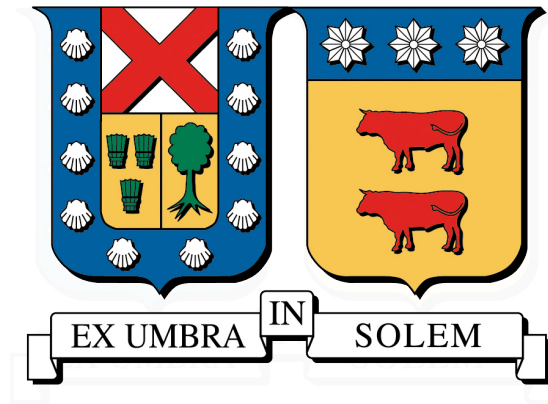


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
SANTIAGO - CHILE



**Modelación bidimensional de elementos de hormigón
armado a través de elementos uniaxiales no lineales y su
comparación con resultados experimentales**

RAIMUNDO ANTONINO OJEDA ALIAGA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

PROFESOR GUÍA : SR. CLAUDIO SEPÚLVEDA CONTRERAS

ENERO 2021

Resumen Ejecutivo

Este estudio busca simular la respuesta de elementos de hormigón armado mediante modelos numérico-computacional desarrollados en un software comercial. El interés consiste en evaluar hasta qué punto los modelos logran representar dichos elementos. Así pues, el trabajo es dividido en dos partes: (1) ensayos experimentales y (2) calibración de un modelo numérico.

En la primera parte y para los propósitos de este trabajo, se construyen dos vigas de dimensiones reducidas. Posteriormente a ello, estas son ensayadas mediante una carga monotónica en la mitad de la luz. En paralelo se recopila información gráfica en cada una de las vigas y que posteriormente será utilizada en un análisis de correlación de imágenes digitales (fotogrametría). Por último, se realizan ensayos para obtener las curvas constitutivas de los materiales y de esta forma calibrar los modelos numéricos.

Los resultados de la fotogrametría permiten observar que el patrón de grietas en cada una de las vigas se encuentra en forma diagonal y se relaciona con una falla por corte. Además, es posible visualizar las distorsiones en los planos de deformaciones unitarias horizontales como consecuencia de la formación de grietas. Junto a ello, el apoyo visual del perfil de deformaciones unitarias en direcciones principales es útil para comprender de mejor manera el modo de falla.

Los modelos computacionales son confeccionados con una tipología de enrejado equivalente y el análisis llevado a cabo corresponde a un pushover configurado para controlar desplazamientos. Los resultados indican que en términos globales, los modelos logran aproximarse a la respuesta lineal de los especímenes. Incluso pueden predecir el modo de falla. Sin embargo, dichos modelos no logran homologar con exactitud la respuesta no lineal, ni las deformaciones unitarias horizontales que son obtenidas de la correlación de imágenes digitales.

Palabras Clave: Ensayos a elementos de dimensiones reducidas, vigas de hormigón armado, fotogrametría, análisis pushover, método de enrejado equivalente, modelación bidimensional.

Abstract

This study seeks to simulate the response of reinforced concrete elements using numerical-computational models developed in commercial software. The interest consists in evaluating to what extent the models manage to represent these elements. Thus, the work is divided into two parts: (1) experimental tests and (2) calibration of a numerical model.

In the first part and for the purposes of this work, two beams of reduced dimensions are built. Subsequently, these are tested by a monotonic load in the middle of the span. In parallel, graphic information is collected in each of the beams and will later be used in correlation analysis of digital images (photogrammetry). Finally, tests are carried out to obtain the constitutive curves of the materials and thus calibrate the numerical models.

The results of the photogrammetry allow us to observe that the pattern of cracks in each of the beams is found diagonally and is related to a shear failure. Besides, it is possible to visualize the distortions in the horizontal strain planes as a consequence of cracking. Also, visual support of the strain profile in main directions is useful to better understand the failure mode.

The computational models are made with an equivalent truss typology and the analysis carried out corresponds to a pushover configured to control displacements. The results indicate that in global terms, the models manage to approximate the linear response of the specimens. They can even predict the failure mode. However, these models are not able to accurately homologate the non-linear response, nor the horizontal unit deformations that are obtained from the correlation of digital images.

Keywords: Tests on elements of reduced dimensions, reinforced concrete beams, photogrammetry, pushover analysis, truss method, two-dimensional modeling.

Agradecimientos

La vida es increíble y uno de los grandes aspectos que sobresalen en ella, son esos pequeños momentos en que puedes sentirte libre, sentirte cómodo contigo mismo y finalmente, darte cuenta del largo camino que ha tomado llegar a cierto instante.

Hoy en día puedo sonreír, y felizmente agradecer a cada uno de mis seres queridos que me han acompañado en este largo proceso de mi vida.

Inicialmente quiero agradecer a mi profesor guía, el señor Claudio Selpúlveda que en su gran calidad de persona, docente y además, como profesional digno de imitar, deposita su confianza en mí y me permite realizar esta memoria bajo su orientación. Su disposición y entrega son factores que aportaron de mucho apoyo, y es por esto, que aprovecho la instancia para desearle mucho éxito en todos sus nuevos proyectos y más importante, en su doctorado.

También quiero agradecer a toda mi familia, quienes estuvieron siempre prestando apoyo, de una u otra forma y cada cual a su manera. Gracias a todos ellos.



*A la memoria de mi abuela,
Reumilda Pinto.*

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Objetivos Generales	2
1.2.1. Objetivos Específicos	2
2. Estado del Arte	3
2.1. Modelación de Elementos de HA	3
2.1.1. Modelos Tipo Enrejado	6
2.1.2. Visualización de Grietas de Corte	9
2.2. Fotogrametría	10
3. Marco Teórico	14
3.1. Áreas de Elementos de Hormigón	14
3.1.1. Método de Rigidez	15
3.1.2. Ley de Hooke Generalizada	18
3.2. Comportamiento de los Materiales	20
3.2.1. Hormigón	20
3.2.2. Acero de Refuerzo	23
3.3. Fotogrametría	24
3.3.1. Deformaciones Unitarias Principales	26
4. Campaña Experimental	27
4.1. Descripción de las Vigas	27
4.1.1. Detallamiento	27
4.1.2. Materiales	28
4.1.3. Fabricación de Elementos de HA	30
4.1.4. Preparación para la Fotogrametría	33
4.2. Propiedades de los Materiales	34
4.3. Ensayo de Carga en Vigas	38
4.3.1. Preparación Experimental	38
4.3.2. Montaje Experimental	39
4.3.3. Realización de Ensayos	41
4.3.4. Respuesta Fuerza-Deformación	42
4.3.4.1. Viga 1	42
4.3.4.2. Viga 2	43

4.4. Registro Fotográfico	44
4.4.1. Viga 1	44
4.4.2. Viga 2	47
4.5. Análisis por Fotogrametría	48
4.5.1. Descripción del Software	49
4.5.2. Implementación del Software	51
4.6. Resultados de la Fotogrametría	52
4.6.1. Deformación Vertical	52
4.6.1.1. Viga 1	52
4.6.1.2. Viga 2	55
4.6.2. Deformaciones Unitarias Horizontales	58
4.6.2.1. Viga 1	58
4.6.2.2. Viga 2	64
4.6.3. Deformaciones Unitarias Principales	69
4.6.3.1. Viga 1	69
4.6.3.2. Viga 2	70
5. Modelación bidimensional	71
5.1. Descripción de Modelos	72
5.2. Definición de Elementos Uniaxiales	74
5.2.1. Curvas de Comportamiento	76
5.2.1.1. Hormigón	77
5.2.1.2. Acero de Refuerzo	78
5.2.1.3. Refuerzo Transversal	79
5.3. Creación de Modelos	79
5.4. Análisis Pushover	81
5.4.1. Otras Consideraciones	82
5.5. Resultados de la Modelación	82
5.5.1. Comportamiento en Tracción	82
5.5.2. Análisis de Sensibilidad	84
5.5.2.1. Viga 1	84
5.5.2.2. Viga 2	85
5.5.3. Deformada en los Modelos	86
5.5.3.1. Viga 1	86
5.5.3.2. Viga 2	89
5.5.4. Deformaciones Unitarias Horizontales	92
5.5.4.1. Viga 1	93
5.5.4.2. Viga 2	97
6. Conclusiones y comentarios	102
6.1. Comentarios Finales	102
Bibliografía	104
A. Matrices de Rigidez Locales	107

B. Especificaciones de la Prensa Hidráulica	109
C. Análisis de Sensibilidad	111
D. Ajuste de Curvas Experimentales	117
D.1. Ensayo de Carga Deformación	117
D.2. Curvas de los Materiales	120
E. Deformaciones Unitarias en Direcciones Principales	122
E.1. Viga 1	122
E.2. Viga 2	130
F. Secciones de Comparación entre Fotogrametría y Modelos	139
F.1. Viga 1	139
F.2. Viga 2	140

Índice de Tablas

4.1. Características geométricas de las vigas.	28
4.2. Propiedades elásticas del hormigón usado en cada viga.	35
4.3. Propiedades elásticas de las barras de acero usadas en cada viga.	38
4.4. Parámetros utilizados en el análisis de fotogrametría	51
5.1. Tamaños de grilla utilizados en la modelación de las vigas.	74
5.2. área usada en la modelación de cada tipo de Link.	75
5.3. Relación entre las cuantías de las probetas y los modelos.	76
5.4. Parámetros no lineales utilizados en el análisis	82
5.5. Descripción de los casos 1 y 2 para evaluar las DUH en la viga 1.	96
5.6. Descripción de los casos 1 y 2 para evaluar las DUH en la viga 2.	100
C.1. Casos a evaluar en el análisis de sensibilidad	111

Índice de Figuras

2.1. Probetas de muros con aberturas Taylor et al. (1998)	5
2.2. Fotogrametría y modelo puntal tensor, Manríquez y Massone (2016).	5
2.3. Zona de falla. Manríquez y Massone (2016).	6
2.4. Comparación del mallado en distintas probetas Moharrami et al. (2015).	7
2.5. Comparación del patrón de daño Moharrami et al. (2015).	8
2.6. Comparación entre el ensayo y el modelo confeccionado, Moharrami et al. (2015).	8
2.7. Comparación entre el ensayo y los modelos de predicción, Tambusay et al. (2018).	9
2.8. Comparación del mallado en distintas probetas Inzunza y Massone (2014).	12
2.9. Comparación de deformaciones a partir de distintas fuentes Inzunza y Massone (2014).	12
3.1. Vinculación entre estados tensionales y rigideces laterales.	14
3.2. Parámetros geométricos.	15
3.3. Nomenclatura del macroelemento para construir la matriz de rigidez.	16
3.4. Esquema de las deformaciones en el macro elemento.	18
3.5. Estado tensional de un sólido infinitesimal.	19
3.6. Diagrama de esfuerzo deformación unitaria del hormigón en compresión <i>Hognestad (1951)</i>	21
3.7. Esquema representativo para el hormigón en tracción.	22
3.8. Diagrama de esfuerzo deformación unitaria para el comportamiento del acero Kent (1969).	24
3.9. Esquema del <i>Círculo de Mohr</i> para deformaciones unitarias.	26
4.1. Esquema representativo de cada viga.	28
4.2. Corte y doblado de barras.	31
4.3. Preparación del moldaje.	31
4.4. Medición de volúmenes a utilizar en la mezcla.	32
4.5. Preparación de la mezcla para el hormigón.	32
4.6. Resguardo de las vigas dentro del laboratorio.	33
4.7. Esquema de pintura en las vigas.	34
4.8. Probetas para realizar ensayos de compresión y tracción.	34
4.9. Curvas de comportamiento del hormigón en compresión.	35

4.10. Curvas de comportamiento del acero en tracción para barras de 8[mm]. 36

4.11. Medición del módulo de elasticidad para barras de 8[mm]. 36

4.12. Curvas de comportamiento del acero en tracción para barras de 6[mm]. 37

4.13. Medición del módulo de elasticidad para barras de 6[mm]. 37

4.14. Diagrama de elementos para la situación en conflicto. 39

4.15. Diagrama de elementos en el montaje experimental. 40

4.16. Esquema de las condiciones de borde del ensayo. 40

4.17. Montaje de instrumentos en el laboratorio. 40

4.18. Uso de cuñas de madera en la viga 1 y 2 para estabilizar la carga. . . 41

4.19. Resultados del ensayo carga-deformación en la viga 1. 43

4.20. Resultados del ensayo carga-deformación en la viga 2. 44

4.21. Agrietamiento en la viga 1 al finalizar el ensayo de carga deformación. 45

4.22. Viga 1 - Perfil de la viga una vez que el elemento ha fallado. 46

4.23. Viga 1 - Desprendimiento del hormigón e inspección de los estribos. . 46

4.24. Agrietamiento en la viga 2 al finalizar el ensayo de carga-deformación. 47

4.25. Viga 2 - Desarrollo de grietas en el elemento. 48

4.26. Viga 2 - Desprendimiento del hormigón e inspección de los estribos. . 48

4.27. Referencia para indicar el subconjunto conformado por las fotografías
número 16, 25 y 26. 53

4.28. Fotogrametría en la imagen 16 durante el ensayo de carga en la viga 1. 53

4.29. Fotogrametría en la imagen 25 durante el ensayo de carga en la viga 1. 54

4.30. Fotogrametría en la imagen 26 durante el ensayo de carga en la viga 1. 54

4.31. Deflexión de la viga 1 para las fotografías 16, 25 y 26. 55

4.32. Referencia para indicar el subconjunto conformado por las fotografías
número 19, 27 y 29. 56

4.33. Fotogrametría en la imagen 19 durante el ensayo de carga en la viga 2. 56

4.34. Fotogrametría en la imagen 27 durante el ensayo de carga en la viga 2. 57

4.35. Fotogrametría en la imagen 29 durante el ensayo de carga en la viga 2. 57

4.36. Deflexión de la viga 2 para las fotografías 19, 27 y 29. 57

4.37. DUH en la fotografía 3. La sección A y B, se encuentran ubicadas a
0,3h y 1,5h desde el centro de la viga. 59

4.38. DUH en la fotografía 8. La sección A y B, se encuentran ubicadas a
0,3h y 1,5h desde el centro de la viga. 60

4.39. DUH en la fotografía 12. La sección A y B, se encuentran ubicadas a
0,3h y 1,5h desde el centro de la viga. 61

4.40. Secciones para examinar las deformaciones unitarias horizontales en la
fotografía 16. 62

4.41. Comparación para examinar el perfil de DUH previo y post desarrollo
de grieta. 63

4.42. Secciones para examinar las deformaciones unitarias horizontales en la
fotografía 26. 63

4.43. DUH en la fotografía 5. La sección A y B, se encuentran ubicadas a
0,4h y 1,2h desde el centro de la viga. 64

4.44. DUH en la fotografía 10. La sección A y B, se encuentran ubicadas a
0,4h y 1,2h desde el centro de la viga. 65

4.45. DUH en la fotografía 15. La sección A y B, se encuentran ubicadas a 0,4h y 1,2h desde el centro de la viga.	66
4.46. Secciones para examinar las deformaciones unitarias horizontales en la fotografía 19.	67
4.47. Comparación para examinar el perfil de DUH previo y post desarrollo de grieta.	67
4.48. Secciones para examinar las deformaciones unitarias horizontales en la fotografía 29.	68
4.49. Perfil de deformaciones unitarias principales en la viga 1 para la fotografía 26.	69
4.50. Perfil de deformaciones unitarias principales en la viga 2 para la fotografía 29.	70
5.1. Bosquejo de los modelos confeccionados.	72
5.2. Comportamiento del hormigón en la viga 1 mediante el modelo 1. . .	77
5.3. Comportamiento del hormigón en la viga 1 mediante el modelo 2. . .	77
5.4. Comportamiento del hormigón en la viga 2 mediante el modelo 1. . .	78
5.5. Comportamiento del hormigón en la viga 2 mediante el modelo 2. . .	78
5.6. Comportamiento del acero de refuerzo.	78
5.7. Comportamiento del refuerzo transversal.	79
5.8. Modelo $v1a41$ con altura de 16,4[cm] y largo de 123[cm]	80
5.9. Modelo $v1a3$ con altura de 15[cm] y largo de 120[cm]	80
5.10. Modelo $v1a229$ con altura de 16,03[cm] y largo de 121,37[cm]	80
5.11. Modelo $v2a45$ con altura de 18[cm] y largo de 126[cm]	80
5.12. Modelo $v2a3$ con altura de 18[cm] y largo de 126[cm]	81
5.13. Modelo $v2a225$ con altura de 18[cm] y largo de 123,75[cm]	81
5.14. Comparación para definir el comportamiento del hormigón en la viga 1. .	83
5.15. Comparación para definir el comportamiento del hormigón en la viga 2. .	83
5.16. Análisis de sensibilidad utilizando distintos tamaños en la discretización de los modelos para la viga 1.	85
5.17. Análisis de sensibilidad utilizando distintos tamaños en la discretización de los modelos para la viga 2.	86
5.18. Deformada calculada en la modelación de la viga 1.	86
5.19. Nomenclatura para representar el perfil de agrietamiento en la viga 1. .	87
5.20. Representación gráfica de la deformada en la viga 1.	87
5.21. Comparación general del agrietamiento en la viga 1.	88
5.22. Comparación a partir de la totalidad de grietas observadas en la viga 1. .	89
5.23. Deformada calculada en la modelación de la viga 2.	89
5.24. Nomenclatura para representar el perfil de agrietamiento en la viga 2. .	90
5.25. Representación gráfica de la deformada en la viga 2.	90
5.26. Comparación general del agrietamiento en la viga 2.	91
5.27. Comparación a partir de la totalidad de grietas observadas en la viga 2. .	91
5.28. Referencia para indicar dónde se examinarán las DUH.	92
5.29. Referencia para contextualizar los puntos a examinar en la curva de capacidad.	93

5.30. Perfiles de DUH al final del tramo lineal del modelo.	94
5.31. Perfiles de DUH en el tramo no lineal del modelo.	95
5.32. Reseña para indicar los puntos a examinar las DUH en la viga 1.	96
5.33. Comparación para el caso 1 en la viga 1.	97
5.34. Comparación para el caso 2 en la viga 1.	97
5.35. Perfiles de DUH al final del tramo lineal del modelo.	98
5.36. Perfiles de DUH en el tramo no lineal del modelo.	99
5.37. Reseña para indicar los puntos a examinar las DUH en la viga 2.	100
5.38. Comparación para el caso 1 en la viga 2.	101
5.39. Comparación para el caso 2 en la viga 2.	101
C.1. Iteraciones para determinar la variabilidad en la deformación vertical.	115
C.2. Iteraciones para determinar la variabilidad en la deformación unitaria horizontal.	116
C.3. Deformación unitaria horizontal en el punto de control de la solución escogida.	116
D.1. Correlación entre las variables para la viga 1 según la cámara A	118
D.2. Correlación entre las variables para la viga 1 según la cámara B	118
D.3. Correlación entre las variables para la viga 2 según la cámara A	119
D.4. Correlación entre las variables para la viga 2 según la cámara B	119
D.5. Ajuste de ensayo carga-deformación en la viga 1	120
D.6. Ajuste de ensayo carga-deformación en la viga 2	120
D.7. Ajuste de la curva constitutiva del hormigón en la viga 1.	121
D.8. Ajuste de la curva constitutiva del hormigón en la viga 2.	121
F.1. Secciones consideradas para realizar las comparaciones en la viga 1.	139
F.2. Secciones consideradas para realizar las comparaciones en la viga 2.	140

1 | Introducción

1.1. Generalidades

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en el mundo y se debe principalmente a sus buenas propiedades mecánicas, alta resistencia a la corrosión, buena durabilidad y sin lugar a dudas, por la facilidad constructiva que puede ser moldeado y capaz de generar diferentes formas. Aún así, tiene la particularidad que es preparado a partir de una mezcla heterogénea y con la industrialización de los procesos, este material ha logrado ser estandarizado obteniendo un mejor rendimiento.

Definitivamente las características intrínsecas del hormigón mejoran en varios aspectos cuando es utilizado junto al acero para formar el hormigón armado. Sin embargo, los elementos formados a partir de este material, como vigas, columnas o muros, son cuerpos con un comportamiento mecánico complejo.

Aun así, en la literatura es posible encontrar investigaciones, como es el caso de [Tambusay et al. \(2018\)](#), que han realizado modelos sofisticados en *ABAQUS* ([Dassault Systèmes \(2018\)](#)) y *Response2000* ([Bentz y Collins \(2001\)](#)), para predecir la respuesta de especímenes sujetos a ensayo. Los resultados de la modelación han mostrado una aproximación aceptable a la respuesta de los especímenes.

Sin embargo, el propósito de este estudio, consiste en realizar un análisis menos sofisticado, confeccionando modelos numérico-computacional en un software comercial como por ejemplo *SAP 2000* ([Computer and Structures, Inc \(2018\)](#)) y determinar si dichos modelos logran predecir los resultados experimentales. Para llevar a cabo esto, el trabajo se ha dividido en dos partes: (1) ensayos experimentales y (2) calibración

de un modelo numérico.

En la etapa de ensayos experimentales, se pretende obtener información empírica de la respuesta de dos vigas de hormigón armado, al ser ensayadas mediante una carga monotonica en la mitad de la luz. Como también, obtener información del campo de deformaciones en los especímenes, a través de un registro fotográfico el cuál será utilizado para posteriormente desarrollar una correlación de imágenes digitales (Tambusay et al. (2018) y Inzunza y Massone (2014)).

Luego, la información recopilada es utilizada para caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales y de esta forma calibrar los modelos numérico-computacional, con que se intentará predecir la respuesta de los especímenes en los ensayos.

1.2. Objetivos Generales

El propósito de este trabajo consiste en realizar ensayos experimentales a elementos de hormigón armado, obtener resultados empíricos y calibrar modelos numéricos de elementos finitos, utilizando un software comercial para finalmente, comparar resultados.

1.2.1. Objetivos Específicos

- Fabricación de especímenes de hormigón armado y preparación de ensayos.
- Obtener el campo de deformaciones en elementos de hormigón armado mediante una correlación de imágenes digitales.
- Comparar la respuesta global entre los modelos y los datos experimentales realizando un análisis de sensibilidad, para observar las variaciones en una curva de capacidad (reacción base *vs* máximo desplazamiento) al considerar distintos tamaños de malla en los modelos.
- Comparar la respuesta local entre los modelos y los resultados de la correlación de imágenes digitales, obteniendo el campo de deformaciones unitarias a lo largo de distintos cortes en los elementos de hormigón armado.

2 | Estado del Arte

En este capítulo se realiza un resumen de la recopilación bibliográfica sobre modelaciones de elementos de hormigón armado (HA) mediante elementos finitos. Particularmente en el uso de elementos uniaxiales debido a que en el trabajo de [Sepúlveda y Leiva \(2016\)](#) han existido problemas de convergencia, al confeccionar modelos computacionales en softwares comerciales y con el uso de elementos más complejos, denominados *Shell*. El objetivo es conocer las técnicas y las metodologías utilizadas por distintos autores y dar a conocer los antecedentes que se han considerado en la realización de este trabajo de título.

2.1. Modelación de Elementos de HA

En la literatura es posible encontrar distintos autores que han realizado investigaciones de interés sobre el comportamiento de elementos de HA. El foco se centra en estudios que involucran elementos ensayados mediante cargas cíclicas o monotónicas y además, han implementado técnicas de evaluación estructural mediante la utilización de sensores o correlación de imágenes digitales.

Algunos de los sensores comúnmente utilizados corresponden a strain gages o galgas extensométricas, las cuales corresponden a un dispositivo que es capaz de convertir el esfuerzo, en un cambio de la resistencia eléctrica interna, la cual se puede medir y relacionar con las deformaciones unitarias. Por lo tanto, si el dispositivo es adherido al objeto de interés, a medida que este se deforma, el sensor también se deforma y esto produce la variación en la resistencia eléctrica del dispositivo. Por otro lado, también se encuentran los transformadores diferenciales de variable lineal

o LVDT, que al producirse un desplazamiento en el núcleo del sensor, son capaces de relacionar dicho desplazamiento, con un voltaje de salida que es medible. La diferencia con sensores del tipo strain gages, consiste en que sensores LVDTs se basan en la teoría de flujos magnéticos.

En cuanto a la correlación de imágenes digitales, el proceso se basa en la fotogrametría, cuya técnica busca definir con precisión las dimensiones o el posicionamiento de un objeto de interés. Generalmente esto se realiza utilizando cámaras digitales o teléfonos inteligentes y es posible que se utilice como ayuda, cintas demarcadoras o pintura opaca para delimitar el objeto. Posteriormente a través de un software, es posible intersectar dos o más fotografías y así, obtener las mediciones de desplazamiento/deformación del cuerpo de interés.

Por ejemplo, [Taylor et al. \(1998\)](#) estudian el comportamiento de muros con aberturas sometidos a ensayos de carga lateral cíclica y para esto, confeccionan distintas probetas (ver *Figura 2.1*) que son analizadas mediante instrumentación de sensores de movimiento como LVDTs y strain gages. En esta investigación el análisis para determinar el refuerzo de corte es realizado mediante un método puntal tensor.

El método puntal tensor es una herramienta de análisis en que se modela el dominio continuo de un sólido de HA a través de elementos distribuidos en un determinado arreglo, con el propósito de estimar la distribución de tensiones en el sólido. En un modelo tradicional, la geometría en que se disponen los elementos es escogida de forma tal de que estos sigan la trayectoria de los esfuerzos principales. Si un elemento presenta esfuerzos de compresión es denominado puntal y si presenta esfuerzos de tensión es denominado tensor.

Un aspecto a resaltar en la investigación, es que se verifica que el método puntal tensor es lo suficientemente efectivo como para analizar regiones discontinuas, y ciertamente, logra predecir de buena manera la respuesta global de un elemento. Sin embargo, mediante las técnicas utilizadas no se obtienen aproximaciones de las deformaciones unitarias.

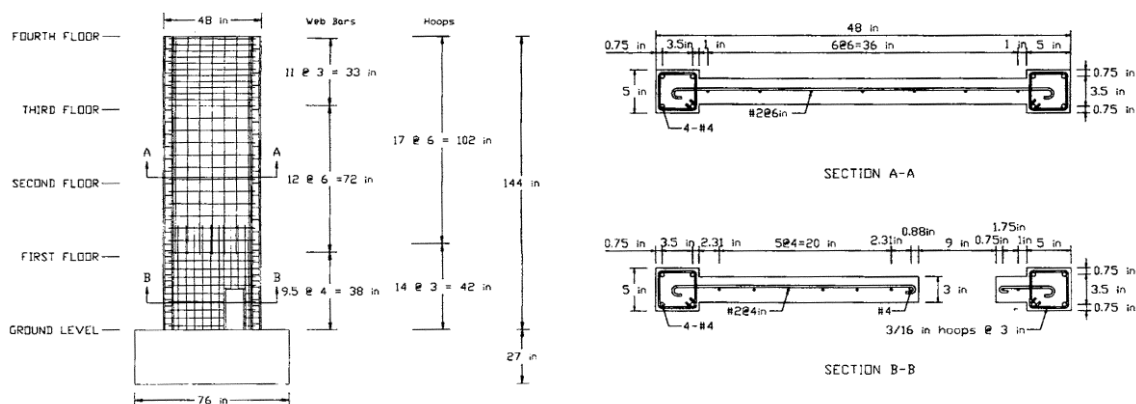


Figura 2.1: Probetas de muros con aberturas Taylor et al. (1998)

En la misma línea que Taylor et al. (1998), Manríquez y Massone (2016) también confecciona probetas de muros con aberturas y realiza un análisis de deformaciones mediante fotogrametría. Los resultados experimentales los compara con un modelo puntal tensor e incluso, el modelo logra interpretar los modos de falla de los elementos y además, como se muestra en las Figuras 2.2 y 2.3, consigue una consistencia con lo obtenido del análisis por fotogrametría.

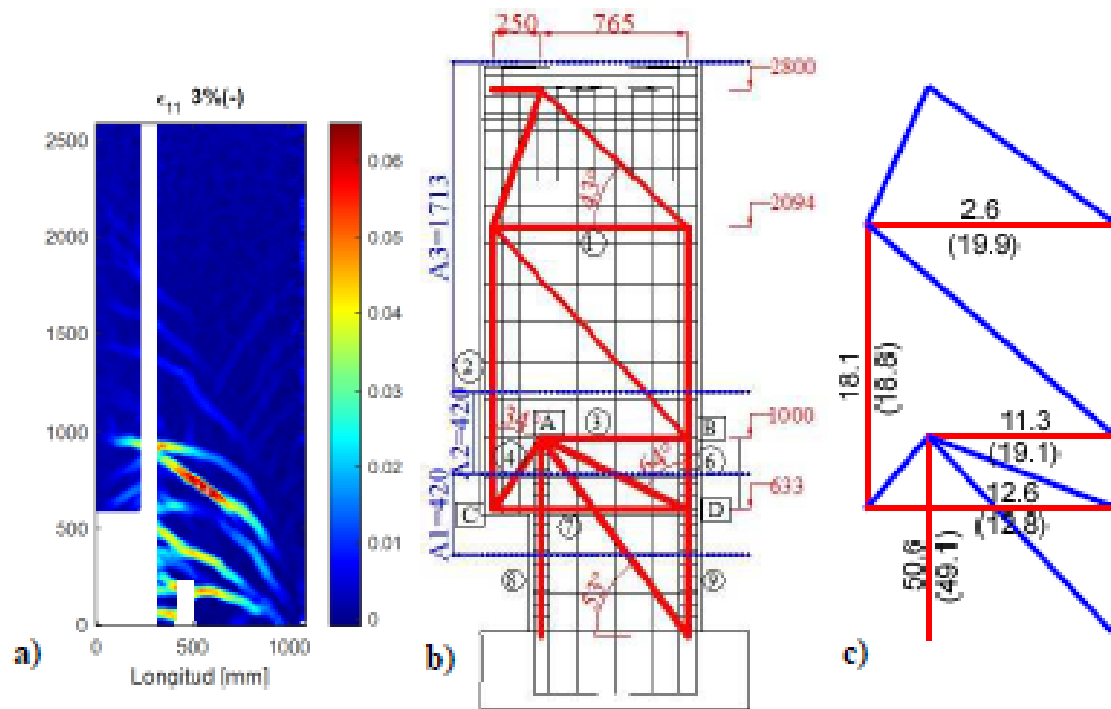


Figura 2.2: Fotogrametría y modelo puntal tensor, Manríquez y Massone (2016).



Figura 2.3: Zona de falla. [Manríquez y Massone \(2016\)](#).

2.1.1. Modelos Tipo Enrejado

En la investigación de la sección anterior, se ha reconocido el uso de elementos uniaxiales los cuales corresponden a los componentes más simples de modelación bidimensional o tridimensional y dentro de las ventajas comparativas frente a otros elementos, es que existe un ahorro en los grados de libertad puesto que sólo transmiten fuerza en el sentido longitudinal. Sin embargo, implementar el método puntal tensor, conlleva una búsqueda de las trayectorias de tensiones máximas por dónde se transmite la carga.

Alternativamente se encuentran los modelos de enrejado equivalente. Este tipo de modelo basado en elementos finitos, también consiste en una idealización de un cuerpo, homologado mediante el uso de elementos uniaxiales conectados en zonas nodales. Por lo tanto, dado un arreglo cualquiera mediante estos elementos, los componentes pueden estar sometidos a esfuerzos de compresión, o bien de tracción.

Una de las ventajas de implementar estos modelos mediante alguna herramienta de visualización, consiste en que se puede observar el patrón de daño en los especímenes representados. Sin embargo, la desventaja es que al ser modelos refinados que se pueden utilizar para la modelación de elementos de HA, son muy costosos computacionalmente para modelar estructuras completas.

De esta forma, mediante la revisión bibliográfica es importante conocer investigaciones realizadas mediante esta técnica y observar los resultados que se obtienen con su uso, como por ejemplo, el patrón de agrietamiento en los modelos.

Por consiguiente, un caso que es necesario comentar, corresponde a la investigación de [Moharrami et al. \(2015\)](#). Los autores realizan un modelo en el programa *OpenSees* ([McKenna et al. \(2000\)](#)) del tipo enrejado equivalente y mediante la implementación de elementos no lineales bajo carga cíclica logran predecir las grietas inclinadas observadas en los ensayos (ver [Figura 2.4](#)).

Para determinar las áreas de elementos uniaxiales, el autor discretiza el cuerpo de análisis en sub-elementos verticales y cada uno de ellos, es definido con un área equivalente mediante un ancho tributario. Posteriormente el ángulo de inclinación de los elementos diagonales es definido a partir del ángulo de fisura θ_d . De esta forma, las dimensiones y el área de los elementos horizontales, quedan definidas por relaciones geométricas. Finalmente, el área de los elementos diagonales se define a partir del espaciamiento entre sub-elementos verticales multiplicado por $\sin(\theta_d)$.

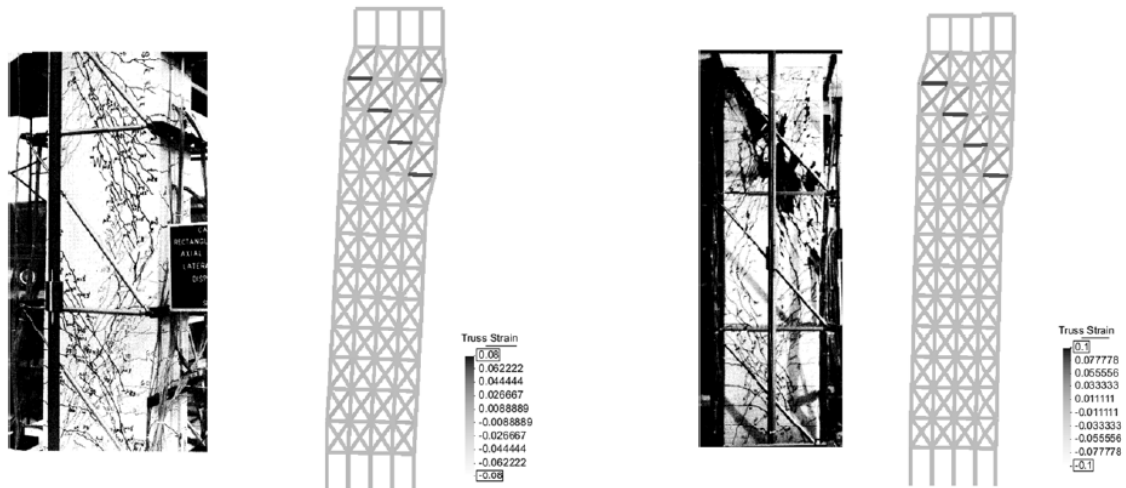


Figura 2.4: Comparación del mallado en distintas probetas [Moharrami et al. \(2015\)](#).

Además, el autor realiza un análisis de validación del modelo confeccionado, en un marco de tres columnas testeado bajo carga dinámica. Cabe señalar, que la probeta de interés ha sido diseñada para que el modo de falla que predomine, sea por corte. El análisis captura satisfactoriamente la historia de tiempo de la respuesta global del

sistema, la respuesta histerética y adicionalmente el patrón de daño como se muestra en las *Figuras 2.5* y *2.6*.

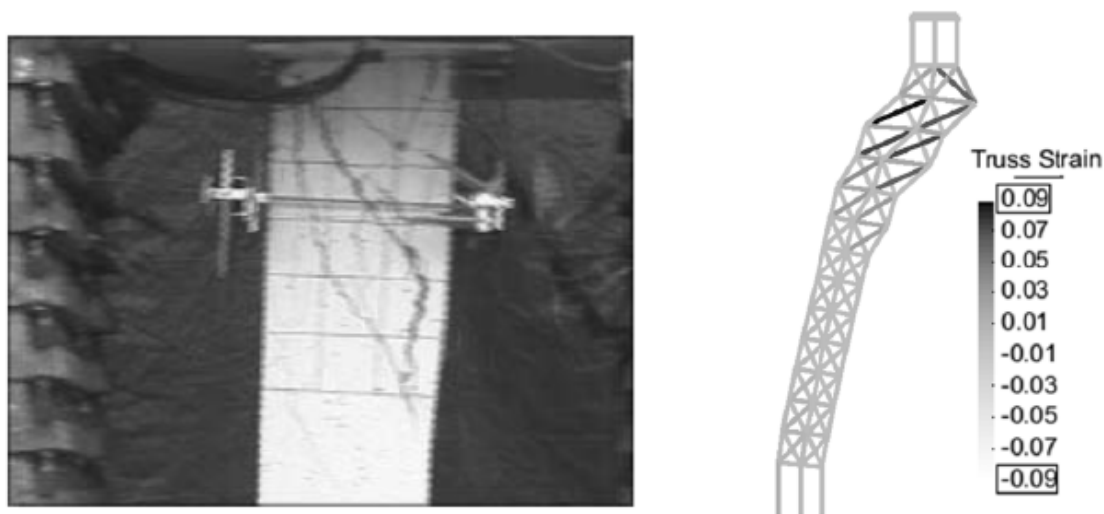


Figura 2.5: Comparación del patrón de daño [Moharrami et al. \(2015\)](#).

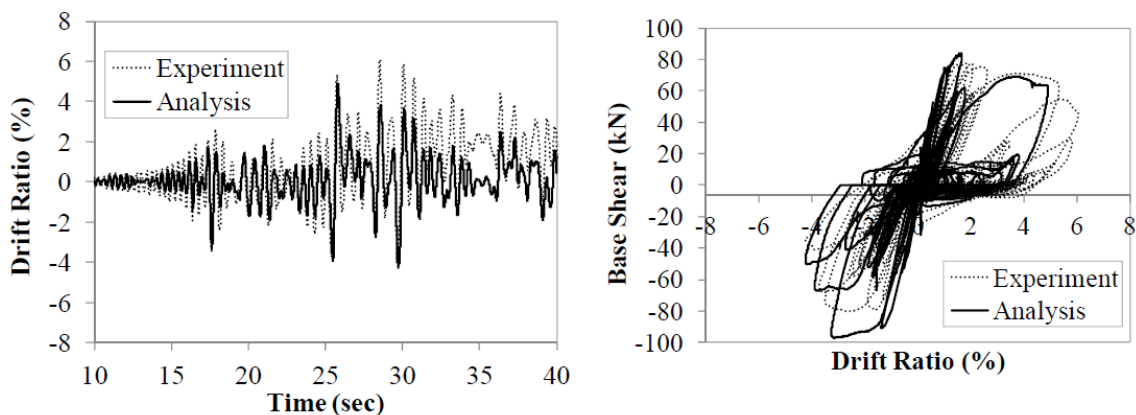


Figura 2.6: Comparación entre el ensayo y el modelo confeccionado, [Moharrami et al. \(2015\)](#).

Es importante hacer notar que cuando se produce el daño, el patrón de agrietamiento en los modelos, se presenta como un patrón en diagonal con excesiva deformación en los elementos paralelos al sentido de aplicación de carga o en los elementos diagonales.

2.1.2. Visualización de Grietas de Corte

De la mano con la sección anterior, es importante reconocer el registro de grietas que es posible observar durante el ensayo de carga de un elemento simple de HA. No obstante, también resulta primordial indagar en publicaciones que analicen la respuesta global de las modelaciones de dichos elementos y de alguna manera anticipar qué resultados se pueden esperar del presente trabajo de título. Es por esto que conviene destacar el estudio realizado por [Tambusay et al. \(2018\)](#).

En la investigación se compara los resultados obtenidos de ensayar una viga de HA que ha sido diseñada con estribos de corte sólo en los extremos, con modelos predictivos de comportamiento que han sido confeccionados en *Response2000* ([Bentz y Collins \(2001\)](#)) y *ABAQUS* ([Dassault Systèmes \(2018\)](#)) mediante elementos finitos no lineales (ver *Figura 2.7*).

Las cosas importantes a destacar en la publicación corresponden a que primero, al comparar la curva de comportamiento global, con las curvas de desviación pronosticadas por los modelos, se obtiene una consistencia dentro del rango lineal y en el modo de falla que presenta dicho elemento. Segundo, ambos modelos utilizados subestiman la capacidad de carga real en la viga y tercero, pese a utilizar sólo elementos finitos no lineales, los modelos predicen el comportamiento del elemento hasta la formación de grietas críticas en forma diagonal (ver *Figura 2.7*).

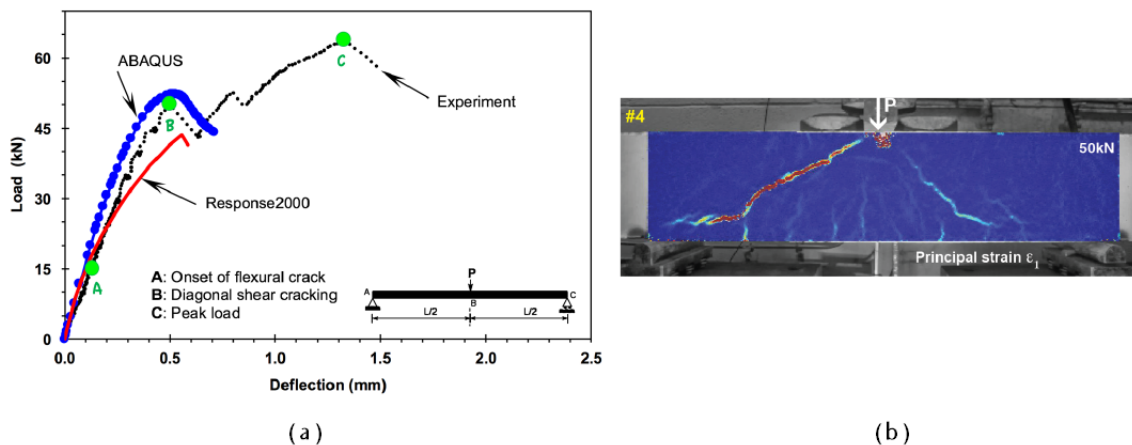


Figura 2.7: Comparación entre el ensayo y los modelos de predicción, [Tambusay et al. \(2018\)](#).

