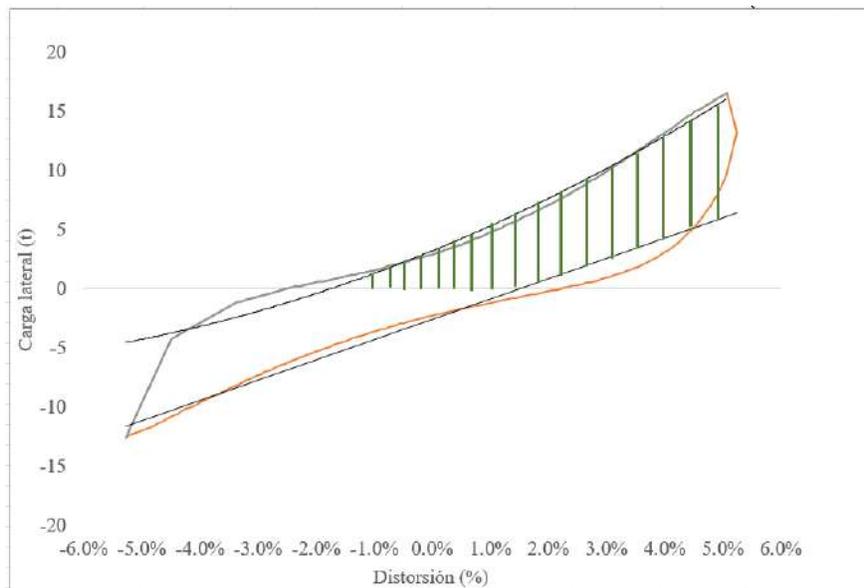


Fig. 5.4.11 Área de la segunda sección - Disipación de la energía

Finalmente, se realiza la suma absoluta del área de las dos secciones, lo que resulta en la obtención del área del ciclo (Fig. 5.4.12).

$$\text{Área 1} + \text{Área 2} = |(-0.44202 t * mm) + (0.36833 t * mm)| = 0.0737 t * mm$$

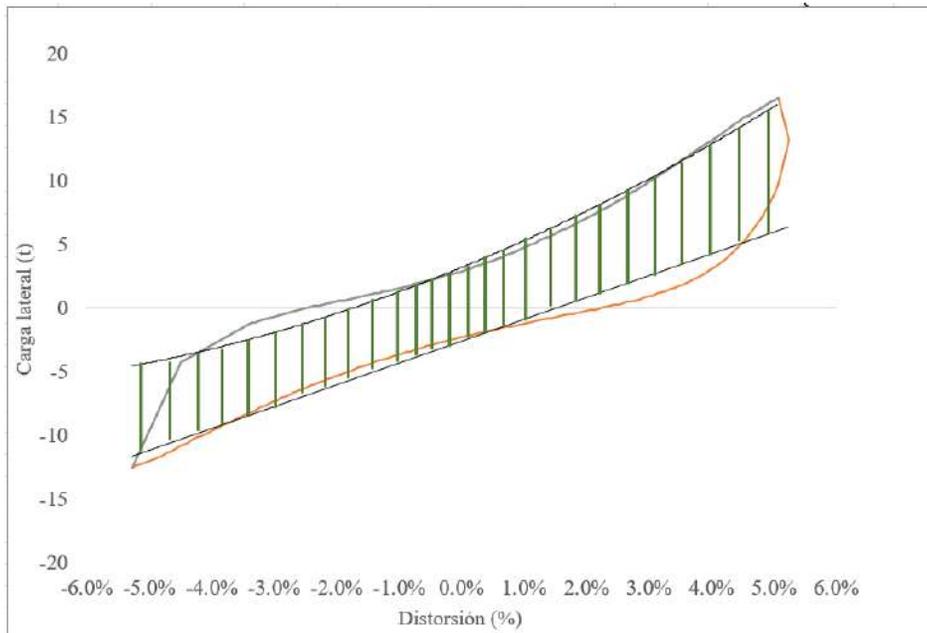


Fig. 5.4.12 Área total del ciclo - Disipación de energía

El procedimiento mencionado anteriormente se repitió en todos los ciclos registrados de cada columna. Luego, se vinculó la distorsión con su respectivo ciclo y se procedió a obtener una serie de puntos que permitió la generación de la gráfica completa de la disipación de energía de cada ensayo (Fig. 5.4.13).

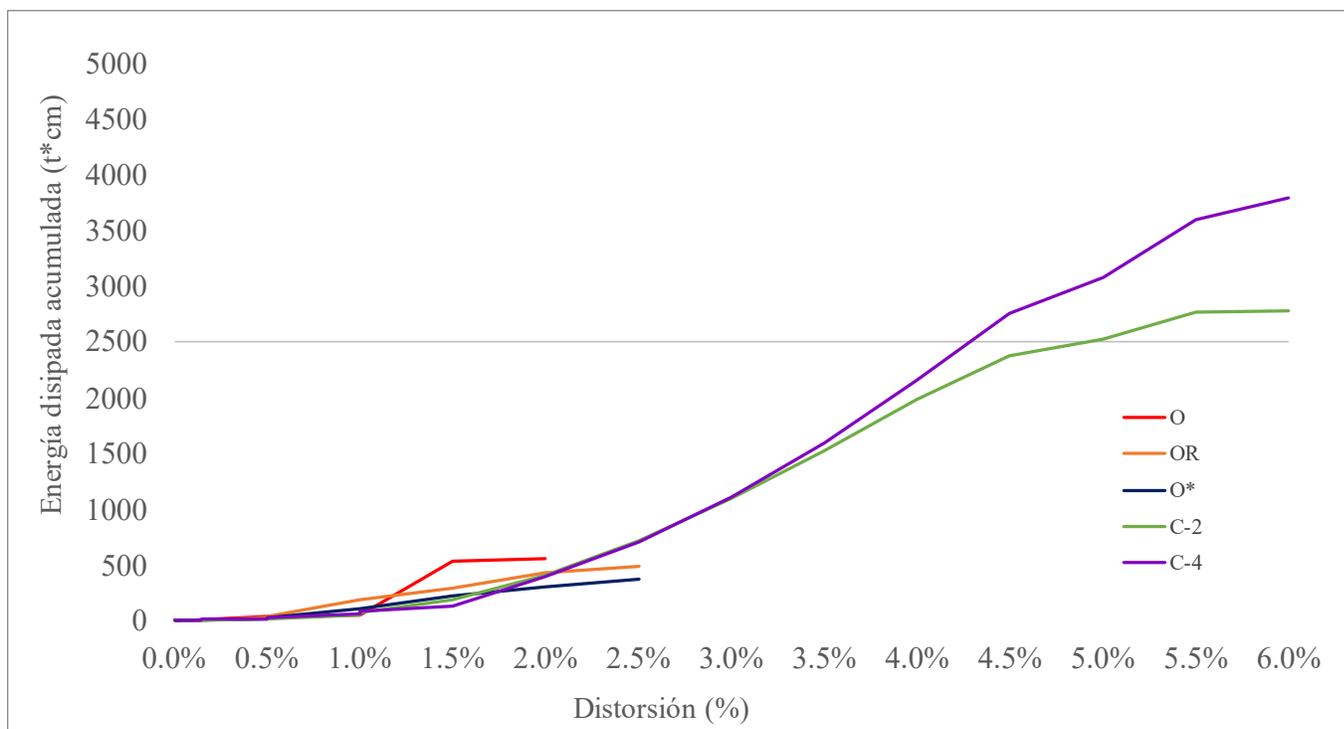


Fig. 5.4.13 Disipación de energía en los especímenes

La disipación de la energía tendió a aumentar conforme el desplazamiento lateral creció. Se observó que el orden de mayor a menor disipación de energía de las columnas fue el siguiente:

- C-4
- C-2
- O
- OR
- O*

5.5 Curvas idealizadas carga – distorsión

La construcción de curvas idealizadas carga – distorsión en el programa experimental sirve para representar la relación entre las variables que intervienen en el comportamiento de las columnas. Estas variables pueden ser el tipo de concreto, las dimensiones de la columna, el refuerzo, las condiciones de carga, entre otras.

Este tipo de gráficas se construyen a partir de los resultados de los ensayos experimentales. En estas gráficas, la resistencia a la compresión se representa en el eje vertical y la deformación en el eje horizontal.

La construcción de estas gráficas permite identificar la resistencia máxima y la ductilidad, así como comparar las similitudes de los resultados obtenidos teórica y prácticamente.

La obtención de este tipo de gráficas tiene los siguientes beneficios:

- Identificar las características del comportamiento de las columnas de concreto.
- Predecir el comportamiento de las columnas en condiciones de servicio.
- Facilitar el diseño y la evaluación de columnas de concreto.

El documento utilizado para la construcción de las curvas idealizadas fue el código de ACI 369-22 (American Concrete Institute, 2022).

Las curvas idealizadas (Fig. 5.5.2), se construyen con base en la siguiente tabla (Fig. 5.5.1):

| Modeling parameters | Acceptance criteria | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|
| | Plastic rotation angle, rad | | |
| | Performance level | | |
| | IO | LS | CP |
| Plastic rotation angles a_{nl} and b_{nl} , rad Residual strength ratio c_{nl} | Columns not controlled by inadequate development or splicing along the clear height [†] | | |
| $a_{nl} = \left(0.042 - 0.043 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} + 0.63 p_t - 0.023 \frac{V_{colE}}{V_{colOE}} \right) \geq 0.0$ | 0.15 $a_{nl} \leq 0.005$ | 0.5 $b_{nl} \leq 0.005$ | 0.7 $b_{nl} \leq 0.005$ |
| For $\frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} \leq 0.5$ $b_{nl} = \frac{0.5}{5 + \frac{N_{UD}}{0.8 A_g f'_{cE}} - \frac{1}{p_t} \frac{f'_{cE}}{f'_{yE}}} - 0.01 \geq a_{nl}$ | | | |
| $c_{nl} = 0.24 - 0.4 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} \geq 0.0$ | | | |
| Columns controlled by inadequate development or splicing along the clear height [‡] | | | |
| $a_{nl} = \left(\frac{1}{8} \frac{p_t f'_{yE}}{f'_{cE}} \right) \geq 0.0$ | 0.0 | 0.5 b_{nl} | 0.7 b_{nl} |
| $b_{nl} = \left(0.012 - 0.085 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} + 12 p_t \right) \geq 0.0$ [#] | | | |
| $c_{nl} = 0.15 + 36 p_t \leq 0.4$ | | | |

Fig. 5.5.1 Obtención de valores curva idealizada (American Concrete Institute, 2022)