Otro tema que se debe tener en cuenta es el fenómeno de localización. [Coleman y Spacone \(2001\)](#) describe el fenómeno y explica las repercusiones que existen en la modelación de elementos compuestos de materiales que presentan "softening" o pendientes negativas en su curva de comportamiento, como ocurre con el hormigón. El fenómeno de localización hace alusión a la dependencia que existen entre la rama descendente de la curva de comportamiento y la dimensión del sensor con el que se está midiendo la deformación. Debido a las concentraciones de deformaciones que existe en una pequeña zona, la medición es muy sensible a la dimensión del strain gage o transductor de desplazamiento. Este fenómeno repercute a nivel de modelación numérica de estos elementos, ya que la respuesta del modelo depende de la dimensión del elemento no lineal utilizado, sin existir una convergencia a medida que se va reduciendo el tamaño del elemento. Es por esto que, en elementos de hormigón armado se debería realizar una corrección a la rama descendente de la curva de comportamiento en base a energía de fractura o algún otro enfoque de forma tal, de que la respuesta no lineal del elemento converja a un valor a medida que se reduce el tamaño del elemento.

2.2. Fotogrametría

Hoy en día existe una gran variedad de técnicas para la instrumentación y medición de la respuesta de un sistema estructural, entre los más comunes es posible nombrar strain gauges, sensores LVDTs y tecnología basada en láser para hacer mediciones de desplazamiento en múltiples puntos del espécimen. Sin embargo, existen desventajas al usar los primeros, cuando se tiene en cuenta que estos elementos eventualmente se pueden soltar e incluso romper, durante los ensayos de carga en el caso de que una grieta pase justo por algún elemento de medición. Por otro lado, es necesario tener en consideración que estos sensores miden la respuesta local en algún punto en específico, por lo tanto, si es necesario medir un campo de deformaciones, la técnica de la fotogrametría es más apropiada e incluso, su implementación puede ser más económica que tecnología basada en láser. Es por esto, que considerando las ventajas

nombradas, el presente trabajo considera el uso de la técnica de la fotogrametría para medir campos de deformaciones.

En lo concerniente a la fotogrametría, esta metodología de análisis consiste en una técnica de ensayo no destructiva (Sony et al. (2019)), que con el avance de la tecnología y la disminución de los costos en cámaras (fotográficas o de video), se ha vuelto cada vez más popular en los últimos años. La técnica se basa principalmente en las características propias de la cámara y el procesamiento de imágenes para obtener la información de trabajo. Dentro de las características, se desprenden los fotogramas por segundo (fps), píxeles, ancho de banda y la capacidad de estabilización de la imagen. Por otro lado, el procesamiento de imágenes puede ser realizado por diferentes software que pueden encontrarse en la literatura, los cuales, operan mediante la correlación de imágenes digitales (DIC) frente al aumento de movimiento.

En cuanto al escenario local, Inzunza y Massone (2014) realizan un sistema de fotogrametría para medir deformaciones en ensayos de elementos de HA. Dentro de su trabajo, el autor realiza una campaña experimental de 17 ensayos sobre elementos de distintas características (vigas, columnas y muros). Un aspecto a considerar, consiste en que para implementar la correlación de imágenes, es necesario que el cuerpo de interés se encuentre pintado con una nube de puntos y de esta forma se hace posible medir el campo de deformaciones/desplazamientos en el cuerpo. Es así como el autor incorpora en su trabajo, una comparación a cerca de las diferencias de utilizar una nube de puntos homogénea o dispersa (ver *Figura 2.8*) y ciertamente, en la misma publicación también es posible encontrar una serie de factores adicionales para obtener mejores resultados en la fotogrametría. Por ejemplo, un aspecto que mejora los resultados, consiste en pintar el cuerpo de interés con pintura opaca y además, con una nube de puntos densa y heterogénea, con alto contraste entre el color del cuerpo y la nube de puntos, entre otros.

Cabe señalar que su investigación corresponde a la línea base de prácticas a seguir que se han considerado para el desarrollo de este trabajo.

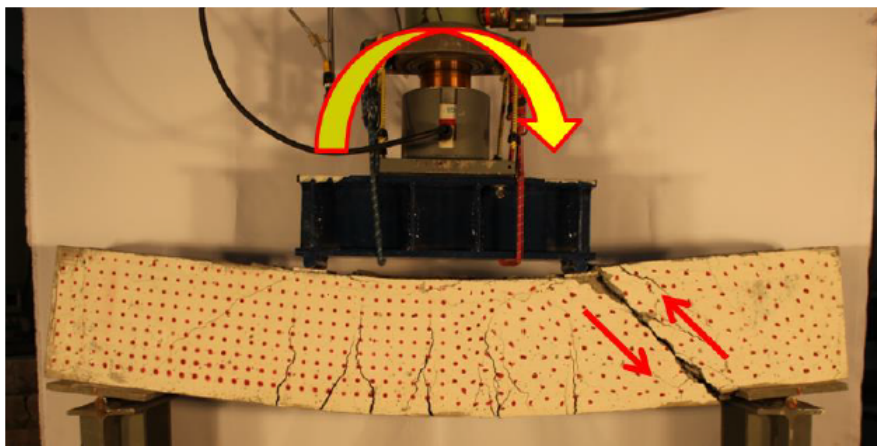


Figura 2.8: Comparación del mallado en distintas probetas [Inzunza y Massone \(2014\)](#).

Además, el autor compara los resultados de la fotogrametría con las mediciones realizadas mediante sensores de desplazamientos ultrasónicos (Modelo S18U, marca BANNER) y obtiene similitudes aceptables según se muestra en la *Figura 2.9*. En los resultados, es posible observar que las curvas son relativamente coincidentes hasta cierto punto, donde a partir de allí, existe una mayor diferenciación entre las curvas debido a la aparición de grietas de mayor tamaño.

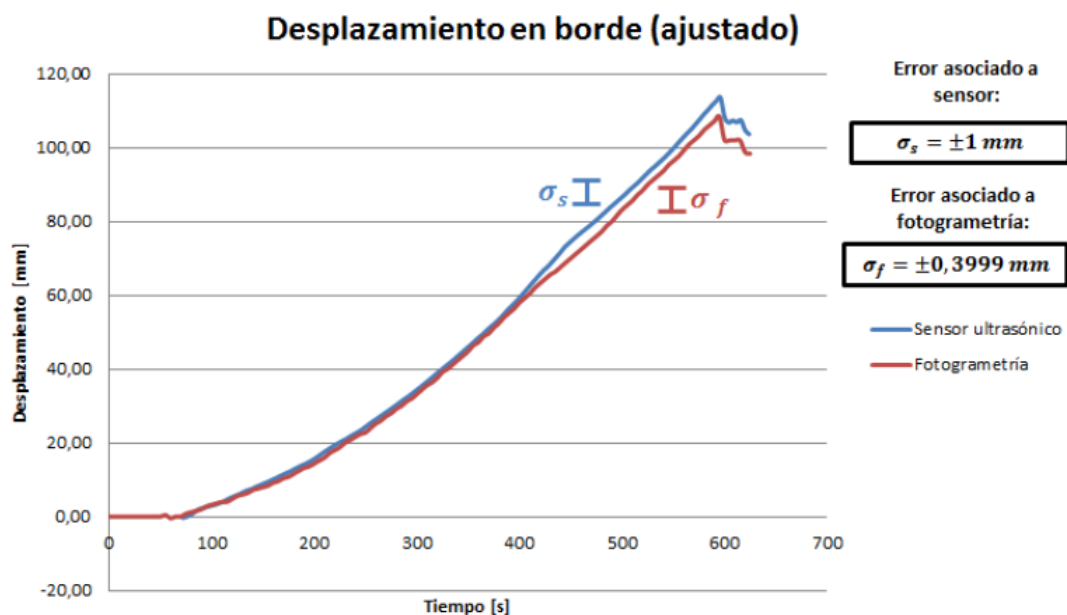


Figura 2.9: Comparación de deformaciones a partir de distintas fuentes [Inzunza y Massone \(2014\)](#).

Finalmente para el cierre del capítulo, es conveniente comentar que en base a la

investigación bibliográfica realizada, es apropiado optar por un análisis de elementos finitos no lineales. Se ha descartado el uso de elementos volumétricos debido a que el software *SAP 2000* no permite definir estos elementos de manera no lineal. También se ha descartado el uso de elementos cáscara o *Shell* en este software, debido a la complejidad del comportamiento del hormigón. En particular la gran asimetría que hay entre el comportamiento en tracción y compresión, sumado a que luego de llegar a la carga máxima el material presenta una pendiente negativa en su curva esfuerzo/deformación unitaria, lo que genera problemas de inestabilidad numérica. Todo esto hace que la modelación de elementos de hormigón armado mediante elementos *Shell* no lineales multicapa tenga dificultades para converger en el software *SAP 2000*.

3 | Marco Teórico

La propuesta de este trabajo consiste en modelar una viga mediante un modelo de enrejado equivalente similar a lo realizado por [Moharrami et al. \(2015\)](#) y [Norero y Sepúlveda \(2018\)](#). Por lo tanto, se confeccionarán modelos semejantes a la *Figura 3.1* a través de elementos uniaxiales.

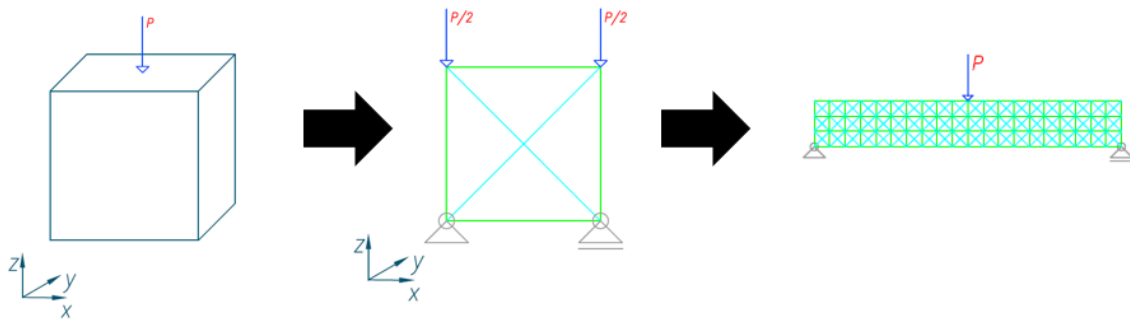


Figura 3.1: Vinculación entre estados tensionales y rigideces laterales.

A modo de resumen, en el desarrollo del capítulo se comenzará con la formulación de las áreas para los elementos del modelo con sustento en el método de los desplazamientos y la *Ley de Hooke Generalizada*. Luego se abarcarán las curvas de comportamiento de los materiales y finalmente, los aspectos relacionados a las deformaciones unitarias en direcciones principales.

3.1. Áreas de Elementos de Hormigón

La definición de las áreas equivalentes de cada elemento uniaxial, se realiza mediante el método de los desplazamientos. El objetivo es obtener una respuesta a nivel de nodos, igual a la respuesta de un elemento cuadrado infinitesimal (en

adelante se hará referencia como "macro elemento").

3.1.1. Método de Rigidez

El método de los desplazamientos en términos matemáticos se define por la siguiente ecuación:

$$\{W\}_n = [K]_n \{D\}_n \quad (3.1)$$

Donde $\{W\}_n$ corresponde al vector de cargas nodales, $[K]_n$ es la matriz de rigidez en coordenadas globales, $\{D\}_n$ es el vector de desplazamientos nodales y el subíndice n hace referencia al elemento en análisis. Como ejemplo es posible considerar el elemento de la *Figura 3.2*:

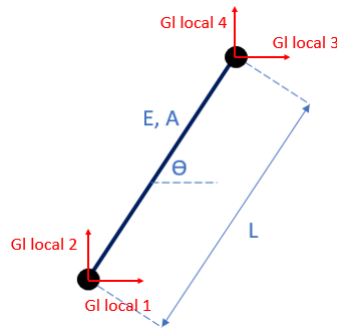


Figura 3.2: Parámetros geométricos.

Donde E corresponde al módulo de elasticidad, A y L definidos como el área del elemento en análisis y su respectivo largo, y θ corresponde al ángulo que determina la orientación del elemento, medido desde el eje de las abscisas y en sentido antihorario. En consiguiente, la matriz de rigidez de este elemento uniaxial y bidimensional corresponde a:

$$[K]_n = \left(\frac{EA}{L} \right)_n \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & & & S \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta & & \\ -\cos^2 \theta & -\cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta & \\ -\cos \theta \sin \theta & -\sin^2 \theta & \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Por lo tanto, el uso de este elemento uniaxial permitirá definir un macro elemento como el de la *Figura 3.3*:

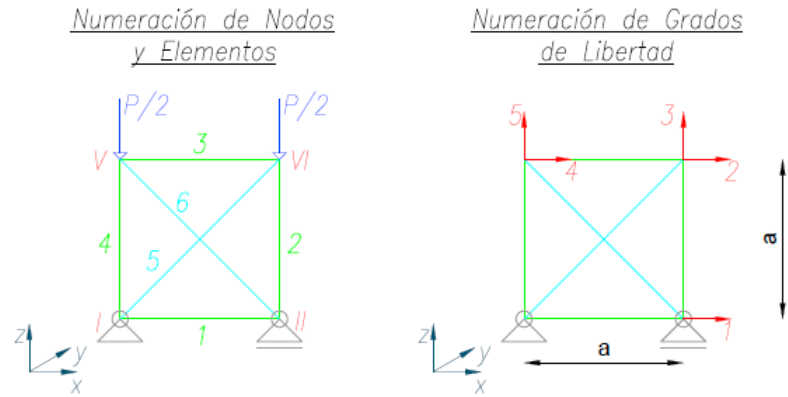


Figura 3.3: Nomenclatura del macroelemento para construir la matriz de rigidez.

En consiguiente, considerando la nomenclatura de la *Figura 3.3* es posible construir la matriz de rigidez del macro elemento en coordenadas globales:

$$[K] = \left(\frac{E}{a} \right) \begin{bmatrix} A_o + \frac{A_d}{2\sqrt{2}} & & & & & S \\ 0 & A_o + \frac{A_d}{2\sqrt{2}} & & & & \\ 0 & \frac{A_d}{2\sqrt{2}} & A_o + \frac{A_d}{2\sqrt{2}} & & & \\ \frac{-A_d}{2\sqrt{2}} & -A_o & 0 & A_o + \frac{A_d}{2\sqrt{2}} & & \\ \frac{A_d}{2\sqrt{2}} & 0 & 0 & \frac{-A_d}{2\sqrt{2}} & A_o + \frac{A_d}{2\sqrt{2}} & \\ & & & & & \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Donde E corresponde al módulo de elasticidad, a es la dimensión de la arista del macro elemento cuadrado y A_o con A_d son las áreas ortogonal y diagonal¹, respectivamente. En efecto, los detalles de los cálculos se encuentran en el *Apéndice A*.

Por otro lado, la fuerza total recibida por el macro elemento se expresa mediante dos cargas puntuales, lo que resulta en el vector de carga $\{W\}$, mientras que los desplazamientos nodales se expresan mediante el vector $\{D\}$:

¹Considerando la nomenclatura de la *Figura 3.3*, el área de los elementos 1, 2, 3 y 4 corresponde a A_o . En cambio, el área de los elementos 5 y 6 corresponde a A_d .

$$\{W\} = P \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{2} \\ 0 \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$\{D\} = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Finalmente, resolviendo la *Ecuación 3.1* en términos globales es posible obtener cada uno de los desplazamientos nodales:

- Desplazamientos en el grado de libertad 1 y 2:

$$D_1 = D_2 = P \frac{aA_o \sqrt{2}}{4E(A_o \sqrt{2} + 2A_o)A_o} \quad (3.6)$$

- Desplazamientos en el grado de libertad 3 y 5:

$$D_3 = D_5 = -P \frac{a(A_d \sqrt{2} + 4A_o)}{4E(A_d \sqrt{2} + 2A_o)A_o} \quad (3.7)$$

- Desplazamientos en el grado de libertad 4:

$$D_4 = 0 \quad (3.8)$$

La *Figura 3.4* corresponde a un esquema que representa cada una de las deformaciones nodales en el macro elemento. Ahora bien, como se ha observado en el trabajo de [Moharrami et al. \(2015\)](#), este macro elemento es adecuado para representar los modos de flexión y corte en los especímenes, ya que en esa publicación se observa que la modelación es capaz de homologar la respuesta histerética de los resultados experimentales.

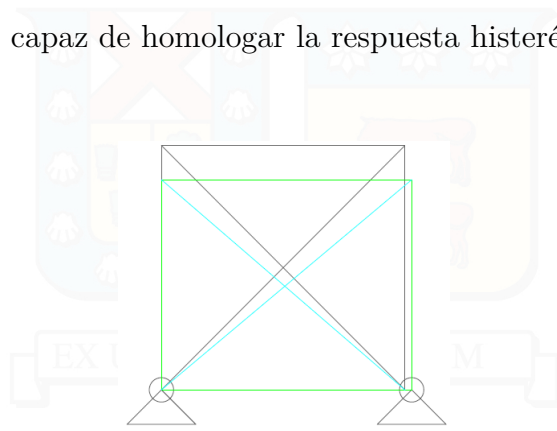


Figura 3.4: Esquema de las deformaciones en el macro elemento.

Debido a que la deformación del macro elemento queda definida en función de las áreas de cada barra, se debe utilizar algún criterio para definir dichas áreas, para lo cual se utiliza la *Ley de Hooke Generalizada*.

Cabe señalar que para caracterizar completamente el comportamiento elástico del macro elemento, se ha supuesto que el material, tiene un comportamiento linealmente elástico isotrópico y homogéneo. Por lo tanto, en este estudio se ha decidido caracterizar el macro elemento por sólo dos constantes, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. Así pues, el módulo de rigidez puede ser expresado como:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.9)$$

3.1.2. Ley de Hooke Generalizada

Para su aplicación se considerarán los siguientes supuestos:

- Los especímenes presentan pequeñas deformaciones.
- El hormigón usado en los experimentos corresponde a un material linealmente elástico, isotrópico y homogéneo.

- La deformación unitaria de los cuerpos es directamente proporcional a la fuerza aplicada en ellos y para su definición, se considerará la deformación unitaria ingenieril (o infinitesimal).

En consiguiente, es posible aplicar las siguientes ecuaciones a un elemento infinitesimal compuesto por hormigón:

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] \quad (3.10)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] \quad (3.11)$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] \quad (3.12)$$

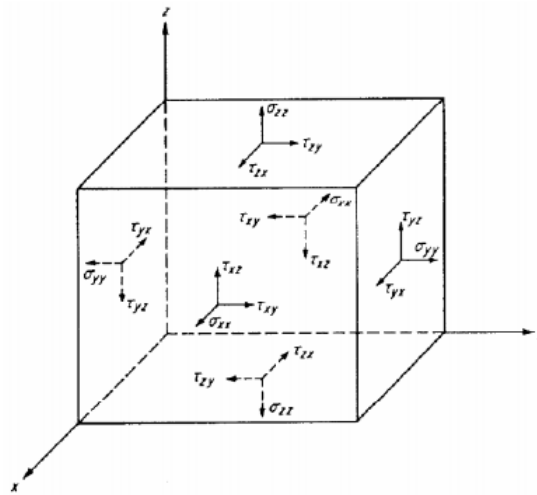


Figura 3.5: Estado tensional de un sólido infinitesimal.

Desde luego, es necesario vincular este sólido infinitesimal con el macro elemento del *Capítulo 3.1.1*. Para lo cual, se considerará que ambos se encuentran bajo el mismo estado tensional y que las dimensiones del cubo corresponden a $L_x = L_z = a$ y $L_y = b$. Por lo tanto, es posible relacionar la deformación unitaria del cubo, con los desplazamientos nodales (D_1 y D_5) del macro elemento:

$$\epsilon_x = \frac{D_1}{a} \quad \epsilon_z = \frac{D_5}{a}$$

Entonces, la Ecuación 3.10 y 3.11 se transforman en el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} \frac{D_1}{a} = -\frac{P\nu}{Eab} \\ \frac{D_5}{a} = \frac{Pba}{E} \end{cases}$$

Resolviendo para A_o y A_d :

$$A_d = \frac{ba\sqrt{2}\nu}{1-\nu^2} \quad A_o = \frac{ba}{2(\nu+1)}$$

En base a lo utilizado por Norero y Sepúlveda (2018) se tomará el coeficiente de Poisson como $\nu = 0,2$, por lo tanto:

$$A_d = \frac{5\sqrt{2}}{24}ba \quad A_o = \frac{5}{12}ba$$

A modo de comentario, los resultados obtenidos son similares a los encontrados en la modelación de Norero y Sepúlveda (2018).

3.2. Comportamiento de los Materiales

Mediante los capítulos anteriores se ha logrado definir los parámetros geométricos de un elemento uniaxial como el de la Figura 3.2. En cambio este capítulo abarca la definición del comportamiento del material con que puede estar compuesto dicho elemento uniaxial.

3.2.1. Hormigón

Uno de los modelos más usados para el hormigón en compresión, corresponde al propuesto por Hognestad (1951). Por su simplicidad, el modelo está basado en el hormigón sin confinar y para su formulación, contempla dos tramos.

El primer tramo es ascendente y representa el estado tensional cuando el hormigón comienza a ser cargado. El tramo corresponde a una curva suave determinada por una parábola, que se encuentra relacionada al módulo de elasticidad del hormigón (E_c).

La parábola está definida hasta el peak en que el hormigón ha alcanzado su resistencia $0,85f'_c$ a una deformación unitaria ϵ_0 . Cabe necesario comentar que la resistencia f'_c corresponde a la resistencia en probetas cilíndricas ensayadas en compresión simple y ϵ_0 posee como valor típico 0,002.

A continuación se encuentra el segundo tramo, el cual está definido desde el peak y se caracteriza por representar la pérdida de resistencia que decrece linealmente hasta la falla.

Según lo propuesto en la investigación, la falla se ha estimado que está caracterizada por una pérdida de resistencia del 15 % a un valor promedio de deformación unitaria ϵ_u de 0,0038.

La formulación del modelo constitutivo es:

$$f_c(\epsilon_c) = f_c'' \begin{cases} 2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 & \epsilon_c \leq \epsilon_0 \\ 1 - 0,15 \left(\frac{\epsilon_c - \epsilon_0}{\epsilon_u - \epsilon_0} \right) & \epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_u \end{cases} \quad (3.13)$$

La *Figura 3.6* corresponde a un diagrama con la definición de las variables.

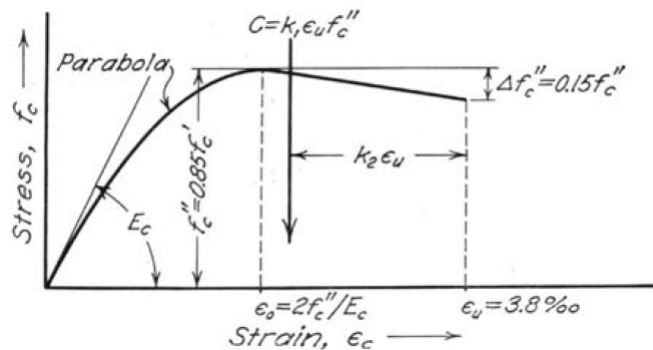


Figura 3.6: Diagrama de esfuerzo deformación unitaria del hormigón en compresión *Hognestad (1951)*.

Por otro lado, para el comportamiento en tracción se utilizarán dos tipos de comportamiento, de forma tal de comparar la respuesta del modelo bajo dos supuestos diferentes: En el modelo 1 se considera que el hormigón en tracción deja de ejercer fuerza de un instante a otro, tal como ocurre con elementos de hormigón sin refuerzo. En cambio, el modelo 2 considera una reducción lineal de la resistencia en tracción

desde el instante en el que se alcanza la resistencia máxima hasta llegar a fuerza nula. Este comportamiento se utiliza para simular de manera equivalente el aporte del hormigón en el comportamiento global de elementos de hormigón armado en tracción. (en base a lo propuesto por [Mohd-Yassin et al. \(1994\)](#)). Por lo tanto, la formulación de ambos modelos corresponde a:

- Modelo 1:

$$f_t(\epsilon_c) = \begin{cases} E_c \epsilon_c & \text{si } f_t \leq f'_t \\ 0 & \text{si } f_t \geq f'_t \end{cases} \quad (3.14)$$

- Modelo 2:

$$f_t(\epsilon_c) = \begin{cases} E_c \epsilon_c & \text{si } f_t \leq f'_t \\ E_{ts} \epsilon_c + \left(f'_t - \frac{f'_t E_{ts}}{E_c} \right) & \text{si } f_t \geq f'_t \end{cases} \quad (3.15)$$

Donde f'_t se ha considerado como $2\sqrt{f'_c}$ (en $[kgf/cm^2]$) en base a lo publicado por el código de diseño [American Concrete Institute ACI \(2008\)](#) y para E_{ts} , el valor de $E_c/10$ según lo propuesto por [Zhou et al. \(2012\)](#).

La *Figura 3.7* muestra las variables consideradas en los modelos:

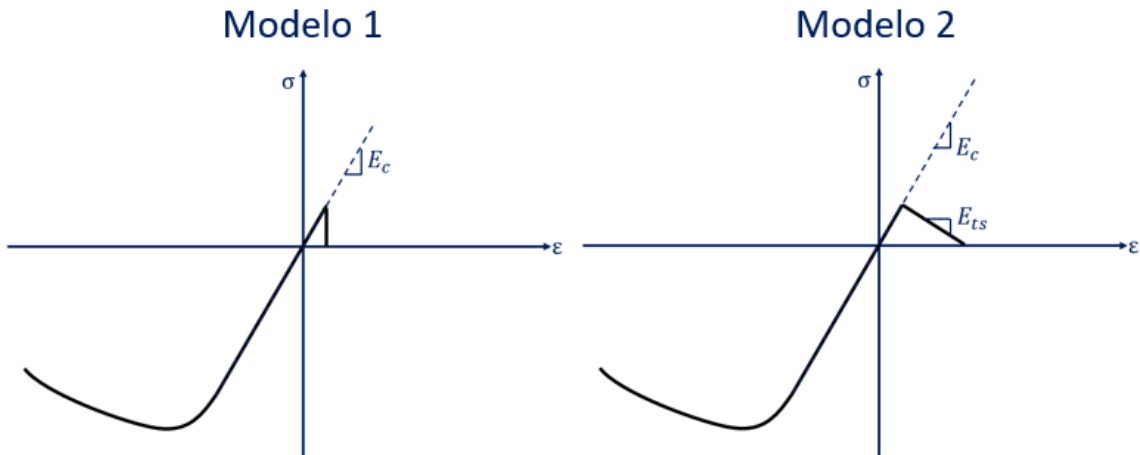


Figura 3.7: Esquema representativo para el hormigón en tracción.

3.2.2. Acero de Refuerzo

En términos generales, la curva de comportamiento del acero está compuesta inicialmente por un tramo lineal que está directamente relacionada con el módulo elástico del material. Este valor es conocido como E_s y posee un valor aproximado de $2,1 \cdot 10^6 [kgf/cm^2]$. El tramo inicial se extiende hasta que la tensión en el material alcanza la resistencia de fluencia f_y a una deformación unitaria ϵ_0 con un valor típico en diseño de 0,002.

Posteriormente a ello, el material continúa deformándose sostenidamente a tensión constante. Esta zona es conocida como la meseta de fluencia y se encuentra representada por una recta horizontal.

Luego de este rango, continúa la zona de endurecimiento por deformación, la cual se caracteriza por una curva creciente hasta que el material alcanza su resistencia última f_u a una deformación unitaria última ϵ_{su} . Cuando el acero ha alcanzado este punto se conoce como la falla del material y a partir de allí, el material rápidamente alcanza la rotura.

En términos de la formulación para la curva de comportamiento, la publicación realizada por [Kent \(1969\)](#) propone lo siguiente:

- Tramo AB - $\epsilon_s \leq \epsilon_y$

$$f_s = E_s \epsilon_s$$

- Tramo BC - $\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}$

$$f_s = f_y$$

- Tramo CD - $\epsilon_{sh} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$

$$f_s = f_y \left[\frac{W_h(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2}{60(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{sh}}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \left(\frac{f_u}{f_y} - W_a \right) \right]$$

$$b = \epsilon_{su} - \epsilon_{sh}$$

$$W_a = \frac{f_u}{f_y} + \frac{W_h b - 60b}{2(30b + 1)^2}$$

$$W_h = \frac{\frac{f_u}{f_y}(30b + 1)^2 - 60b - 1}{15b^2}$$

La *Figura 3.8* corresponde a un diagrama con la definición de las variables:

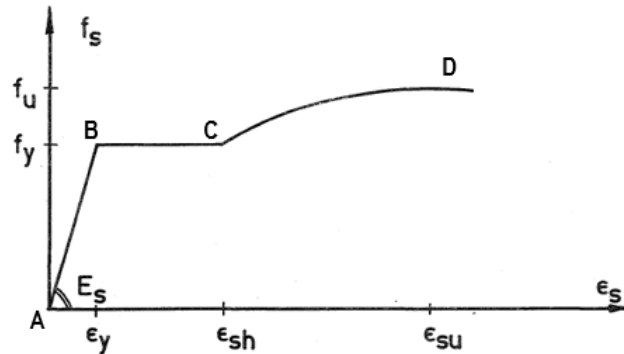


Figura 3.8: Diagrama de esfuerzo deformación unitaria para el comportamiento del acero Kent (1969).

3.3. Fotogrametría

La implementación de la fotogrametría consiste a grandes rasgos en el seguimiento de un cuerpo en una serie de imágenes subsecuentes, mediante alguna herramienta de correlación (*digital image correlation DIC*).

Desde luego, el cuerpo en análisis se encuentra predefinido mediante una grilla de nodos. Esto permite caracterizar al cuerpo en ciertos puntos discretos, formando una grilla, tal como si fuera un mallado de elementos finitos. Por ende, en términos prácticos la posición de un punto en la imagen actual P_{i+1} se encuentra vinculado a un punto en la imagen anterior P_i , mediante un valor δ que corresponde al desplazamiento del nodo.

En la literatura es posible encontrar diferentes algoritmos que se han implementado para encontrar el valor de δ , incluso Manríquez y Massone (2016) realiza una comparación entre distintos programas para llevar a cabo su investigación. Entre ellos, el desarrollado por Inzunza y Massone (2014) y otros, como *Ncorr* (Blaber et al. (2015)) de libre acceso, *VIC-2D* y *GeoPIV-RG*. Finalmente, los comentarios indican que *Ncorr* sobresale por el resto.

En cuanto al software *Ncorr*, el algoritmo plantea la solución de los desplazamientos nodales mediante las siguientes ecuaciones:

$$\tilde{x}_{cur_i} = x_{ref_i} + u_{rc} + \frac{\partial u}{\partial x_{rc}}(x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial u}{\partial y_{rc}}(y_{ref_j} - y_{ref_c}) \quad (3.16)$$

$$\tilde{y}_{cur_j} = y_{ref_j} + v_{rc} + \frac{\partial v}{\partial x_{rc}}(x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial v}{\partial y_{rc}}(y_{ref_j} - y_{ref_c}) \quad (3.17)$$

$$p = \left\{ u \quad v \quad \frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial u}{\partial y} \quad \frac{\partial v}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \right\}^T \quad (3.18)$$

Donde

- \tilde{x}_{ref_i} y \tilde{y}_{ref_j} hacen referencia a las coordenadas nodales del subconjunto de referencia.
- \tilde{x}_{ref_c} y \tilde{y}_{ref_c} indican las coordenadas nodales del centro del subconjunto de referencia.
- \tilde{x}_{cur_i} y \tilde{y}_{cur_j} aluden a las coordenadas nodales del subconjunto actual.
- Los subíndices i, j indican la ubicación relativa del subconjunto.
- El subíndice rc indica la transformación desde la referencia al sistema de coordenadas actual.
- p es la forma del vector de deformación.

Posteriormente, una vez que el programa encuentra el vector de desplazamientos, las deformaciones unitarias quedan definidas por las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right) \quad (3.19)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3.20)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) \quad (3.21)$$

Es así como la definición de las deformaciones unitarias, permite descomponerlas y plantear la formulación para deformaciones unitarias en direcciones principales. Para lo cual, se optará por el enfoque bidimensional del *Círculo de Mohr*.

3.3.1. Deformaciones Unitarias Principales

La definición de las deformaciones unitarias principales (DUP) queda determinada a través del *Círculo de Mohr*. En consiguiente, la formulación está basada en los antecedentes publicados en el texto de estudio: *Mecánica de Sólidos* (Popov y Balan (1990)) y la *Figura 3.9* muestra cada una de las variables.

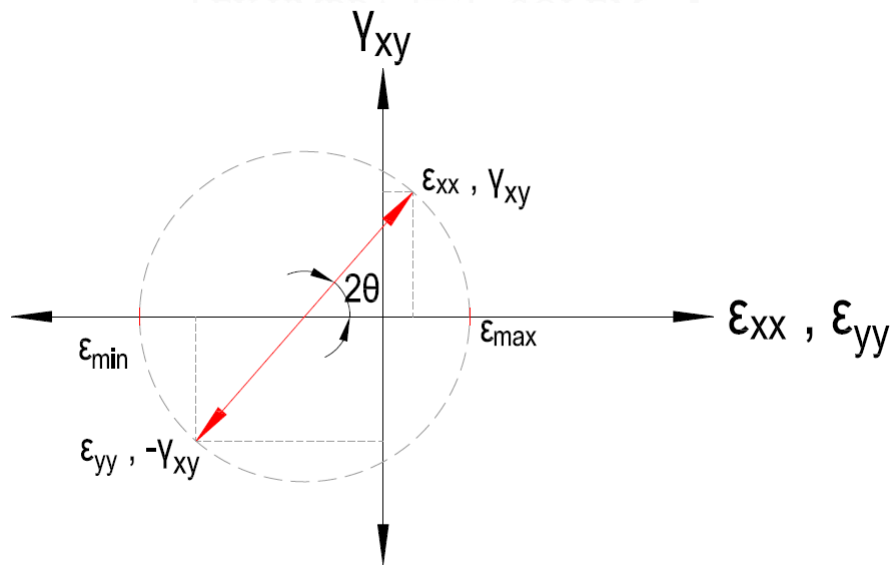


Figura 3.9: Esquema del *Círculo de Mohr* para deformaciones unitarias.

$$\epsilon_{m\acute{a}x,m\acute{i}n} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (3.22)$$

Así entonces, el plano sobre el que actúa las DUP queda definido por:

$$\tan 2\theta = \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad (3.23)$$

4 | Campaña Experimental

El desarrollo de este capítulo está enfocado a la preparación de elementos de HA para ser ensayados en el laboratorio. Desde luego se aprovecha la instancia de la campaña experimental, para realizar ensayos de carga deformación en los materiales utilizados y de esta forma calibrar los modelos constitutivos que se han comentado en el *Capítulo 3.2*. No obstante, también se obtiene información empírica del comportamiento de los especímenes mediante la recopilación de fotografías para posteriormente ser usadas en un análisis de correlación de imágenes digitales.

Es por esto que a lo largo de este apartado, se abarcan los distintos detalles de los trabajos de campo realizados para ensayar dos vigas de HA y durante su desarrollo, la recopilación del registro fotográfico.

Para tales labores, se han utilizado las instalaciones del laboratorio de Ingeniería Civil en la **Universidad Técnica Federico Santa María** (Campus Santiago).

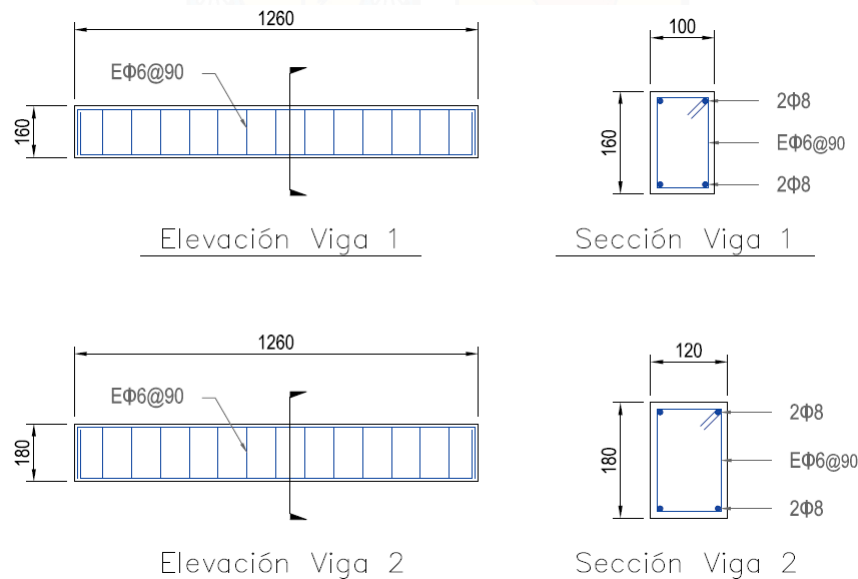
4.1. Descripción de las Vigas

4.1.1. Detallamiento

La *Tabla 4.1* muestra las características de cada viga a ensayar y la *Figura 4.1* corresponde a un esquema que complementa la disposición de la armadura dispuesta en cada una de ellas. Adicionalmente, es necesario comentar que para el refuerzo longitudinal se usan barras con resaltes de calidad *A630-420H* y para los estribos, se usan barras lisas de calidad *A440-280H*.

Tabla 4.1: Características geométricas de las vigas.

	Viga 1	Viga 2
Sec. Transversal [mm^2]	100x160	120x180
Ref. Longitudinal	4 ϕ 8	4 ϕ 8
Estribos	ϕ 6@90	ϕ 6@90

**Figura 4.1:** Esquema representativo de cada viga.

Finalmente, para ambas vigas se ha considerado un recubrimiento de 10[mm]

4.1.2. Materiales

Los materiales se han organizado según las etapas de enfierradura, moldaje, preparación de mezcla, pintura para la fotogrametría y ensayo de carga en vigas:

- En primer lugar, el proceso de preparación de la enfierradura considera la utilización de las siguientes herramientas y materiales:
 - Barras con resaltos diámetro nominal ϕ 8, largo 6[m] y calidad de acero *A630-420H*

- Barras lisas con diámetro nominal $\phi 6$, largo $6[m]$ y calidad de acero *A440-280H*
- Esmeril angular
- Elementos de protección personal (guantes, máscara facial, overol)
- Huincha de medir hasta $5[m]$
- Dobladora de fierros artesanal
- Alicates
- Alambre
- Posteriormente, el proceso de moldaje consta de:
 - Planchas de madera de $25[mm]$ de espesor
 - Clavos corrientes de $3''$
 - Martillo
 - Desmoldante
 - Brocha
- Luego, la preparación de la mezcla considera la utilización de:
 - Áridos con tamaño máximo de $10[mm]$
 - Cemento para usos generales
 - Agua
 - Pala
 - Poruñas
 - Recipientes graduados
 - Tamices
- Posteriormente la pintura requerida para poder implementar la fotogrametría requiere los siguientes materiales:

- Esmalte al agua para interiores de color negro y acabado opaco
 - Cal para pintar
 - Agua
 - Pulverizador ajustable
 - Brochas
- Finalmente, los elementos requeridos en el ensayo de carga en vigas corresponden a:
- Cámara fotográfica A:
 - Modelo: Canon EOS Rebel T3i
 - Procesador: DIGIC 4
 - Megapíxeles: 18 MP
 - Sensor: CMOS APS-C
 - Cámara fotográfica B:
 - Modelo: Sony alpha-58
 - Procesador: BIONZ
 - Megapíxeles: 20,1 MP
 - Sensor: CMOS Exmor APS-C
 - Trípodes con nivelación incorporada (2)
 - Focos halógenos (2)
 - Computador (1)
 - Regla de 60[cm] con resolución de 1[mm]
 - Prensa hidráulica Controls modelo 70-C820/C (*ver Apéndice B*)

4.1.3. Fabricación de Elementos de HA

La fabricación de las vigas es realizada de manera artesanal. En primer lugar, la enfierradura es cortada y doblada personalmente por el autor en las instalaciones

del laboratorio de Ingeniería Civil de la **Universidad Técnica Federico Santa María**.

La *Figura 4.2* muestra algunas fotos tomadas durante el proceso de preparación de la enfierradura.

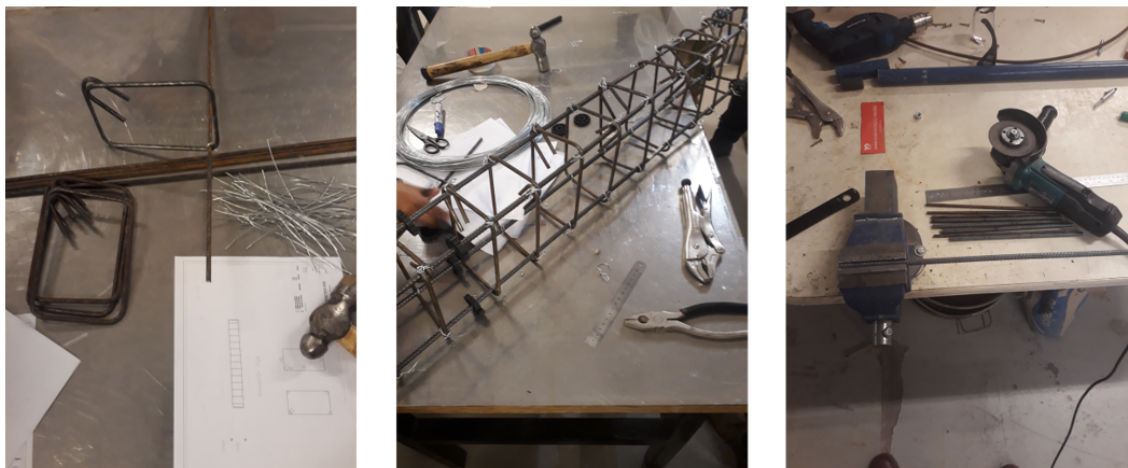


Figura 4.2: Corte y doblado de barras.

Posteriormente, se prepara el moldaje mediante planchas de madera y clavos corrientes (ver *Figura 4.3*). Una vez que el moldaje está terminado, se pinta por el interior con desmoldante y se coloca la enfierradura de la viga en el interior del moldaje.



Figura 4.3: Preparación del moldaje.

A continuación se procede a preparar la mezcla de hormigón. Para esto se ha decidido preparar un hormigón con una resistencia objetivo de $100[\text{kgf}/\text{cm}^2]$ y utilizar una proporción de tres volúmenes de árido por uno de cemento y agua. Las cantidades de material son medidas y posteriormente mezcladas manualmente. En la *Figura 4.4* es posible observar distintas fotos tomadas durante el proceso.



Figura 4.4: Medición de volúmenes a utilizar en la mezcla.

Una vez terminada la mezcla, el hormigón es vertido en el encofrado de madera y se procede a realizar la compactación. Esto es realizado mediante picado con barra y apisonado con un mazo de goma. La *Figura 4.5* y *4.6* muestran distintas fotos tomadas durante el proceso hasta que las vigas son transportadas a un lugar de resguardo dentro del laboratorio.



Figura 4.5: Preparación de la mezcla para el hormigón.



Figura 4.6: Resguardo de las vigas dentro del laboratorio.

Finalmente es necesario agregar que las vigas no mantuvieron una humedad adecuada durante el proceso de curado. Por lo mismo, este factor tiene influencia en la respuesta de estos elementos y desde luego, su presencia influye en que los ensayos en la prensa entreguen resultados diferentes a lo esperado.

4.1.4. Preparación para la Fotogrametría

Una vez que las vigas están listas para ensayar, el proceso inicia con la preparación de una mezcla líquida compuesta por cal y agua. Una vez que se eliminan los grumos de la mezcla, es posible comenzar a pintar completamente cada viga.

Posteriormente, una vez que la pintura ha secado, se procede a pintar cada viga de color negro con un pulverizador. Para el rociado con pintura negra, se debe considerar que las manchas deben encontrarse dispuestas de manera densa y heterogénea y además, se debe cuidar que la pintura no escurra ni que las manchas sean de un tamaño considerable. Finalmente, la *Figura 4.7* muestra el proceso en que se aplica el esquema de pintura y termina con las vigas listas para ensayar.



Figura 4.7: Esquema de pintura en las vigas.

4.2. Propiedades de los Materiales

Las propiedades mecánicas del hormigón y de las barras de acero fueron medidas experimentalmente y la *Figura 4.8* muestra algunas fotos de los elementos ensayados.¹



Figura 4.8: Probetas para realizar ensayos de compresión y tracción.

En cuanto al hormigón, se ensayaron 2 probetas (una para cada viga) con dimensiones de 150[mm] de diámetro y 300[mm] de alto. Los resultados de laboratorio entregan las siguientes curvas de carga (F) deformación (Δ):

¹Los ensayos de compresión son realizados en los laboratorios del Departamento de Obras Civiles y por otro lado, los ensayos de barras a tracción hasta la rotura, son realizados en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Mecánica.

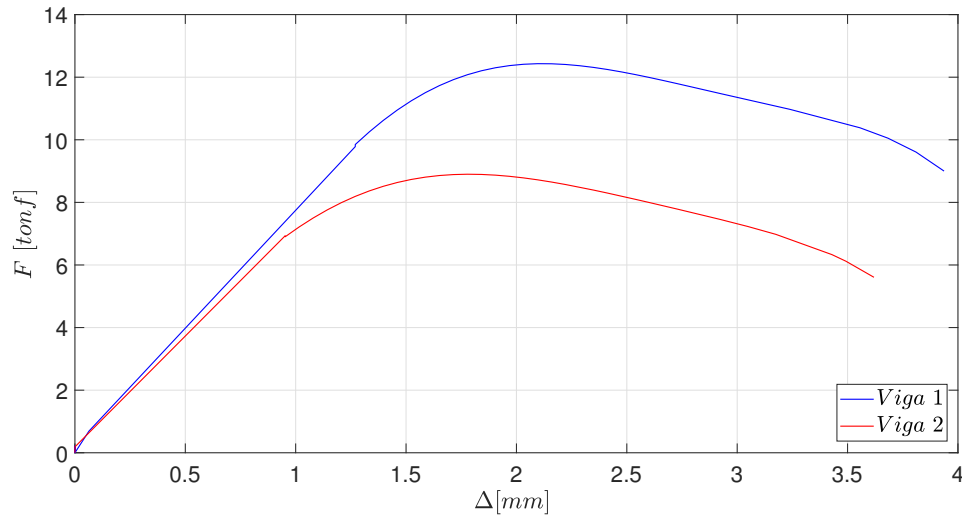


Figura 4.9: Curvas de comportamiento del hormigón en compresión.

La *Tabla 4.2* muestra los parámetros característicos calculados para cada viga. Cabe señalar que el módulo de elasticidad se calculó usando el módulo de elasticidad secante a una tensión equivalente de $0,4f'_c$:

Tabla 4.2: Propiedades elásticas del hormigón usado en cada viga.

	Viga 1	Viga 2
E_c [kgf/cm ²]	13179	12263
f'_c [kgf/cm ²]	70,2	50,3

En cuanto a las propiedades del acero, se realizaron cuatro ensayos para caracterizar las barras con resaltes de 8[mm] usadas en el refuerzo y cuatro más para las barras lisas de 6[mm] usadas para formar los estribos. En particular, de los cuatro ensayos realizados en cada tipo de barra, dos de ellos son utilizados para conocer la curva de comportamiento en un ensayo de tracción hasta la rotura y los restantes dos, para obtener el módulo de elasticidad en un ensayo de tracción en el rango elástico.

Luego, en la *Figura 4.10* es posible observar los resultados de las curvas de comportamiento para las barras de 8[mm] y en la *Figura 4.11* se muestran los resultados de laboratorio, para medir el módulo de elasticidad.

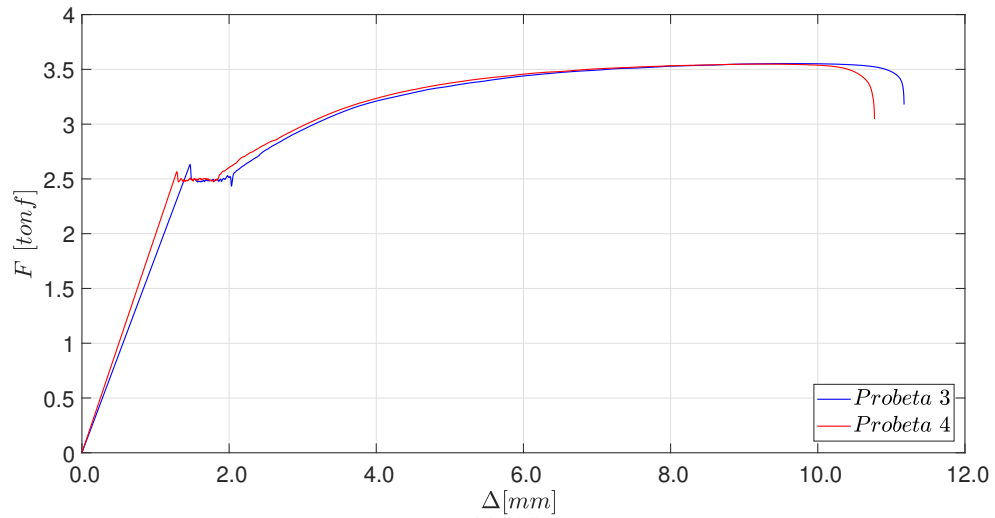


Figura 4.10: Curvas de comportamiento del acero en tracción para barras de 8[mm].

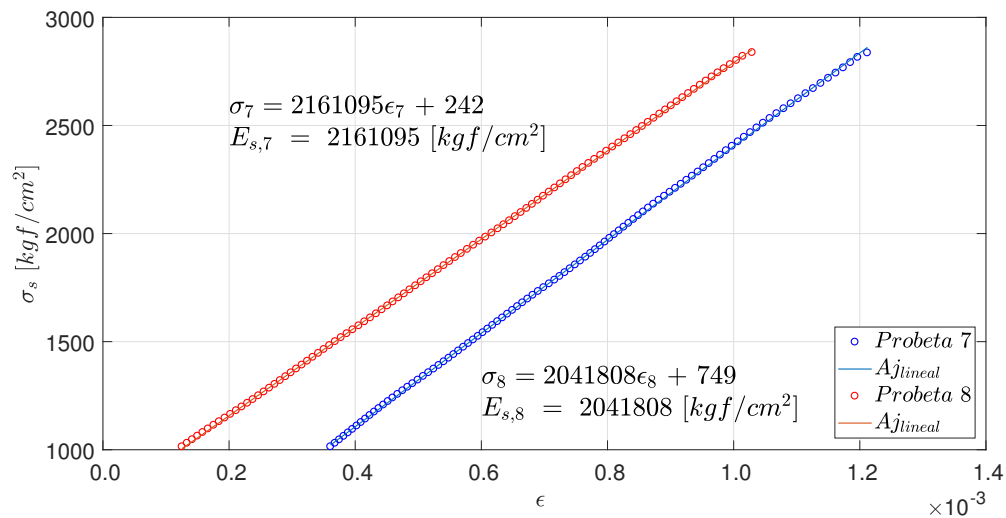


Figura 4.11: Medición del módulo de elasticidad para barras de 8[mm].

De manera análoga, los resultados experimentales de las barras de 6[mm] usadas en los estribos son mostrados en las *Figuras 4.12* y *4.13*. De igual forma es necesario recordar, que la calidad de la barra corresponde a un acero *A440-280H*.

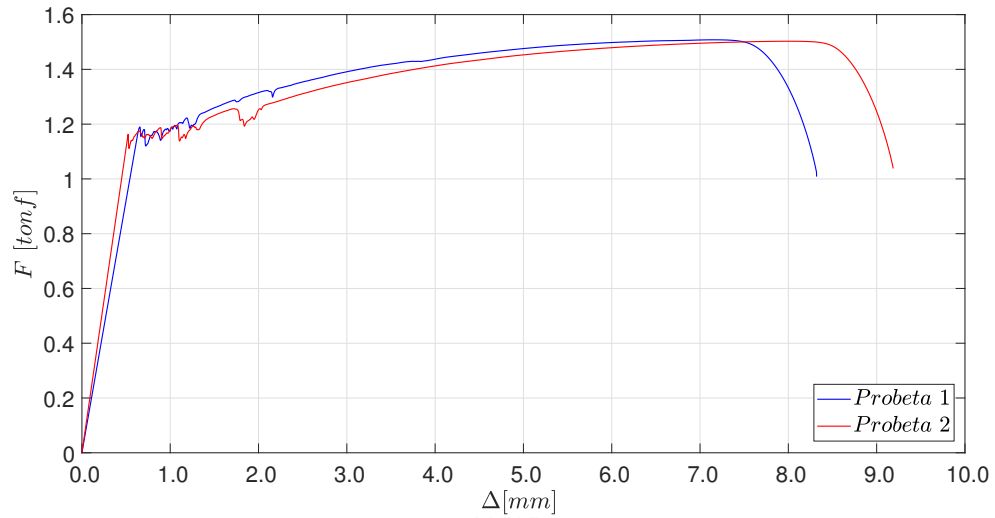


Figura 4.12: Curvas de comportamiento del acero en tracción para barras de 6[mm].

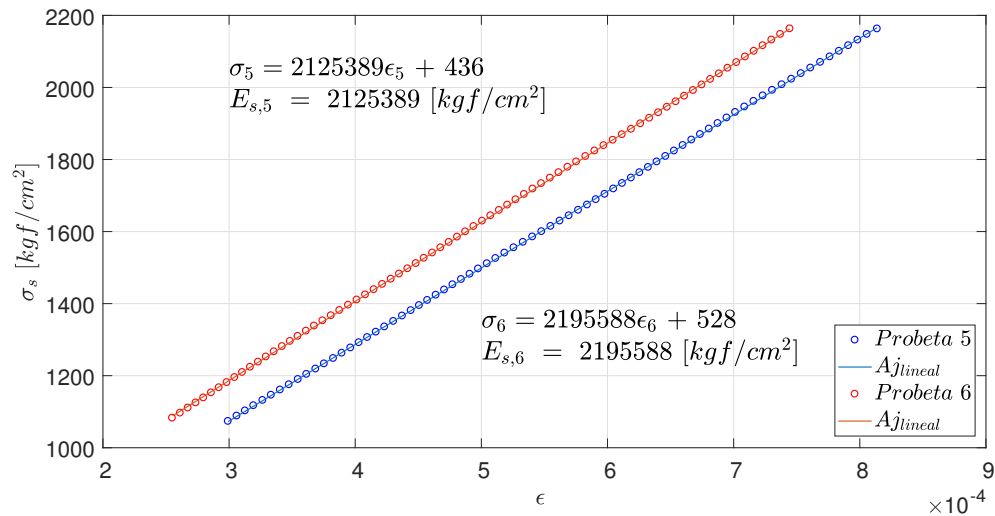


Figura 4.13: Medición del módulo de elasticidad para barras de 6[mm].

Por consiguiente y a manera de resumen, las propiedades elásticas obtenidas fueron promediadas en cada tipo de barra y se muestran en la *Tabla 4.3*.

Tabla 4.3: Propiedades elásticas de las barras de acero usadas en cada viga.

	$E_y[kgf/cm^2]$	$E_s[kgf/cm^2]$
Barras con $\phi 6[mm]$	4116	2171751
Barras con $\phi 8[mm]$	4943	2101456

4.3. Ensayo de Carga en Vigas

4.3.1. Preparación Experimental

La recopilación bibliográfica desarrollada en el presente trabajo de título contempla el uso de la aplicación *Ncorr* (Blaber et al. (2015)) para aplicar la técnica de fotogrametría, y aunque más adelante se darán las especificaciones de las configuraciones usadas en esta herramienta, hasta este punto es necesario comentar que el programa posee la limitación de operar con un factor de escala constante (usado para la conversión entre pixeles y unidades de longitud) y en términos prácticos, esto repercute en que el lente de la cámara debe encontrarse paralelo a la superficie que se desea analizar con la fotogrametría. Dicho de otra forma, la cámara no debe montarse para enfocar en perspectiva al elemento en análisis, si no, de manera frontal al plano observado.

Además, es necesario considerar que el equipo de carga se encuentra diseñado para que el elemento a ensayar se encuentre perpendicular al marco de la prensa. Lo cual implica, que al montar las vigas en el equipo, no es posible realizar la fotogrametría en una pequeña zona en el centro de la viga, debido a que el campo de visión de la cámara fotográfica es obstaculizado por el marco de la prensa y por lo tanto, es necesario adaptar el montaje.

Como solución se plantea girar la viga entorno al actuador de la prensa, tal y como se muestra en la *Figura 4.14*. Así pues, esta forma permite exponer el perfil de la viga y poder incluir en el registro fotográfico el centro de la viga. Sin embargo, como limitación de esta alternativa surge la restricción de que la cámara sólo puede

fotografiar la mitad de la viga. Por lo tanto, se emplean dos cámaras para observar lados opuestos de la viga y lograr tener un panorama completo en la fotogrametría.

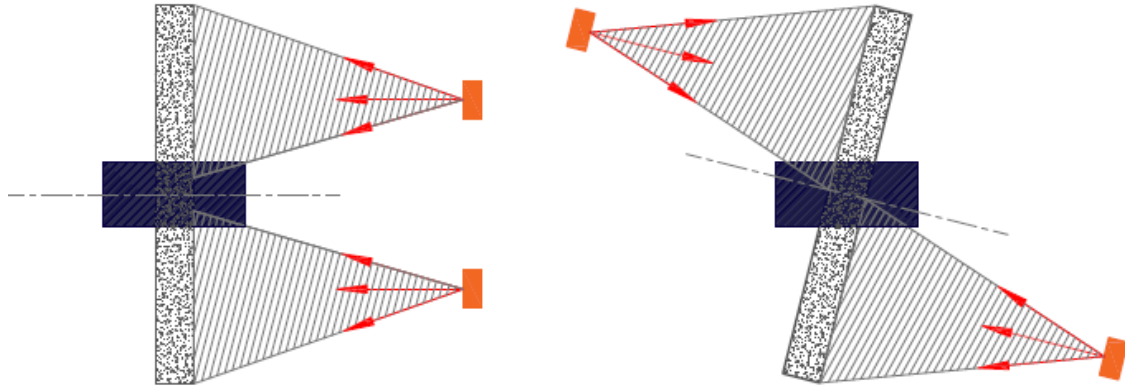


Figura 4.14: Diagrama de elementos para la situación en conflicto.

En general, el desarrollo experimental implica el cumplimiento de los siguientes supuestos:

- Las condiciones de iluminación son constantes en el laboratorio.
- No existe contaminación cruzada entre los focos de iluminación que afecten a las cámaras.
- Ambas cámaras son equivalentes en términos técnicos.
- La deformación de la viga es simétrica.
- La aplicación de la carga es realizada a una velocidad baja, es decir, de manera cuasi-estática.

4.3.2. Montaje Experimental

En la *Figura 4.15* es posible observar un esquema de la vista en planta del montaje para el ensayo de carga en vigas y además, la disposición de los elementos para obtener el registro fotográfico.

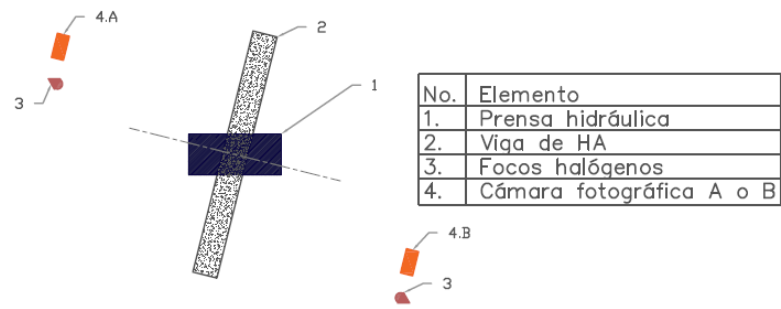


Figura 4.15: Diagrama de elementos en el montaje experimental.

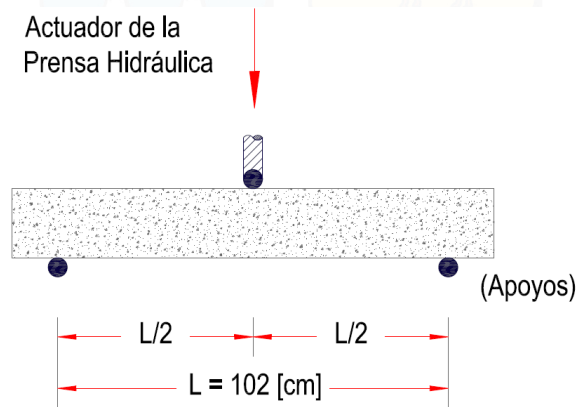


Figura 4.16: Esquema de las condiciones de borde del ensayo.

Y de manera complementaria, la *Figura 4.17* muestra la disposición de los instrumentos en el laboratorio:



Figura 4.17: Montaje de instrumentos en el laboratorio.

4.3.3. Realización de Ensayos

Previo a la realización del ensayo, la prensa hidráulica es encendida una hora con antelación para preparar el equipo y lograr que el proceso de carga no tenga problemas con aumentos de carga desmedidos.

Durante la preparación de la prensa, el actuador y los apoyos en la máquina son rotados en torno al eje de carga hasta que las características de la máquina lo permitan, de forma tal, de poder darle el mejor ángulo de visión a las cámaras. Además, la distancia entre los apoyos es aumentada hasta una separación de $102[cm]$ y se ha mantenido fija en el ensayo de ambas vigas.

Posteriormente a ello, la viga es levantada manualmente hasta el nivel requerido por la prensa y ajustada para ser ensayada. Debido a que las dimensiones de la viga no son ideales, es necesario estabilizar la carga aplicada mediante cuñas de madera, tal y como muestra la siguiente figura:

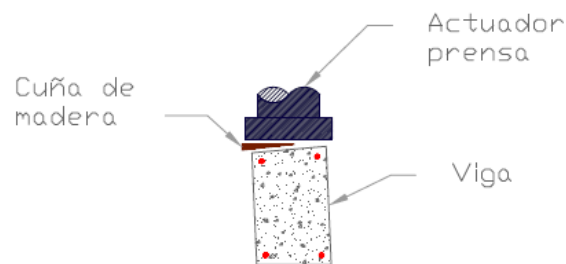


Figura 4.18: Uso de cuñas de madera en la viga 1 y 2 para estabilizar la carga.

A continuación se montan las cámaras fotográficas sobre los trípodes y se colocan de tal manera, que cada una apunte hacia el lado expuesto de la viga. Una vez posicionadas, se ajustan manualmente para que el lente se encuentre paralelo al perfil de observación y que el campo de visión de la cámara sea capaz de enfocar desde el extremo al centro de la viga.

Luego, los focos halógenos son posicionados apuntando en la misma dirección de las cámaras y sin estorbar el campo de observación. Como medida de resguardo las cámaras fotográficas y los focos halógenos son fijados mediante cinta adhesiva a sus apoyos.

Una vez montado el equipo fotográfico, se ajusta el actuador mediante el control de la prensa para que se encuentre en contacto con la viga para iniciar el proceso de carga.

Debido a que las cámaras digitales pueden ser configuradas para obtener continuamente fotografías a lo menos, cada 10[s], la prensa debe configurarse para aplicar la carga, a la mínima velocidad posible que permita el equipo (0,06[kN/s]).²

Con todos los elementos en posición para ensayar, se procede a medir el factor de escala requerido para la fotogrametría. Para lo cual, se posiciona una regla milimétrica (rango de 60[cm]) sobre la cara lateral de la viga y se toman fotografías a criterio. El procedimiento se realiza para cada cámara.

A continuación se procede a configurar el temporizador de las cámaras al mínimo permitido por los equipos (10[s]). Una vez realizado, las cámaras son activadas manualmente para comenzar a registrar el *Time Lapse* durante el ensayo.

Con las cámaras ya activadas para fotografiar la viga, a criterio personal se dejan pasar aproximadamente dos a tres fotografías y se acciona el controlador de la prensa para que comience el ensayo.

Una vez que el ensayo de carga termina, el *Time Lapse* registrado por las cámaras es detenido y la viga es retirada del equipo de carga.

4.3.4. Respuesta Fuerza-Deformación

A continuación se muestra la respuesta fuerza versus deformación de cada uno de los ensayos, siendo estos los valores obtenidos directamente de los sensores de la prensa hidráulica (celda de carga electrónica y encoder).

4.3.4.1. Viga 1

En la *Figura 4.19* es posible observar que la curva luego de alcanzar el *peak*, decrece súbitamente hasta el término del ensayo y por ende, tal comportamiento es

²Cabe necesario señalar que la razón de aplicar la carga de manera lenta, se debe a que el objetivo de este trabajo, no consiste en analizar la respuesta dinámica en elementos de hormigón armado. De esta forma, para que la respuesta no dependa de la velocidad, los ensayos se realizan mediante una carga pseudo estática.

relacionado a una baja ductilidad.

Puesto que es de interés tener una noción cuantitativa de la capacidad de deformación en la viga, se escoge como criterio evaluar la deformación al *peak* y normalizarla por la deformación en la falla. Esta relación corresponde a 1,4 para la viga 1.

Cabe mencionar que el término del ensayo corresponde a un punto arbitrario, en el que se ha decidido que la viga ya ha fallado y no es necesario seguir con las mediciones. En consiguiente, evaluar la capacidad de deformación en este punto no es apropiado y puesto que no es posible calcular la falla de forma meticulosa, se ha escogido un criterio objetivo para definirla, como por ejemplo, cuando la resistencia máxima en el elemento se ha reducido en un 30 %. Este criterio también se ha utilizado en la viga 2.

Debido a la fragilidad con que se produce la falla en la viga 1, se plantea la hipótesis de que el elemento falla por corte.

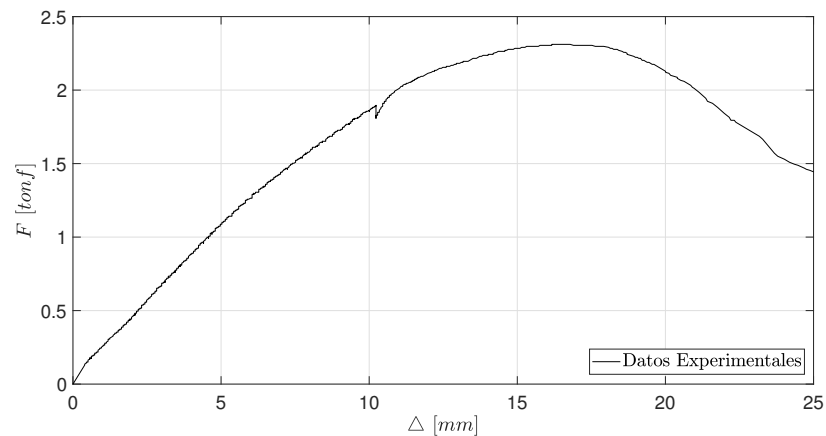


Figura 4.19: Resultados del ensayo carga-deformación en la viga 1.

4.3.4.2. Viga 2

En la *Figura 4.20* es posible observar que el comportamiento en la viga 2 posee mayor capacidad de deformación que la viga 1. De hecho luego de alcanzar el *peak*, la curva sigue alcanzando mayores deformaciones, con un decrecimiento paulatino de la carga que soporta, pero mucho más suave que en el caso anterior. Es necesario agregar que la relación entre la deformación al *peak* y la deformación en la falla, corresponde a 2,3.

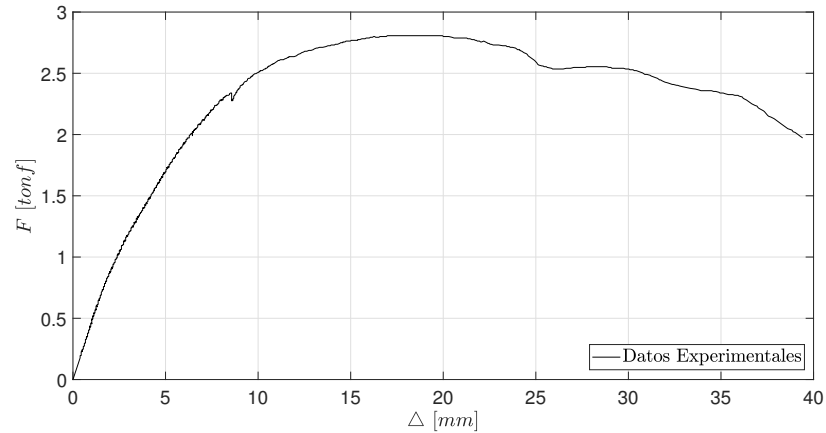


Figura 4.20: Resultados del ensayo carga-deformación en la viga 2.

4.4. Registro Fotográfico

Previo a finalizar cada ensayo, las imágenes capturadas por las cámaras digitales son editadas con el objetivo de visualizar el perfil completo que muestra el agrietamiento en cada viga. Es así como las fotografías capturadas tanto por la cámara A como B, son acopladas en un mismo esquema. Como alternativa de visualización, las imágenes también han sido remarcadas para favorecer la inspección de las grietas que han sido detectadas.

Adicionalmente, se agrega al registro, fotografías capturadas mediante el apoyo de teléfonos inteligentes y una vez que los ensayos han terminado.

4.4.1. Viga 1

En la *Figura 4.21* es posible observar el patrón de agrietamiento presente en la viga 1 y como se ha mencionado anteriormente, la misma imagen se ha replicado con el objetivo de remarcar la totalidad de las grietas.

Según la imagen original, se observa que existe principalmente una grieta en forma diagonal. Esta misma, se desarrolla en el perfil de la viga desde el borde superior hasta el inferior. Observando esta y otras fotografías de estados posteriores, es posible visualizar que las grietas más importantes pasan a través del refuerzo transversal de

la viga.

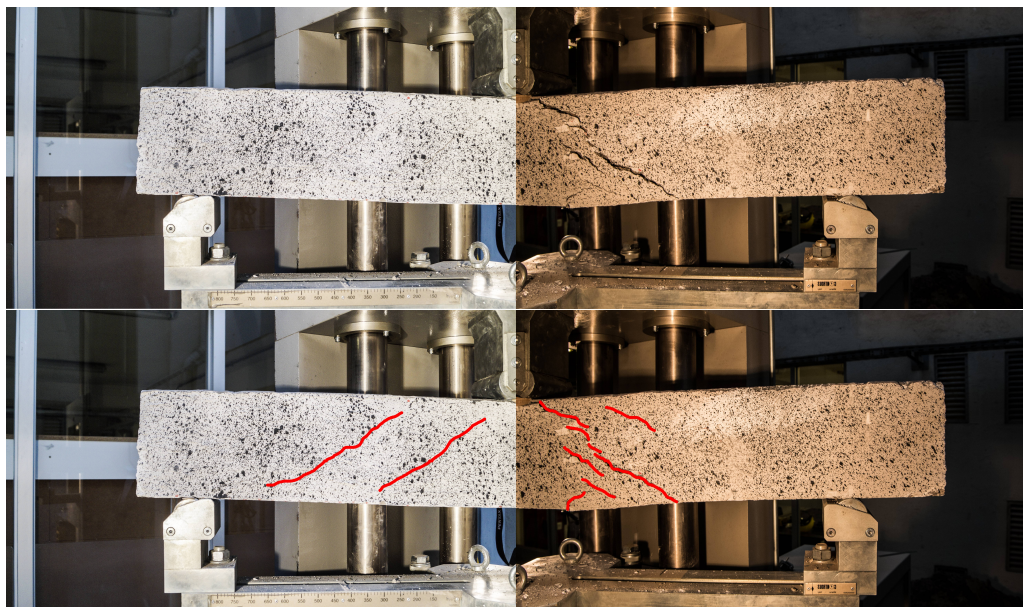


Figura 4.21: Agrietamiento en la viga 1 al finalizar el ensayo de carga deformación.

Por otro lado en la imagen con grietas remarcadas, es posible distinguir con mayor claridad el perfil completo de la viga. Salvo que no se hace distinción en el ancho de las aberturas. En esta oportunidad, es posible observar que la mayoría de las grietas se desarrollan en planos inclinados y con similar pendiente lo que deja entrever una falla por corte de la viga.

A continuación se muestran una serie de fotografías tomadas mediante teléfonos inteligentes, en zonas de interés al terminar el ensayo:

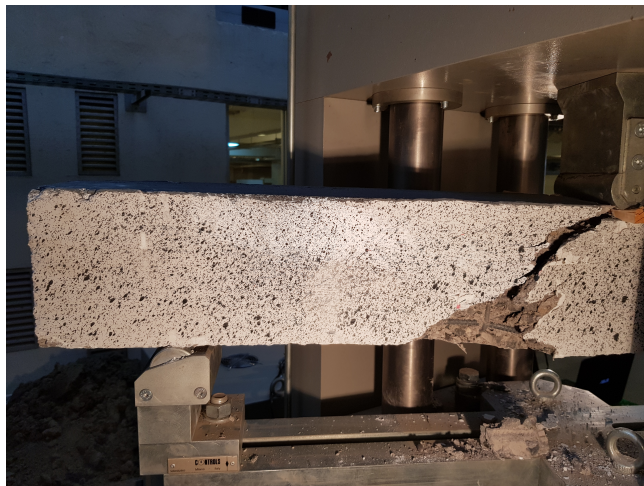


Figura 4.22: Viga 1 - Perfil de la viga una vez que el elemento ha fallado.



Figura 4.23: Viga 1 - Desprendimiento del hormigón e inspección de los estribos.

Al observar las fotografías de la viga 1, notoriamente existe desprendimiento del hormigón en la zona de la falla y fuera de este lugar, el daño es mínimo. Por inspección de los estribos, estos no muestran indicios de perder adherencia con el hormigón.

Cabe destacar que el agrietamiento en ambas caras de un mismo lado no es igual. Se presume que esta asimetría se debe a que la viga no quedó con su cara superior completamente horizontal, debido a problemas en los moldajes, lo que provocó que el soporte central cargara más una cara de la viga, que la otra.

4.4.2. Viga 2

En la *Figura 4.24* es posible observar el patrón de agrietamiento presente en la viga 2 y también se ha implementado la alternativa de remarcar las grietas.

A partir de la imagen original, se observa que existen principalmente dos grietas orientadas en diagonal al costado derecho y una en el lado izquierdo. En esta viga se observa una mayor cantidad de grietas pero de menor espesor.

Cabe señalar que si bien existen grietas diagonales igual que en el caso anterior, las grietas en la parte inferior de la viga, presuntamente grietas por flexión, se presentan en mayor cantidad.

Al igual que en la viga 1, el patrón de agrietamiento en ambas caras de un mismo lado no es igual. Por lo tanto, también se presume que esta asimetría se debe a que la viga no quedó con su cara superior completamente horizontal, debido a problemas en los moldajes.

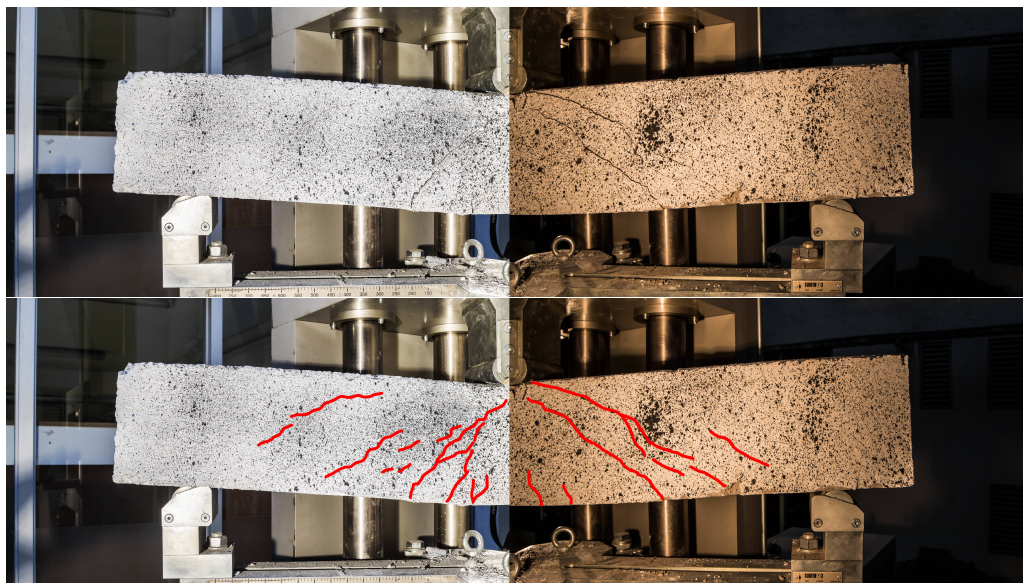


Figura 4.24: Agrietamiento en la viga 2 al finalizar el ensayo de carga-deformación.

A continuación se muestran una serie de fotografías tomadas mediante teléfonos inteligentes, en zonas de interés al terminar el ensayo:



Figura 4.25: Viga 2 - Desarrollo de grietas en el elemento.



Figura 4.26: Viga 2 - Desprendimiento del hormigón e inspección de los estribos.

Al observar las fotografías de la viga 2, es posible observar gran cantidad de grietas en diagonal y orientadas hacia el punto de aplicación de la carga. Presuntamente la falla de la viga 2 también sea por corte. Cabe señalar que existe mayor daño en una cara lateral de la viga que en la otra, por lo tanto, este hallazgo indica que no fue posible mitigar totalmente el hecho que la viga posee imperfecciones y no es perfectamente recta. Por otro lado, el desprendimiento del hormigón se encuentra principalmente en la zona del recubrimiento, particularmente en la zona central inferior de la viga. Luego de realizar una inspección a los estribos, estos no muestran indicios de perder adherencia con el hormigón.

4.5. Análisis por Fotogrametría

El principal objetivo de esta sección, consiste en incorporar a la información experimental, la completa representación de las vigas de HA durante los ensayos de

carga. Es decir, por medio del análisis por fotogrametría, obtener la deformación de la viga discretizada a lo largo de su longitud y posteriormente, en la etapa de análisis, lograr comparar los resultados experimentales con la respuesta de un modelo bidimensional en términos locales. Esto es llevado a cabo tomando como referencia los resultados obtenidos en la investigación de [Tambusay et al. \(2018\)](#) (ver *Figura 2.7*).

Por lo tanto, para su aplicación se considera el supuesto de que cualquier plano longitudinal-vertical de la viga, es representativo del comportamiento del cuerpo completo. De esta manera, efectuar el análisis por fotogrametría en el perfil de las vigas es válido.

En consiguiente, se escoge hacer el análisis por fotogrametría mediante el software de código abierto *Ncorr* ([Blaber et al. \(2015\)](#)). Cabe señalar que para su utilización, se ha tomado como antecedente la investigación realizada por [Manríquez y Massone \(2016\)](#) y el manual del software.

Por lo tanto, el desarrollo de este capítulo está enfocado a comentar los parámetros y consideraciones utilizados en el programa.

4.5.1. Descripción del Software

El primer paso al utilizar el software, consiste en cargar la imagen de referencia en la cual el elemento de HA se encuentra no deformado. Posteriormente se deben cargar todas las imágenes del registro tomado durante el ensayo. Al realizar este paso, se debe considerar que los archivos cargados deben encontrarse en orden correlativo según la secuencia de carga en el experimento.

Posteriormente es necesario delimitar la región de interés que será considerada en el análisis. Por recomendaciones del manual, se deben excluir las zonas de nula deformación para evitar problemas de convergencia. Por ejemplo los bordes. Por lo tanto, el foco del análisis es orientado al elemento de HA y se omiten los puntos que se encuentran en los bordes del elemento.

A continuación, es necesario completar los parámetros de conjunto para la correlación de imágenes digitales. Dentro de las opciones existentes, el primer ítem está

relacionado al grado de precisión en el análisis. Para ajustar estos parámetros, es necesario definir el espaciamiento del subconjunto (*Subset Spacing*) y su radio de alcance (*Subset Radius*). El primero debe ajustarse para variar la carga computacional en el análisis y el segundo, para ser el mínimo valor, que dé como resultado una respuesta sin datos con ruido.

El segundo ítem se encuentra relacionado con la exactitud de la solución encontrada. Por lo tanto, los parámetros a completar están vinculados al máximo número de iteraciones permitidas (*Iteration # C/O*) y al valor de la tolerancia admisible (*Diff. Norm. C/O*).

El tercer ítem se encuentra relacionado a escoger el tipo de análisis. En el cual, se ha elegido la opción de análisis de grandes deformaciones por las características del problema.

En términos del procesamiento interno del programa, esto implica que la imagen de referencia es actualizada (así como también la región de interés) durante el análisis. En consecuencia, el programa requiere elegir entre 2 caminos diferentes para configurar el proceso de actualización.

El primer camino *Seed propagation* consiste en la actualización de la imagen de referencia basado en el coeficiente de correlación y el número de iteraciones para la convergencia de las semillas. Por otro lado, el segundo camino *Leapfrog* permite seleccionar manualmente el número de imágenes para usar antes de actualizar la imagen de referencia.

En adición a estas alternativas, se encuentra la opción de *Automatic propagation* para establecer que el programa defina automáticamente las semillas en base a la imagen de referencia actualizada. Finalmente, para el desarrollo de este trabajo se ha considerado la alternativa de *Seed propagation* habilitando la opción de *Automatic propagation*.

Una vez completado el ítem anterior, queda continuar con la ejecución del análisis, para el cual, el programa calcula los desplazamientos nodales en cada imagen.

El siguiente paso es dar formato a los desplazamientos calculados. En este punto, los resultados que habían sido obtenidos en términos de *pixeles* son transformados a

unidades de longitud. Para llevar a cabo la transformación, el programa puede ser calibrado cargando una imagen en la que se pueda ingresar una distancia conocida (se ha utilizado 55[*cm*] aproximadamente) e internamente se obtiene la relación [*unidad/pixel*].

A continuación el último paso está relacionado al análisis de deformaciones unitarias. En este punto, es necesario variar el parámetro *Strain Radius* para que el programa pueda ajustar las deformaciones unitarias mediante un enfoque de mínimos cuadrados. Este parámetro debe ser ajustado con el mínimo valor que de como resultado una respuesta sin datos con ruido.

4.5.2. Implementación del Software

El manual del software recomienda realizar una serie de iteraciones previas antes de encontrar una solución definitiva. La razón de esto se debe a que existen parámetros que afectan el grado de exactitud y precisión en la respuesta.

Por lo tanto, es necesario ajustar el set de parámetros con el objetivo de obtener una respuesta libre de ruido. Para lo cual, se realiza una serie de iteraciones para determinar qué valores en los parámetros *Subset Radius*, *Subset Spacing* y *Strain Radius*, es aceptable usar con tal de obtener una solución óptima.

Dichos resultados son mostrados en el *Apéndice C* y la siguiente tabla, resume los parámetros definitivos a utilizar en las cámaras:

Tabla 4.4: Parámetros utilizados en el análisis de fotogrametría

Parámetro	Valor
Subset Radius	90
Subset Spacing	18
Strain Radius	10
Iteration # C/O	50
Diff. Norm C/O	10^{-6}

4.6. Resultados de la Fotogrametría

El análisis por fotogrametría brinda la oportunidad de conocer el comportamiento localizado en las vigas ensayadas. Es decir, permite observar el campo de desplazamientos punto a punto a lo largo del cuerpo analizado, sin la necesidad de incluir sensores adicionales en el espécimen.

Es por esto que un entendimiento más completo a nivel de resultados experimentales es realizado para cada viga mediante este tipo de análisis y de esta forma obtener una visión más robusta respecto del proceso de carga llevado a cabo en estos cuerpos.

En particular, las imágenes también son editadas como en la sección anterior con el objetivo de visualizar el perfil completo de la viga en una única figura y así, simplificar la inspección visual de los resultados.

4.6.1. Deformación Vertical

Este apartado está centrado en observar el perfil de deformación durante los ensayos de carga en cada una de las vigas. Con este objetivo, se opta por examinar un subconjunto de las fotografías ya que es poco práctico analizar el registro completo de ellas. En consiguiente, a continuación se darán a conocer los detalles y los principales resultados obtenidos.

4.6.1.1. Viga 1

Para indicar el subconjunto de imágenes a examinar, se ha decidido referenciar estas fotografías con respecto al instante que fueron tomadas durante el ensayo de carga deformación.

La *Figura 4.27* es confeccionada para indicar algunas de las imágenes utilizadas. En ella, es posible notar que la fotografía 16 fue tomada aún cuando la viga se encuentra en el rango lineal, mientras que la fotografía 26 es cercana al *peak* de la resistencia máxima del elemento, y por último, la fotografía 25 se encuentra en un punto arbitrario entre las ya mencionadas.