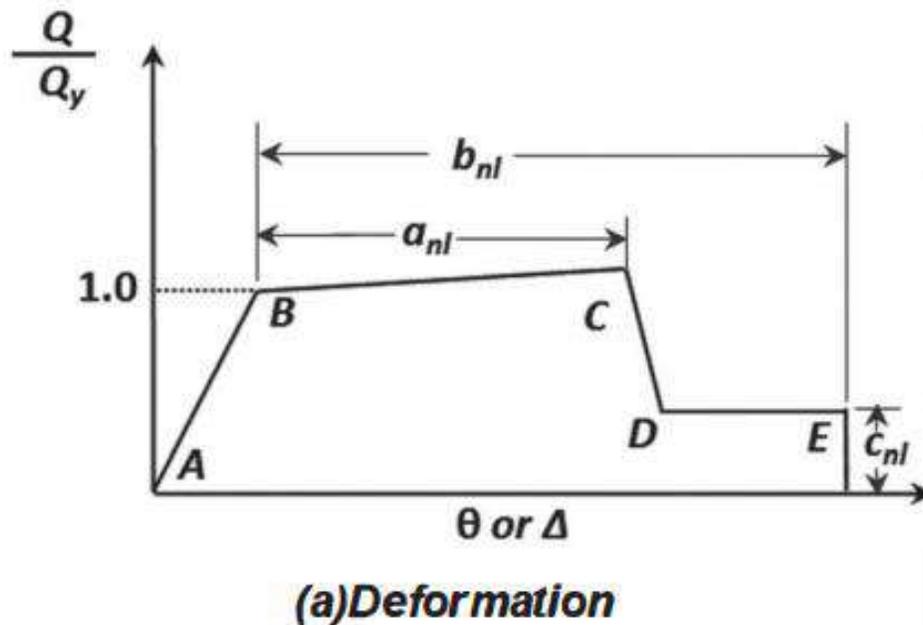


Fig. 5.5.2 Curva idealizada tipo (American Concrete Institute, 2022)

Se incluyen las curvas idealizadas y las experimentales de cada espécimen, así como una tabla resumen (Tabla 68) con la variación $(1-(V_{\text{calculada}}/V_{\text{máx}}) * 100[\%])$ los valores calculados y los experimentales:

Tabla 68. Tabla resumen de las curvas idealizadas contra las experimentales

| Columna | Variación porcentual entre los valores $V_{\text{máx}}$ (%) |
|---------|---|
| O | 19.7% |
| OR | 14.4% |
| O* | 3.2% |
| C-2 | 5.3% |
| C-4 | 4.8% |