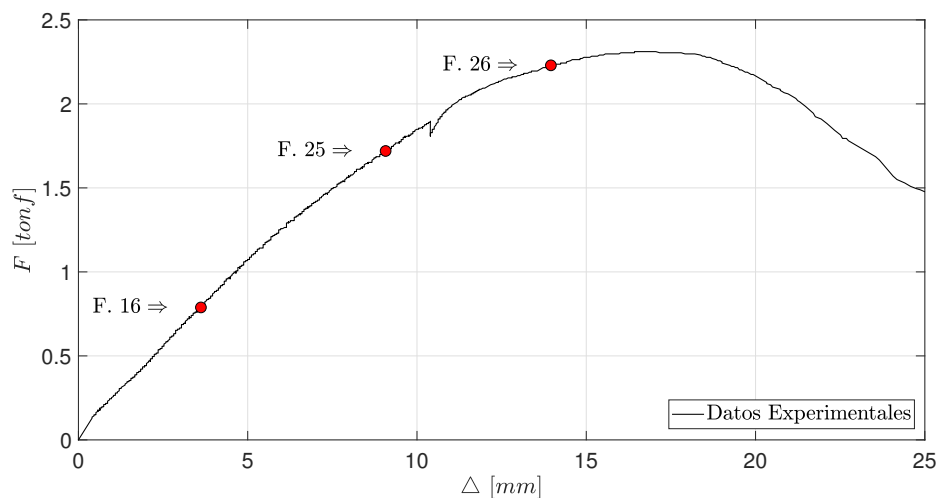


Figura 4.27: Referencia para indicar el subconjunto conformado por las fotografías número 16, 25 y 26.

Ahora bien, ya con una noción básica del contexto de las fotografías, es posible continuar con observar los resultados de la fotogrametría en cada una de ellas. La *Figura 4.28* muestra el perfil de deformación vertical³ en la fotografía 16:

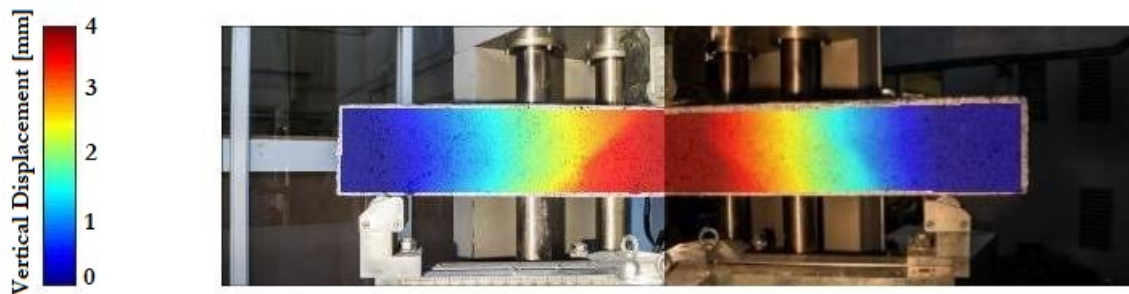


Figura 4.28: Fotogrametría en la imagen 16 durante el ensayo de carga en la viga 1.

En la figura anterior es posible observar cierta similitud en el perfil de deformaciones capturado en cada cámara, e incluso las magnitudes son parecidas. Sin embargo, aún encontrándose la viga en el rango lineal, la deformación en el centro del elemento no es estrictamente igual al compararlo registrado por la cámara A y B.

La leve diferencia obtenida, se debe principalmente a que la aplicación de la carga no es ideal y como se ha mencionado en capítulos anteriores, para un pleno contacto

³Para los resultados de la fotogrametría, considerar que la escala varía de fotografía a fotografía, por lo tanto, un tono de una figura no representa la misma deformación que el mismo tono en la figura siguiente.

entre el actuador de la prensa y la viga, fue necesario el uso de cuñas de madera para estabilizar la carga.

Ahora bien, los efectos mencionados también se observan en las fotografías 25 y 26 mostradas a continuación, donde en esta última se observa de manera más notoria.



Figura 4.29: Fotogrametría en la imagen 25 durante el ensayo de carga en la viga 1.

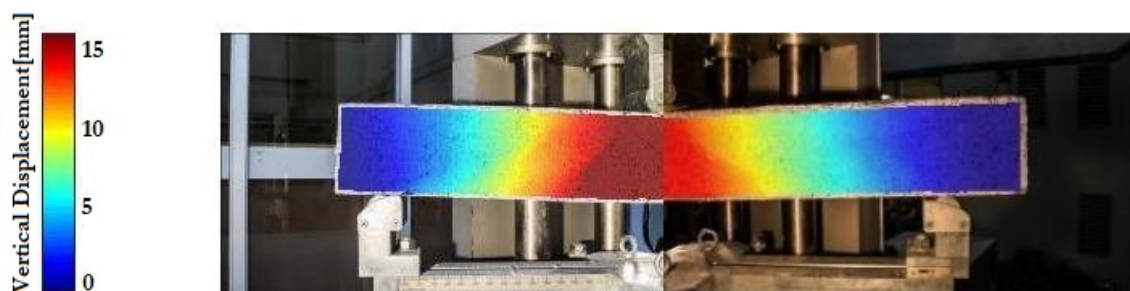


Figura 4.30: Fotogrametría en la imagen 26 durante el ensayo de carga en la viga 1.

Para cuantificar las diferencias que existen en las deformaciones observadas en cada uno de los lados, se confecciona la *Figura 4.31* a través de la fotogrametría y evaluando una sección longitudinal en el medio de la viga.

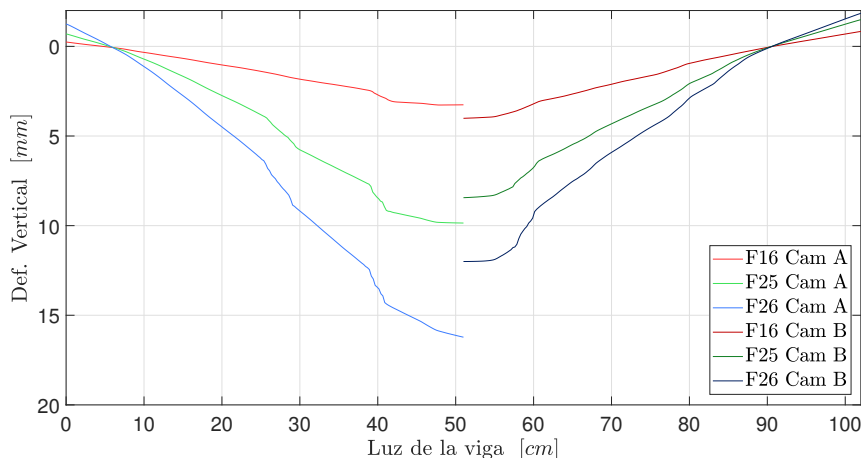


Figura 4.31: Deflexión de la viga 1 para las fotografías 16, 25 y 26.

A partir de la figura, se observan diferencias en el centro de la viga las cuales aumentan a lo largo del ensayo con un valor de aproximadamente de $4[mm]$ en la fotografía 26.

4.6.1.2. Viga 2

De igual forma que con la viga 1, para la viga 2 también se ha decidido referenciar algunas de las fotografías a examinar, siendo indicadas en el gráfico de carga deformación. Es así como la *Figura 4.32* muestra que la fotografía 19 fue tomada aún cuando la viga se encuentra en el rango lineal, mientras que la fotografía 29 es cercana al *peak* de la resistencia, y por último, la fotografía 25 se encuentra en un punto arbitrario entre las ya mencionadas.

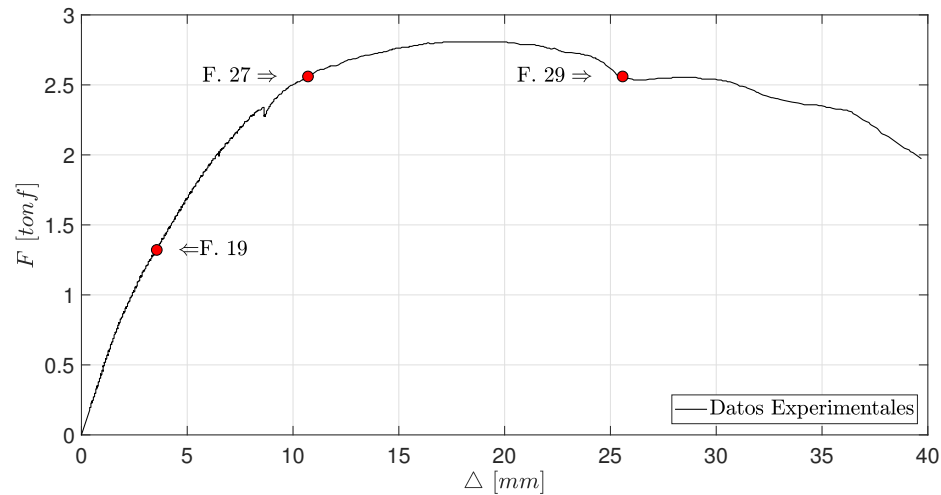


Figura 4.32: Referencia para indicar el subconjunto conformado por las fotografías número 19, 27 y 29.

De esta forma, la *Figura 4.33* muestra el perfil de deformación vertical en la fotografía 19.



Figura 4.33: Fotogrametría en la imagen 19 durante el ensayo de carga en la viga 2.

En la figura anterior es posible observar cierta similitud en el perfil de deformaciones capturado en cada cámara, e incluso las magnitudes son parecidas y además, las diferencias encontradas en cada uno de los lados no tan grandes como en el caso de la viga 1. No obstante, aún encontrándose la viga en el rango lineal, la deformación en el centro del elemento no es estrictamente igual al comparar lo registrado por la cámara A y B.

De manera similar, las fotografías 27 y 29 mostradas a continuación también muestran los efectos mencionados:

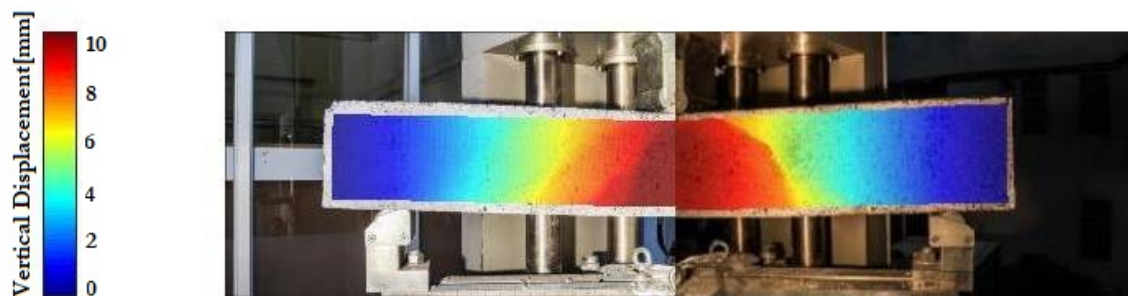


Figura 4.34: Fotogrametría en la imagen 27 durante el ensayo de carga en la viga 2.



Figura 4.35: Fotogrametría en la imagen 29 durante el ensayo de carga en la viga 2.

De igual forma que en el caso de la viga 1, la *Figura 4.36* muestra la deformada vertical de la viga obtenida desde el eje central del elemento:

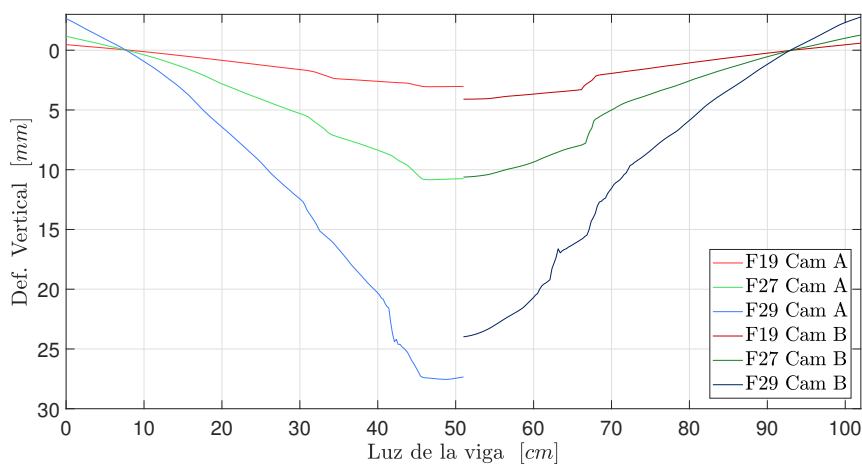


Figura 4.36: Deflexión de la viga 2 para las fotografías 19, 27 y 29.

A partir de la figura, se observan diferencias menores a 1[mm] hasta la fotografía 27, sin embargo, al término del ensayo esta diferencia aumenta hasta aproximadamente 4[mm]. Este hallazgo se debe al hecho que la viga posee imperfecciones y no es

perfectamente recta, por lo tanto, cuando ocurre la falla del elemento, existe un lado de la viga que la deflexión es mayor. Aún así, al comparar el promedio de la deflexión en la fotografía 29 de la *Figura 4.36*, con respecto a lo registrado por el sensor de la prensa hidráulica, existe una variación menor al 10 %.

Por otro lado y al igual que en caso de la viga 1, es posible observar que a lo largo de la mayor parte de la viga, el elemento tiene desplazamientos casi de cuerpo rígido, mientras que en el centro se ve una concentración importante de curvatura, lo cual es un comportamiento esperado en elementos de hormigón armado al estar en el rango no lineal.

4.6.2. Deformaciones Unitarias Horizontales

4.6.2.1. Viga 1

A continuación se analizan las deformaciones unitarias horizontales (DUH) en fotografías anteriores a la 16, puesto que como se observó previamente, estas podrían encontrarse en el rango lineal. Para esto se opta por examinar sólo ciertas secciones en la viga.

La *Figura 4.37* es una imagen muy cercana al inicio del ensayo (fotografía 3) y en ella, es posible visualizar el perfil completo de la viga. Además, es posible distinguir secciones con zonas tanto en compresión como en tracción, sin embargo, en el perfil existe una gran variabilidad para todo el elemento.

Ahora bien, al observar la ubicación del eje neutro (cercano al borde superior de la viga) en las secciones, es posible observar que existen zonas con microgrietas en la viga. En particular, la sección B ubicada a $1,5h$ desde la aplicación de la carga, muestra que aún se cumple la hipótesis de Navier-Bernoulli, *caras planas permanecen planas*.

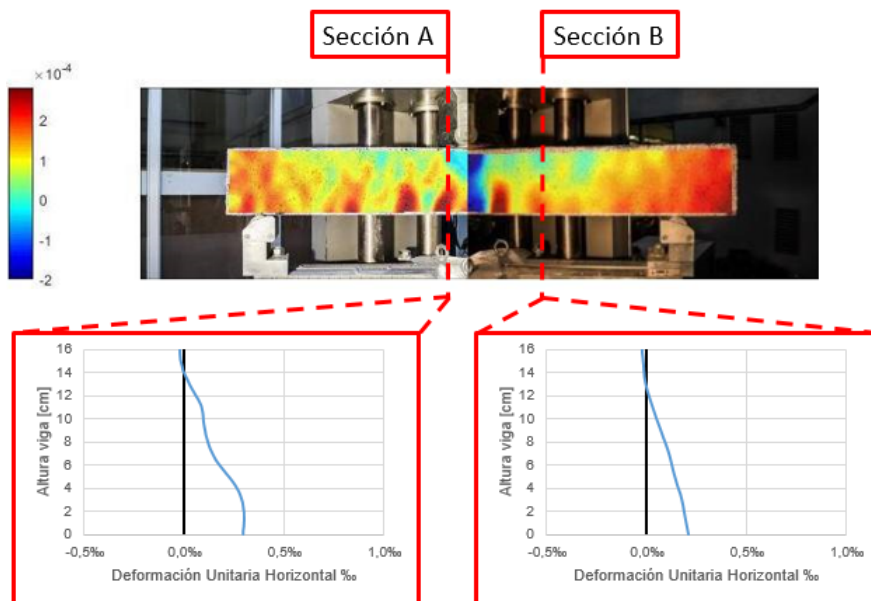


Figura 4.37: DUH en la fotografía 3. La sección A y B, se encuentran ubicadas a $0,3h$ y $1,5h$ desde el centro de la viga.

A continuación se muestra la *Figura 4.38* con los resultados de la fotogrametría en la fotografía 8. En ella, se observan mayores valores en las DUH, pero aún así existen diferencias notorias a cada lado de la viga. Incluso se observa claramente que uno de los lados, presenta mayores DUH que el otro.

Por otro lado, una característica a hacer notar consiste en que todavía para la fotografía 8, la zona en compresión en un lado de la viga, es muy pequeña y se mantiene la tendencia que el eje neutro se observa muy cercano al borde superior.

En cambio, lo capturado por la otra cámara indica que el desarrollo de la grieta produce distorsiones en el perfil de DUH y por lo tanto, la hipótesis de Navier-Bernoulli no aplica.

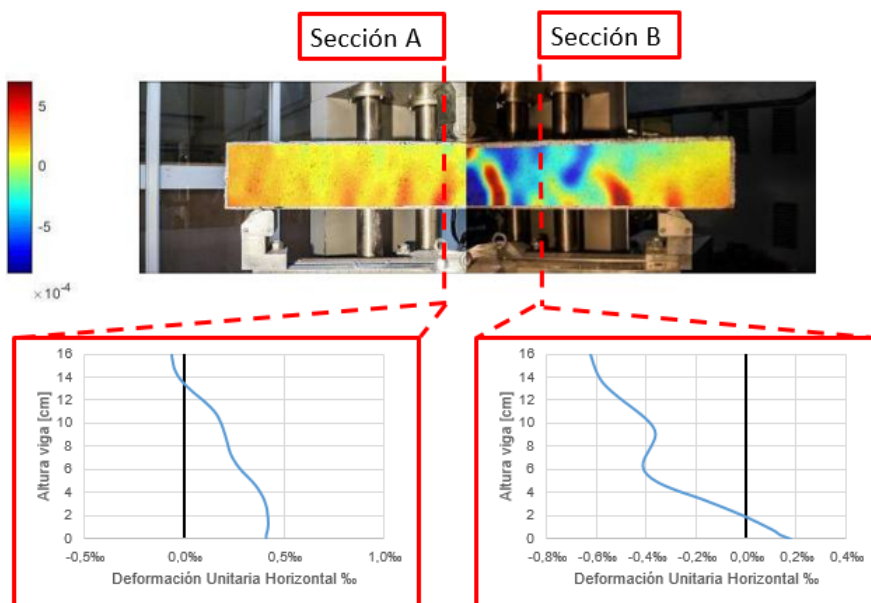


Figura 4.38: DUH en la fotografía 8. La sección A y B, se encuentran ubicadas a $0,3h$ y $1,5h$ desde el centro de la viga.

De manera similar en la *Figura 4.39* se muestran los resultados de la fotogrametría realizada en la fotografía 12. En ella es posible visualizar características similares a la figura anterior, incluso las diferencias entre las DUH a cada lado de la viga continúan siendo evidentes.

Con respecto a la *Sección A* de esta figura, la zona en compresión es bastante pequeña e incluso, el perfil prácticamente forma un plano para una DUH de casi $4‰$ en la zona en tracción.

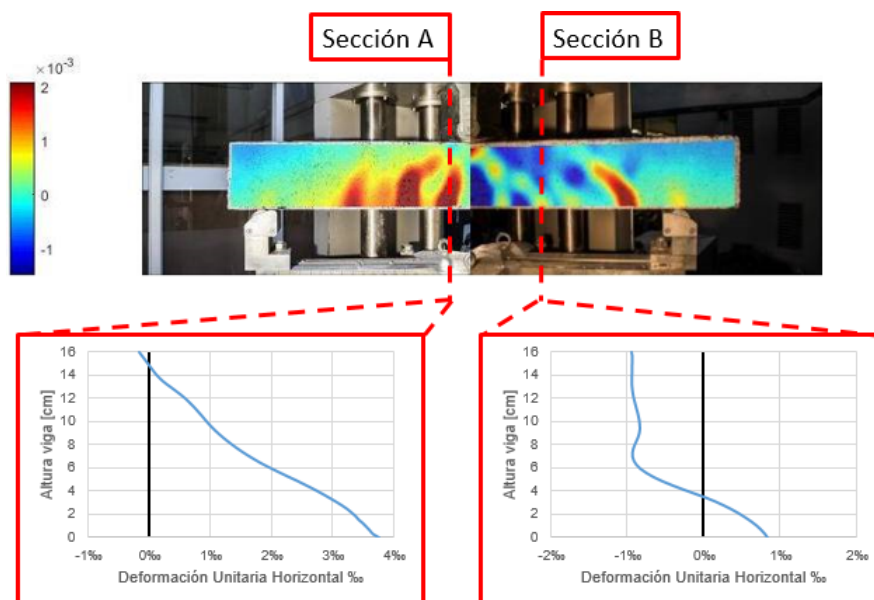


Figura 4.39: DUH en la fotografía 12. La sección A y B, se encuentran ubicadas a $0,3h$ y $1,5h$ desde el centro de la viga.

En general los resultados muestran diferencias notorias en los colores de la fotogrametría para cada lado de la viga y de manera contraria, era de esperar que hubiera mayor similitud en el rango lineal. La razón más probable de esta asimetría en el comportamiento, corresponde a la forma torcida de la viga.

Por otro lado, también los resultados muestran que el perfil típico de un plano, formado por las DUH, no es totalmente ideal en todas las figuras para la *Sección B*, ya que en esta sección por estar ubicada a $1,5h$, era esperable que aplicase la hipótesis de Navier-Bernoulli. Incluso considerando que en la *Figura 4.31* los resultados para la fotografía 16, indicaban leves distorsiones y en consecuencia, se daba por hecho que en las fotografías anteriores a ella, existirían menores diferencias con la teoría en el rango lineal.

Finalmente, se muestran las DUH para un mismo instante, mostrando dos secciones diferentes, ambas cruzando diferentes grietas y con el fin de visualizar las distorsiones que ocurren en estas zonas para las fotografías posteriores a la número 12 (fotografía 16 mostrada en la *Figura 4.40* y fotografía 26, mostrada en la *Figura 4.42*).

A partir del perfil de DUH mostrado en la *Figura 4.40*, se observa claramente la existencia de 2 grietas principales. La mayor encontrándose cercana a la sección A y

una menor, coincidente con la sección B. Así pues, estas secciones se encuentran a las mismas distancias desde el centro que las correspondientes a las secciones A* y B*, y de manera cuantitativa, se ha querido comparar estas secciones en la misma figura.

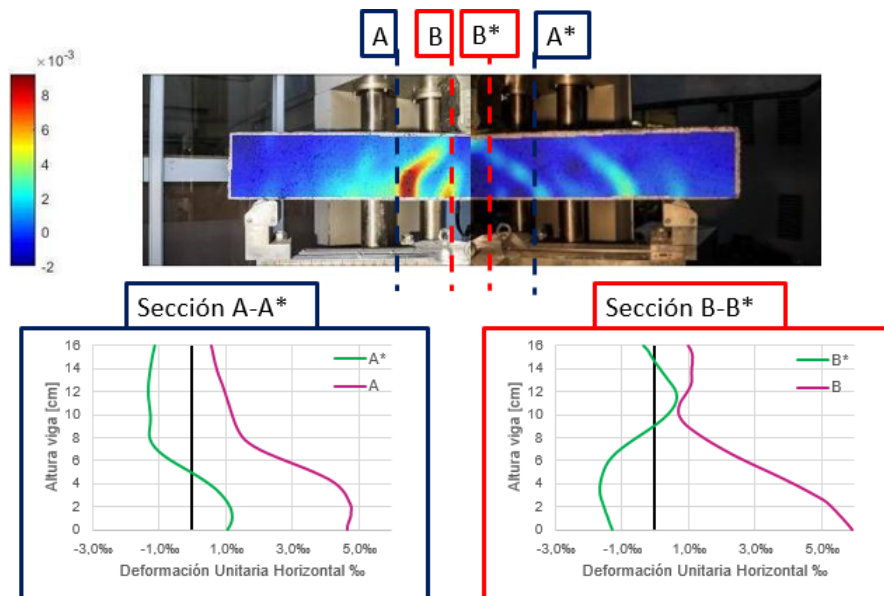


Figura 4.40: Secciones para examinar las deformaciones unitarias horizontales en la fotografía 16.

En términos cualitativos tanto las curvas en la sección A-A* como B-B*, tienen distorsiones evidentes en el perfil de deformaciones, debido a que se encuentran ubicadas a través del paso de grietas. Además, el hecho de que la viga posee imperfecciones y por tanto no es perfectamente recta, produce que las deformaciones en una cara sean mayores que en la otra, lo que se manifiesta a través de un *corrimiento* del perfil de deformaciones al comparar ambos lados.

Para examinar los efectos del agrietamiento en la viga, se plantea considerar sólo la grieta en la sección B de la *Figura 4.40* y comparar estos resultados, con una fotografía en la que dicha grieta, aún no se alcance a desarrollar. Dicho lo anterior, la comparación es realizada con la fotografía 12(*Figura 4.39*) y a continuación se muestran los resultados, con las distorsiones que experimentan las DUH producto de la aparición de una grieta:

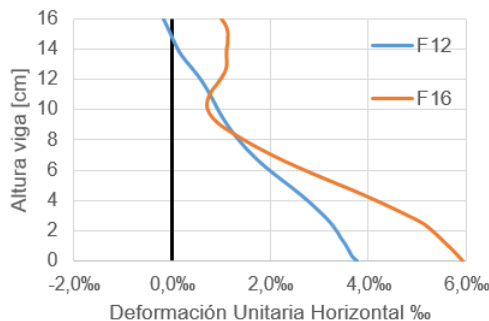


Figura 4.41: Comparación para examinar el perfil de DUH previo y post desarrollo de grieta.

Por último, la *Figura 4.42* muestra los resultados para la fotografía 26, con la cual, se concluye el registro fotográfico del ensayo en la viga 1. De manera similar a lo comentado en figuras anteriores, al observar las secciones con los perfiles de DUH, existe la impresión que las curvas se encuentran desplazadas.

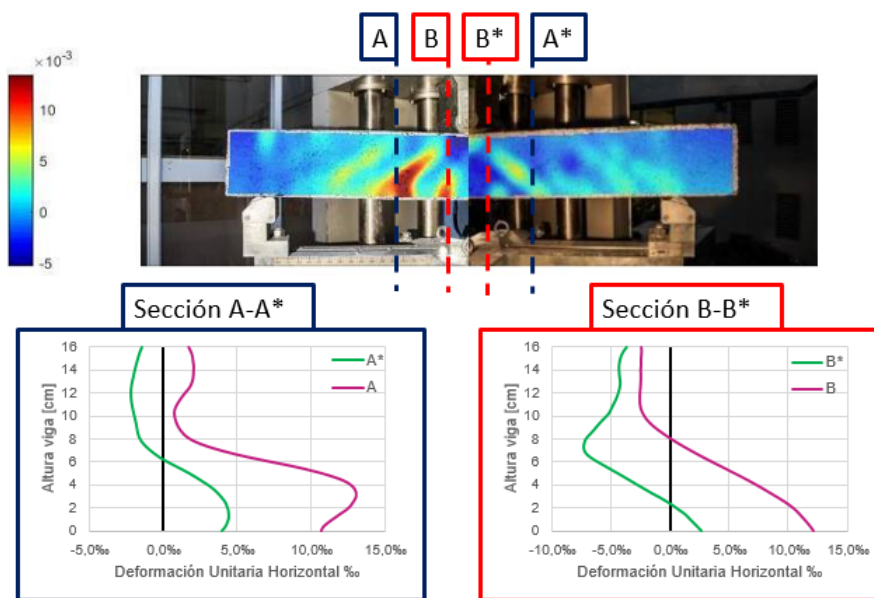


Figura 4.42: Secciones para examinar las deformaciones unitarias horizontales en la fotografía 26.

Desde luego escapa de los objetivos de esta memoria continuar con un análisis de las grietas, por lo que los resultados obtenidos en este trabajo, pueden servir como antecedentes para futuros estudios que realicen un análisis más acabado en estos temas.

4.6.2.2. Viga 2

De igual forma que con la viga 1, a continuación se analizan las DUH en fotografías anteriores a la 19, puesto que como se comentó en el *Capítulo 4.6.1.2*, estas podrían encontrarse en el rango lineal. Para esto se opta por examinar sólo ciertas secciones en la viga.

La *Figura 4.43* es una imagen muy cercana al inicio del ensayo (fotografía 5) y en ella, es posible visualizar aspectos similares a lo comentado para la viga 1 en la *Figura 4.37*.

De igual forma, aunque las secciones examinadas no corresponden a una línea recta ideal, si son bastante similares y muestran esta tendencia.

Por otro lado, es posible visualizar que en la *Sección A* existe agrietamiento y el eje neutro se encuentra muy cercano a la fibra superior, mientras que en la *Sección B*, recién existe un agrietamiento incipiente.

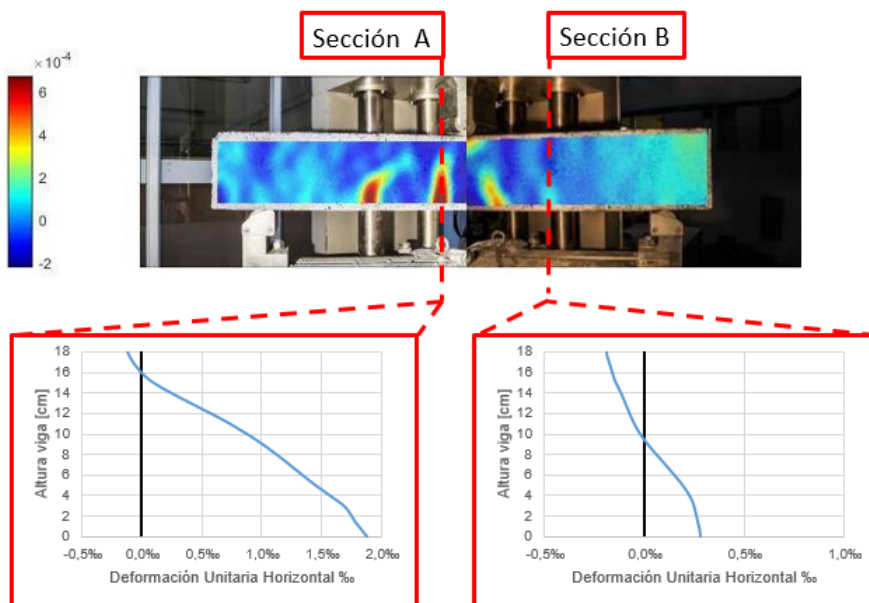


Figura 4.43: DUH en la fotografía 5. La sección A y B, se encuentran ubicadas a $0,4h$ y $1,2h$ desde el centro de la viga.

A continuación se muestra la *Figura 4.44* con los resultados de la fotogrametría en la fotografía 10, y por ende, representa un estado tensional en que la viga presenta mayores esfuerzos en su perfil. Por lo mismo, en esta figura se observan mayores

valores en las DUH. Tanto *Sección A* como *B* indican un mayor agrietamiento.

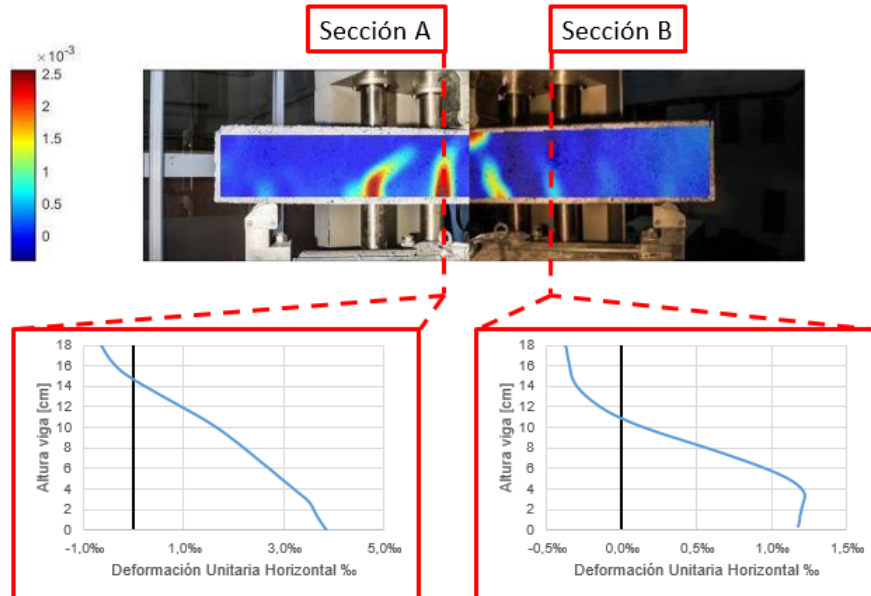


Figura 4.44: DUH en la fotografía 10. La sección A y B, se encuentran ubicadas a $0,4h$ y $1,2h$ desde el centro de la viga.

De manera similar, en la *Figura 4.45* se muestran los resultados de la fotogrametría realizada en la fotografía 15. En ella es posible visualizar características similares a la figura anterior, el agrietamiento continúa aumentando e incluso las diferencias entre las DUH a cada lado de la viga continúan siendo evidentes.

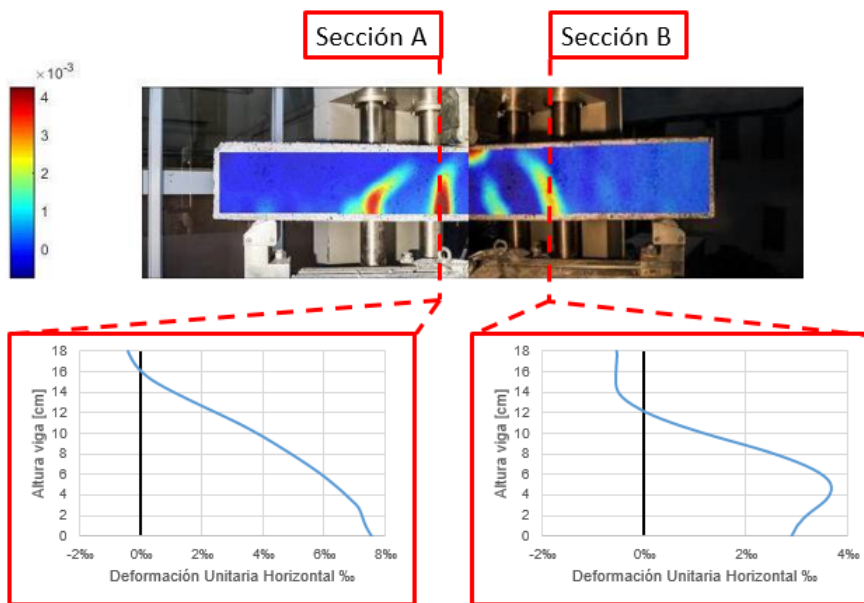


Figura 4.45: DUH en la fotografía 15. La sección A y B, se encuentran ubicadas a $0,4h$ y $1,2h$ desde el centro de la viga.

En general, los resultados no muestran tantas diferencias en los colores de la fotogrametría como en la viga 1 y se observan resultados mucho más regulares.

Por lo mismo, se observa que en general el perfil típico esperado para las DUH, no es totalmente ideal en todas las figuras. Sin embargo, son mucho más regulares al ser comparados con lo obtenido en la viga 1. Aún así, el hecho de que la viga esté torcida, produce que las deformaciones en una cara sean mayores que en la otra, lo que se manifiesta a través de una *corrimiento* del perfil de deformaciones al comparar ambos lados.

De igual forma que con la viga 1, a continuación se muestran las DUH para un mismo instante, mostrando dos secciones diferentes, ambas cruzando diferentes grietas y con el fin de visualizar las distorsiones que ocurren en estas zonas para las fotografías posteriores a la número 15 (fotografía 19 mostrada en la *Figura 4.46* y fotografía 29, mostrada en la *Figura 4.48*).

A partir del perfil de DUH mostrado en la *Figura 4.46*, se observa claramente la formación de 2 grietas principales. La mayor encontrándose en la sección A* y una menor, en la sección B. Ahora bien, estas secciones se encuentran a las mismas distancias desde el centro que las correspondientes a las secciones A y B*, y de manera

cuantitativa, se ha querido comparar estas secciones en la misma figura.

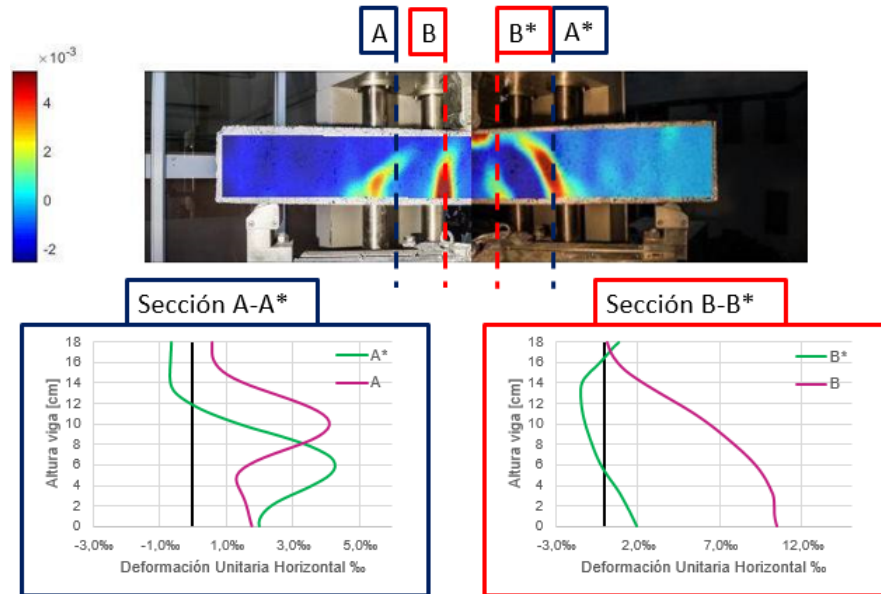


Figura 4.46: Secciones para examinar las deformaciones unitarias horizontales en la fotografía 19.

En términos cualitativos tanto las curvas en la sección A-A* como B-B*, no tienen una forma muy distinta y con la misma tendencia que en los resultados de la viga 1. Es por esto, que se mantiene la hipótesis de que la formación de la grieta produce como efecto, un desplazamiento en el perfil de DUH.

Al igual que en la viga 1, se observan distorsiones en el perfil de deformaciones debido a que se están evaluando las secciones a través del paso de grietas. Para examinar los efectos de este agrietamiento, se inspecciona la *Sección B* de la *Figura 4.46* y es comparada con la fotografía 15 (*Figura 4.45*):

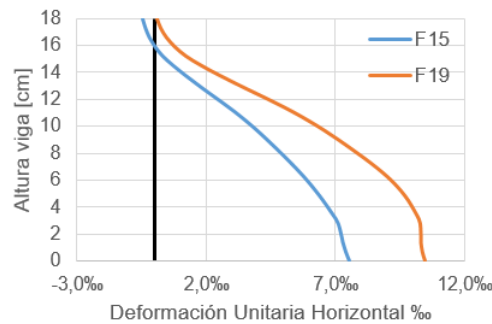


Figura 4.47: Comparación para examinar el perfil de DUH previo y post desarrollo de grieta.

En la figura anterior es posible visualizar las distorsiones (más regulares que en el caso de la viga 1) que experimentan las DUH producto del agrietamiento y por la forma de las curvas, existe un desplazamiento de la curva tanto para la fibra extrema en compresión como de tracción.

Por último, la *Figura 4.48* muestra los resultados para la fotografía 29, con la cual, se concluye el registro fotográfico del ensayo en la viga 2. De manera similar a lo comentado en figuras anteriores, al observar las secciones con los perfiles de DUH, existe la impresión que las curvas se encuentran desplazadas.

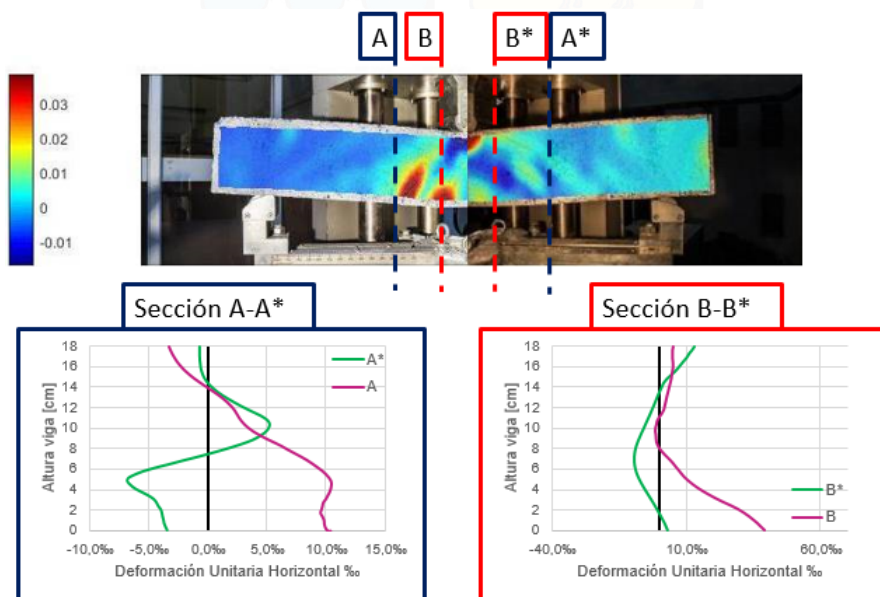


Figura 4.48: Secciones para examinar las deformaciones unitarias horizontales en la fotografía 29.

Cabe señalar que las deformaciones unitarias horizontales obtenidas a partir de la correlación de imágenes, no representan las deformaciones normales de la sección transversal, la cual, gira producto de la curvatura de la viga. Sin embargo, por limitación de tiempo en la duración de esta memoria, se ha supuesto que el giro no posee una gran relevancia como para causar diferencias entre las variables.

Desde luego escapa de los objetivos de esta memoria continuar con un análisis de las grietas, por lo que los resultados obtenidos en este trabajo, pueden servir como antecedentes para futuros estudios que realicen un análisis más acabado en estos temas.

4.6.3. Deformaciones Unitarias Principales

Esta sección está enfocada a identificar la ubicación de grietas que presentan las vigas al terminar el ensayo. Para lo cual, se considerarán las deformaciones principales máximas en tracción de acuerdo a la *Sección 3.3.1*.

4.6.3.1. Viga 1

La *Figura 4.49* muestra los resultados para la viga 1 en un instante previo a la falla. A partir de esta figura, es posible visualizar una gran cantidad de planos en diagonal donde se concentran las mayores DUP en el elemento. Definitivamente estos efectos son consistentes con la respuesta obtenida de manera global en esta viga y claramente coinciden con una falla por corte.

Es más, también es posible visualizar una zona roja en la parte inferior, la cual es posible que se deba, a una concentración de tensiones de adherencia en la zona cercana al refuerzo en tracción, esfuerzos que producen grietas casi horizontales en la zona cercana a los apoyos.

Finalmente cabe destacar que este tipo de gráficos ayudan a identificar con mayor exactitud, ciertos fenómenos que ocurren en elementos de hormigón armado, tales como los mencionados previamente: los patrones de grietas en diagonal y las zonas con concentraciones de tensiones de adherencia.

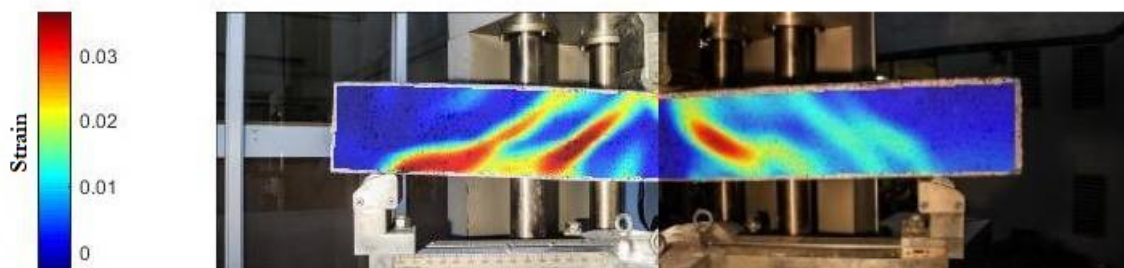


Figura 4.49: Perfil de deformaciones unitarias principales en la viga 1 para la fotografía 26.

4.6.3.2. Viga 2

La *Figura 4.50* muestra los resultados para la viga 2 en un instante previo a la falla. A partir de esta figura, es posible visualizar un plano dominante en forma diagonal en el lado derecho donde se concentran las mayores DUP en el elemento. Mientras que en el lado izquierdo, se ve una grieta de mayor espesor, la cual se inicia en la parte inferior de la viga en dirección vertical, presumiblemente grietas por flexión, y que luego se curva levemente hacia la zona en la que se aplica la carga.

Ahora bien, en términos globales los resultados obtenidos para la viga 2, indican que este elemento experimentaba mayor ductilidad que la viga 1. Incluso en un principio no se descartaba la hipótesis que este elemento podía experimentar una falla por flexión. Sin embargo, al observar los resultados de la fotogrametría, sin duda que la viga 2 también falla por corte.

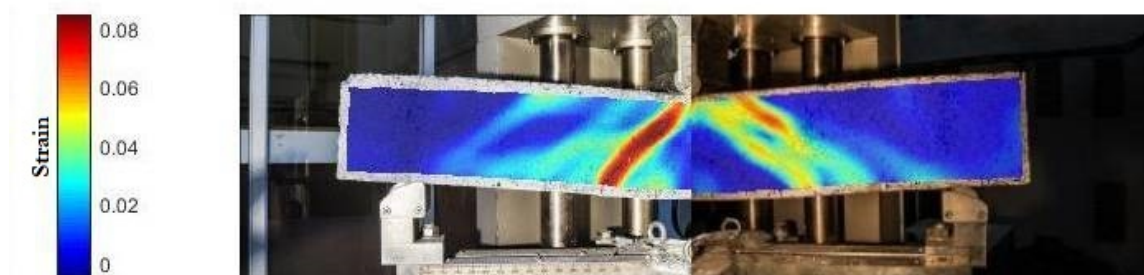


Figura 4.50: Perfil de deformaciones unitarias principales en la viga 2 para la fotografía 29.

5 | Modelación bidimensional

Como se ha mencionado anteriormente en el marco teórico, la propuesta de este trabajo consiste en realizar un análisis similar a lo realizado por [Moharrami et al. \(2015\)](#) y replicar las características generales de la modelación de [Norero y Sepúlveda \(2018\)](#).

Para lo cual, se mantendrá el concepto de confeccionar modelos no lineales y bidimensionales a través de modelos de enrejado equivalente, sin embargo, la propuesta de este trabajo consiste en utilizar curvas experimentales que definan el comportamiento del hormigón y el acero.

Previo a desarrollar la modelación, debe contemplarse como principal supuesto que cualquier plano logitudinal-vertical de la viga es representativo del comportamiento del cuerpo completo. Así pues, esto permitirá comparar los resultados de la fotogrametría realizada en caras opuestas de la viga, con los resultados de la modelación.

Con estas consideraciones en mente, es posible dar paso a la confección de los modelos a través de elementos uniaxiales.

Un elemento uniaxial posee la característica de deformarse en sólo una dirección, por lo cual, su curva de comportamiento no se encuentra influenciada por otras direcciones. Ahora bien, en el rango lineal esto posee poca relevancia, no así en el rango no lineal, donde este fenómeno ya no es tan fácil modelar. Por otro lado, al ser usados para formar cuerpos más complejos, el acople entre ellos no es modelado explícitamente en cada elemento de forma individual, sino más bien aparece cuando estos elementos uniaxiales simples interactúan entre sí, generando el acople a nivel intra-elementos y no inter-elementos, como se hace en otro tipo de modelaciones.

En términos prácticos, la modelación es realizada mediante el software *SAP2000*

v20 (Computer and Structures, Inc (2018)) que posee la capacidad de implementar análisis no lineales y el uso de elementos barra uniaxiales denominados en el software como "Links".

El desarrollo de este capítulo, se encuentran enfocadas a describir los modelos confeccionados y junto a eso, los parámetros y consideraciones utilizadas en el programa.

5.1. Descripción de Modelos

El macro elemento del *Capítulo 3.1.1* es utilizado para construir los modelos computacionales de cada espécimen. Luego, este es replicado continuamente hasta formar cuerpos similares a cada viga.

En general, los modelos confeccionados son bastante similares al bosquejo de la *Figura 5.1* y el mismo tipo de referenciación con colores, es utilizado al desarrollar los modelos.

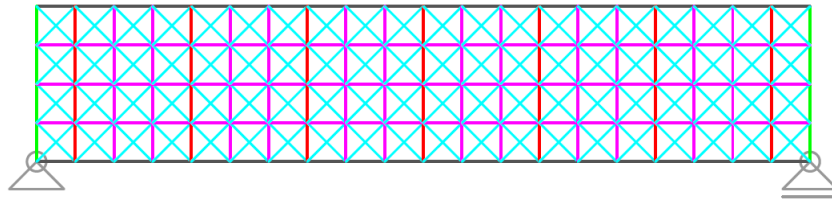


Figura 5.1: Bosquejo de los modelos confeccionados.

Desde luego, los colores también están vinculados al macro elemento del *Capítulo 3.1.1* y los elementos de hormigón que se encuentran traslapados, son simplificados y transformados en un nuevo elemento, pero con propiedades equivalentes dado que estos poseen el doble de área que un sólo elemento.

También se agrega la representación de las barras de acero de $8[mm]$ y $6[mm]$ mediante elementos uniaxiales, sin embargo, el área de estos Links está determinada por el diámetro de la barra según corresponda.

En resumen, el uso de colores en la modelación pretende diferenciar si el elemento uniaxial representa un tipo de material (hormigón o acero) con su respectiva área y

si corresponde a un elemento ortogonal o diagonal. Por lo tanto, se distinguen 5 tipos de elementos:

- En color negro se definen los Links denominados F_LONG . Estos elementos representan al acero de refuerzo y se encuentran ubicados en los bordes inferior y superior.
- En color rojo se definen los Links denominados $F_ESTRIBO$. Estos elementos representan al acero usado en los estribos y se encuentran ubicados de manera vertical espaciándose a $9[cm]$ aproximadamente.
- En color celeste se definen los Links denominados $DIAGONAL$ y representan a las diagonales del macro elemento de hormigón.
- En color verde se definen los Links denominados $ORTOGONAL$ y representan a las aristas del macro elemento de hormigón que no son traslapadas. Estos elementos se encuentran en los bordes del modelo de las vigas.
- En color morado se definen los Links denominados $ORTOGONAL\ x2$ y representan a los elementos $ORTOGONALES$ que han sido traslapados.

Además, se confeccionan distintos modelos refinando el tamaño de los Links. Con esto en mente, debe considerarse que los elementos se encuentran relacionados a un macro elemento cuadrado de arista a , y este a su vez, al ser replicado debe ajustarse a la altura de la viga y a la configuración de los estribos (ubicados cada $9[cm]$).

Finalmente, *Tabla 5.1* muestra el valor de la longitud de arista a , utilizado en cada modelación:

Tabla 5.1: Tamaños de grilla utilizados en la modelación de las vigas.

-	a [cm]		
Viga 1 100x160	4.1	3	2.29
Viga 2 120x180	4.5	3	2.25

Una vez escogido el tamaño de la discretización en la grilla, es posible continuar con definir las propiedades de los elementos uniaxiales.

5.2. Definición de Elementos Uniaxiales

En el programa *SAP2000* las propiedades de cada Link quedan definidas al ingresar la curva fuerza-deformación. Luego, para el caso de un Link de largo L , área A , esfuerzo σ y deformación unitaria ϵ ; la fuerza y deformación se definen como:

$$F = \frac{\sigma}{A}$$

$$\delta = \frac{\epsilon}{L}$$

Ahora bien σ y ϵ se encuentra definidos a partir de las curvas constitutivas de los materiales. Y por otro lado, en el caso de los elementos ortogonales, recordar que el área A y el largo L se encuentran relacionados por la ecuación $A = 0,417a \cdot b$ con $L = a$ y b el ancho de la viga. Mientras que en el caso de los elementos diagonales, estos se encuentran relacionados por la ecuación $A = 0,295a \cdot b$. Para más detalles revisar la *Sección 3.1.2*.

De esta forma, es posible resumir los cálculos para los valores de las áreas en la siguiente tabla:

Tabla 5.2: área usada en la modelación de cada tipo de Link.

-	a	Áreas de elementos de hormigón [cm^2]		
		<i>DIAGONAL</i>	<i>ORTOGONAL</i>	<i>ORTOGONAL x2</i>
Viga 1 100x160	4, 1	12, 08	17, 08	34, 17
	3, 0	8, 84	12, 50	25, 00
	2, 29	6, 75	9, 54	19, 08
Viga 2 120x180	4, 5	15, 91	22, 50	45, 00
	3, 0	10, 61	15, 00	30, 00
	2, 25	7, 95	11, 25	22, 50

Con respecto a los Links que representan a las barras de acero, sencillamente sus áreas se encuentran definidas por la correspondiente barra que represente y ya sea de diámetro $8[mm]$ para el refuerzo longitudinal o $6[mm]$ en los estribos:

- $F_LONG = 1,01[cm^2]$
- $F_ESTRIBO = 0,57[cm^2]$

Mediante estos resultados, es posible caracterizar los modelos a través de las cuantías. Por lo tanto, la *Tabla 5.3* realiza una comparación entre las cuantías de acero de refuerzo ρ_l y acero transversal ρ_t , entre las probetas ensayadas y los modelos.

Tabla 5.3: Relación entre las cuantías de las probetas y los modelos.

-	Probetas		Modelos				
	ρ_l	ρ_t	a	ρ_l	Dif %	ρ_t	Dif %
Viga 1 100x160	6,3	6,3	4,1	6,1	2,4	6,9	9,8
			3	6,7	6,7	6,3	0,0
			2,29	6,3	0,2	6,2	1,7
Viga 2 120x180	4,7	5,2	4,5	4,7	0,0	5,2	0,0
			3	4,7	0,0	5,2	0,0
			2,25	4,7	0,0	5,2	0,0

El siguiente paso, corresponde definir las curvas de comportamiento esfuerzo deformación-unitaria para convertirlas posteriormente, en curvas fuerza-deformación.

5.2.1. Curvas de Comportamiento

Las curvas de comportamiento son definidas a partir de los resultados en la *Campaña Experimental* y el *Marco Teórico*. Por lo tanto:

- La curva del hormigón es dividida en dos tramos. El primer tramo considerado bajo esfuerzos de compresión, está determinado por los ensayos que se han comentado en el *Capítulo 4.2*. Por otro lado, el segundo tramo considerado bajo esfuerzos de tracción, es definido mediante los modelos constitutivos presentados en el *Capítulo 3.2*.
- La curva del acero se encuentra definida mediante los resultados del *Capítulo 4.2* tanto en la zona de compresión como de tracción.

Con estas consideraciones, las curvas esfuerzo deformación unitaria son mostradas a continuación.

5.2.1.1. Hormigón

La *Figura 5.2* muestra la curva del hormigón para la Viga 1. Cabe señalar que se ha considerado un comportamiento en tracción, que una vez el material alcanza la resistencia máxima, deja de ejercer fuerza de un instante a otro (modelo 1 del *Capítulo 3.2.1*).

En cambio, la *Figura 5.3* muestra la curva del hormigón considerando una reducción lineal de la resistencia en tracción, desde el instante en el que se alcanza la resistencia máxima (modelo 2 del *Capítulo 3.2.1*) hasta su completo desprendimiento.

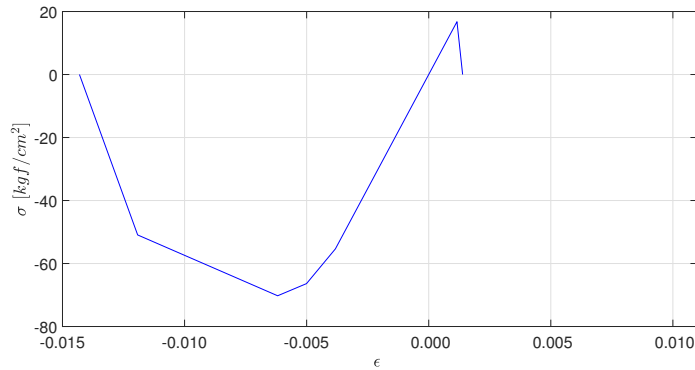


Figura 5.2: Comportamiento del hormigón en la viga 1 mediante el modelo 1.

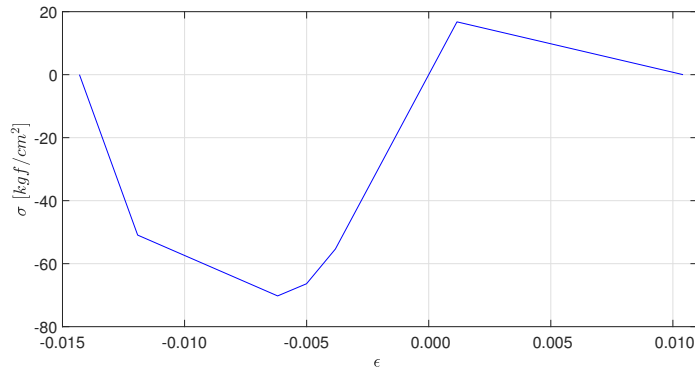


Figura 5.3: Comportamiento del hormigón en la viga 1 mediante el modelo 2.

De manera análoga para la viga 2:

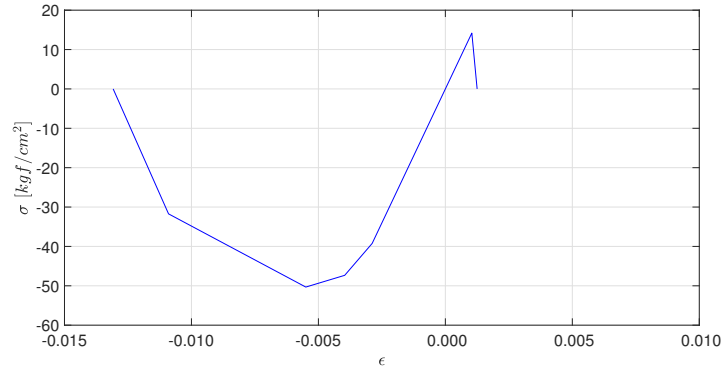


Figura 5.4: Comportamiento del hormigón en la viga 2 mediante el modelo 1.

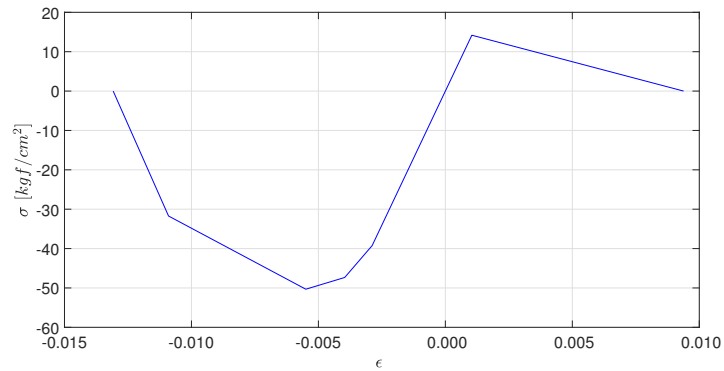


Figura 5.5: Comportamiento del hormigón en la viga 2 mediante el modelo 2.

5.2.1.2. Acero de Refuerzo

La *Figura 5.6* muestra la curva para el acero de refuerzo (barra de 8[mm]).

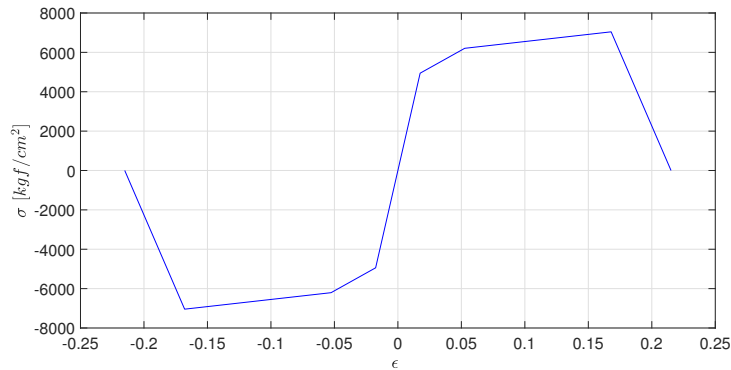


Figura 5.6: Comportamiento del acero de refuerzo.

5.2.1.3. Refuerzo Transversal

La *Figura 5.7* muestra la curva para el acero usado en los estribos (barra de 6[mm]).

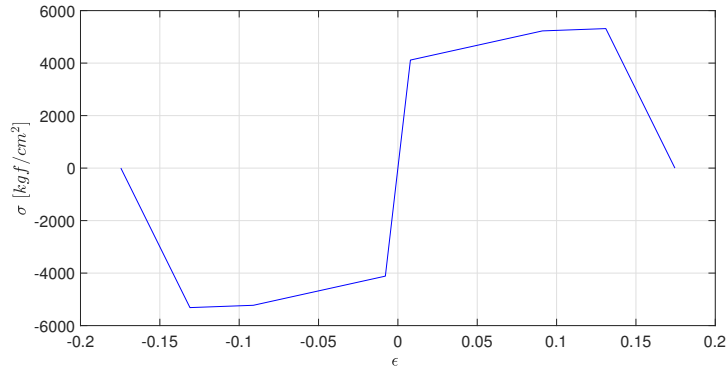


Figura 5.7: Comportamiento del refuerzo transversal.

Una vez que las curvas de comportamiento se encuentran definidas, es posible incorporarlas en la definición de cada Link con la opción *Multi-Linear Plastic Property*.

Posteriormente debe definirse el comportamiento histerético. Para lo cual, se utiliza la opción de *Concrete* para el hormigón y *Kinematic* para el acero.

5.3. Creación de Modelos

Con la definición de los elementos uniaxiales, es posible proceder a confeccionar los modelos de enrejado equivalente en el software *SAP2000*.

Para su desarrollo y como se ha mencionado previamente, se considera utilizar diferentes discretizaciones. Es por esto que a continuación se muestran los modelos generados y cada uno representando la viga 1 o bien la viga 2, pero diferenciando en el tamaño de la discretización.

- Viga 1:

- Modelo $v1a41$ para $a = 4,1[cm]$:

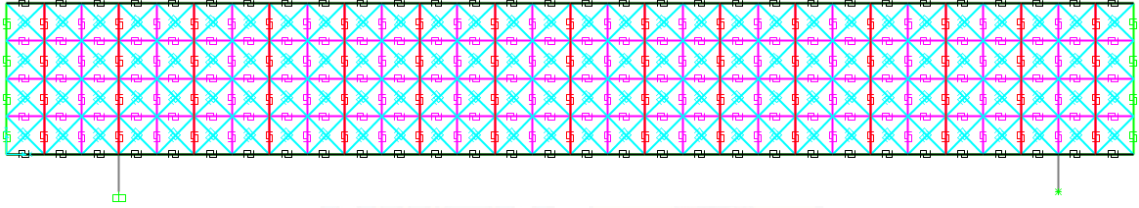


Figura 5.8: Modelo $v1a41$ con altura de $16,4[cm]$ y largo de $123[cm]$

- Modelo $v1a3$ para $a = 3[cm]$:

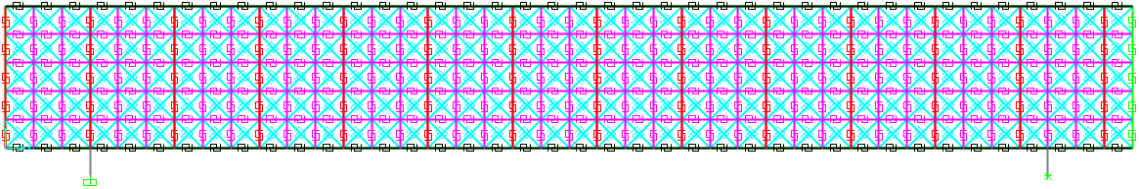


Figura 5.9: Modelo $v1a3$ con altura de $15[cm]$ y largo de $120[cm]$

- Modelo $v1a229$ para $a = 2,29[cm]$:

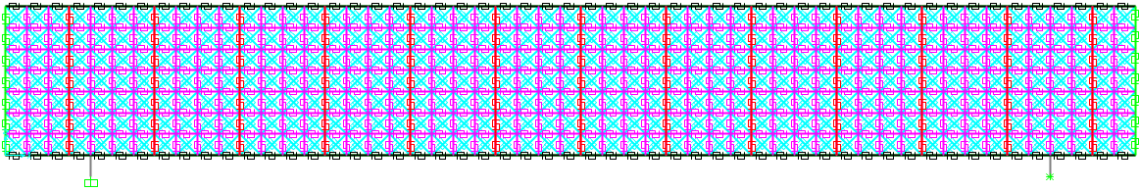


Figura 5.10: Modelo $v1a229$ con altura de $16,03[cm]$ y largo de $121,37[cm]$

- Viga 2:

- Modelo $v2a45$ para $a = 4,5[cm]$:

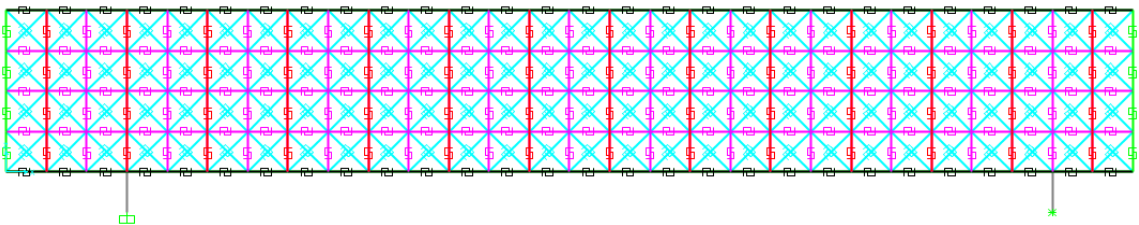


Figura 5.11: Modelo $v2a45$ con altura de $18[cm]$ y largo de $126[cm]$

- Modelo $v2a3$ para $a = 3[cm]$:

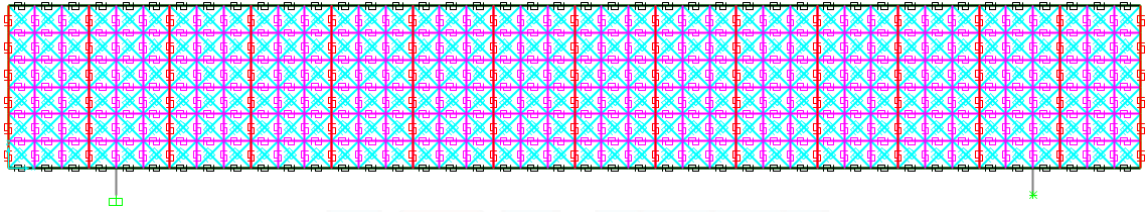


Figura 5.12: Modelo $v2a3$ con altura de $18[cm]$ y largo de $126[cm]$

- Modelo $v2a225$ para $a = 2,25[cm]$:

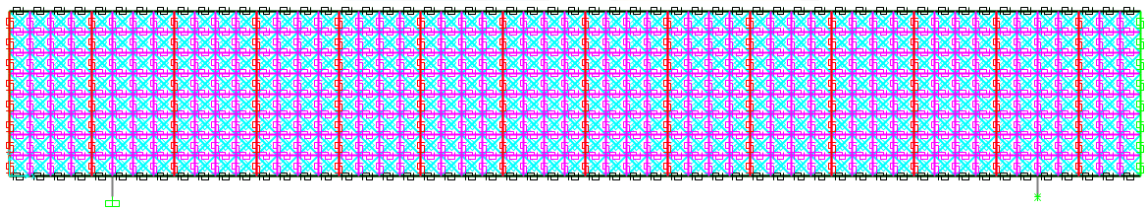


Figura 5.13: Modelo $v2a225$ con altura de $18[cm]$ y largo de $123,75[cm]$

5.4. Análisis Pushover

El análisis no lineal es llevado a cabo controlando desplazamientos. Se escoge monitorear el nodo correspondiente a la mitad de la luz, en la parte superior del modelo de cada viga. Cabe señalar que este punto es homólogo a la zona de aplicación de carga en los especímenes ensayados.

En cuanto a los pasos guardados, se decide utilizar entre 100 y 110 pasos con la finalidad de tener suficiente información y poder comparar en una etapa posterior, con los resultados de la correlación de imágenes digitales.

Finalmente para los parámetros no lineales, por un tema de convergencia, se opta por configurar los valores por defecto que recomienda el programa y de esta manera, utilizar más iteraciones en la solución del caso de carga. La siguiente tabla muestra los valores utilizados:

Tabla 5.4: Parámetros no lineales utilizados en el análisis

Parámetro	Valor
Maximum Constant-Stiff Iterations per Step	400
Maximum Newton-Raphson Iter. Per Step	800
Iteration Convergence Tolerance (Relative)	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Max Line Searches per Iteration	300
Line-search Acceptance Tol. (Relative)	0,1
Line-search Step Factor	1,005

5.4.1. Otras Consideraciones

Debido a que los apoyos en el modelo se asignan a un nodo en particular, esta modelación produce concentraciones de esfuerzos importantes y que no representan fielmente lo que pasa en la realidad, en donde la zona apoyada de la viga en el ensayo posee un área finita. Es por esto que en el modelo, en la zona cercana al apoyo se asignan *Joint Constraints*, de forma tal de que los esfuerzos se distribuyan en más de un solo nodo.

Además, los apoyos son asignados intentando mantener la distancia entre ellos de 102[cm] según lo comentado en la *Campaña Experimental*. Estos son asignados como un apoyo simple, mientras que el otro, como un apoyo rotulado.

5.5. Resultados de la Modelación

5.5.1. Comportamiento en Tracción

En primer lugar se realiza un análisis de sensibilidad respecto a las curvas de comportamiento de hormigón en tracción. Para esto es necesario recordar que en el *Marco Teórico* se ha planteado utilizar 2 enfoques diferentes.

El primer enfoque (modelo 1) está vinculado al supuesto de que el hormigón una vez que alcanza la resistencia de tracción deja de ejercer fuerza de un instante a otro. En cambio, el segundo enfoque (modelo 2) considera una reducción lineal de la resistencia en tracción, hasta llegar a fuerza nula.

Para estudiar los 2 enfoques propuestos, se ha tomado como base analizar los casos de estudios *v1a41* y *v2a45* correspondientes al modelo de la viga 1 y 2 con discretización de $4,1[cm]$ y $4,5[cm]$ respectivamente. Es así como la *Figura 5.14* y *Figura 5.15* muestran los resultados con los enfoques propuestos.

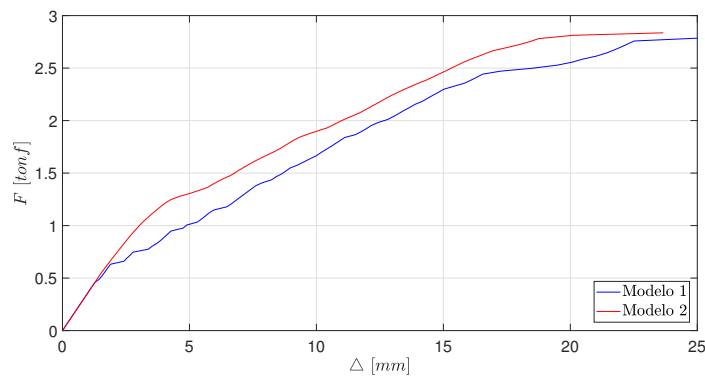


Figura 5.14: Comparación para definir el comportamiento del hormigón en la viga 1.

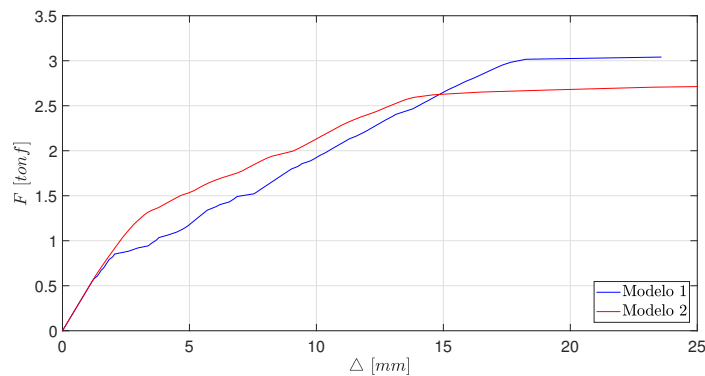


Figura 5.15: Comparación para definir el comportamiento del hormigón en la viga 2.

Evidentemente las curvas determinadas por el modelo 2 presentan una curvatura más homogénea respecto al modelo 1, dado que en este último existe una pérdida de resistencia de manera abrupta al alcanzarse la resistencia en tracción. Incluso esta características del modelo 1, conlleva a alcanzar las limitaciones del programa y por

lo tanto, el tiempo que el programa demora en encontrar una solución, es mayor.

Escoger entre el modelo 1 o 2, no tiene una gran diferencia en el rango lineal, ni tampoco en el estado final que alcanzan los modelos computacionales. En el rango lineal la respuesta es exactamente la misma y en el estado final, ambos alcanzan prácticamente resistencias similares.

En resumen y además por un tema de eficiencia computacional, es más práctico trabajar con el modelo 2. Por lo tanto el desarrollo del siguiente trabajo, continuará únicamente con el supuesto de representar la pérdida de resistencia del hormigón en tracción, como un proceso paulatino.

5.5.2. Análisis de Sensibilidad

Puesto que se ha escogido el tipo de comportamiento para el hormigón en tracción que entrega mejores resultados, el siguiente paso es determinar cuál tamaño en la discretización de los modelos de cada viga, posee un mejor desempeño para homologar los resultados experimentales.

Con esto en mente, se plantea examinar los casos de la *Sección 5.3* comparando la respuesta frente a los resultados experimentales.

5.5.2.1. Viga 1

La *Figura 5.16* muestra los resultados de las curvas de capacidad obtenidas a partir de la modelación de la viga 1. En esta imagen, es posible observar que en general los casos evaluados entregan curvas de carga deformación bastante similares. En ellas, existe un primer tramo lineal y a partir de cierto punto, el modelo pierde su rigidez inicial y el comportamiento se mantiene constante hasta encontrarse cerca del *peak* de la curva experimental. A partir de allí, el sistema vuelve a perder su rigidez y nuevamente la curva se mantiene constante, pero esta vez, hasta el término de la curva. Incluso esta característica es peculiar y se observa en los 3 casos evaluados, ya que la zona posterior al rango lineal elástico, se encuentra representada prácticamente por un tramo horizontal

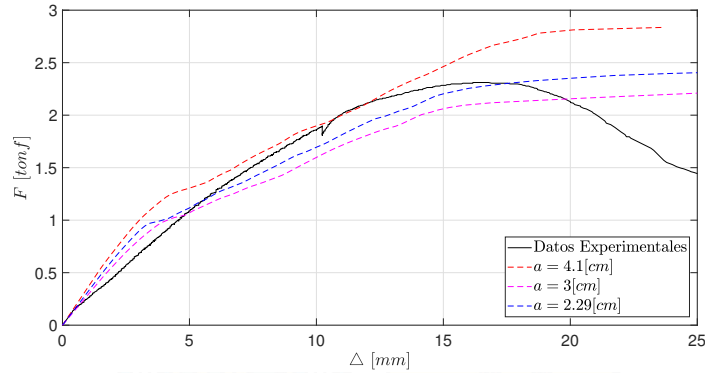


Figura 5.16: Análisis de sensibilidad utilizando distintos tamaños en la discretización de los modelos para la viga 1.

Pese a todo lo anterior, ninguno de los modelos logra predecir en exactitud el comportamiento lineal expuesto por los datos experimentales. Incluso el modelo con menor discretización ($3[cm]$), tampoco es coincidente con el rango lineal. A lo anterior es posible agregar que todos los modelos sobrestiman la rigidez inicial de la viga 1, sin embargo, este fenómeno es algo que suele ocurrir en estudios de otros autores.

En adición, la alternativa con $a = 2,29[cm]$ corresponde a la que en términos generales, entrega valores similares a las de las vigas ensayadas. Sin embargo, la respuesta con mayor similitud en el rango lineal, corresponde al modelo con $a = 3[cm]$.

Finalmente dado que la diferencia entre el modelo con discretización $3[cm]$ y $2,29[cm]$ es marginal, por un tema práctico, se opta por continuar con el desarrollo de la alternativa con $a = 3[cm]$.

5.5.2.2. Viga 2

La *Figura 5.17* muestra la curva de capacidad obtenida en la modelación de la viga 2:

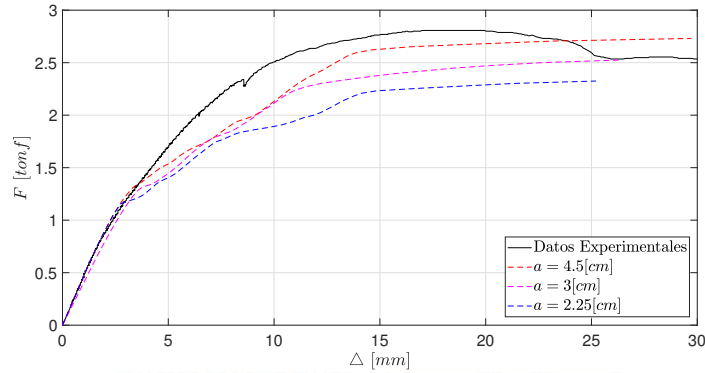


Figura 5.17: Análisis de sensibilidad utilizando distintos tamaños en la discretización de los modelos para la viga 2.

En este caso se observa un comportamiento similar respecto a la sensibilidad del modelo al tamaño de los elementos. Por lo tanto, se continuará con la discretización de $a = 3[cm]$, ya que posiblemente el caso con $a = 2,25[cm]$, este influenciado por el fenómeno de localización.

5.5.3. Deformada en los Modelos

5.5.3.1. Viga 1

En la *Figura 5.18* se muestra la deformada del modelo para la viga 1 al momento de terminar el análisis. En ella, es posible observar una zona de deformación importante en el costado izquierdo de la viga.

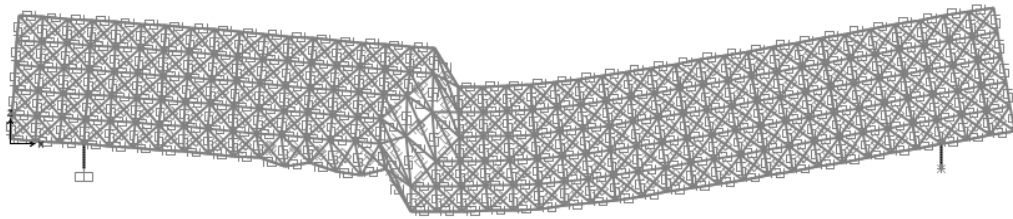


Figura 5.18: Deformada calculada en la modelación de la viga 1.

Aún así, debido a la presencia de una gran grieta en la deformada y por un tema de saturación de la imagen, se desconoce si en el modelo se han desarrollado más grietas. En consecuencia, los resultados son utilizados para confeccionar un *perfil de agrietamiento* en el cual, es posible estandarizar las deformaciones en cada tipo de

Link convirtiéndolas a deformaciones unitarias. El objetivo es determinar de manera binaria la presencia de grietas.

La siguiente figura indica la nomenclatura a utilizar:

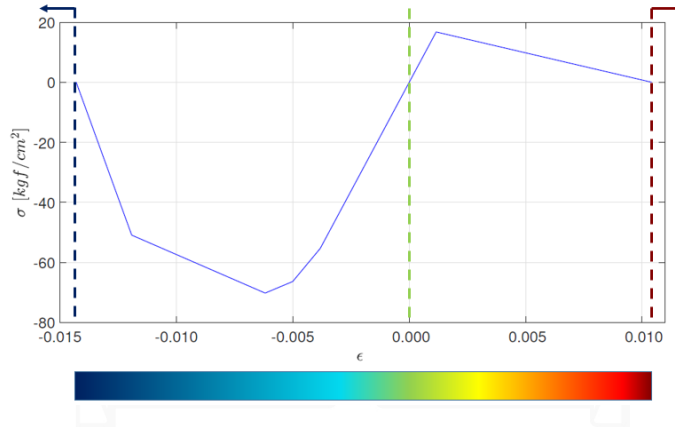


Figura 5.19: Nomenclatura para representar el perfil de agrietamiento en la viga 1.

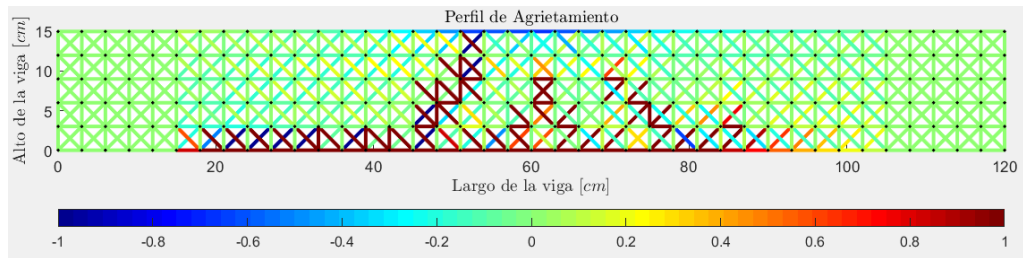


Figura 5.20: Representación gráfica de la deformada en la viga 1.

A partir de la figura anterior, es posible observar con mayor claridad las zonas agrietadas, que las correspondientes en la *Figura 5.18*, las cuales se presentan principalmente en dirección diagonal desde el borde inferior del modelo.

En los aspectos diferenciadores, en esta oportunidad es posible observar daño en la zona del recubrimiento. Los Links afectados se encuentran en la parte inferior de la viga y corresponden a los que se encuentran en posición horizontal. Este efecto puede ser producido por esfuerzos de corte derivados de las tensiones de adherencia, la cual se desarrolla, por el contacto entre el hormigón y el acero de refuerzo, efecto que también se observa en la *Figura 4.49*.

Las mayores deformaciones unitarias en tracción se encuentran en los Links diagonales e incluso, superan el límite de 0,0114 definido para el hormigón, lo que

significa la presencia de una grieta en el modelo. En términos de la compresión, en general afecta a los Links ortogonales de la zona superior y también sobrepasan el límite de $-0,0157$.

Por otro lado, también es de interés comparar el patrón de agrietamiento que entrega la modelación al momento de la falla, con los resultados experimentales. Para lo cual, se preparan las *Figuras 5.21* y *5.22* que facilitarán la comparación en términos cualitativos.

A partir de la *Figura 5.21* es posible desprender, que la modelación logra representar el modo de falla de la viga ensayada en términos generales. Es decir, los resultados computacionales muestran la formación de una grieta principal con forma diagonal, tal y como se muestra en la fotografía del experimento. Ahora bien, que en la modelación se desarrolle el plano de falla en el lado izquierdo o bien, en el lado derecho, es por un tema aleatorio a nivel numérico cuando el programa computa una solución.

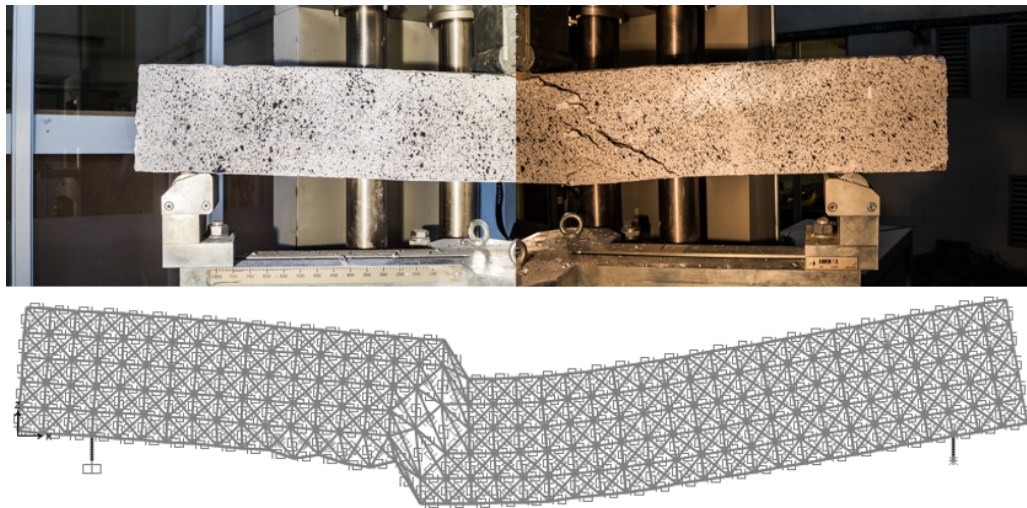


Figura 5.21: Comparación general del agrietamiento en la viga 1.

Por lo mismo, al observar la *Figura 5.22* se observa que en términos comparativos, la formación de grietas entre la modelación y el ensayo, no es igual, pero conceptualmente similares. Esto era esperado puesto que las curvas constitutivas no se han desarrollado para considerar fenómenos más complejos, tales como incertidumbre en las propiedades mecánicas de los materiales al comparar diferentes zonas de la viga,

asimetría de la carga, entre otras. Además, las características del programa en que se realizó la modelación, son limitadas.