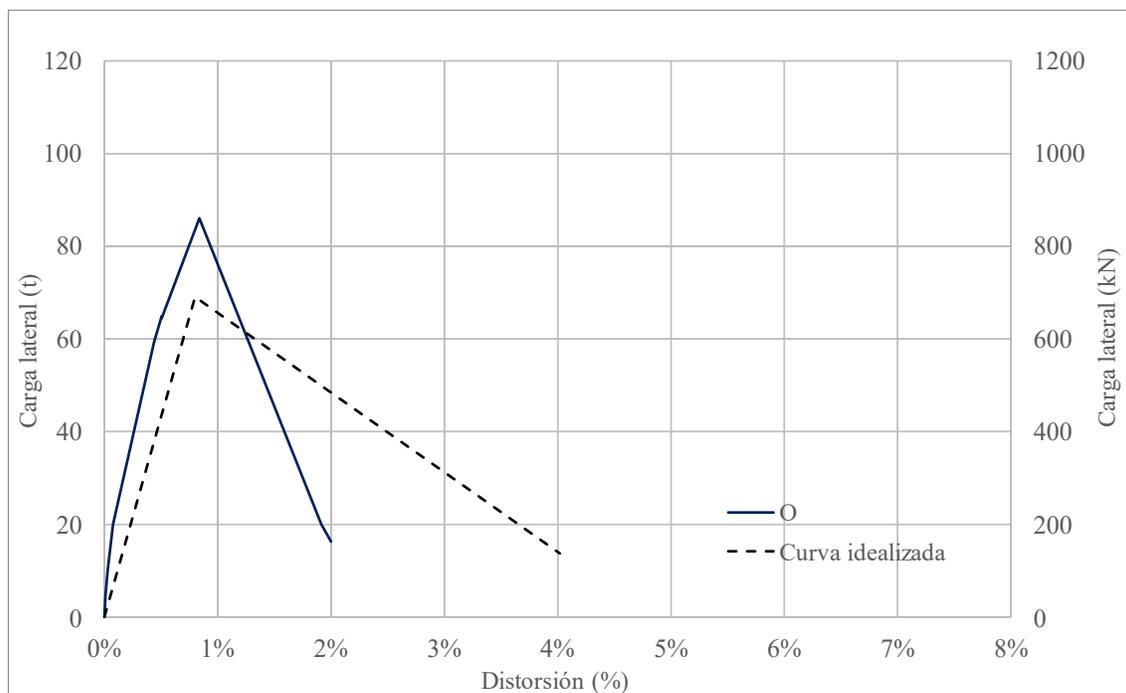


Fig. 5.5.3 Curva idealizada - Columna O

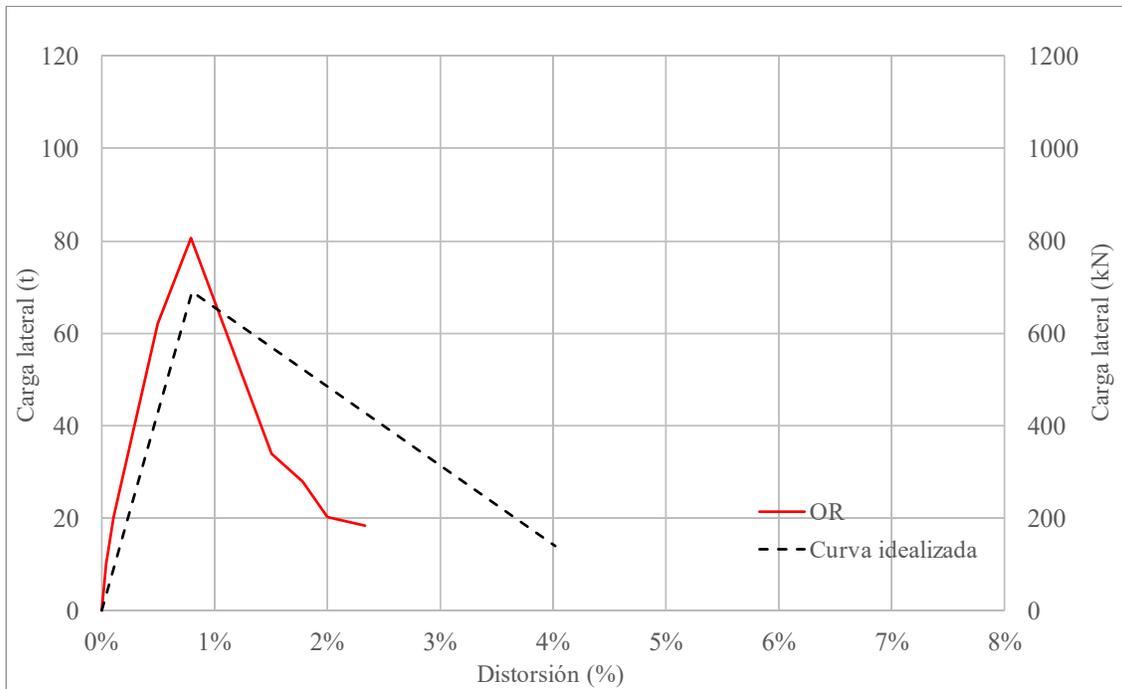


Fig. 5.5.4 Curva idealizada - Columna OR

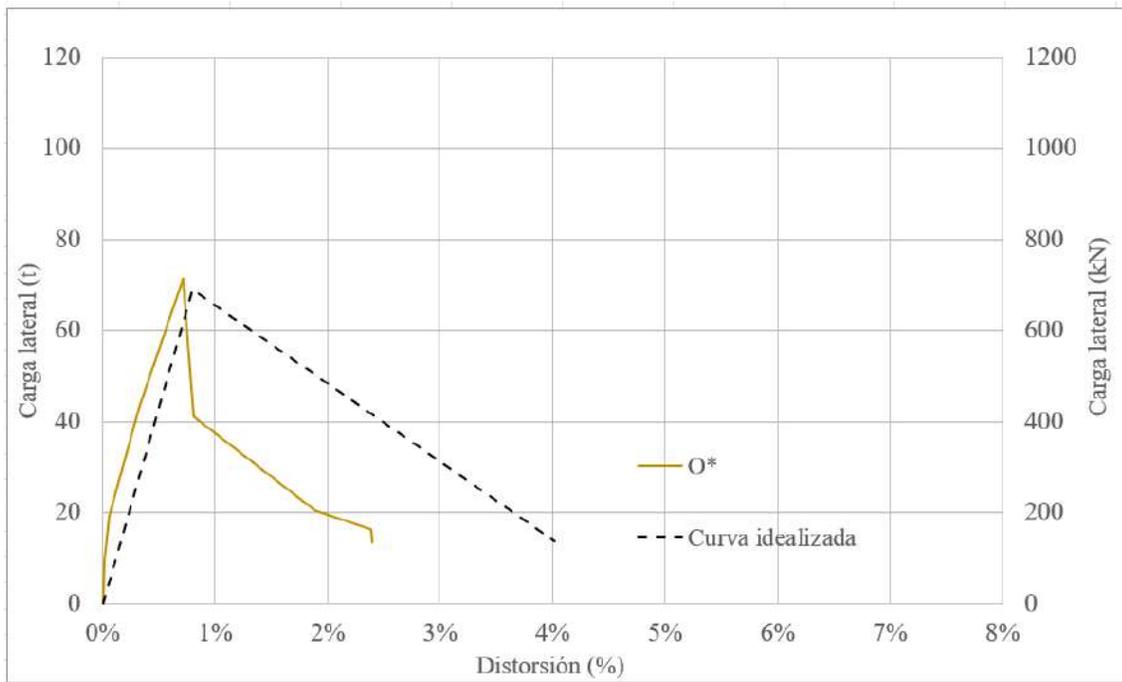


Fig. 5.5.5 Curva idealizada - Columna O*

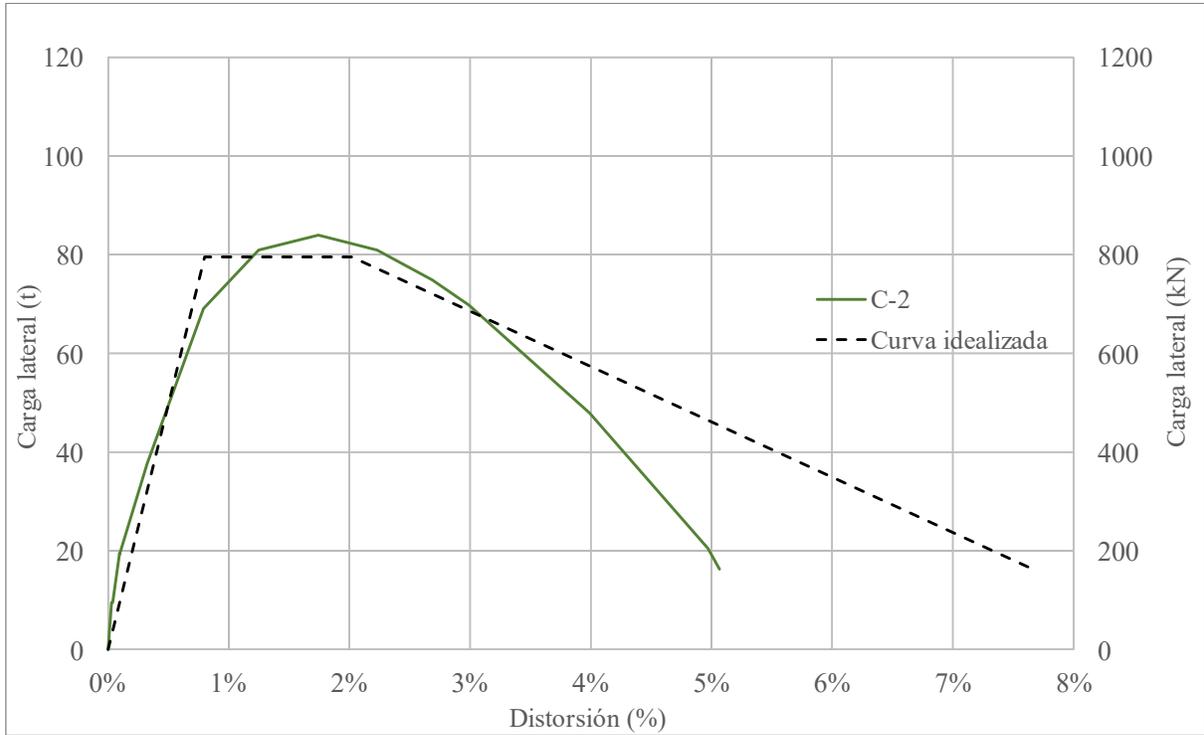


Fig. 5.5.6 Curva idealizada - Columna C-2

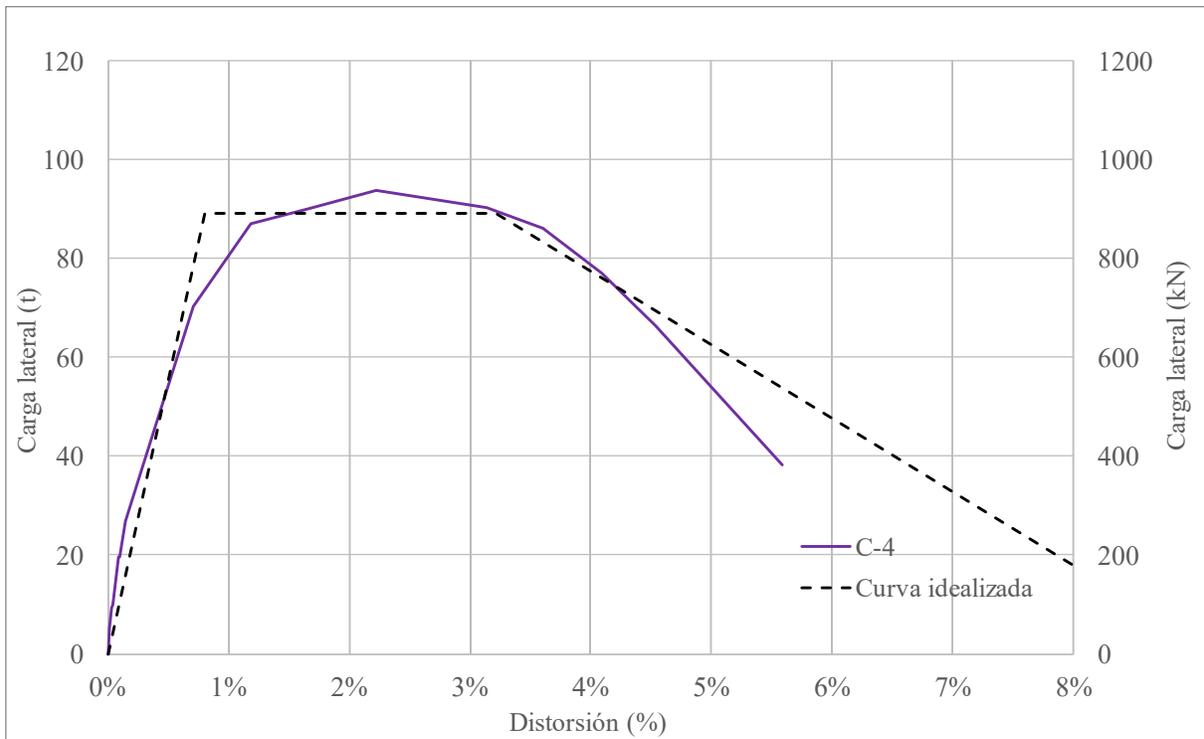


Fig. 5.5.7 Curva idealizada - Columna C-4

Las gráficas muestran que existen similitudes muy cercanas entre las columnas idealizadas y las columnas encamisadas, sin embargo, las columnas originales fueron las que presentaron las mayores variaciones.

5.6 Análisis del tipo de falla en los especímenes

En esta sección se aborda el análisis general de cada uno de los especímenes ensayados incluyendo su resistencia máxima, el comportamiento de la degradación de rigidez, las distorsiones a las que las barras del acero de refuerzo alcanzaron la fluencia y el tipo de falla.

Columna O

La columna O fue el primer modelo ensayado, el cual no contaba con camisa de acero y fue denominado como una de las tres columnas de control. Este espécimen registró una resistencia máxima de 86.05 t en la distorsión asociada a 1%. La pérdida de resistencia en el semiciclo inmediato fue de 50% respecto al valor máximo, coincidiendo con la pérdida de rigidez evidente en el espécimen.

En cuanto al comportamiento del acero de refuerzo, fueron colocados siete deformímetros internos funcionales, de los cuales únicamente fluyeron dos en la distorsión de -0.5% y 1%. En la Fig. 5.6.1 se observan las ubicaciones de los deformímetros funcionales y los que fluyeron:

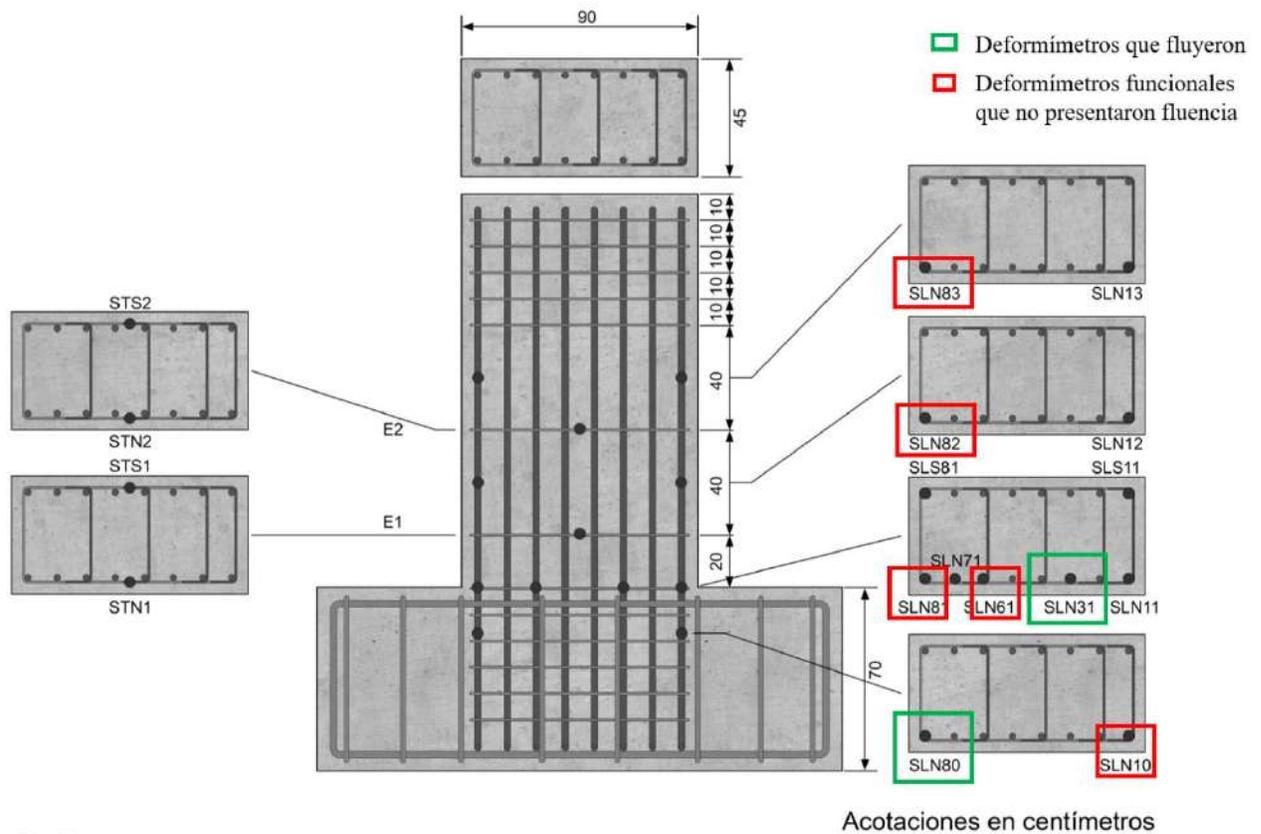


Fig. 5.6.1 Fluencia en deformímetros internos - Columna O

Finalmente, gracias a las gráficas de 5.5 se puede concluir que la columna O tuvo una falla a cortante, pues inmediatamente después de haber alcanzado su resistencia máxima, la caída de la resistencia fue súbita.

Columna OR

El modelo OR fue la segunda columna sin camisa ensayada, la cual fue la columna O rehabilitada mediante resina en las grietas y mortero tipo grout en donde la sección presentó daño en el concreto. La resistencia máxima alcanzada fue de 80.6 t en la distorsión de 1%. La degradación de la rigidez se presentó después del primer par de semiciclos con distorsión de 0.5%.

fue de 7% respecto al mayor valor. La pérdida de rigidez del modelo se presentó después del primer semiciclo con distorsión de 0.5%.

La instrumentación interna de la columna OR constó de 16 deformímetros, de los cuales 15 fueron funcionales antes de iniciar la prueba. Para la distorsión del 1%, 11 deformímetros funcionales habían fluido (Fig. 5.6.3).

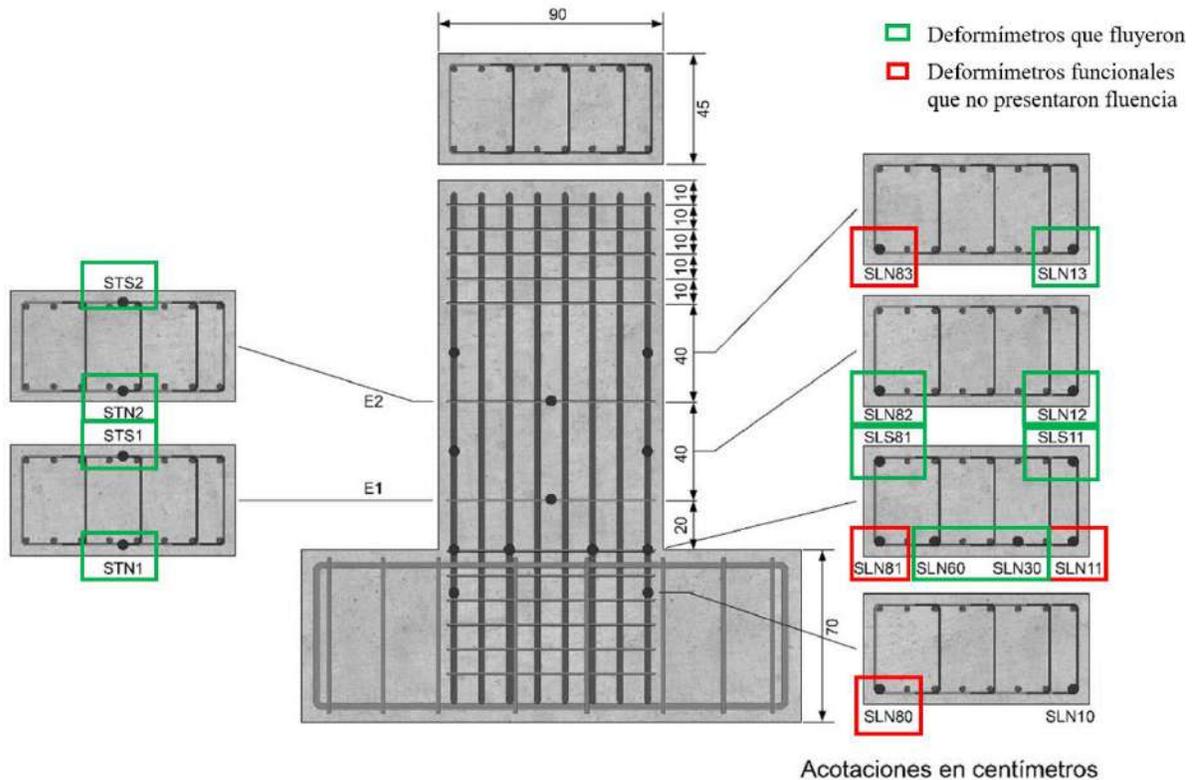


Fig. 5.6.3 Fluencia en deformímetros internos - Columna O*

El tipo de falla presentado en este modelo fue por cortante, ya que después de alcanzar su resistencia máxima los valores registrados cayeron abruptamente, sin embargo, después de la distorsión de 1%, la resistencia registrada se mantuvo estable.

Columna C-2

El espécimen C-2 se refiere a la primera columna encamisada con elementos metálicos. La camisa constó de soleras de ½" y ancho del ala del ángulo de

2". La resistencia máxima registrada fue de 84.01 t en la distorsión asociada al 2%, sin embargo, la pérdida de la rigidez se presentó a partir del inicio de los semiciclos con distorsión de 1%.

Fueron colocados 16 deformímetros internos de los cuales sólo dos no funcionaron correctamente al iniciar la prueba. En total ocho de los 16 deformímetros internos habían fluido en la distorsión de 2.5%.

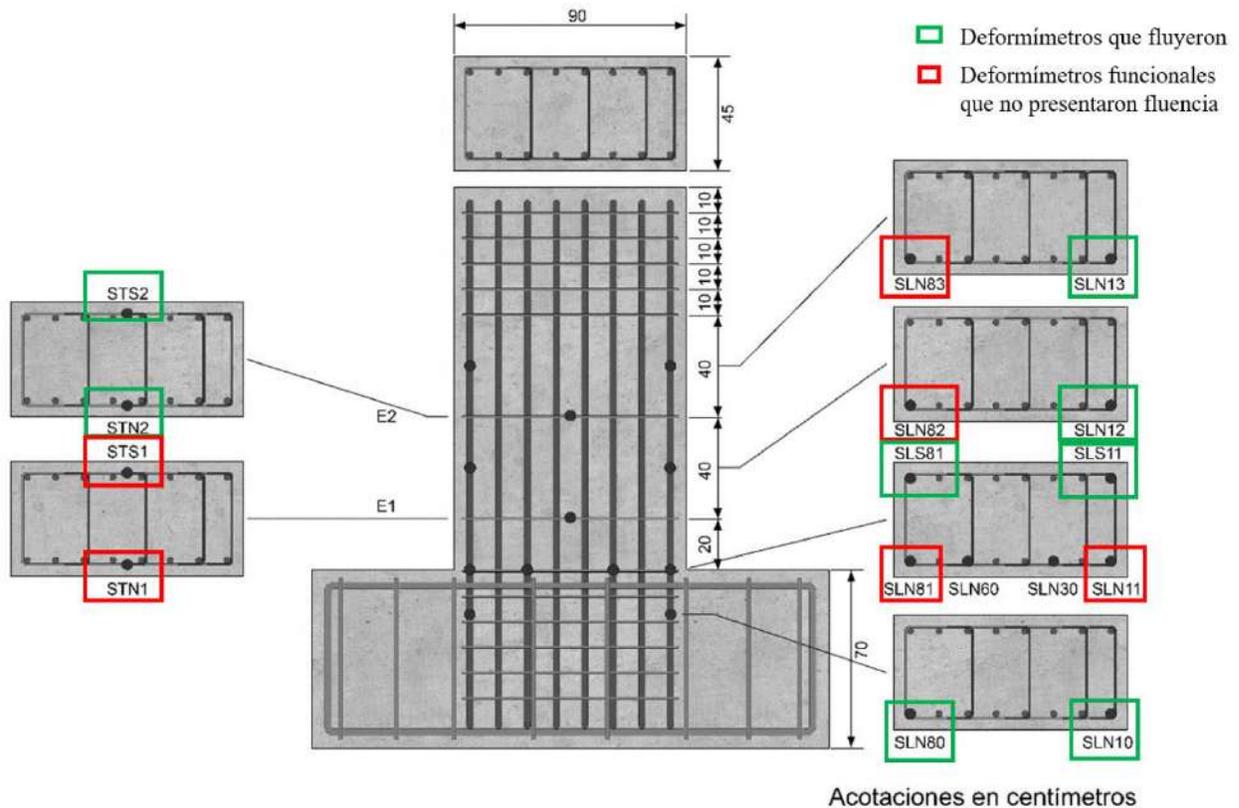


Fig. 5.6.4 Fluencia en deformímetros internos - Columna C-2

Al ser este modelo encamisado, se colocaron también deformímetros externos tipo deformímetros en los elementos que conformaron la camisa. Cabe mencionar que el encamisado aportó capacidad de resistencia a la columna, lo que se ahondará en la sección 6.

En la gráfica correspondiente a la columna C-2 en el apartado 5.5 se observa que la falla del espécimen fue flexo cortante. Después de haber alcanzado

la resistencia máxima, se observó la caída de la resistencia de manera parabólica.

Columna C-4

La columna C-4 fue la segunda columna encamisada con elementos metálicos y la quinta en ensayarse para el propósito de esta tesis. El modelo reportó una resistencia máxima de 93.78 t en la distorsión de 2.5% y su pérdida de rigidez se presentó después del primer par de semiciclos en la distorsión 0.5%.

Los deformímetros internos colocados en el modelo fueron 16, de los cuales únicamente 14 fueron funcionales. Para el final de la distorsión de 2.5%, siete deformímetros en el acero de refuerzo habían fluido.

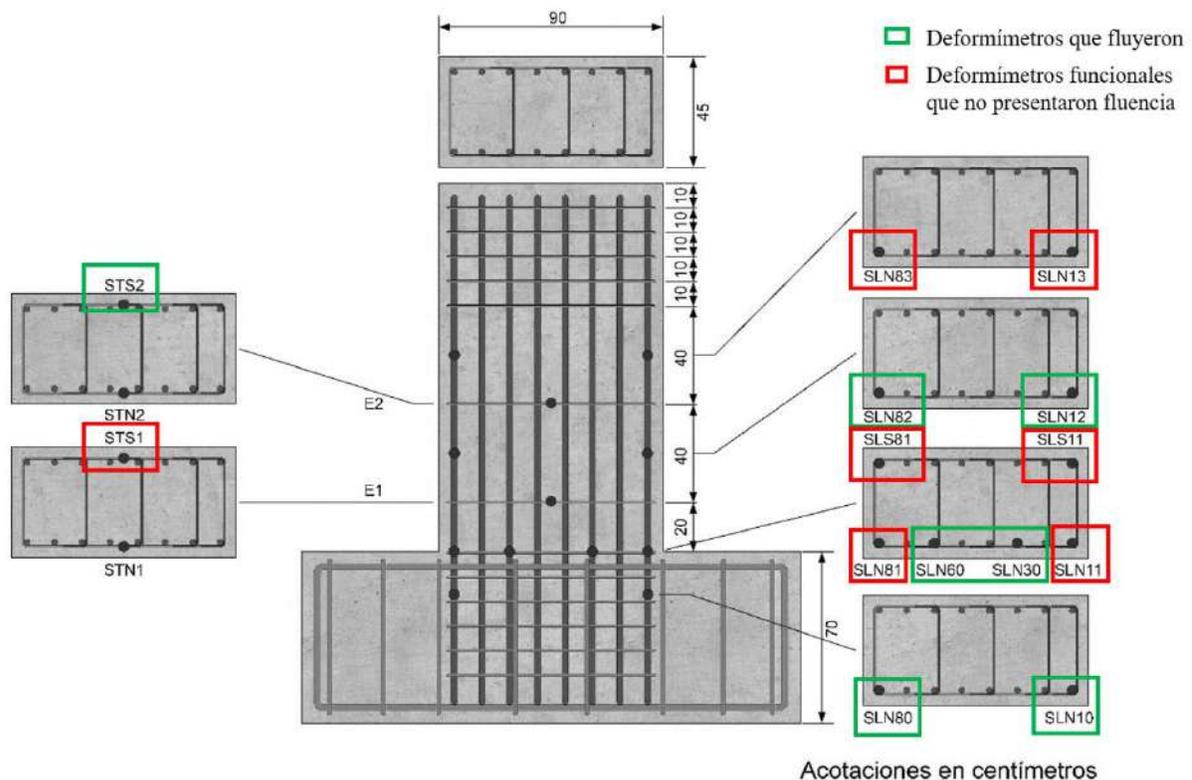


Fig. 5.6.5 Fluencia en deformímetros internos – Columna C-4

Al igual que la columna C-2, se profundizará sobre los deformímetros colocados en los encamisados en la sección 6.

Por último, el modo de falla del espécimen C-4 fue por flexo cortante, siendo de las dos columnas encamisadas el tipo de falla más evidente, pues después de haber alcanzado su mayor resistencia la pérdida de resistencia en los ciclos posteriores fue paulatinamente, como se observa en la gráfica correspondiente a esta columna en la sección 5.5.

6 EVALUACIÓN DE ENCAMISADOS METÁLICOS

En este último capítulo se realiza el análisis del comportamiento de los encamisados formados por elementos metálicos.