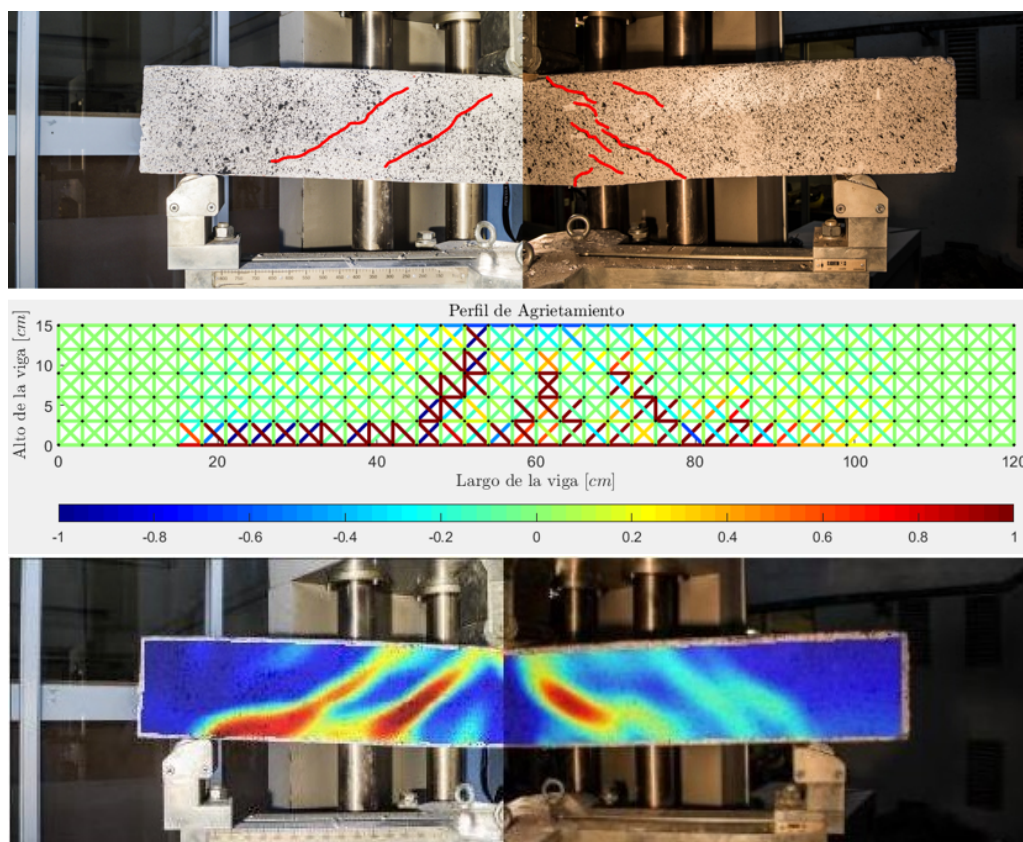


Figura 5.22: Comparación a partir de la totalidad de grietas observadas en la viga 1.

5.5.3.2. Viga 2

De igual forma que en la sección anterior, la *Figura 5.23* muestra la deformada del modelo para la viga 2 al momento de terminar el análisis. En ella, es posible observar una zona de deformación importante en el lado izquierdo de la viga y otra de menor tamaño, en el lado derecho.

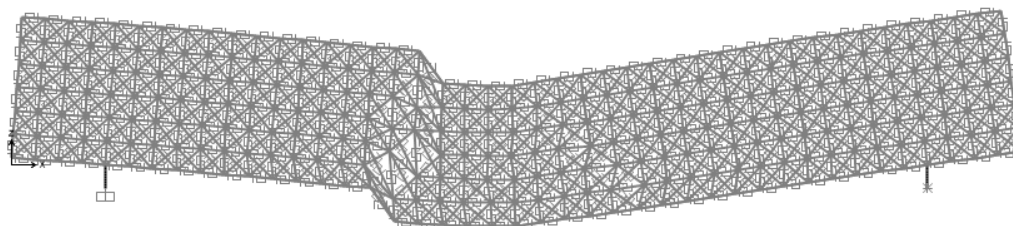


Figura 5.23: Deformada calculada en la modelación de la viga 2.

De igual forma que con la viga 1, se desconoce si existe más daño en otros elementos estructurales, por lo tanto, las deformaciones son transformadas en deformaciones unitarias y graficadas en un *perfil de agrietamiento* mediante colores. Para su representación también se ha considerado los límites de la curva constitutiva del hormigón. La siguiente figura indica la nomenclatura a utilizar:

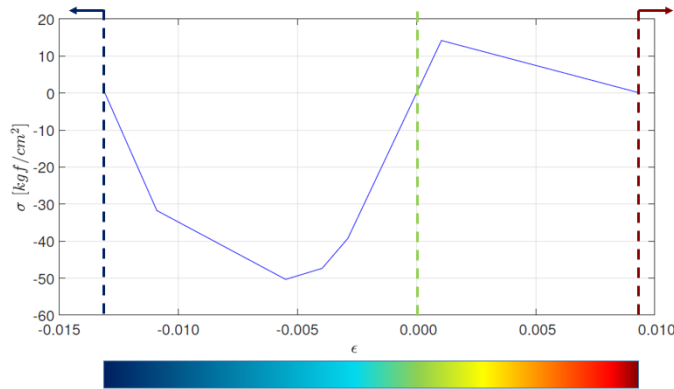


Figura 5.24: Nomenclatura para representar el perfil de agrietamiento en la viga 2.

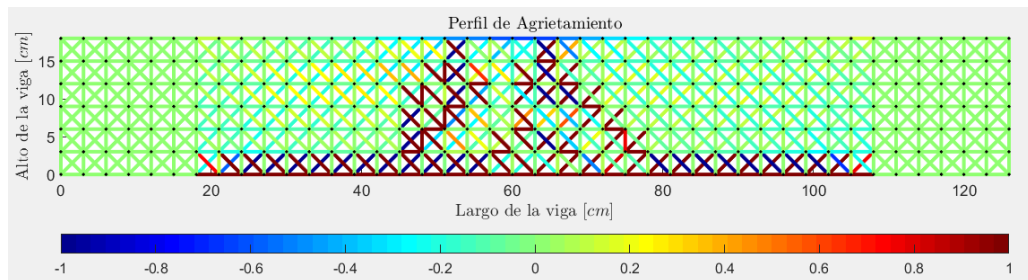


Figura 5.25: Representación gráfica de la deformada en la viga 2.

A partir de la figura anterior, se observan características similares que para el caso de la viga 1, es decir, los *Links* con las mayores deformaciones corresponden a los diagonales y la orientación de las grietas.

De igual forma que en el caso de la viga 1, se confeccionan las *Figuras 5.26 y 5.27* para comparar los resultados.

A partir de la *Figura 5.26*, es posible desprender que la modelación logra una semejanza en la formación de grietas en términos generales. Es decir, los resultados computacionales logran emular grietas orientadas en diagonal en la viga.

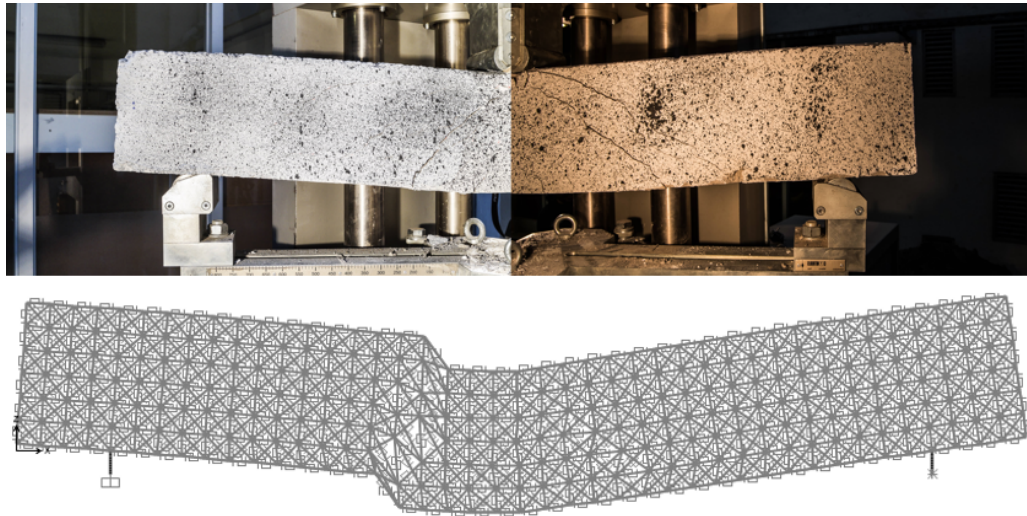


Figura 5.26: Comparación general del agrietamiento en la viga 2.

Al observar la *Figura 5.27*, se observan aspectos similares que los comentados para el caso de la viga 1.

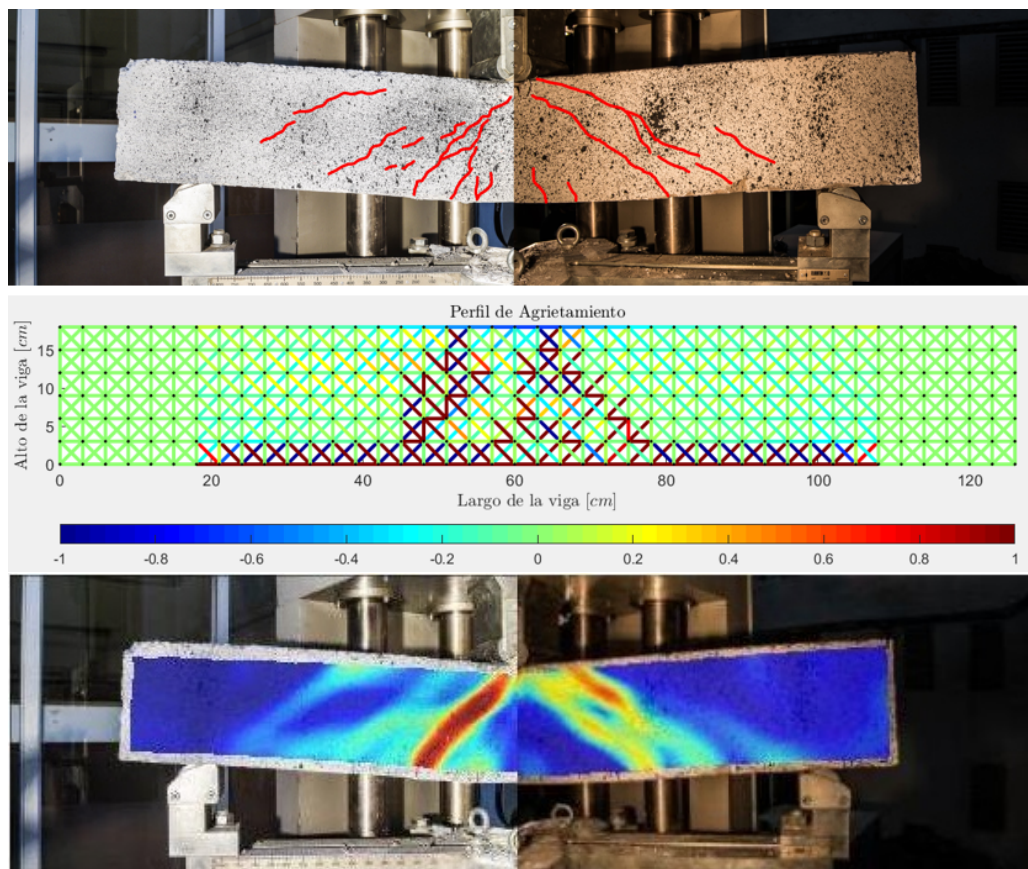
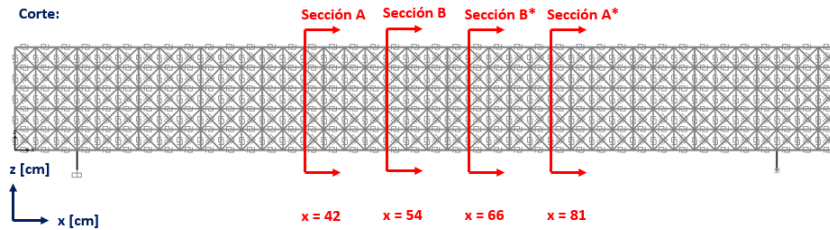


Figura 5.27: Comparación a partir de la totalidad de grietas observadas en la viga 2.

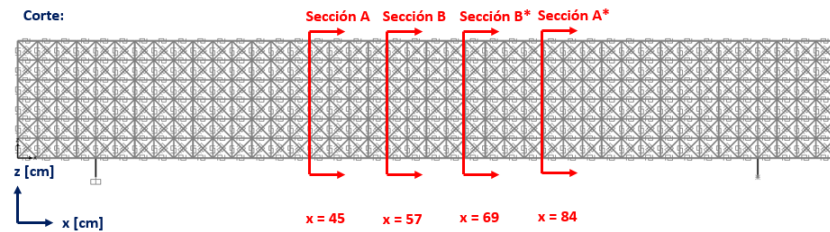
5.5.4. Deformaciones Unitarias Horizontales

En los modelos de cada viga se ha escogido examinar las DUH en distintas secciones a lo largo de la viga y también, en distintos puntos de sus respectivas curvas de capacidad.

En particular, las secciones a examinar en cada viga corresponden a 4, en las cuales, 2 de ellas se encuentran cercanas al centro y las restantes 2, entre el punto de aplicación de carga y los apoyos. La siguiente figura es preparada para mostrar la ubicación de estas secciones:



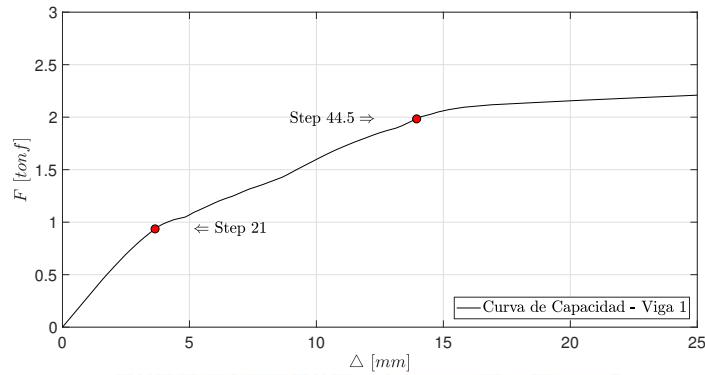
(a) Secciones consideradas para el modelo de la viga 1.



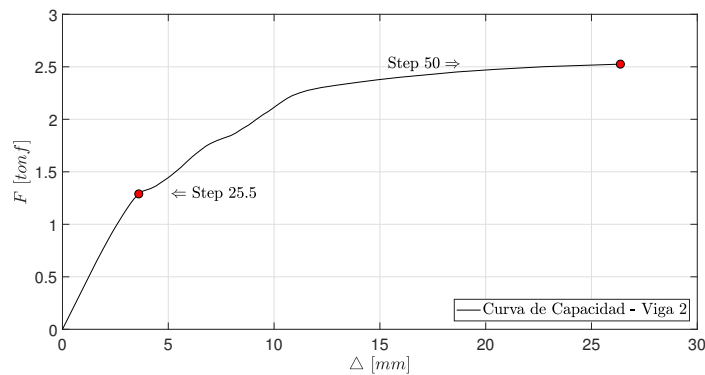
(b) Secciones consideradas para el modelo de la viga 2.

Figura 5.28: Referencia para indicar dónde se examinarán las DUH.

Por otro lado, los puntos a examinar en la curva de capacidad corresponden a 2, uno en el tramo lineal y otro en el tramo no lineal. Las siguiente figura muestra su ubicación:



(a) Puntos a examinar en la viga 1.



(b) Puntos a examinar en la viga 2.

Figura 5.29: Referencia para contextualizar los puntos a examinar en la curva de capacidad.

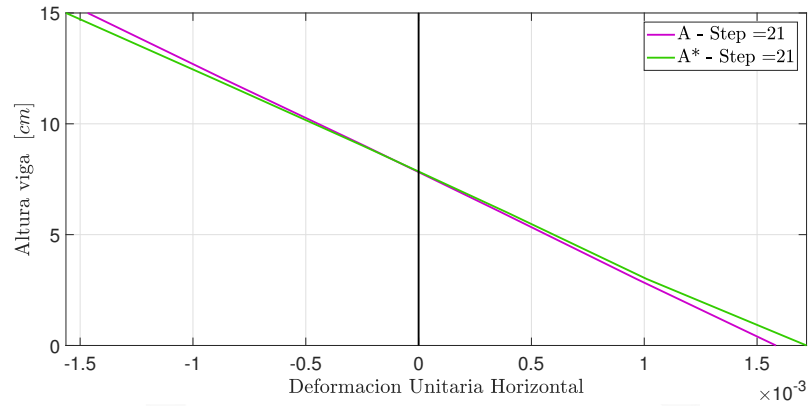
5.5.4.1. Viga 1

Las DUH evaluadas en las secciones para el final del tramo lineal, son mostradas en la *Figura 5.30*. A partir de la figura es posible observar que en general, el modelo aún refleja las características de caras planas permanecen planas. Salvo por la *Sección B^** , la cual indica que en esa zona, la viga comienza a experimentar deformaciones mayores.

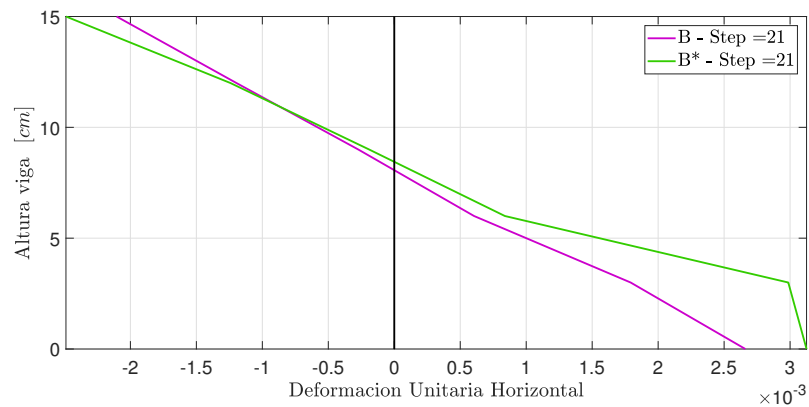
Por otro lado, en términos comparativos la *Sección $B - B^*$* se encuentra más cercana al punto de aplicación de la carga, por lo tanto, se cumple la lógica que las DUH son mayores que en la *Sección $A - A^*$* . Aún así, la diferencia entre las 2 secciones en términos de la ubicación del eje neutro es marginal.

Pese a que existe simetría en la construcción del modelo, se observa que las DUH de

secciones semejantes, aún pueden presentar diferencias considerando que se encuentran en el tramo lineal o fuera de este. Por lo mismo, las diferencias observadas se deben netamente por efectos del procesamiento interno del programa en la modelación.



(a) Modelo de la viga 1 sección A - A*.



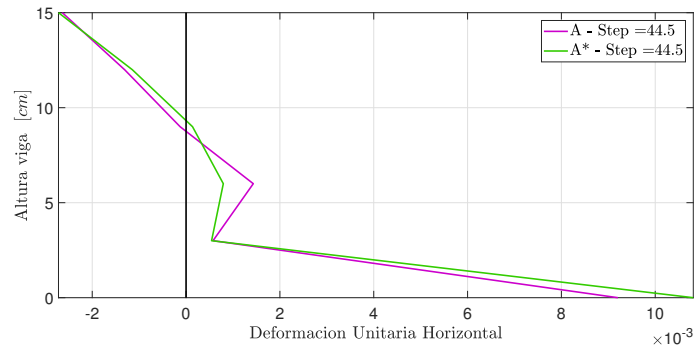
(b) Modelo de la viga 1 sección B - B*.

Figura 5.30: Perfiles de DUH al final del tramo lineal del modelo.

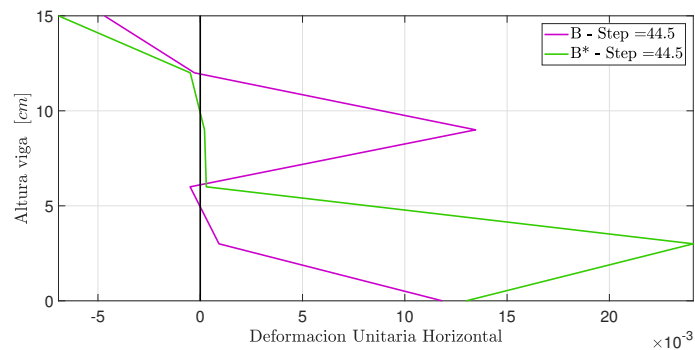
La *Figura 5.31* muestra las DUH en las mismas secciones de la modelación y en esta oportunidad, para un estado tensional dentro del tramo no lineal. A partir de la figura, es posible observar que los efectos de la misma no linealidad, influyen principalmente en la zona en tracción y además, mientras la sección se encuentra más cercana al punto de aplicación de la carga, el perfil obtenido presenta una forma más heterogénea. Incluso, para estas secciones las diferencias son mayores que las observadas anteriormente.

Un aspecto a considerar, consiste en que para el nivel de esfuerzos que corresponden

a la *Figura 5.31*, existe una gran cantidad de Links en que sencillamente se ha excedido su capacidad y claramente esto indica el desarrollo de grietas importantes.



(a) Modelo de la viga 1 sección A - A*.



(b) Modelo de la viga 1 sección B - B*.

Figura 5.31: Perfiles de DUH en el tramo no lineal del modelo.

Por otro lado, también es de interés comparar las DUH que entrega la modelación con los resultados experimentales. Para lo cual, se escoge estudiar las *Secciones A - A** y *Secciones B - B**, siendo estas equivalentes tanto en la modelación, como en los resultados de la fotogrametría (para mayor detalle revisar el *Apéndice F*). De igual forma, la *Figura 5.32* es preparada para indicar en las curvas de capacidad, a qué estado tensional corresponden los casos a estudiar las DUH.

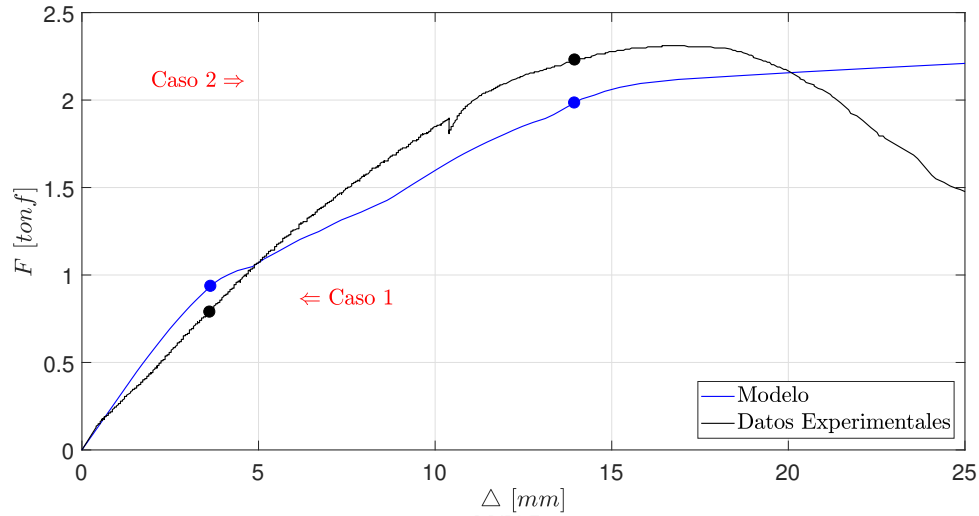


Figura 5.32: Reseña para indicar los puntos a examinar las DUH en la viga 1.

Tabla 5.5: Descripción de los casos 1 y 2 para evaluar las DUH en la viga 1.

	Caso 1		
	Fuerza [tonf]	Deformación [mm]	Descripción
Fotogrametría	0,79	4	Fotografía 16
Modelación	0,94	4	Step 43
	Caso 2		
	Fuerza [tonf]	Deformación [mm]	Descripción
Fotogrametría	2,23	14	Fotografía 26
Modelación	1,98	14	Step 90

De esta forma, en las figuras *Figuras 5.33* y *5.34* se muestran los resultados de la comparación en términos de las DUH obtenidas tanto en la fotogrametría, como en la modelación.

Al observar las figuras, la correlación entre las curvas obtenidas de la fotogrametría y la modelación, es escasa. Incluso para el caso 1 en que las curvas de capacidad se encuentran en el rango lineal de la viga. Posiblemente la razón se deba a que los

planos en que se evalúan las DUH, pasan justo a través de las grietas ya que las mediciones muestran muchas distorsiones.

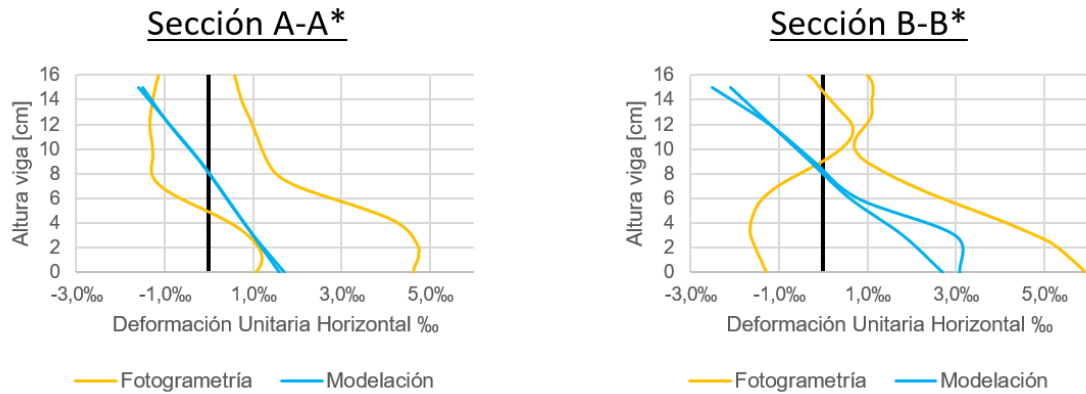


Figura 5.33: Comparación para el caso 1 en la viga 1.

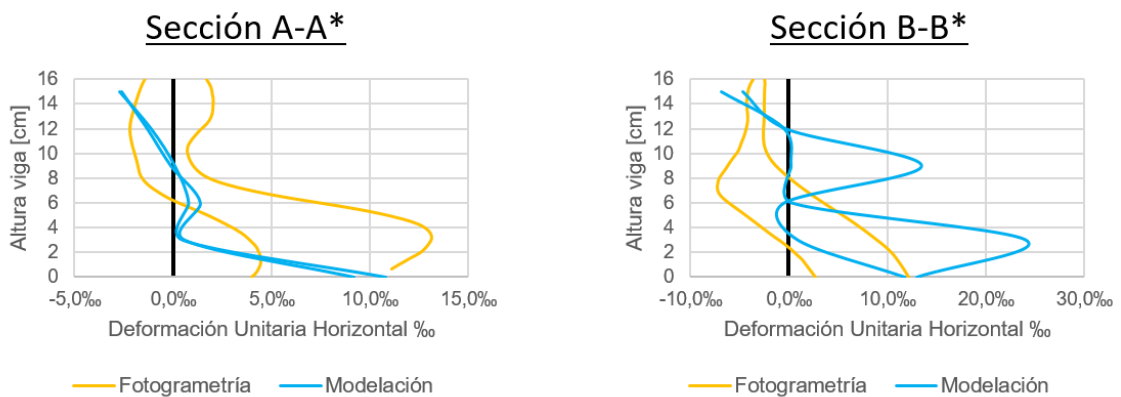
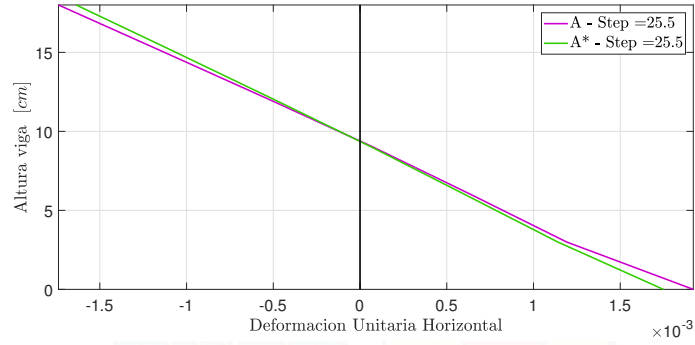


Figura 5.34: Comparación para el caso 2 en la viga 1.

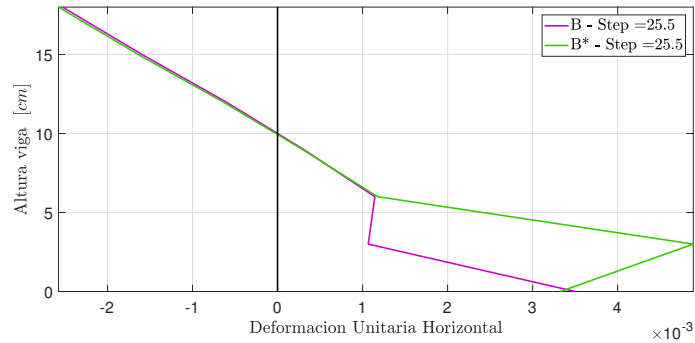
5.5.4.2. Viga 2

Las DUH evaluadas en las secciones para el final del tramo lineal, son mostradas en la *Figura 5.35*. A partir de la figura es posible observar que la *Sección A - A** aún permanecen en el rango lineal y mantienen las características de caras planas permanecen planas. Sin embargo, la *Sección B - B** muestra distorsiones que evidencian claramente los efectos del rango no lineal.

Por lo mismo, en términos comparativos la *Sección B - B** se encuentra más cercana al punto de aplicación de la carga, por lo tanto, se cumple la lógica que las DUH son mayores que en la *Sección A - A**.



(a) Modelo de la viga 2 sección A - A*.

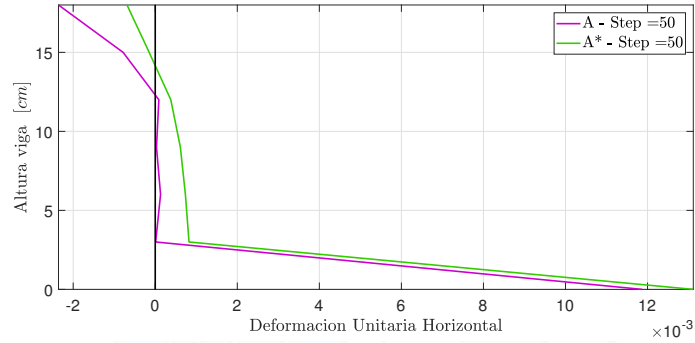


(b) Modelo de la viga 2 sección B - B*.

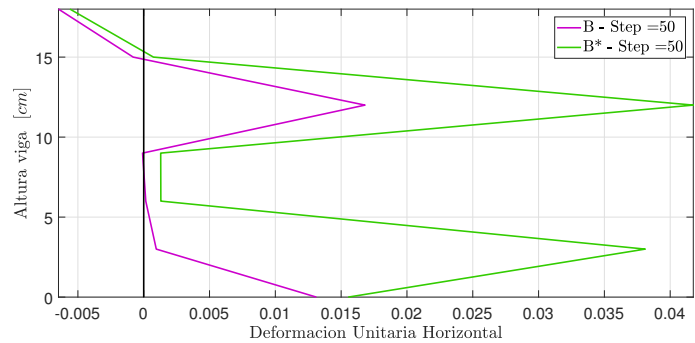
Figura 5.35: Perfiles de DUH al final del tramo lineal del modelo.

La *Figura 5.36* muestra las DUH en las mismas secciones de la modelación y para un estado tensional directamente dentro del tramo no lineal. A partir de la figura, es posible observar que los efectos de la misma no linealidad, influye en toda la curva y tanto para las fibras en tracción como en compresión.

Un aspecto a considerar, consiste en que para el nivel de esfuerzos que corresponden a la *Figura 5.36*, existe una gran cantidad de Links que se ha excedido su capacidad y claramente esto indica el desarrollo de grietas.



(a) Modelo de la viga 2 sección A - A*.



(b) Modelo de la viga 2 sección B - B*.

Figura 5.36: Perfiles de DUH en el tramo no lineal del modelo.

Por otro lado, también es de interés comparar las DUH que entrega la modelación con los resultados experimentales. Para lo cual, se escoge estudiar las *Secciones A - A** y *Secciones B - B**, siendo estas equivalentes tanto en la modelación, como en los resultados de la fotogrametría (para mayor detalle revisar el *Apéndice F*). De igual forma, la *Figura 5.37* es preparada para indicar en las curvas de capacidad, a qué estado tensional corresponden los casos a estudiar las DUH.

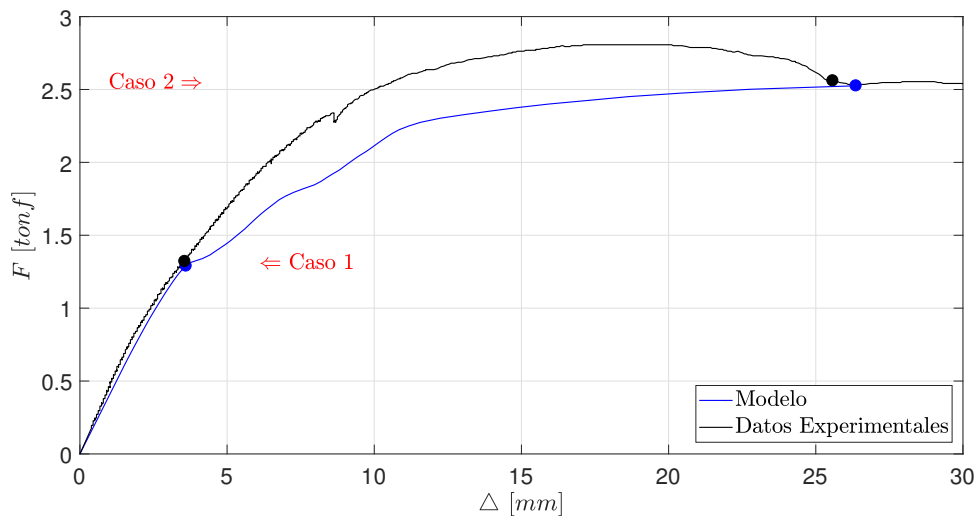


Figura 5.37: Reseña para indicar los puntos a examinar las DUH en la viga 2.

Tabla 5.6: Descripción de los casos 1 y 2 para evaluar las DUH en la viga 2.

	Caso 1		
	Fuerza [tonf]	Deformación [mm]	Descripción
Fotogrametría	1,33	4	Fotografía 19
Modelación	1,29	4	Step 52
	Caso 2		
	Fuerza [tonf]	Deformación [mm]	Descripción
Fotogrametría	2,56	26	Fotografía 29
Modelación	2,53	26	Step 101

De esta forma, en las figuras *Figuras 5.38* y *5.39* se muestran los resultados de la comparación en términos de las DUH obtenidas tanto en la fotogrametría, como en la modelación.

Al observar las figuras, la correlación entre las curvas obtenidas de la fotogrametría y la modelación, es escasa, al igual que en la viga 1. Posiblemente la razón se deba a que los planos en que se evalúan las DUH, pasan justo a través de las grietas ya que

las mediciones muestran muchas distorsiones.

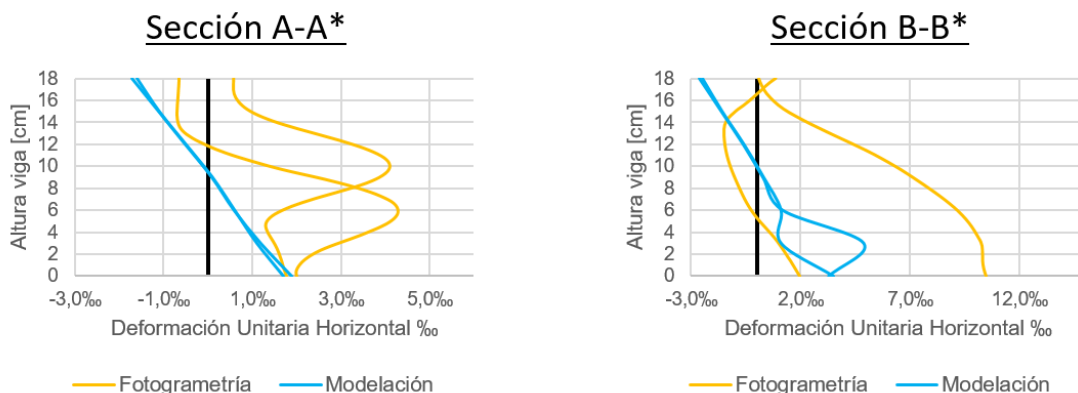


Figura 5.38: Comparación para el caso 1 en la viga 2.

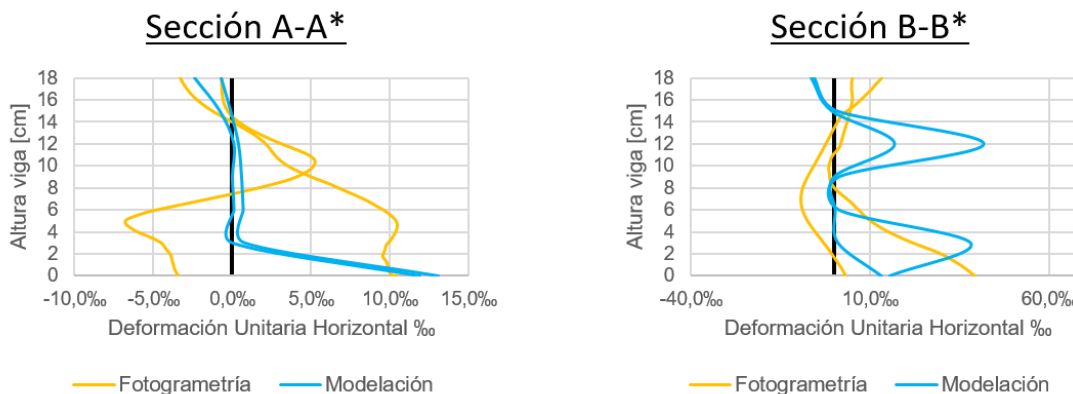


Figura 5.39: Comparación para el caso 2 en la viga 2.

6 | Conclusiones y comentarios

En este trabajo se han evaluado modelos con distinto enfoque para representar el comportamiento del hormigón en tracción y en términos numéricos, con resultados similares. Sin embargo, el modelo que considera una pérdida de resistencia abrupta, requiere mayor tiempo de procesamiento, que el modelo definido mediante una reducción lineal de la resistencia en tracción.

Los resultados de la modelación computacional indican que sólo es posible homologar la respuesta experimental en términos globales. En particular, con respecto a la curva carga/deflexión en la mitad de la luz y al modo de falla observado. Por otro lado, el desarrollo de grietas es un fenómeno complejo que escapa del tipo de modelación con que se realizó este trabajo.

6.1. Comentarios Finales

En base al trabajo presentado en esta memoria, se han cumplido satisfactoriamente todos los objetivos de este trabajo. En particular, se prepararon los ensayos experimentales y con información empírica, se confeccionaron y calibraron modelos numérico computacional de los especímenes. Posteriormente fue posible realizar comparaciones tanto a nivel global como local.

Como se ha mencionado, se han obtenido resultados aceptables mediante la comparación de resultados a nivel global. No así con comparaciones de deformaciones unitarias. Desde luego existen varios factores que influyen en las diferencias obtenidas entre la información empírica y los modelos. A continuación estos son descritos:

- Problemas con los moldajes han repercutido en que los especímenes posean

imperfecciones y no sean perfectamente rectos. En consiguiente, la carga durante los ensayos se aplica de manera excéntrica, produciendo mayores concentraciones de esfuerzos en un lado de las vigas que en el otro. Pese a los intentos por mitigar este hallazgo, no fue posible anular este efecto.

- Adicionalmente hubo problemas con la disponibilidad de materiales, particularmente no fue suficiente la cantidad de áridos para la mezcla de hormigón. De esta manera y por un tema de disponibilidad de tiempo, no fue posible fabricar nuevamente los especímenes con que se trabajó en este estudio.
- En los resultados de la correlación de imágenes digitales existen leves diferencias en lo registrado por la cámara A y B, esto se debe a que no se cumplió perfectamente el supuesto de simetría y que los planos de observación fueran representativos de cualquier plano longitudinal-vertical en la viga.
- La teoría desarrollada en el marco teórico para definir las propiedades geométricas de los elementos uniaxiales, se basa en el supuesto de pequeñas deformaciones. Esto no aplica fielmente para los resultados que provienen del rango no lineal en los modelos.

También existieron problemas de convergencia al desarrollar la modelación computacional en el software comercial *SAP2000* ([Computer and Structures, Inc \(2018\)](#)). Puesto que al utilizar una curva constitutiva para un hormigón de baja resistencia, el cual fácilmente puede agrietarse, causa una mayor inestabilidad computacional. Las limitaciones del software se alcanzan al computar una solución para el análisis no lineal, con el uso de curvas constitutivas que contienen cambios abruptos en la resistencia y cambios repentinos en la pendiente de la rigidez.

Los trabajos futuros para continuar con este estudio, consiste en utilizar otro software más sofisticado, que no posea limitaciones en cuánto a cómo se definen las curvas constitutivas de los materiales. Incluso desarrollar modelos más robustos, por ejemplo, mediante modelos de fibra o elementos sólidos, puesto que inicialmente se habían desechado en el software *SAP2000* ([Computer and Structures, Inc \(2018\)](#)) por problemas de convergencia en otro tipo de modelaciones.