Las tres columnas que serán comparadas en 6.1 y 6.2 serán:

- O*
- C-2
- C-4

Se eligió la columna O*, ya que es el espécimen con los datos más concluyentes y con características compatibles para poder ser comparada con las columnas encamisadas, pues fue la primera columna sin daño previo y sin camisa que fue sometida a la carga lateral con dos gatos hidráulicos controlados por el sistema. Pese a la selección del modelo O*, el análisis de las columnas O y OR permitirán conocer y predecir el comportamiento de columnas de concreto en 6.3.

6.1 Efecto del tamaño de los ángulos

Al observar el comportamiento de los especímenes encamisados, estos compartieron características como:

- f_c' del concreto en la zapata y la columna
- Colocación de mortero tipo grout entre la camisa y la columna
- Distribución del acero de refuerzo
- Dimensiones de las soleras

Por lo anterior, los ángulos son el rasgo distintivo de cada una de las columnas.

Primeramente, se hace el análisis en la Tabla 69 de la resistencia de las tres columnas a comparar y la variación porcentual tomando como referencia el modelo O*:

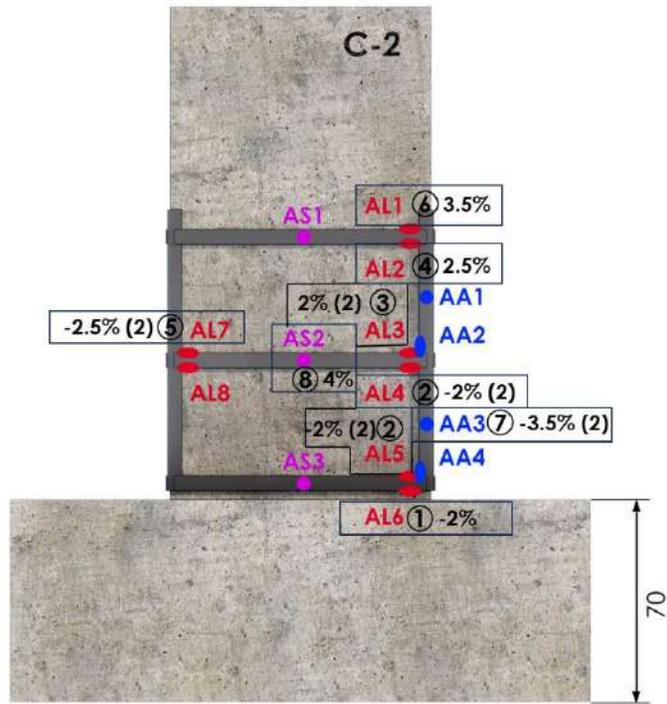
Tabla 69. Comparación de la resistencia - Efecto del tamaño de los ángulos

| Columna | $V_{\text{máx}}$ (t) | Variación (%) |
|---------|----------------------|---------------|
| O* | 71.35 | Referencia |
| C-2 | 84.01 | 17.74% |
| C-4 | 93.78 | 31.44% |

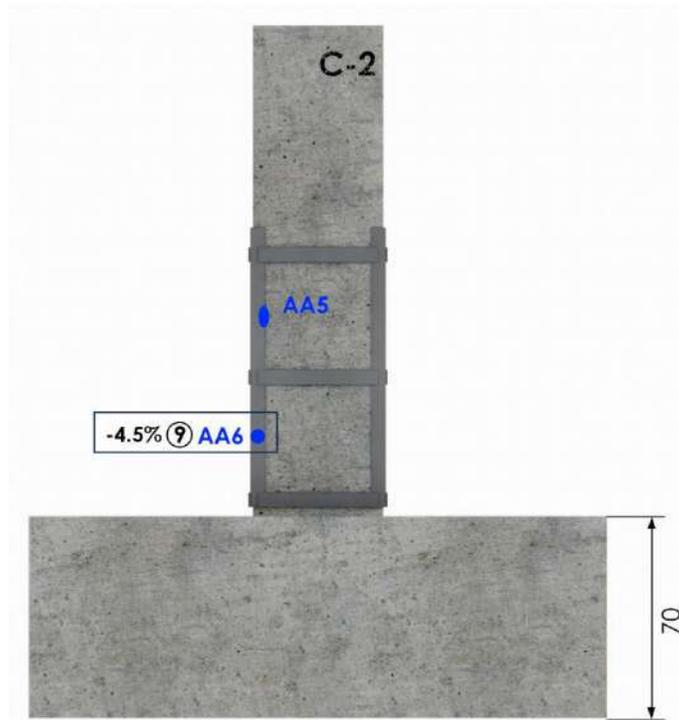
En resumen, la columna C-4 tiene una capacidad máxima de carga más alta en comparación con la columna C-2, y ambas superan significativamente la capacidad de carga de la columna de referencia O*. Por lo que se puede concluir que es evidente la aportación del ángulo a la resistencia de los especímenes.

A continuación, se compara la secuencia de fluencia de los encamisados de las columnas C-2 y C-4:

Primeramente, se incluyen las siguientes cuatro figuras que muestran el orden de fluencia de cada uno de los deformímetros.



Modelo S-2-1/4-d/2-2
Acotaciones en cm



Modelo S-2-1/4-d/2-2
Acotaciones en cm

Fig. 6.1.1 Orden de fluencia de los deformímetros en encamisado metálico - Columna C-2

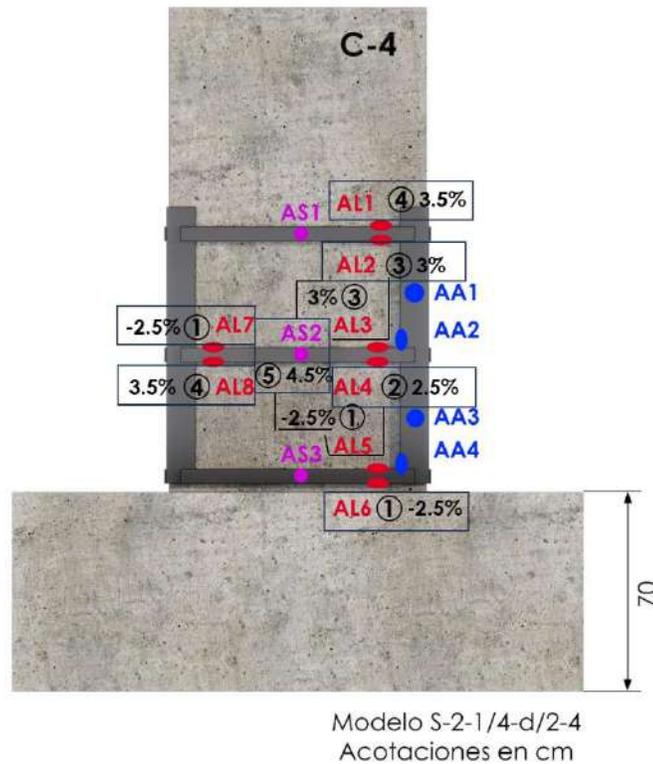


Fig. 6.1.2 Orden de fluencia de los deformímetros en encamisado metálico - Columna C-4

Saber cuál es el orden de la fluencia de los deformímetros permiten conocer cuales partes de los elementos de la camisa fueron los primeros en influir en el comportamiento de los especímenes. Pese a que el orden, brindó una premisa del comportamiento, la información que realmente aporta más detalles es la distorsión en la que este fenómeno ocurrió.

La Tabla 70 muestra el orden y la distorsión absoluta en la que cada uno de los deformímetros fluyó en las dos columnas:

Tabla 70. Comparación de la fluencia en cada espécimen

| Deformímetro | C-2 | | C-4 | |
|--------------|-------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| | Orden de fluencia | Distorsión de fluencia (%) | Orden de fluencia | Distorsión de fluencia (%) |
| AL6 | 1 | -2% | 1 | -2.5% |
| AL5 | 2 | -2% (2) | 1 | -2.5% |

| | | | | |
|-----|-----|-----------|-----|-------|
| AL4 | 2 | -2% (2) | 2 | 2.5% |
| AL3 | 3 | 2% (2) | 3 | 3% |
| AL2 | 4 | 2.5% | 3 | 3% |
| AL7 | 5 | -2.5% (2) | 1 | -2.5% |
| AL8 | N/A | N/A | 4 | 3.5% |
| AL1 | 6 | 3.5% | 4 | 3.5% |
| AA3 | 7 | -3.5% (2) | N/A | N/A |
| AS2 | 8 | 4% | 5 | -5% |
| AA6 | 9 | -4.5% | N/A | N/A |

Como se puede ver en la tabla, el orden de fluencia de los deformímetros fue muy similar, sin embargo se observa que la fluencia de las distorsiones aumentó en 0.5% en la columna C-4 respecto a la C-2. Por lo que el comportamiento de los encamisados de igual manera lo fue, pudiendo afirmar que la diferencia del espesor del ala del ángulo aporta una diferencia en la capacidad de resistencia de las columnas.

De igual manera, los resultados reflejados en la Tabla 70 muestran que en la columna C-4 los deformímetros comenzaron a fluir en un ciclo con distorsión mayor ($R=-2.5\%$) que en la columna C-2 ($R=-2\%$). Lo anterior coincidió cuando el último deformímetro fluyó en las columnas C-4 y C-2 con distorsiones de -5% y -4.5% .

Finalmente, se hace una evaluación visual de las dos columnas estudiadas en esta sección con las imágenes obtenidas del estado final después del término de los ensayos.

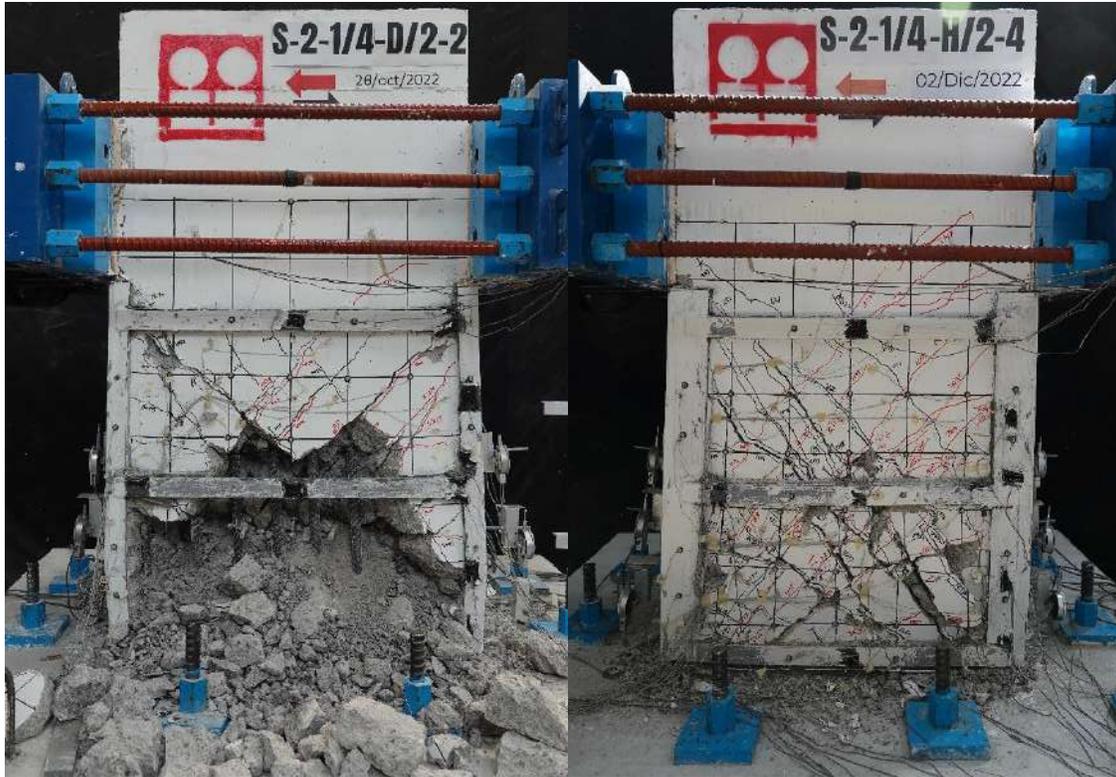


Fig. 6.1.3 Comparación del estado final del daño

Se observó que la columna C-2 presentó un nivel de daño mayor que la columna C-4, lo cual se puede apreciar en lo siguiente:

- Desprendimiento del concreto en el centro de la columna
- Desprendimiento de la pintura a base de cal en las soleras
- Deformación de los ángulos en su sección inferior

En el capítulo 7 se concluye sobre toda la información reportada en este subcapítulo.

6.2 Efecto de las soleras

En este apartado se ahonda en el efecto de las soleras y su comportamiento en las columnas encamisadas. Como primer punto se realiza el análisis de los deformímetros colocados en el centro de las soleras en cada columna.

A continuación se muestran las imágenes que incluyen la fluencia de los instrumentos:

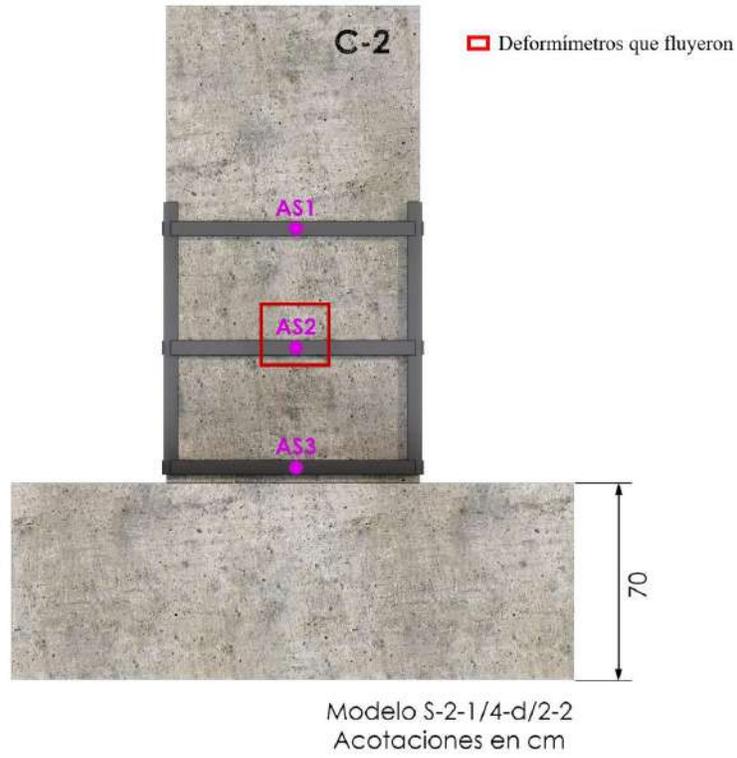


Fig. 6.2.1 Deformímetros que presentaron fluencia en las soleras - Columna C-2

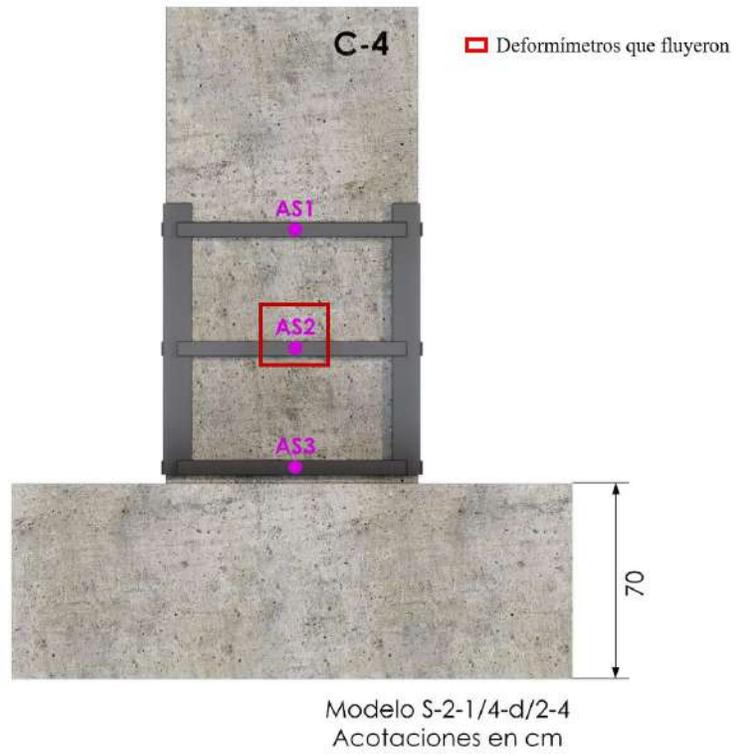


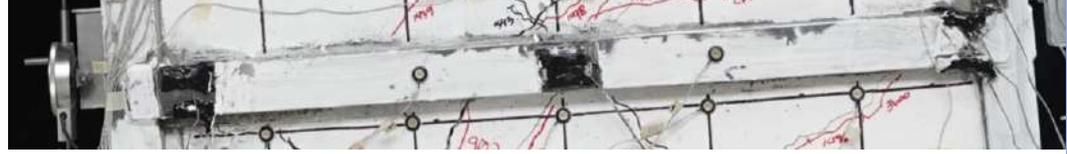
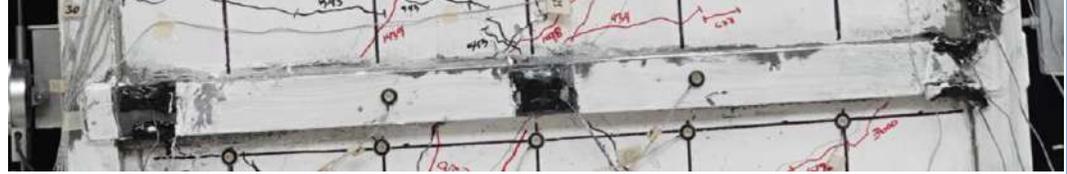
Fig. 6.2.2 Deformímetros que presentaron fluencia en las soleras - Columna C-4

Se observó que el único deformímetro colocado en la sección media de las soleras fue el AS2 en las dos columnas, lo cual es un indicador de su comportamiento y trabajo en los ensayos. Tomando en cuenta lo anterior se hace el análisis de la siguiente parte de este subcapítulo solo de las soleras intermedias.

Seguido, se lleva un registro de la caída de la pintura a base de cal en las camisas, lo que ayudó a poder apreciar de mejor manera la evolución del daño.

El primer registro de la caída de pintura a base de cal para la columna C-2 fue en el primer semiciclo positivo con distorsión de 2.5% y en la columna C-4 fue en el primer semiciclo con distorsión negativa de -3%.

Tabla 71. Evolución de la caída de la pintura a base de cal en las soleras – Columna C-2

| Distorsión | C-2 |
|------------|--|
| 2.5% |  |
| 2.5% (2) |  |
| -3% |  |
| 3% |  |
| -3% (2) |  |

| Distorsión | | C-2 |
|---|---|-----|
| 3% (2) |  | |
| -3.5% |  | |
| -4% |  | |
| -5% |  | |
| 6% |  | |
| Grout desprendido de la solera intermedia cara norte, columna C-2 |  | |

Tabla 72. Evolución de la caída de la pintura a base de cal en las soleras – Columna C-4

| Distorsión | | C-4 |
|------------|--|-----|
| -3% |  | |
| -3.5% (2) |  | |
| -4% |  | |

| Distorsión | | C-4 |
|------------|---|-----|
| 4% |  | |
| -4% (2) |  | |
| 4% (2) |  | |
| -4.5% |  | |
| -5% |  | |
| -6% |  | |

Se concluye que la columna C-4 fue la que presentó menor desprendimiento de la pintura a base de cal, menos desprendimiento de concreto en su ubicación y a diferencia de la columna C-2, el mortero tipo grout no tuvo una caída parcial en la solera.

6.3 Comportamiento de especímenes con encamisados metálicos

Una vez recopilados los datos de todos los capítulos previos, es posible la construcción de una ecuación de la línea de tendencia que permita predecir resultados con base los resultados obtenidos. La tendencia de comportamiento obtenida permitirá la comparación de lo reportado con la ecuación que involucra al tema en las NTC – 2023 (Gobierno de la Ciudad de México, 2023).

Partiendo de la observación del comportamiento de los modelos con encamisados de acero, se establece que la aportación de la resistencia a las columnas se debe al confinamiento de los ángulos. A mayor ancho del ala del ángulo, mayor resistencia y menor daño se puede esperar en un espécimen. En cuanto a las soleras, se concluye que al inicio de la prueba, su comportamiento fue a flexión en sus extremos, en doble curvatura, pero conforme el ensaye avanzó éste fue a tensión, permitiendo la modelación de las soleras como estribos de la columna. Sin embargo, es importante considerar que el confinamiento aportado por las soleras fue crucial, pues el encamisado necesitó de ángulos y soleras en conjunto para un buen desempeño. Las soleras restringieron el giro de los ángulos en la unión solera-ángulo. Por lo anterior, las ecuaciones presentadas, involucran directa y totalmente al ángulo como única variable en los sistemas predictivos presentados.

Primeramente, con la norma establecida en la NTC-2023 (Gobierno de la Ciudad de México, 2023) mostrada en la Fig. 6.3.1 se obtuvieron los resultados reportados en la Tabla 74.

- c) Resistencia a fuerza cortante:
- 1) Se aceptará que la resistencia a fuerza cortante de un encamisado de acero sea igual a la suma de las contribuciones del elemento original más la del encamisado de acero. Se desprejará la contribución de la columna existente cuando se cumpla cualquiera de i) o ii):

- i) Tenga daño severo, según el Capítulo 3 de esta Norma
- ii) Si la estructura fue diseñada con un Reglamento anterior a la versión de 1987.