Bibliografía

- American Concrete Institute ACI (2008). Building code requirements for structural concrete (aci 318-08) and commentary. *Farmington Hills, Michigan, USA*. [3.2.1](#)
- Bentz Evan y Collins Michael (2001). *Response-2000*. Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario Canada. [1.1](#), [2.1.2](#)
- Blaber J., Adair B. y Antoniou A. (2015). Ncorr: open-source 2d digital image correlation matlab software. *Experimental Mechanics*, 55(6), 1105–1122. [3.3](#), [4.3.1](#), [4.5](#)
- Coleman J. y Spacone Enrico (2001). Localization Issues in Force-Based Frame Elements. *Journal of Structural Engineering*, 127(11), 1257–1265. [2.1.2](#)
- Computer and Structures, Inc (2018). SAP2000 Advanced, Structural Analysis Program. *20.2.1*. [1.1](#), [5](#), [6.1](#)
- Dassault Systèmes (2018). *ABAQUS*. Obtenido desde <https://www.3ds.com/>. [1.1](#), [2.1.2](#)
- Hognestad Eivind (1951). *Study of combined bending and axial load in reinforced concrete members*. University of Illinois. Engineering Experiment Station. Bulletin ; no. 399. University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station. ([document](#)), [3.2.1](#), [3.6](#)
- Inzunza Ernesto y Massone Leonardo (2014). Uso de fotogrametría en elementos de hormigón armado. [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile]. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/130400>. ([document](#)), [1.1](#), [2.2](#), [2.8](#), [2.9](#), [3.3](#)
- Kent Dudley (1969). Inelastic behaviour of reinforced concrete members with cyclic loading. *Doctoral dissertation, University of Canterbury*. ([document](#)), [3.2.2](#), [3.8](#)
- Manríquez Ignacio y Massone Leonardo (2016). Ensayo de muros bandera de hormigón armado con carga lateral cíclica medido por fotogrametría y comparado con modelo puntal-tensor. [Tesis de Maestría, Universidad de Chile]. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/142549>. ([document](#)), [2.1](#), [2.2](#), [2.3](#), [3.3](#), [4.5](#), [C](#)

- McKenna F., Fenves L. y Scott M. (2000). *OpenSees: Open System for Earthquake Engineering Simulation*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. [2.1.1](#)
- Moharrami Mohammadreza, Koutromanos Ioannis y Panagiotou Marios (2015). Nonlinear Truss Modeling Method for the Analysis of Shear Failures in Reinforced Concrete and Masonry Structures. *In Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures 2015*. ([document](#)), [2.1.1](#), [2.4](#), [2.5](#), [2.6](#), [3](#), [3.1.1](#), [5](#)
- Mohd-Yassin, Mohd-Hisham y Filippou Filip (1994). Nonlinear analysis of prestressed concrete structures. *In Structures Congress XII. ASCE*, (pp. 1421–1426). [3.2.1](#)
- Norero Felipe y Sepúlveda Claudio (2018). Modelamiento tridimensional de muros de hormigón armado a través de elementos uniaxiales no lineales. [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/43486>. [3](#), [3.1.2](#), [5](#)
- Popov E. y Balan T. (1990). *Engineering mechanics of solids*, volume 2. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. [3.3.1](#)
- Sepúlveda Claudio y Leiva Gilberto (2016). Análisis de la respuesta del edificio "toledo" de viña del mar durante el terremoto de Chile 2010. [Tesis de Maestría, Universidad Técnica Federico Santa María]. <https://repositorio-usm-cl.usm.idm.oclc.org/handle/11673/12747>. [2](#)
- Sony Sandeep, Laventure Shea y Sadhu Ayan (2019). A Literature Review of Next-Generation Smart Sensing Technology in Structural Health Monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*. [2.2](#)
- Tambusay Asdam, Suryanto Benny y Suprobo Priyo (2018). Visualization of Shear Cracks in a Reinforced Concrete Beam using the Digital Image Correlation. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology. Vol8 (2018) No. 2*. ([document](#)), [1.1](#), [2.1.2](#), [2.7](#), [4.5](#)
- Taylor Christopher, Cote Paul y Wallace John (1998). Design of Slender Reinforced Concrete Walls with Openings. *ACI Structural Journal, Technical Paper*. ([document](#)), [2.1](#), [2.1](#)
- Zhou Xin, Chu Ming, Liu Jin, Qu Shu y Fan Hai (2012). Progress in Structures, Applied Mechanics and Materials. *Trans Tech Publications Limited*, (pp. 1609). [3.2.1](#)

Anexos



A | Matrices de Rigidez Locales

Considerando la nomenclatura de la *Figura 3.3*, se presenta las matrices de rigidez de cada uno de los elementos referidas a los grados de libertad globales:

- Elemento 1 vinculado al grado de libertad 1:

$$[K]_1 = \left(\frac{EA_o}{a} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

- Elemento 2 vinculado al grado de libertad 3:

$$[K]_2 = \left(\frac{EA_o}{a} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

- Elemento 3 vinculado al grado de libertad 2 y 4:

$$[K]_3 = \left(\frac{EA_o}{a} \right) \begin{bmatrix} 1 & S \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

- Elemento 4 vinculado al grado de libertad 5:

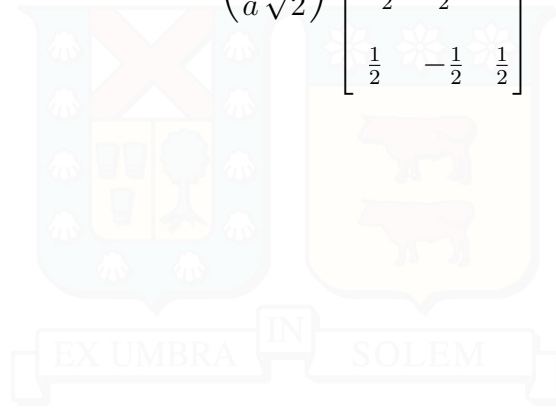
$$[K]_4 = \left(\frac{EA_o}{a} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

- Elemento 5 vinculado al grado de libertad 2 y 3:

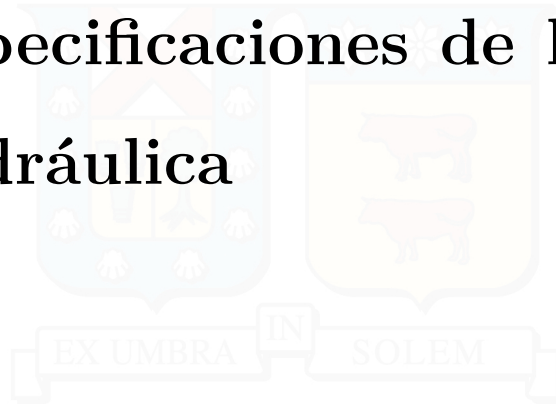
$$[K]_5 = \left(\frac{EA_d}{a\sqrt{2}} \right) \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & S \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

- Elemento 6 vinculado al grado de libertad 1, 4 y 5:

$$[K]_6 = \left(\frac{EA_d}{a\sqrt{2}} \right) \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & & S \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$



B | Especificaciones de la Prensa Hidráulica



11 Technical data

Models

Specifications	70-C807/C	70-C820/C
Max. test load (kN)		
- in tension	600	1000
- in compression	200	2000
Measurement load ranges		Automatic changeover of scale sensitivity
Minimum reading value	0,01 N	0,1 kN
Tensile test		
- max. distance between grips (mm)	750	700
- grip set for rods	2	2
- grip set for plates	1	1
- grip liners (sets)	2	2
- gripping system	hydraulic with remote control	hydraulic with remote control
- max. rod size (mm dia.)	40	40
- max. plate size (mm)	75x30	75x30
Compression test		70-C820/4
- accessory required	70-C807/4	675
- max. distance between platens (mm)	660	
Transverse test		70-C820/2
- accessory required	70-C807/2	
Bending test		70-C820/31
- accessory requires	70-C807/31	0-83
Test speed (mm/min)	0-195	
Crosshead adjustment speed (mm/min)	675	500
Max. piston stroke (mm)	250	610
Mechanical adjustment of vertical clearance (mm)	400	-
Distance between columns (mm)	282	330
Power (watt)	2700	2700
Dimension and approx. weights (lxdxh/kg)		
- testing frame (piston fully out)	707x537x2740/2490	955x635x3960/3350
- servocontrolled power unit	565x540x1350	565x540x1350
Total approx. gross weight	2300 kg	4000 kg
Shipping cubage (m³)	4.5	7

C | Análisis de Sensibilidad

El esquema de iteraciones de la siguiente tabla contempla evaluar distintos casos entorno a los parámetros por defecto del programa (iteración 10) y los valores utilizados en la investigación de [Manríquez y Massone \(2016\)](#) (iteración 34).

Tabla C.1: Casos a evaluar en el análisis de sensibilidad

Iteración	Subset Radius	Subset Spacing	Strain Radius
1	16	2	5
2	16	2	10
3	16	2	15
4	16	11	5
5	16	11	10
6	16	11	15
7	16	20	5
8	16	20	10
9	16	20	15
10	23	2	5
11	23	2	10
12	23	2	15

Iteración	Subset Radius	Subset Spacing	Strain Radius
13	23	11	5
14	23	11	10
15	23	11	15
16	23	20	5
17	23	20	10
18	23	20	15
19	37	2	5
20	37	2	10
21	37	2	15
22	37	11	5
23	37	11	10
24	37	11	15
25	37	20	5
26	37	20	10
27	37	20	15
28	50	2	5
29	50	2	10
30	50	2	15
31	50	11	5
32	50	11	10
33	50	11	15

Iteración	Subset Radius	Subset Spacing	Strain Radius
34	50	20	5
35	50	20	10
36	50	20	15
37	57	2	5
38	57	2	10
39	57	2	15
40	57	11	5
41	57	11	10
42	57	11	15
43	57	20	5
44	57	20	10
45	57	20	15
46	60	12	5
47	60	12	10
48	60	12	15
49	70	14	5
50	70	14	10
51	70	14	15
52	80	16	5
53	80	16	10
54	80	16	15

Iteración	Subset Radius	Subset Spacing	Strain Radius
55	90	18	5
56	90	18	10
57	90	18	15
58	57	11	12
59	57	11	17
60	60	12	12
61	60	12	17
62	80	16	7
63	80	16	12
64	90	18	7
65	90	18	12

Puesto que es necesario escoger criterios para determinar la respuesta definitiva, se realizan las siguientes consideraciones:

- Los resultados serán evaluados en el borde inferior de la mitad de la luz en las vigas (punto de control). La razón consiste en que corresponde a una zona con altas deformaciones y además, por inspección visual, las fotografías no muestran agrietamiento en esa zona.
- El mecanismo de evaluación consiste en generar un gráfico de la deformación vertical en función del número de fotografía. Una vez filtradas las iteraciones aceptables, se realiza el mismo procedimiento para las deformaciones unitarias en dirección horizontal.
- Una iteración aceptable es definida en términos cualitativos mediante la baja presencia de ruido.

- La influencia del ruido es reconocida como grandes variaciones a lo largo del registro.
- Ante una convergencia en las iteraciones, los parámetros de la solución definitiva corresponden a los que presenten bajos niveles de ruido y con los menores valores en *Subset Radius* y *Strain Radius*.
- Los parámetros que no influyen en la variabilidad de la solución, son fijados a los valores por defecto del programa. En efecto, para todos los casos se ha utilizado como máximo 50 iteraciones y la norma de la solución es fijada en 10^{-6} .

La *Figura C.1* muestra el desplazamiento del punto de control durante el registro fotográfico:

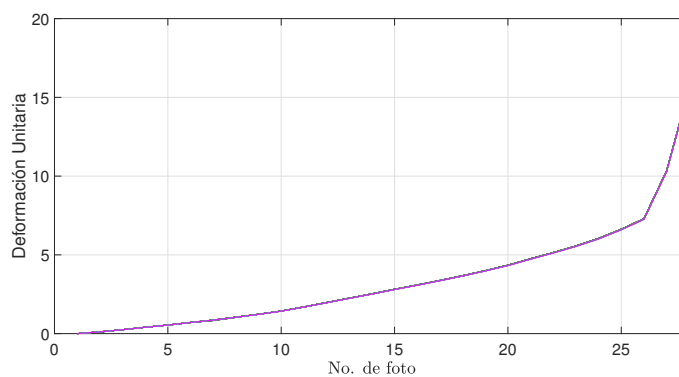


Figura C.1: Iteraciones para determinar la variabilidad en la deformación vertical.

A partir de la figura previa y dado los criterios comentados, es posible extraer el buen comportamiento de las 65 iteraciones. En consiguiente, el siguiente paso es evaluar las deformaciones unitarias horizontales durante el registro fotográfico y del mismo punto de control. Luego, la *Figura C.2* muestra los resultados:

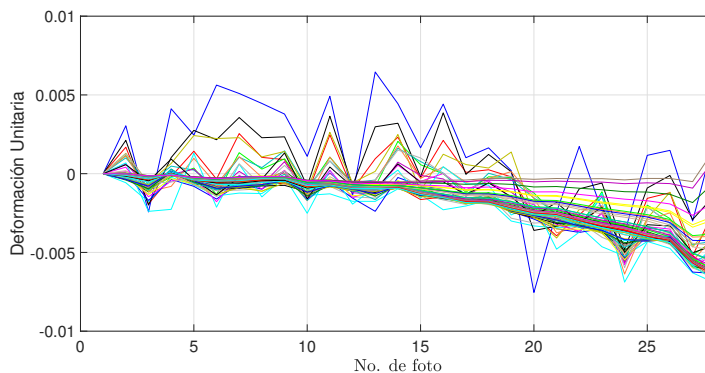


Figura C.2: Iteraciones para determinar la variabilidad en la deformación unitaria horizontal.

En esta oportunidad se logra observar la variabilidad de la solución frente a distintos parámetros. Si bien, las iteraciones realizadas poseen prácticamente nula influencia en las deformaciones de la viga, no es así frente a las deformaciones unitarias.

Por lo tanto, por inspección visual se filtran las soluciones que no cumplen con los criterios establecidos con anterioridad y se escoge como solución definitiva los parámetros de la iteración 56. La *Figura C.3* muestra el comportamiento de las deformaciones unitarias para la solución escogida:

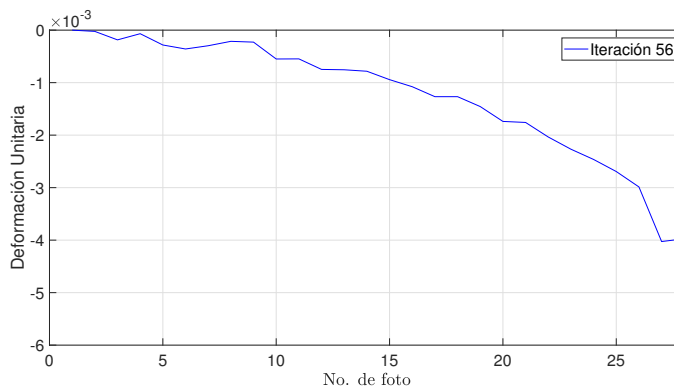


Figura C.3: Deformación unitaria horizontal en el punto de control de la solución escogida.

D | Ajuste de Curvas Experimentales

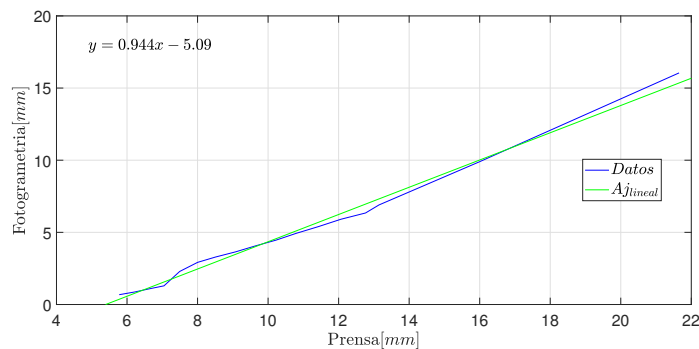
D.1. Ensayo de Carga Deformación

Hasta este punto, la determinación de los parámetros definitivos para el análisis por fotogrametría permite obtener el campo de deformaciones completo de las vigas.

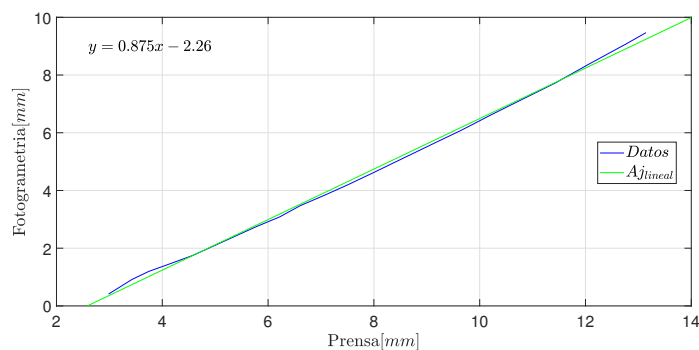
En consiguiente, es posible comparar a nivel de deformaciones, los resultados del ensayo carga-deformación (provenientes de la prensa hidráulica) con lo obtenido mediante el análisis por fotogrametría. Puesto que por lo menos, las curvas de la *Figura ??* deben ser desplazadas al origen.

Así pues, mediante un gráfico de deformaciones a partir de ambas fuentes, se busca la correlación entre las variables y determinar la consistencia entre ambos métodos experimentales. A continuación se muestran los resultados según el tipo de viga y si corresponde a la cámara *A* o *B*:

■ Viga 1 cámara A

**Figura D.1:** Correlación entre las variables para la viga 1 según la cámara A

■ Viga 1 cámara B

**Figura D.2:** Correlación entre las variables para la viga 1 según la cámara B

Promediando los valores de las pendientes, se obtiene que las deformaciones obtenidas de la prensa, deben ajustarse en un factor de 0,91 para coincidir con los resultados del análisis por fotogrametría.

- Viga 2 cámara A

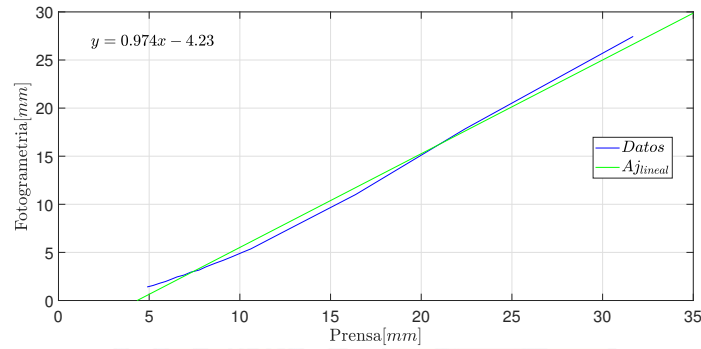


Figura D.3: Correlación entre las variables para la viga 2 según la cámara A

- Viga 2 cámara B

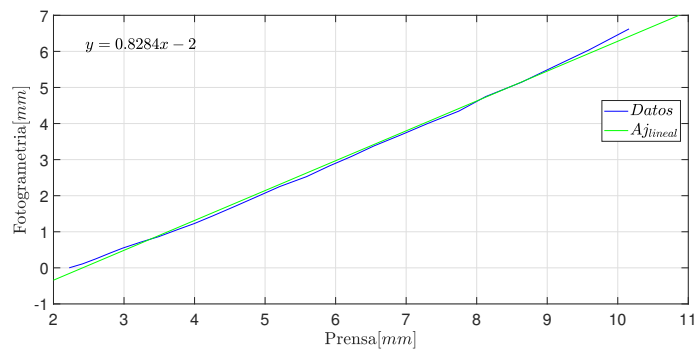


Figura D.4: Correlación entre las variables para la viga 2 según la cámara B

Promediando los valores de las pendientes, se obtiene que las deformaciones obtenidas de la prensa, deben ajustarse en un factor de 0,90 para coincidir con los resultados del análisis por fotogrametría.

El factor de 0,91 obtenido para la viga 1 es utilizado para ajustar correspondientemente la curva del ensayo carga-deformación. De esta forma, la *Figura D.5* muestra una comparación entre las curvas antes y después de ser ajustadas:

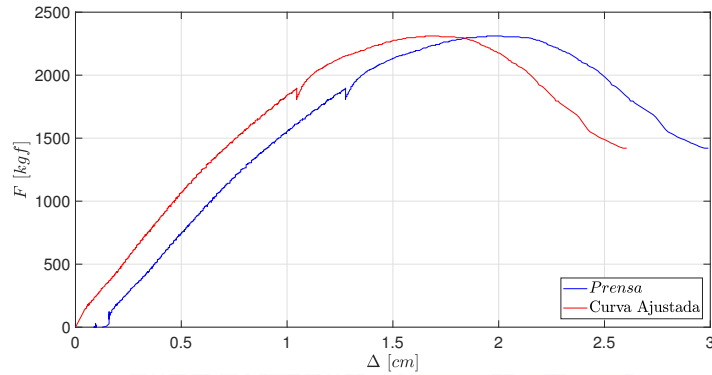


Figura D.5: Ajuste de ensayo carga-deformación en la viga 1

De manera análoga, mediante el factor de 0,9 obtenido para la viga 2, también es posible ajustar correspondientemente la curva carga-deformación:

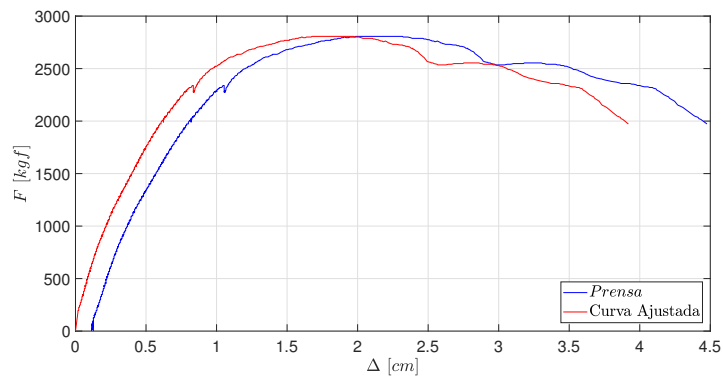


Figura D.6: Ajuste de ensayo carga-deformación en la viga 2

D.2. Curvas de los Materiales

Así como en la sección anterior, se utilizaron factores de corrección para ajustar las curvas del ensayo carga-deformación, en esta sección se utilizan dichos factores para corregir las curvas de comportamiento del hormigón.

En consiguiente, la *Figura D.7* muestra una comparación entre las curvas antes y después de ser ajustadas en el hormigón de la viga 1.

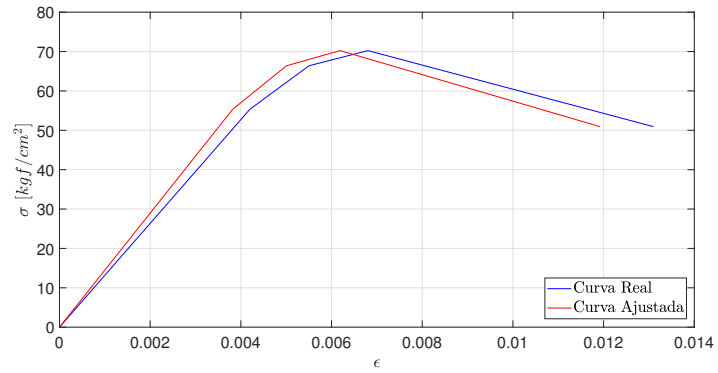


Figura D.7: Ajuste de la curva constitutiva del hormigón en la viga 1.

De manera análoga, para el hormigón utilizado en la viga 2:

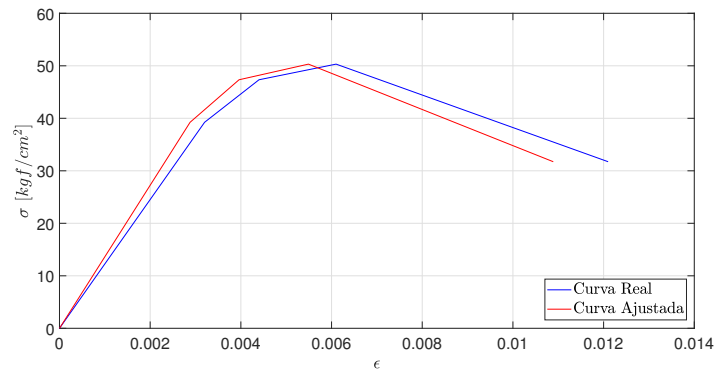
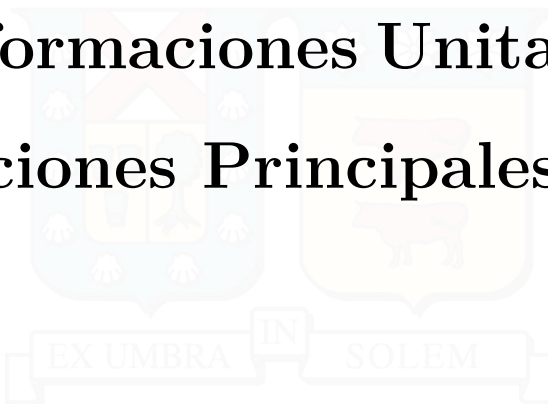


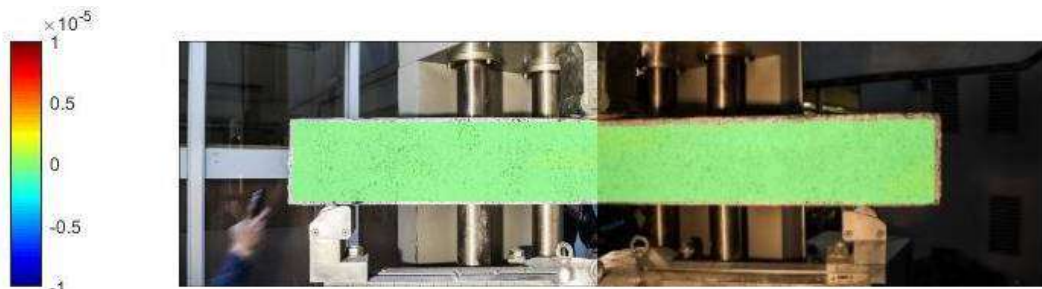
Figura D.8: Ajuste de la curva constitutiva del hormigón en la viga 2.