- 2) Se permitirá usar cualquiera de los criterios i) o ii)

- i) Calcular la resistencia nominal a cortante de la columna encamisada, $V_{Col,enc}$, con la ec. 9.7.6.3.1.a, donde en la primera ecuación la resistencia está en N y en la segunda en kg:

$$V_{Col,enc} = k_{nt} \left[\alpha_{Col} \left(\frac{A_v f_{yt} d}{s} \right) + \lambda k_{conf} \left(\frac{0.5 \sqrt{f'_c}}{M_u/V_u d} \sqrt{1 + \frac{P_{UG}}{0.5 A_g \sqrt{f'_c}}} \right) 0.8 A_g \right]$$

(9.7.6.3.1.a)

$$\left(V_{Col,enc} = k_{nt} \left[\alpha_{Col} \left(\frac{A_v f_{yt} d}{s} \right) + \lambda k_{conf} \left(\frac{1.6 \sqrt{f'_c}}{M_u/V_u d} \sqrt{1 + \frac{P_{UG}}{1.6 A_g \sqrt{f'_c}}} \right) 0.8 A_g \right] \right)$$

donde el primer sumando se refiere a la contribución del refuerzo transversal existente; $k_{nt} = 1.0$ en regiones donde la demanda de ductilidad de desplazamiento es menor o igual que 2, 0.7 en regiones donde la demanda de ductilidad de desplazamiento es mayor o igual que 6, y varía linealmente para ductilidad de desplazamiento entre 2 y 6; $k_{conf} = (1.0 + (10/3)(l_a/h))$, en donde l_a es la longitud del ala de un ángulo, h es el peralte de la columna ambas en la dirección de la fuerza cortante y $0.06 \leq l_a/h \leq 0.20$; λ es 0.75 para concreto ligero y 1.0 para concreto de peso normal; $M_u/V_u d$ es la relación más grande entre el momento y la fuerza cortante en el eje neutro de la viga bajo cargas de diseño considerando la combinación de cargas permanentes y accidentales por sismo, pero no se tomará mayor que 4 ni menor que 2; y $\alpha_{viga} = 1.0$ para $s/d \leq 0.75$, 0 para $s/d \geq 1.0$ y varía linealmente para s/d entre 0.75 y 1.0. En columnas de edificios construidos antes de 1987, se aceptará suponer $k_{nt} = 1.0$

- ii) Calcular la contribución del encamisado de acero con la ec. 5.5.3.6.1.b de la NTC-Concreto, sustituyendo el área y separación de los estribos por los correspondientes de las soleras, multiplicando el valor obtenido por 0.40.
- 3) La resistencia nominal se deberá multiplicar por el F_R correspondiente
- 4) Se revisará que no se exceda el límite de fuerza cortante que pueda resistir el elemento de concreto existente
- 5) La separación centro a centro entre soleras no deberá exceder $0.5h$, donde h es la dimensión transversal de la columna en la dirección de análisis.

Fig. 6.3.1 Ecuación de la resistencia a fuerza cortante - NTC 2023

Para la segunda ecuación para el cálculo de la resistencia a fuerza cortante, se tomaron como punto de partida los valores obtenidos experimentalmente.

En la siguiente tabla (Tabla 73), se muestran los valores usados que tomaron parte para la construcción de la ecuación.

Tabla 73. Valores tomados para la construcción de la ecuación tendencia del programa experimental

| Columna | Ángulo [in] | V _{máx} (t) |
|---------|-------------|----------------------|
| O* | 0 | 71.35 |
| C-2 | 2 | 84.01 |
| C-4 | 4 | 97.78 |

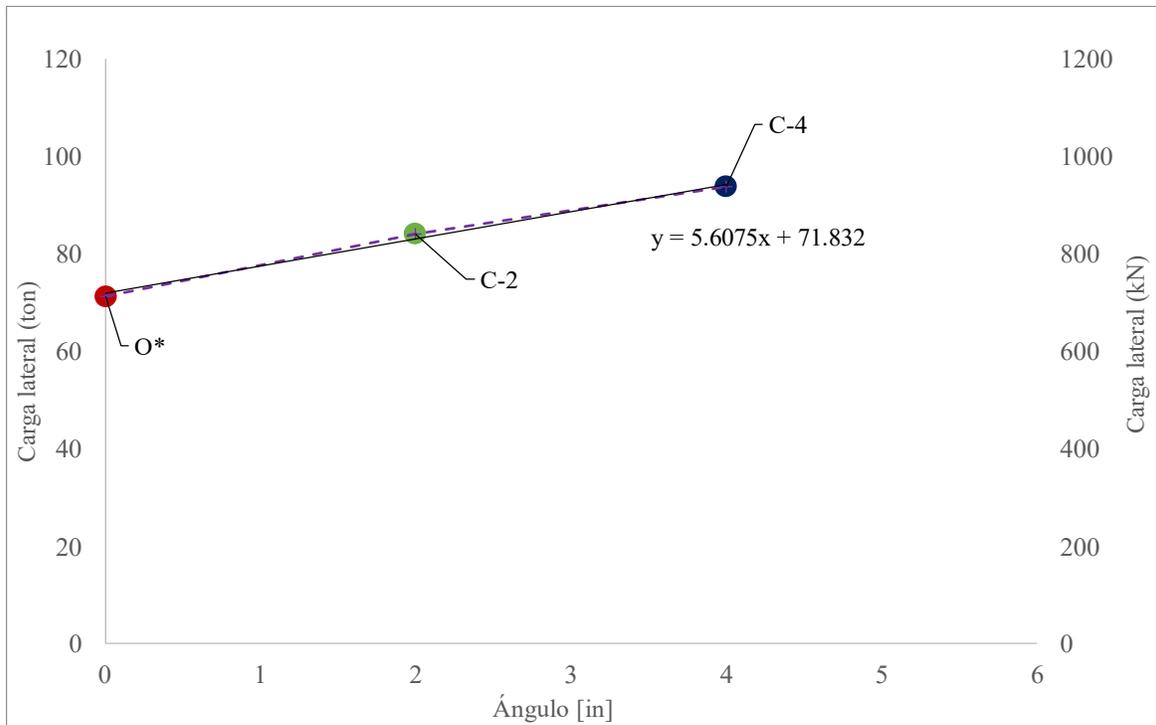


Fig. 6.3.2 Tendencia y ecuación de comportamiento de los especímenes

Una vez operadas ambas ecuaciones, se obtuvieron los siguientes resultados que permiten evaluar la variación entre los valores reportados:

Tabla 74. Comparación de las resistencias máximas

| Columna | $V_{\text{máx}} \text{ experimental (t)}$ | $V_{\text{máx}} \text{ NTC-2023 (t)}$ | Variación (%) = $V_{\text{máx}} \text{ experimental (t)} / V_{\text{máx}} \text{ NTC-2023 (t)} * 100$ (%) |
|---------|---|---------------------------------------|---|
| O* | 71.35 | 65.37 | 8.4% |
| C-2 | 84.01 | 75.32 | 10.3% |
| C-4 | 93.78 | 82.68 | 11.8% |

Finalmente, se puede observar que los valores experimentales superan los valores obtenidos mediante la NTC-2023 y que a medida que crece el ancho del ala del ángulo, la variación entre los dos valores también lo hacen. Por lo anterior se concluyó que la ecuación correspondiente a la NTC es conservadora, lo que resulta en la variación reportada.

Los valores experimentales son lineales y muestran lo evidente del efecto del ancho del ala del ángulo en encamisados metálicos.

6.4 Tabla comparativa/resumen

Tabla 75. Tabla comparativa/resumen general

| Parámetro | Columna O* | Columna C-2 | Columna C-4 |
|---|------------|----------------|----------------|
| V_{máx} exp (t) | 71.35 | 84.01 | 93.78 |
| V_{máx} NTC-2023 (t) | 66.37 | 75.32 | 82.68 |
| Cantidad de deformímetros que fluyeron en el acero de refuerzo | 11 | 8 | 7 |
| Distorsión absoluta en la que fluyó el primer deformímetro del acero de refuerzo (%) | 0.27% | 1% | 1% |
| Distorsión absoluta última en la que el último deformímetro presentó su fluencia en el acero de refuerzo (%) | 1% | 2.5% | 2.5% |
| Cantidad de deformímetros que fluyeron en el encamisado | N/A | 10 | 9 |
| Distorsión absoluta en la que fluyó el primer deformímetro de la camisa (%) | N/A | 2% | 2.5% |
| Distorsión absoluta última en la que el último deformímetro presentó su fluencia en el acero de refuerzo (%) | N/A | 4.5% | 5% |
| Tipo de falla | Cortante | Flexo cortante | Flexo cortante |

6.5 Análisis costo – beneficio de los encamisados metálicos

Finalmente en esta última sección del capítulo 6, se hace una comparación entre los dos tipos de columnas encamisadas, las cuales son:

- C-2
- C-4

Se incluirá únicamente el precio de los materiales de las columnas de concreto encamisadas con elementos metálicos. El fin de conocer la información mencionada es poder obtener información del costo-beneficio de cada uno de los arreglos a través del valor del precio por tonelada resistida.

Los datos incluidos, fueron obtenidos a través de la plataforma de Construrama (2023) para los precios de los elementos del encamisado de acero y de The Home Depot (2023) para la obtención del precio del mortero tipo grout.

Cabe mencionar que los dos tipos de especímenes a comparar cuentan con los siguientes conceptos, por lo que se les asigna un valor de \$0.00 y en automático no aportarán a este estudio. Los conceptos son:

- Suministro, habilitado y armado de acero de refuerzo para la construcción de columna, incluye: materiales, desperdicios, acarreos, mano de obra, herramienta y equipo
- Suministro y colocación de la cimbra acabado aparente, incluye: materiales, mano de obra, herramienta y equipo
- Suministro y colocación de concreto $f_c' = 250 \text{ kg/cm}^2$, incluye: mano de obra, herramienta y equipo
- Suministro y colocación de concreto $f_c' = 300 \text{ kg/cm}^2$, incluye: mano de obra, herramienta y equipo
- Suministro y colocación de soldadura tipo filete para la unión del encamisado metálico, incluye: material, mano de obra, herramienta y equipo

Tabla 76. Costo de la columna C-2

| Concepto | Unidad | Cantidad | P.U. | Importe |
|--|--------|----------|---------|-----------------|
| Suministro mortero Sika grout | L | 8 | \$52.9 | \$423.6 |
| Suministro de estructura de acero, perfiles ligeros para encamisado de columnas de sección 0.45 x 0.90 m, para su posterior ensaye en el laboratorio de CENAPRED habilitado con ángulo de 2" según plano estructural | m | 8 | \$178.2 | \$1425.6 |
| Suministro de solera de 2" según plano estructural | m | 7.35 | \$111.6 | \$820.3 |
| TOTAL | | | | \$2669.5 |

Tabla 77. Costo de la columna C-4

| Concepto | Unidad | Cantidad | P.U. | Importe |
|--|--------|----------|----------|-----------------|
| Suministro de mortero Sika grout | L | 13 | \$52.9 | 687.7 |
| Suministro de estructura de acero, perfiles ligeros para encamisado de columnas de sección 0.45 x 0.90 m, para su posterior ensaye en el laboratorio de CENAPRED habilitado con ángulo de 4" según plano estructural | m | 8 | \$368.76 | \$2950.1 |
| Suministro y colocación de solera de 2" según plano estructural | m | 7.35 | \$111.6 | \$820.3 |
| TOTAL | | | | \$4458.1 |

Por último, se obtuvo el valor del precio por tonelada en los dos modelos encamisados, lo cual se observa en la Tabla 78.

Tabla 78. Resultado costo por tonelada resistida en las columnas encamisadas

| Columna | Costo total (\$) | $V_{m\acute{a}x}$ (t) | Precio de cada tonelada resistida (\$/t) |
|---------|------------------|-----------------------|--|
| C-2 | \$2669.5 | 84.01 | \$31.77 |
| C-4 | \$4458.1 | 93.78 | \$47.54 |

Con los resultados obtenidos se observó que el precio tonelada resistida del encamisado de la columna C-4 es 49.7% más elevado que el de la columna C-2. No obstante, la contribución de la resistencia es un 11% mayor en C-4 que en C-2.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En los capítulos anteriores, se presentaron los antecedentes, la descripción y el análisis de la técnica de rehabilitación de encamisado con elementos metálicos variando el ancho del ala del ángulo.

Este capítulo, está centrado en presentar las conclusiones y recomendaciones que se derivan de este estudio experimental:

- La aplicación de carga lateral con un sistema de actuadores hidráulicos MTS mejora la precisión de la obtención de los datos en comparación con la aplicación de carga lateral con un gato hidráulico de control manual. Esto se debe a que el sistema de actuadores hidráulicos MTS permite una aplicación de carga lateral más uniforme y precisa, lo que se pudo observar en la columna O ensayada con un gato hidráulico por control manual y el resto de los especímenes ensayados controlados por el sistema MTS.
- La calidad de los materiales y la elaboración de los trabajos deben ser cuidadosamente controlados para garantizar la fiabilidad de los resultados de un programa experimental.
- El encamisado metálico formado por ángulos y soleras con la configuración presentada en C-2 y C-4 aumenta la capacidad lateral de columnas con detallado no dúctil al cambiar el mecanismo de falla de cortante a flexión. Esto se debe a que el encamisado proporciona una mayor capacidad de deformación inelástica a la columna, lo que le permite soportar mayores cargas laterales, aumentar su rigidez y disminuir el nivel del daño.
- El mortero tipo grout fue un medio de contacto eficaz entre el encamisado y la columna, ya que transmitió las cargas de manera adecuada. En las columnas C-2 y C-4, el grout de las soleras intermedias se desprendió del concreto y presentó grietas, respectivamente. Sin embargo, el grout colocado en el resto de la camisa evitó el desplazamiento entre el elemento de concreto y el metálico.

- Encamisar una columna de concreto con la configuración de la columna C-4 aumenta su capacidad en 31.4 % en comparación con una columna sin camisa. La configuración de la columna C-2 aumenta la resistencia en 17.8 %.
- Los resultados derivados de los ensayos realizados en las columnas muestran una clara tendencia lineal en relación con su resistencia máxima. Esta observación conduce a la conclusión de que existe una relación directa: a medida que se incrementa la sección del ángulo, se experimenta un aumento proporcional en la capacidad de resistencia y confinamiento a dicho elemento estructural.
- El sometimiento de un elemento estructural a cargas cíclicas puede generar fatiga de bajo ciclaje, lo que resalta la importancia de evaluar y mitigar este fenómeno para asegurar la durabilidad y la integridad a lo largo de ensayos.
- Al comparar los valores experimentales de la resistencia máxima y los obtenidos de las expresiones de la Norma Técnica para la Evaluación y Rehabilitación Estructural de Edificios Existentes (Gobierno de la Ciudad de México, 2023) se notaron variaciones de hasta 11.8%.
- Las configuraciones asociadas a los encamisados metálicos de acero deben ser evaluadas tanto desde una perspectiva económica como técnica. Es fundamental que su contribución en términos de refuerzo estructural esté equilibrada con su costo-beneficio. Además, es crucial considerar detalladamente el tipo de cargas anticipadas para garantizar que el encamisado seleccionado sea idóneo y proporcione el nivel de refuerzo requerido para esas condiciones específicas.
- Los resultados experimentales demuestran que la distorsión de diseño de $Q=2$ es adecuada para la columna C-2. En cuanto a la columna C-4 se puede diseñar con un $Q>2$.

La información recopilada hasta el momento puede enriquecerse al considerar otras configuraciones de encamisados metálicos y distintos métodos de aplicación de carga. Aunque se han realizado avances significativos, aún queda un amplio camino por recorrer para profundizar en el conocimiento y la investigación en torno a la técnica de encamisado de columnas con elementos

metálicos. El futuro de esta técnica se vislumbra prometedor, pero requiere un esfuerzo continuo en investigación y desarrollo. Explorar nuevas metodologías, materiales y técnicas de evaluación será fundamental para desbloquear su máximo potencial en el ámbito estructural.

Comentarios finales de la autora

Sirva la presente tesis como recordatorio y evidencia de la responsabilidad que tiene la ingeniería civil en México. La profundización en estos estudios no sólo enriquece el conocimiento técnico, sino que también sensibiliza sobre las necesidades de las poblaciones y las vulnerabilidades de las construcciones. La búsqueda constante de mejoras en las técnicas de construcción y rehabilitación no solo fortalecen la infraestructura, sino que también contribuyen al desarrollo sostenible y a la seguridad. Esta tesis es un llamado a continuar invirtiendo en la investigación estructural para impulsar un futuro más resiliente y próspero para nuestro país.

BIBLIOGRAFÍA

- Aboutaha, R. S. (1994). *Seismic retrofit of non-ductile reinforced concrete columns using rectangular steel jackets*. Austin: The University of Texas at Austin.
- Aguilar, G. (1997). *Efecto del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería confinada ante cargas laterales*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Aguirre, J. (2018, septiembre 19). Sismos de 1985 y 2017 Organización y solidaridad del pueblo mexicano. *Artículos Comisión Nacional de Derechos Humanos México*.
- Alcocer, S., & Murià, D. (2020). *Rehabilitación sísmica de la infraestructura*. Ciudad de México: Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa.
- Alcocer, S., Murià, D., Palma, S., Andrade, J. E., & Alcaraz, J. (2023). *Informe técnico parcial, "Estudio experimental de columnas de concreto encamisadas con elementos metálicos"*. Ciudad de México: Tercer Informe Parcial.
- Alcocer, S., Murià, D., Vargas, C., González, V., Palma, S., & Andrade, E. (2022). Estudio experimental de columnas de concreto rehabilitadas con encamisados metálicos. *Memorias del XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Zacatecas, Zacatecas*.
- American Concrete Institute. (2019). *ACI 211.1-19: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. Farmington Hills, Michigan: ACI.
- American Concrete Institute. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*. Farmington Hills, Michigan: ACI.
- American Concrete Institute. (2022). *ACI 308.1R-2022: Guide to Curing Concrete*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2022). *ACI 369-22: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Concrete Buildings—Code and Commentary*. Michigan, Estados Unidos: American Concrete Institute.

- American Society for Testing and Materials . (2005). *ASTM A529/A529M-05: Standard Specification for Cold-Formed Welded Carbon Steel Structural Tubing*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2008). *ASTM A36/A36M-08: Standard Specification for Carbon Structural Steel*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2012). *ASTM A6/A6M-12: Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
- Beer, F., Johnston, R., DeWolf, J., & Mazurek, D. (2017). *Mecánica de materiales* (Vol. 7a. Edición). Ciudad de México: Mc Graw Hill Education.
- CEMEX. (2022). Imagen de Olla. México.
- Construrama. (2023). *Tienda en línea Construrama*. Obtenido de <https://www.construrama.com/ferroacero>
- Cruz, V. D. (2022). *Modelos de cálculo de resistencia a momento flexionante y fuerza cortante de columnas rehabilitadas con encamisado de concreto reforzado*. Ciudad de México: UNAM.
- DEACERO. (Agosto de 2023). *DEACERO*. Obtenido de <https://www.deacero.com/>
- Gerdau S/A. (Julio de 2019). *Gerdau Corsa*. Obtenido de <https://www.gerdaucorsa.com.mx/>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2023). *Norma Técnica para la Evaluación y Rehabilitación Estructural de Edificios Existentes*. Ciudad de México: GCDMX.
- Gobierno Federal. (2004). *NMX-C-159-ONNCCE-2004*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Gobierno Federal Mexicano. (2017). *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera*. Ciudad de México: Gaceta de la Ciudad de México.
- González, O. M., Guerrero, J. J., Gómez, B., & Flores, F. A. (2007). Resistencia a fuerza cortante de columnas de concreto reforzadas con camisas de acero. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 19.

- Hosny Khalil, A. H., Ali, A., & Beih, A. (2018). Behavior of steel jacketed reinforced concrete column under eccentric forces. *Al-Azhar University Civil Engineering Research Magazine*.
- Instituto de Ingeniería. (2021 - 2023). Archivo del Proyecto de Columnas de Concreto Encamisadas con Elementos Metálicos. México: UNAM.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2011). *Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio*. Ciudad de México: IMCYC.
- Jodawat, A., Parekh, A., Marathe, B., Pawar, K., Patwa, S., Sahu, Y., & Jain, I. (2016). Retrofitting Of Reinforced Concrete Column by Steel Jacketing. *Journal of Engineering Research and Application*, 1-5.
- Lui, Z. (1987). Strees and Bond Behavior of Beam and Column Longitudinal Bars Inside the Joint, A Calculation Report". *University of Texas at Austin*.
- Materials, A. S. (2011). *ASTM A992/A992M-11: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel with Normalized Yield Points*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
- Materials, A. S. (2012). *ASTM A572/A572M-12: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
- MTS. (2023). *Hydraulic Actuators & Servo-Valves*. Obtenido de <https://www.mts.com/en/company/history>
- Nájar, A. (2018, septiembre). Sismo 2017 en México: las lecciones no aprendidas que dejó el terremoto del 19 de septiembre. *BBC News Mundo, Ciudad de México*.
- Neville, A. (2011). *Properties of concrete* (Vol. 5a. Edición). Pearson.
- Nilson, A., Darwin, D., & Dolan, C. (2021). *Design of Concrete Structures*. Mc Graw Hill.
- ONNCE. (2014). *NMX C-083 ONNCCE "Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto"*. México: Gobierno Federal.
- Palma, S. (2022 - 2023). Archivo Personal. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería.
- Sakino, K., & Sun, Y. (2000). Steel jacketing for improvement of column strength and ductilty. *12 WCEE Memories*.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1988). *NMX-B-252-1988: Requisitos Generales para Planchas, Perfiles, Tablaestacas y Barras de*

Acero Laminado para Uso Estructural. Ciudad de México: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

SikaGrout. (2014). *Hoja Técnica, SikaGrout, Mortero expansivo de excelente fluidez para anclajes, rellenos y*. México: Sika México.

Sistema Nacional de Protección Civil, & Secretaría de Gobernación. (2015). *Página Oficial del Sistema Nacional de Protección Civil*. Obtenido de http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/7/1/images/lamina_exp_cenapred.pdf

The Home Depot. (2023). *Tienda en línea Home Depot*. Obtenido de <https://www.homedepot.com.mx/>