E | Deformaciones Unitarias en Direcciones Principales

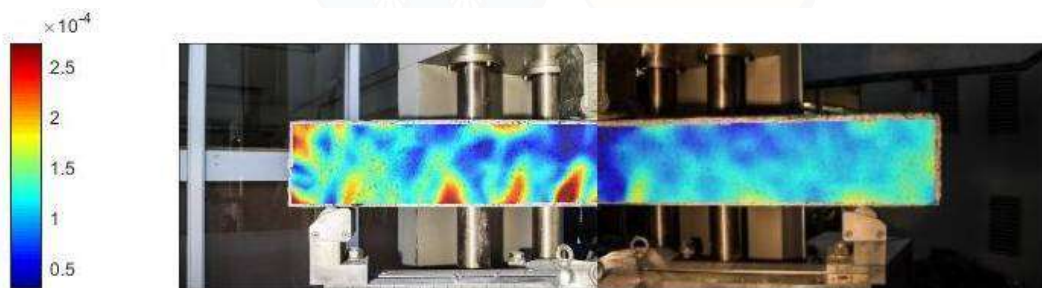
E.1. Viga 1



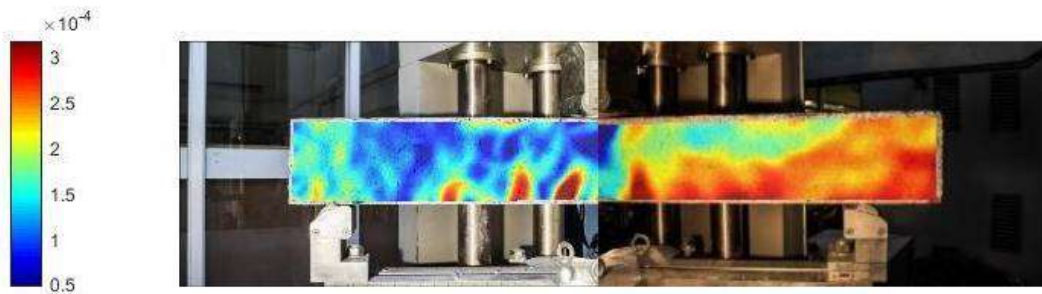
▪ Fotografia 1



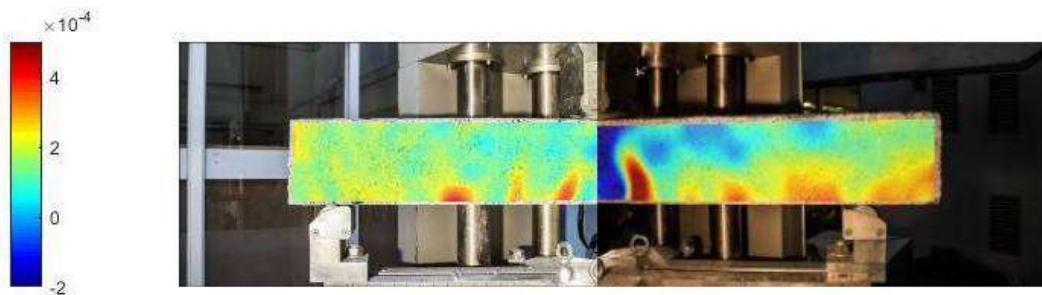
▪ Fotografia 2



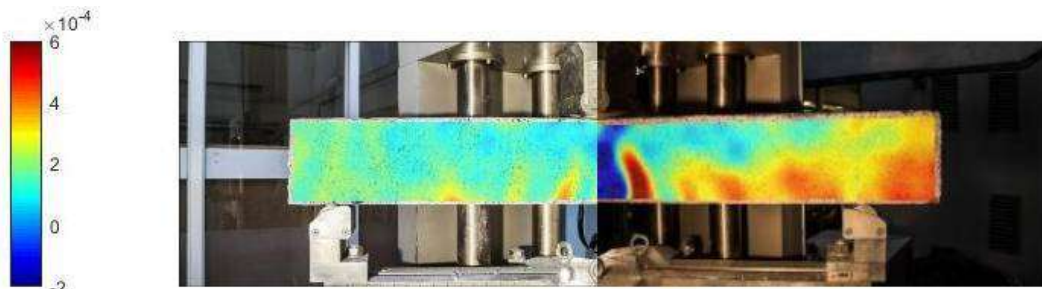
▪ Fotografia 3



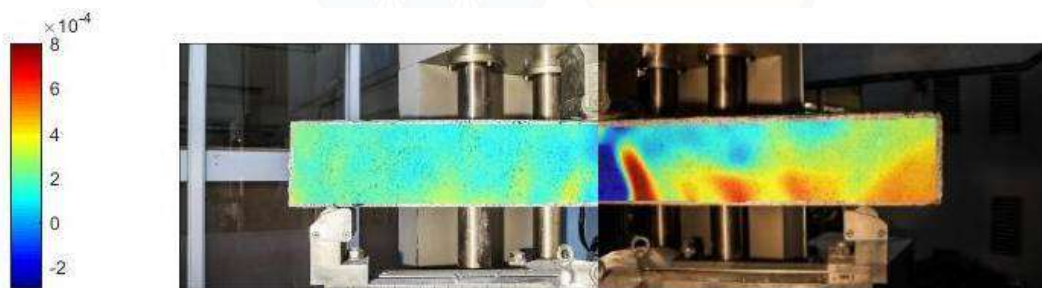
▪ Fotografia 4



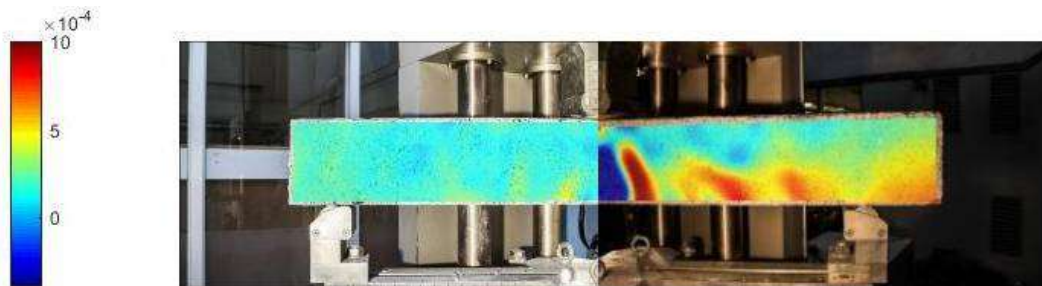
- Fotografía 5



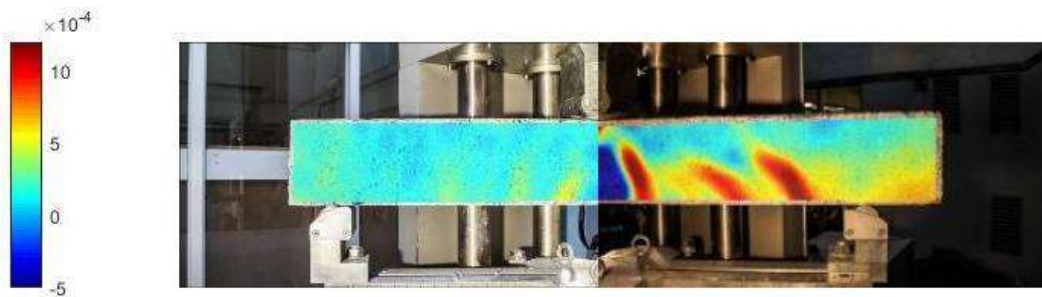
- Fotografía 6



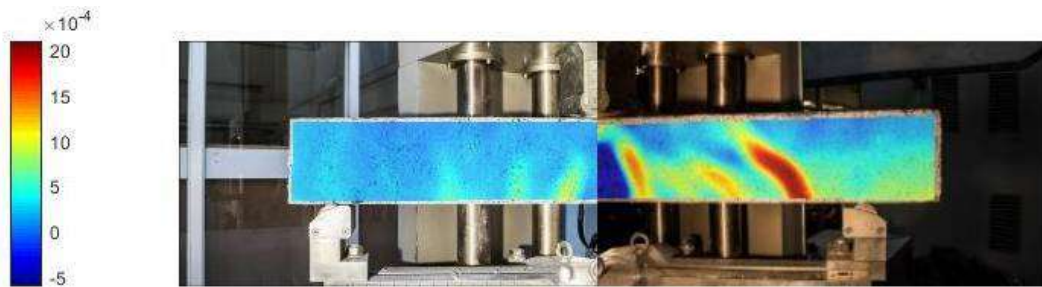
- Fotografía 7



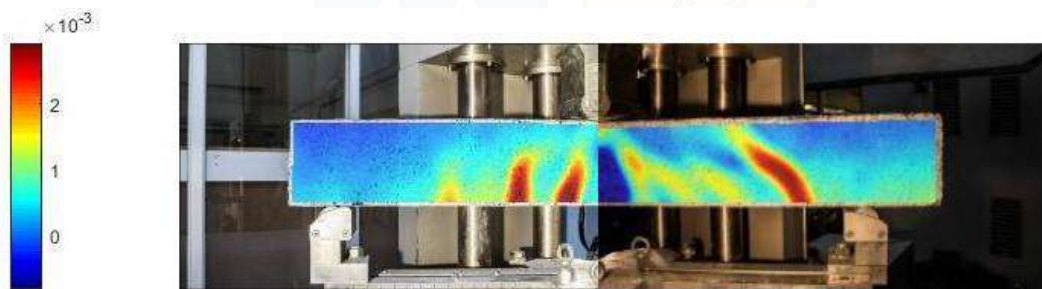
- Fotografía 8



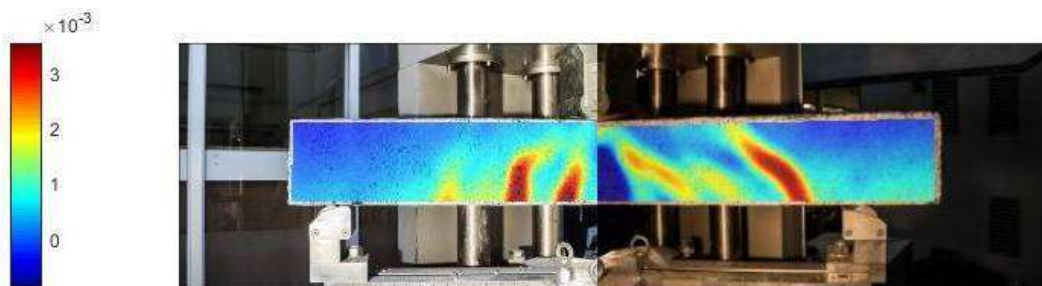
▪ Fotografía 9



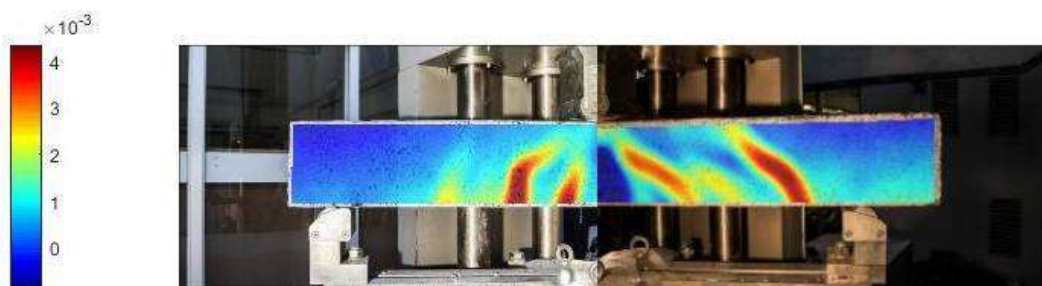
▪ Fotografía 10



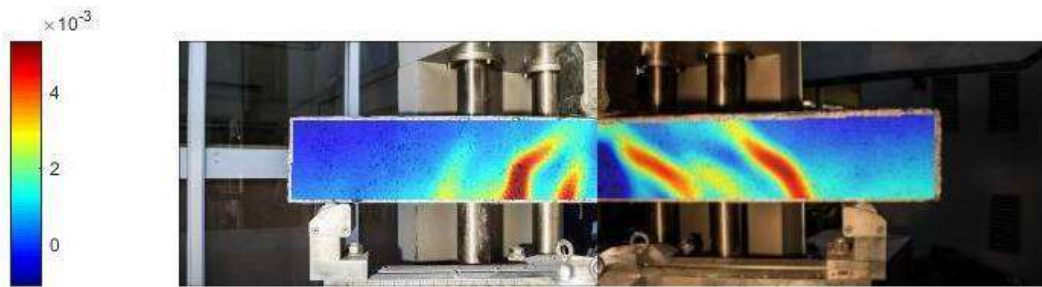
▪ Fotografía 11



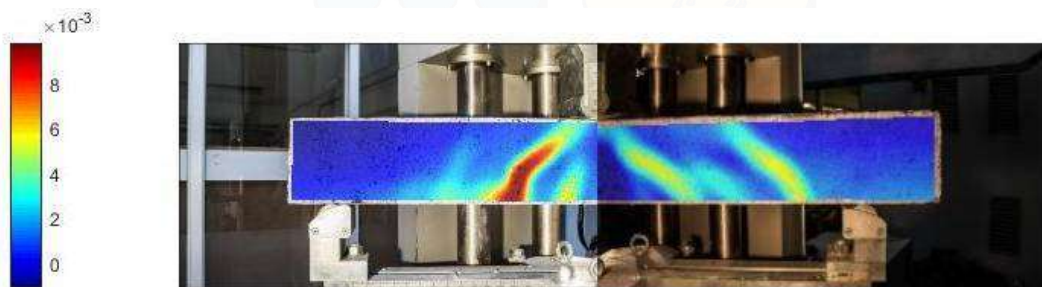
▪ Fotografía 12



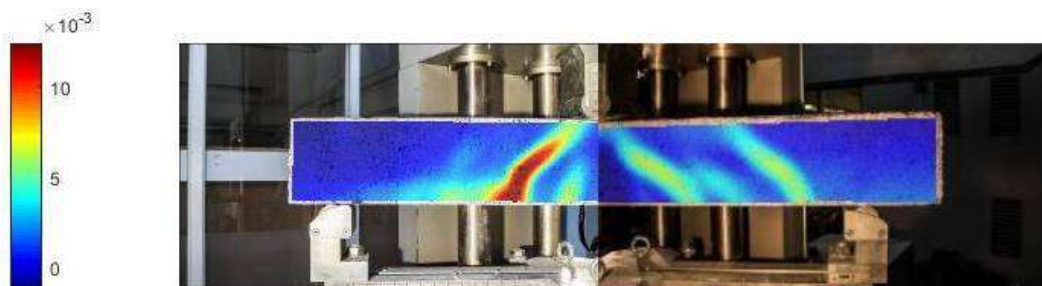
▪ Fotografía 13



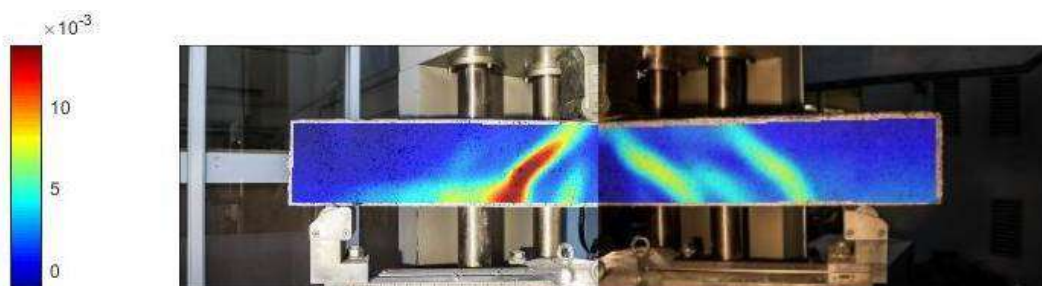
▪ Fotografía 14



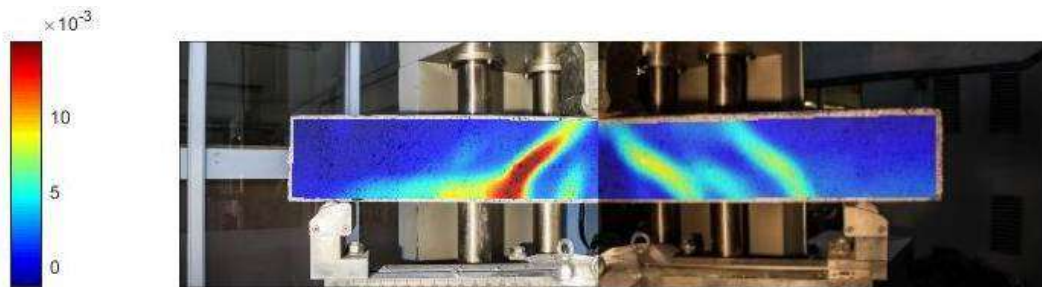
▪ Fotografía 15



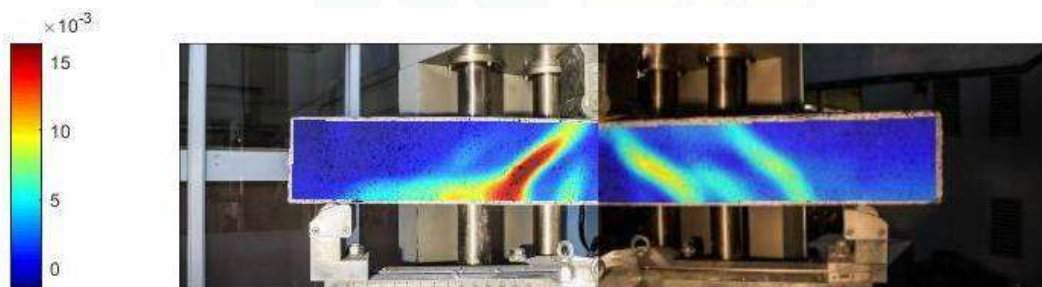
▪ Fotografía 16



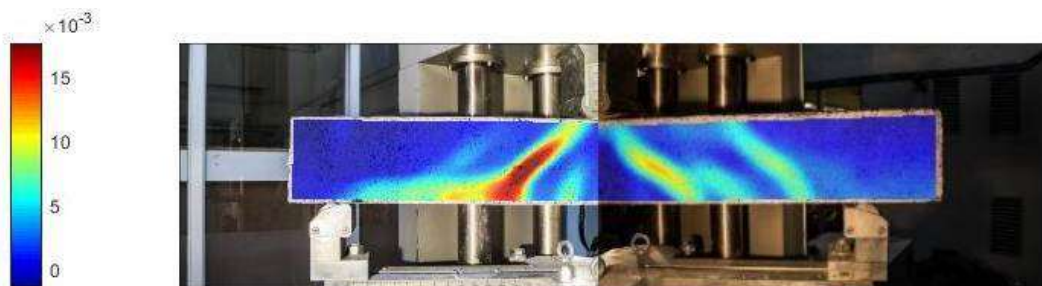
- Fotografía 17



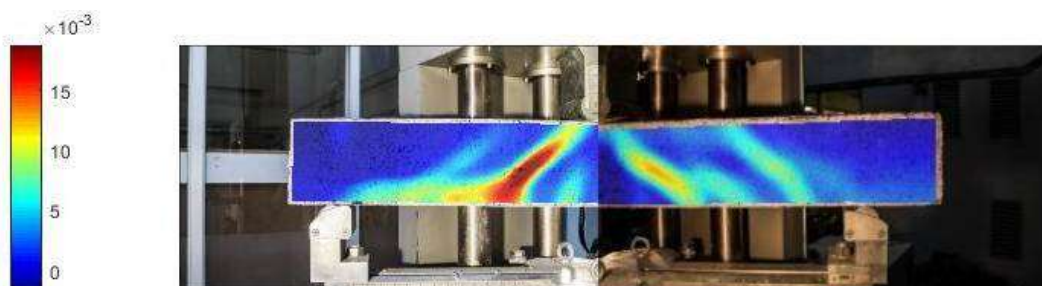
- Fotografía 18



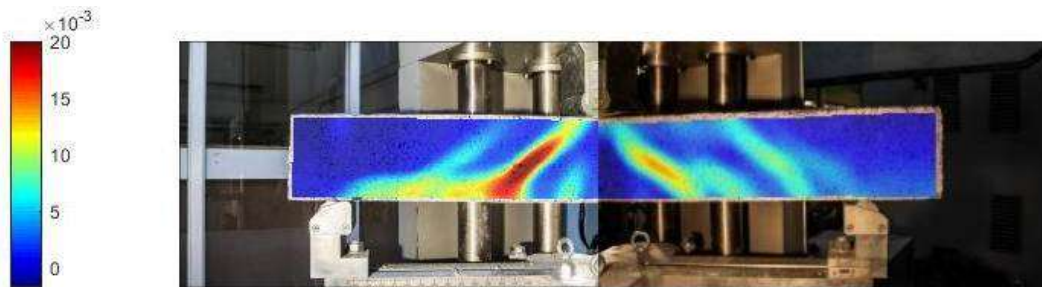
- Fotografía 19



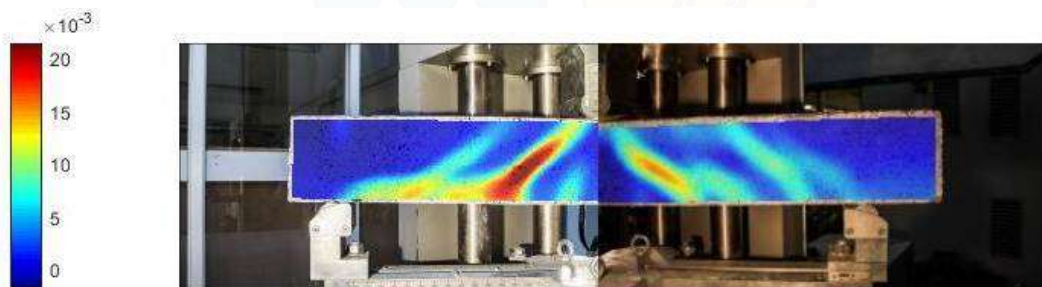
- Fotografía 20



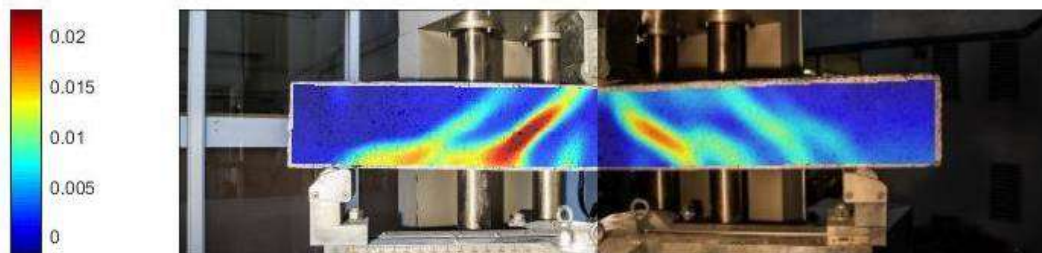
- Fotografía 21



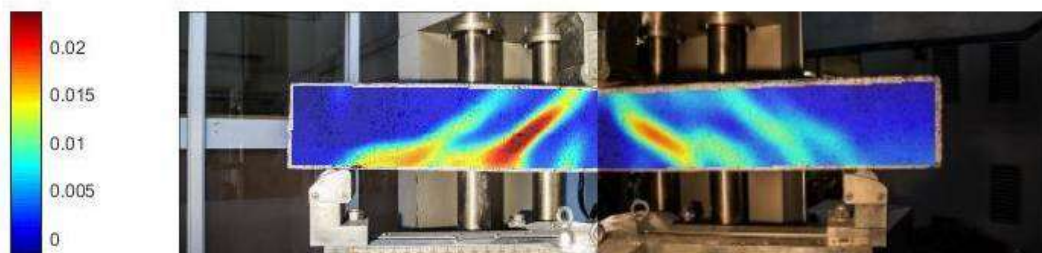
- Fotografía 22



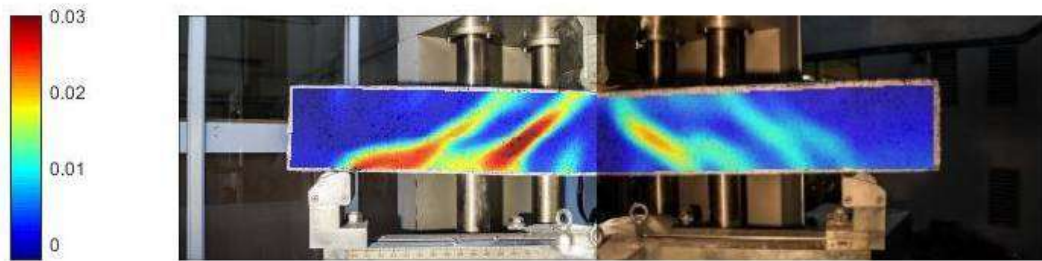
- Fotografía 23



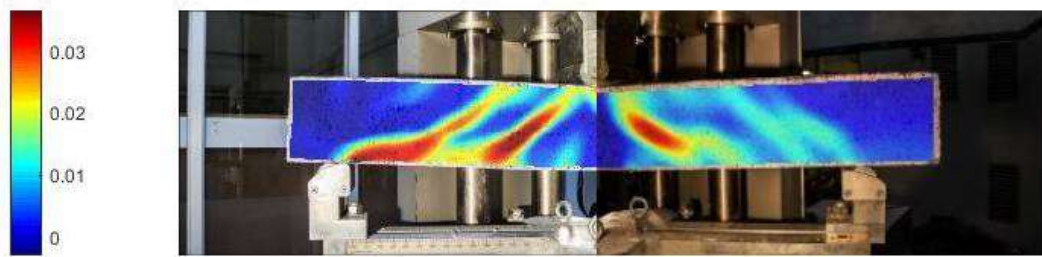
- Fotografía 24



- Fotografía 25



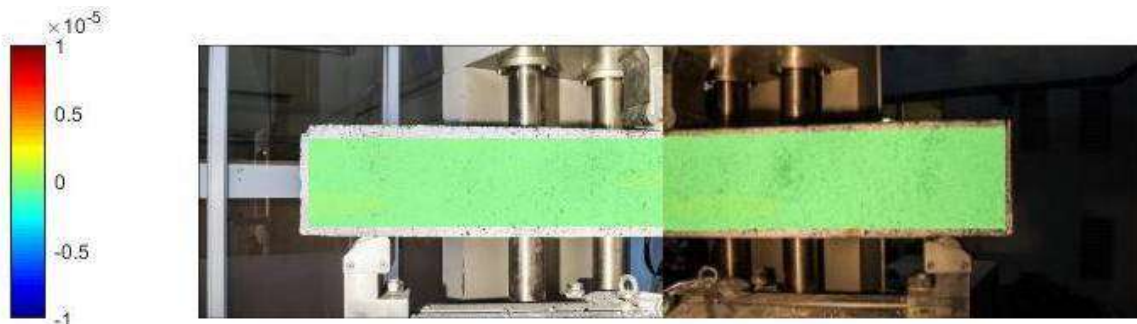
- Fotografía 26



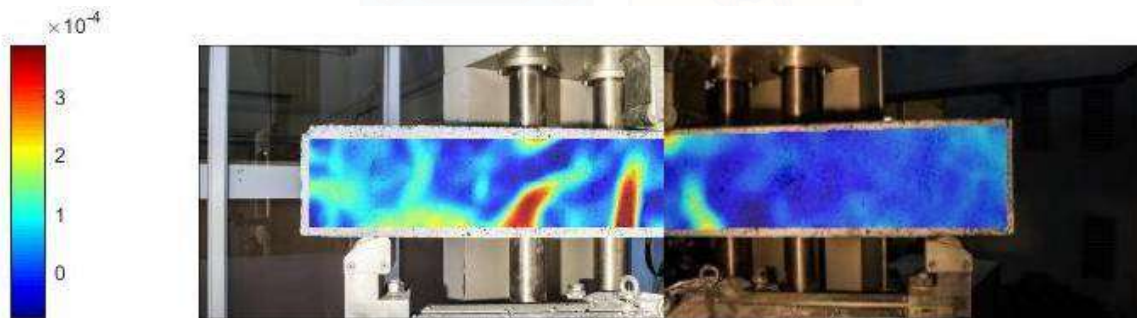
E.2. Viga 2



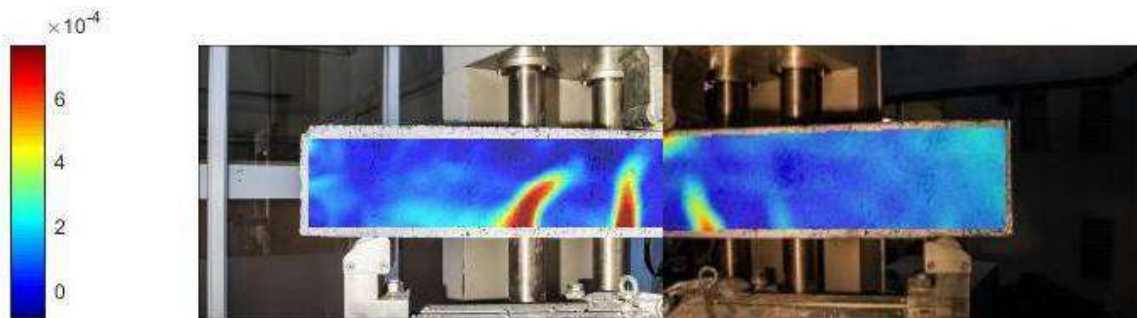
▪ Fotografía 1



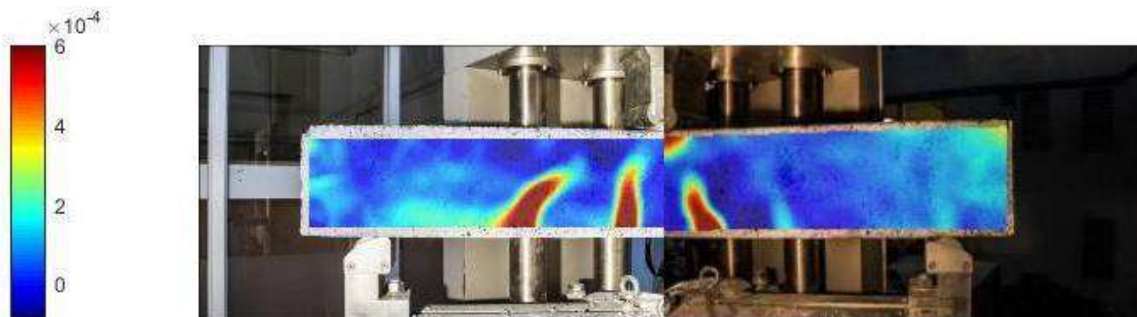
▪ Fotografía 2



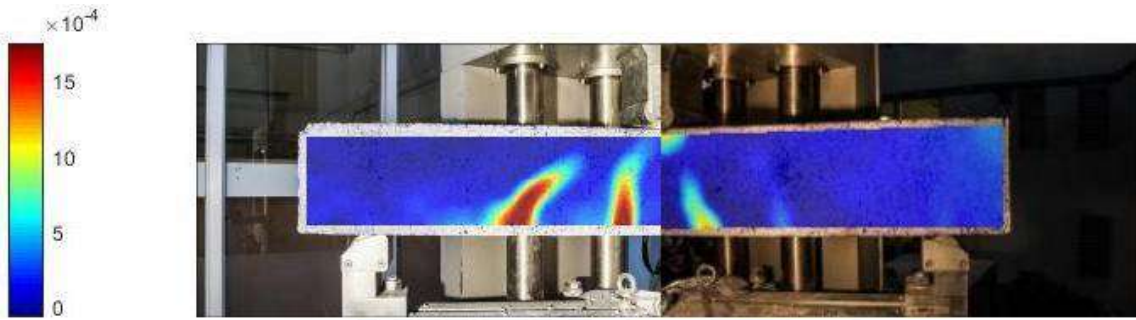
▪ Fotografía 3



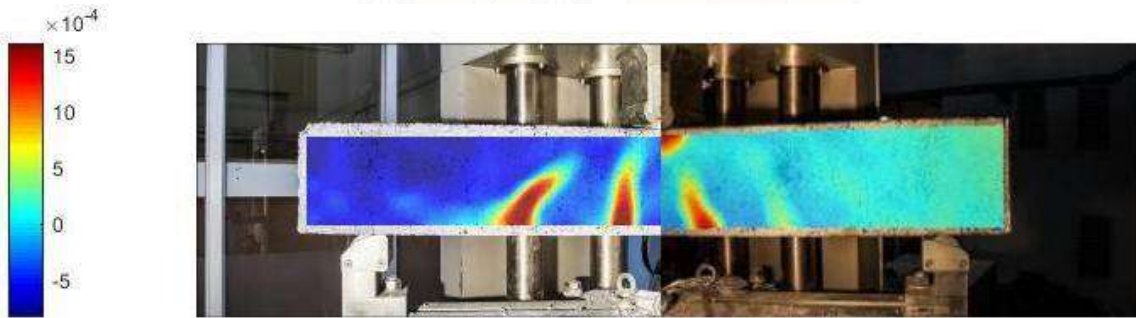
▪ Fotografía 4



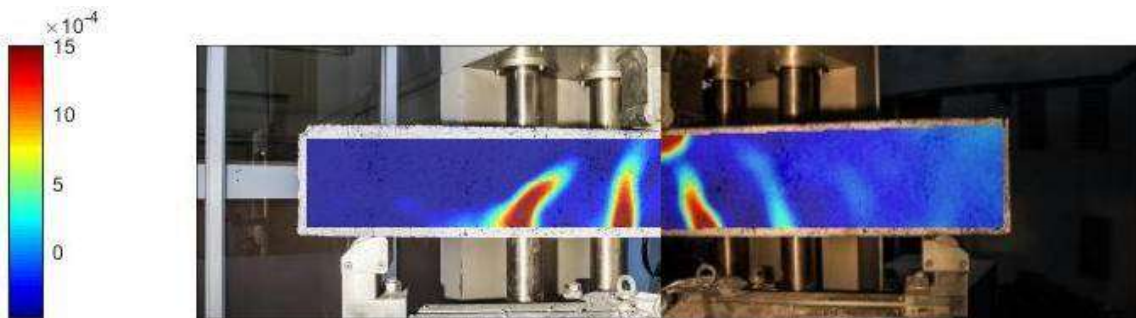
▪ Fotografía 5



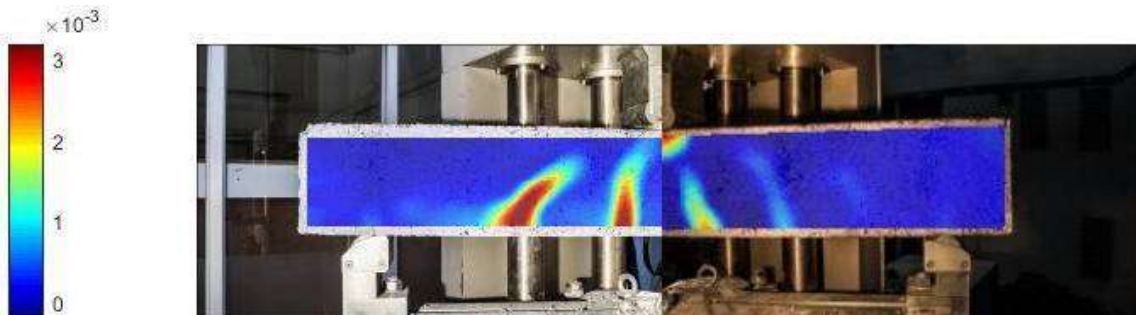
▪ Fotografía 6



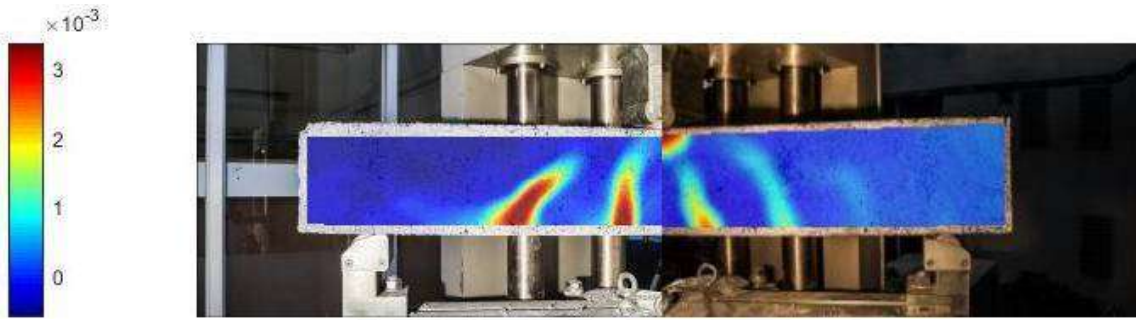
▪ Fotografía 7



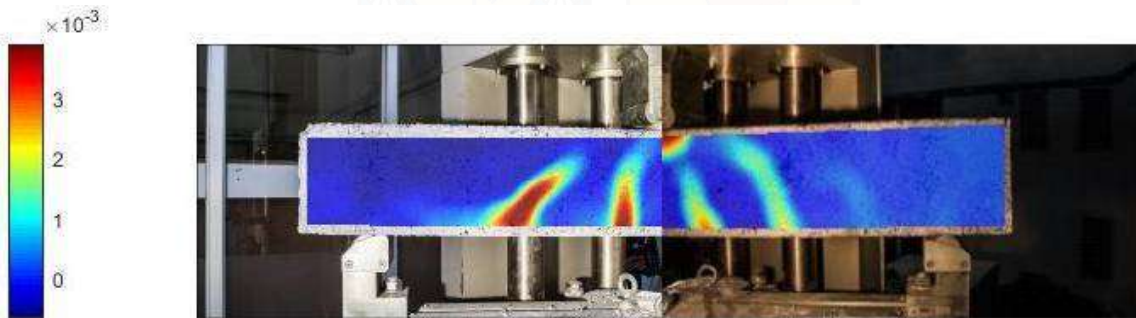
▪ Fotografía 8



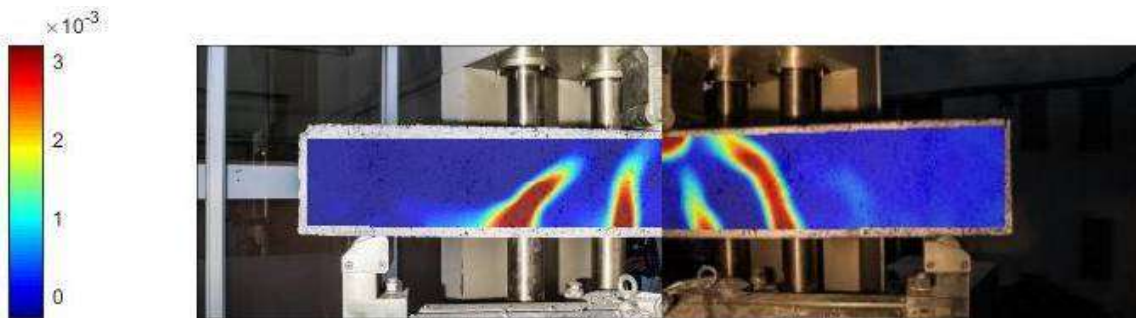
▪ Fotografía 9



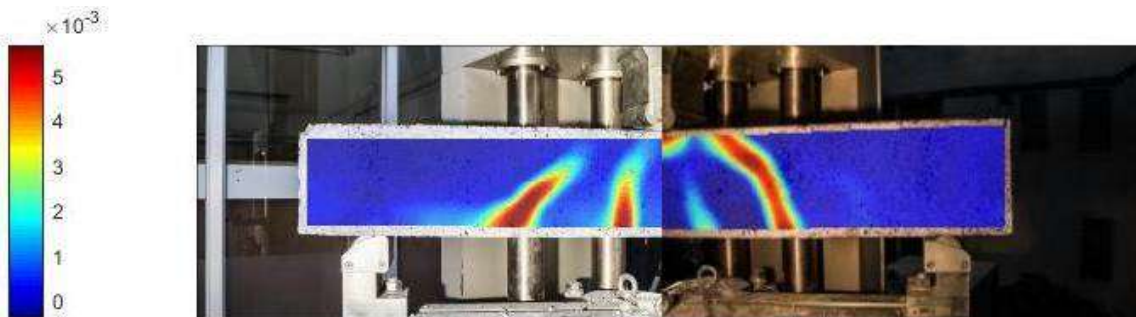
▪ Fotografía 10



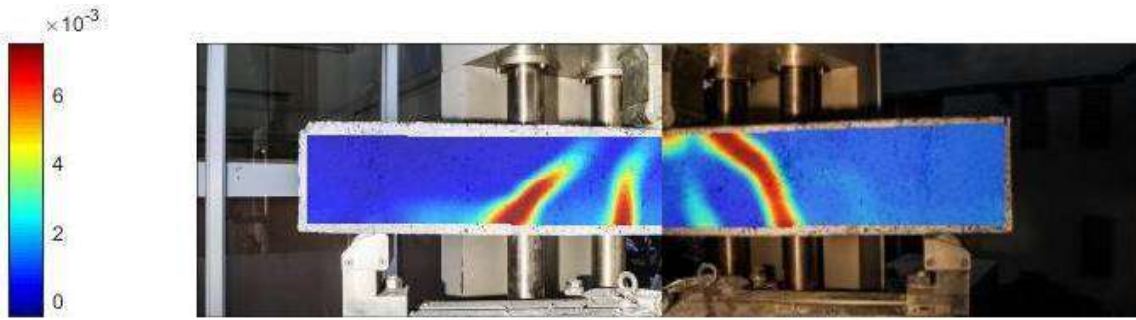
▪ Fotografía 11



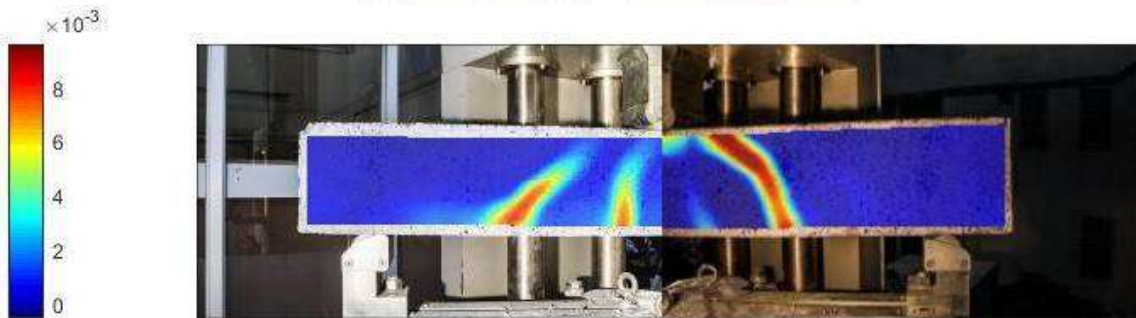
▪ Fotografía 1



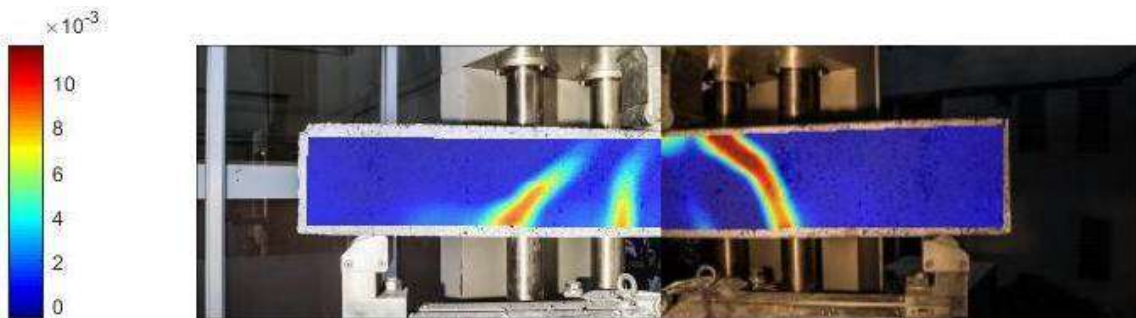
▪ Fotografía 13



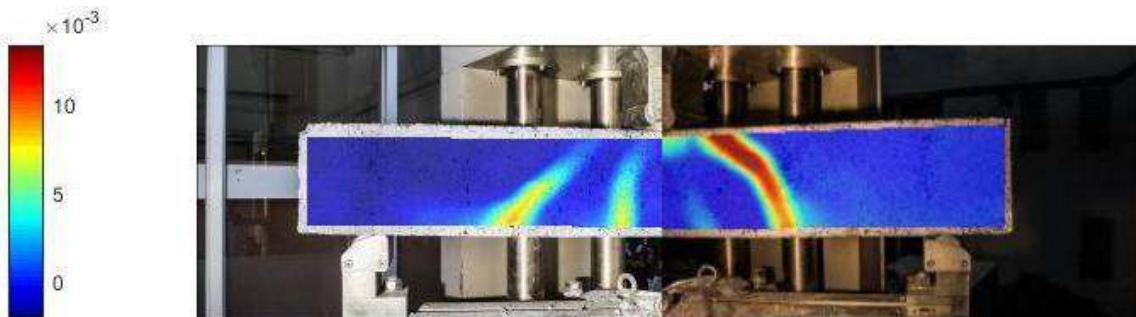
▪ Fotografía 14



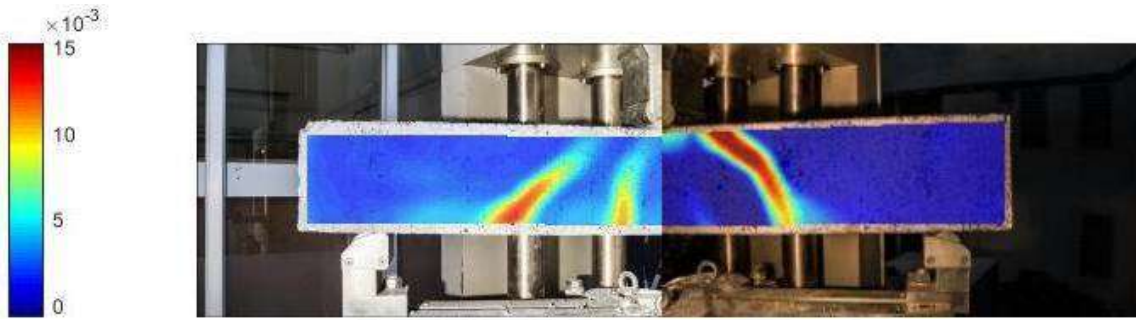
▪ Fotografía 15



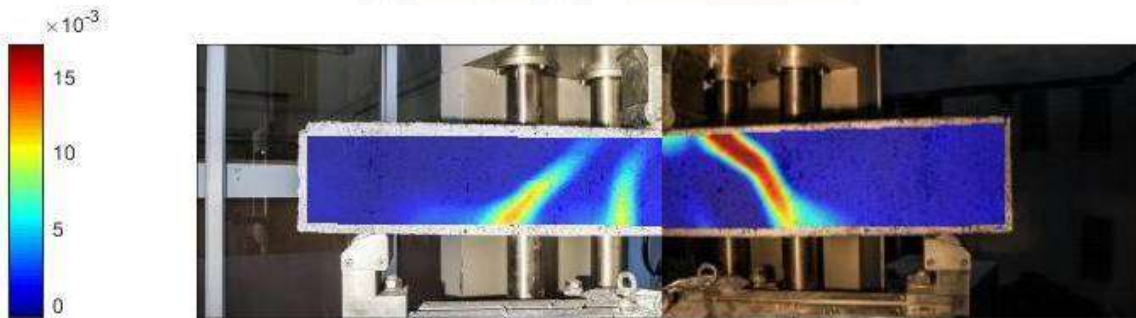
▪ Fotografía 16



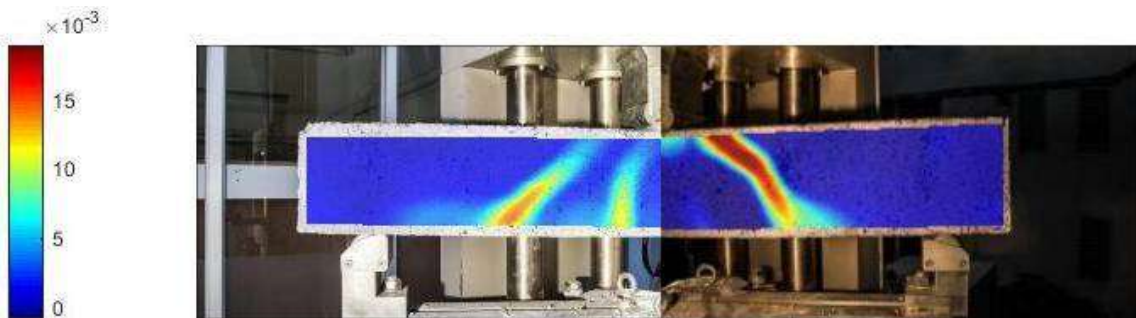
▪ Fotografía 17



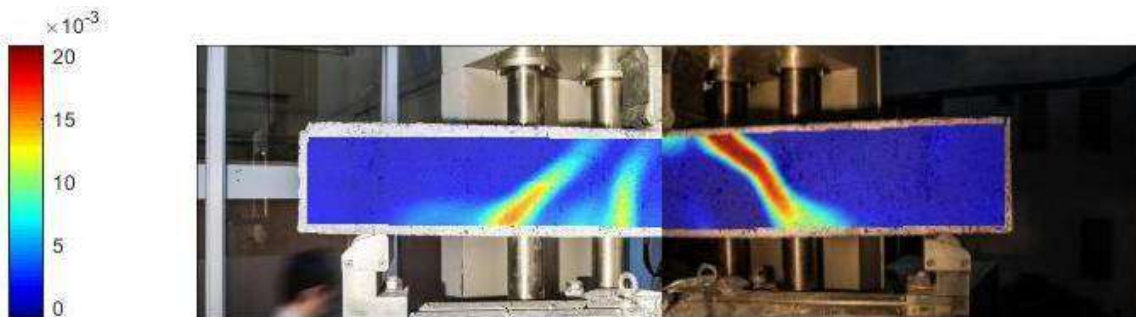
▪ Fotografía 18



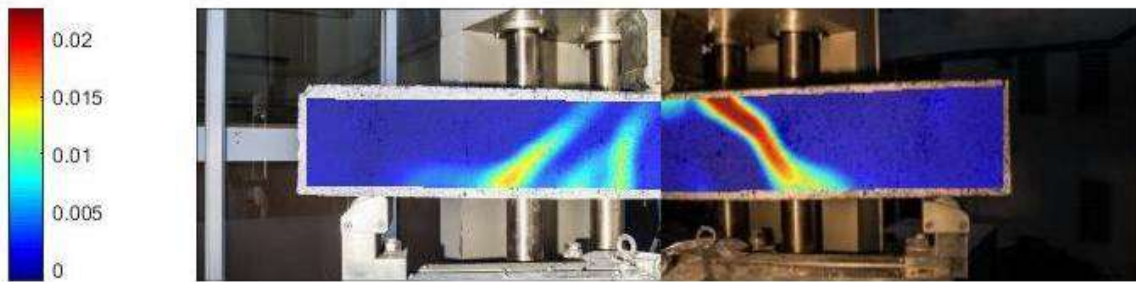
▪ Fotografía 19



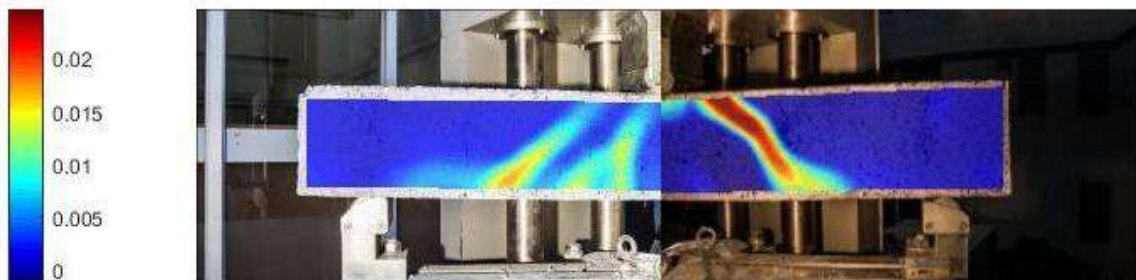
▪ Fotografía 20



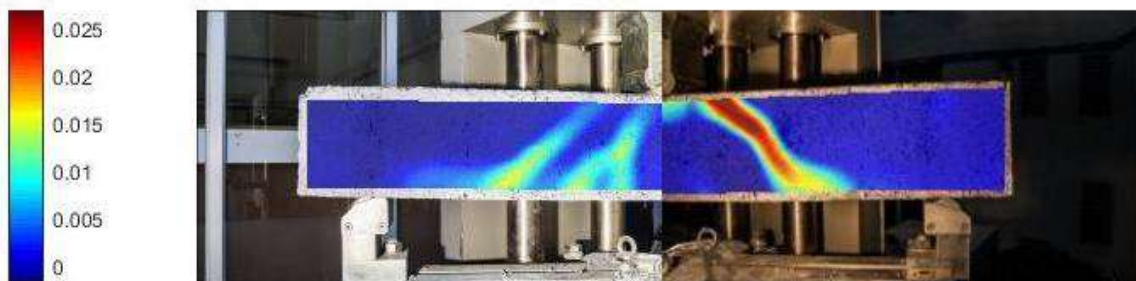
▪ Fotografía 21



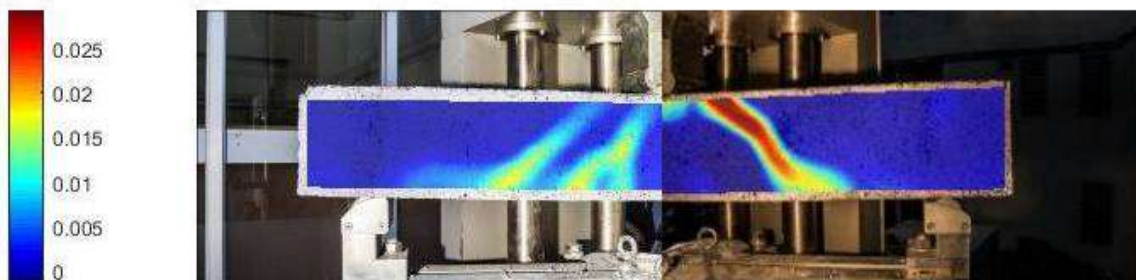
▪ Fotografía 22



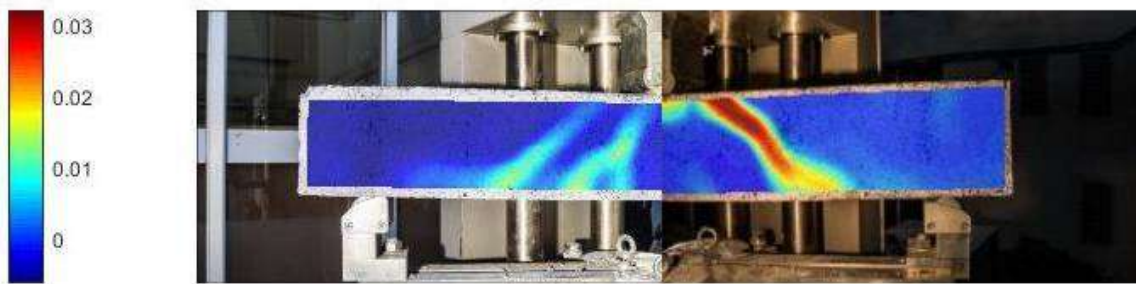
▪ Fotografía 23



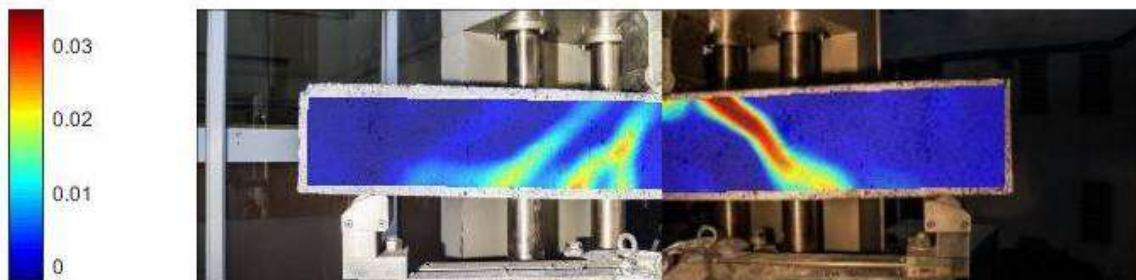
▪ Fotografía 24



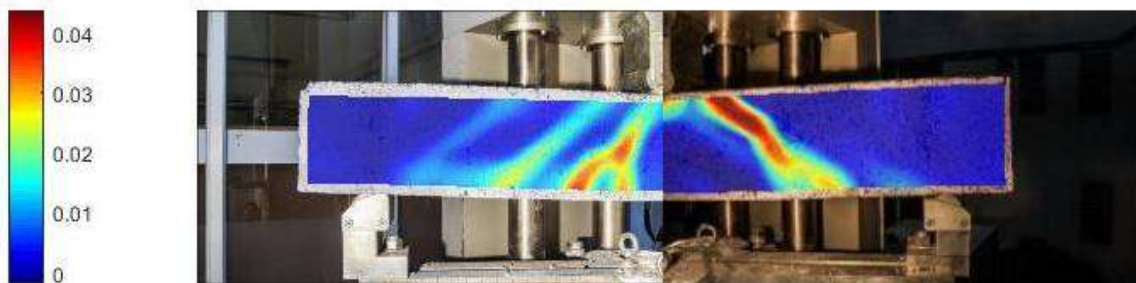
▪ Fotografía 25



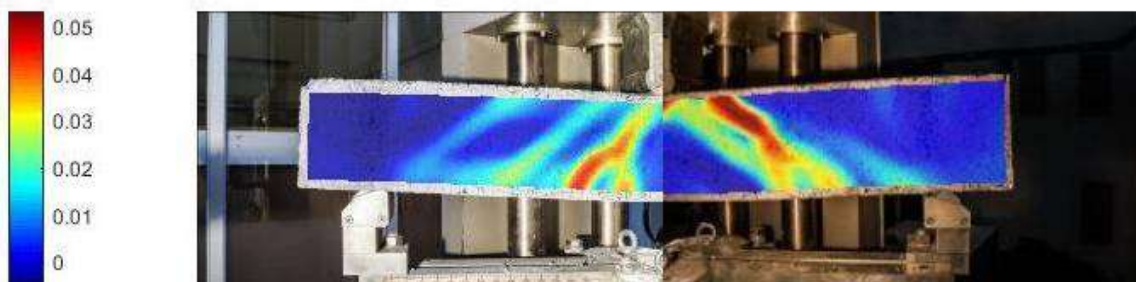
▪ Fotografía 26



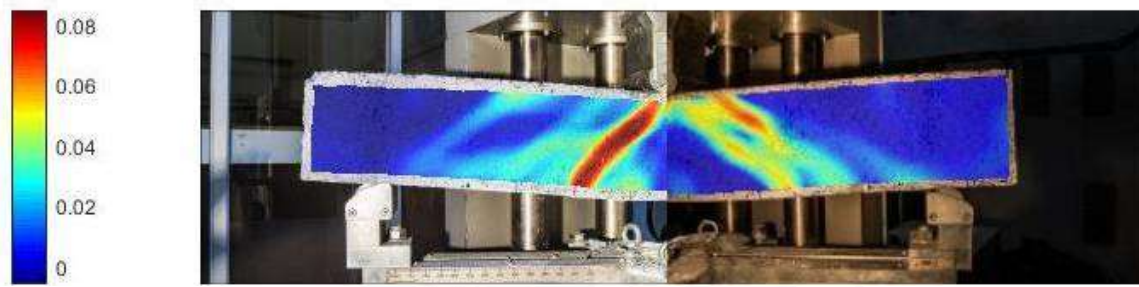
▪ Fotografía 27



▪ Fotografía 28



- Fotografía 29



F | Secciones de Comparación entre Fotogrametría y Modelos

F.1. Viga 1

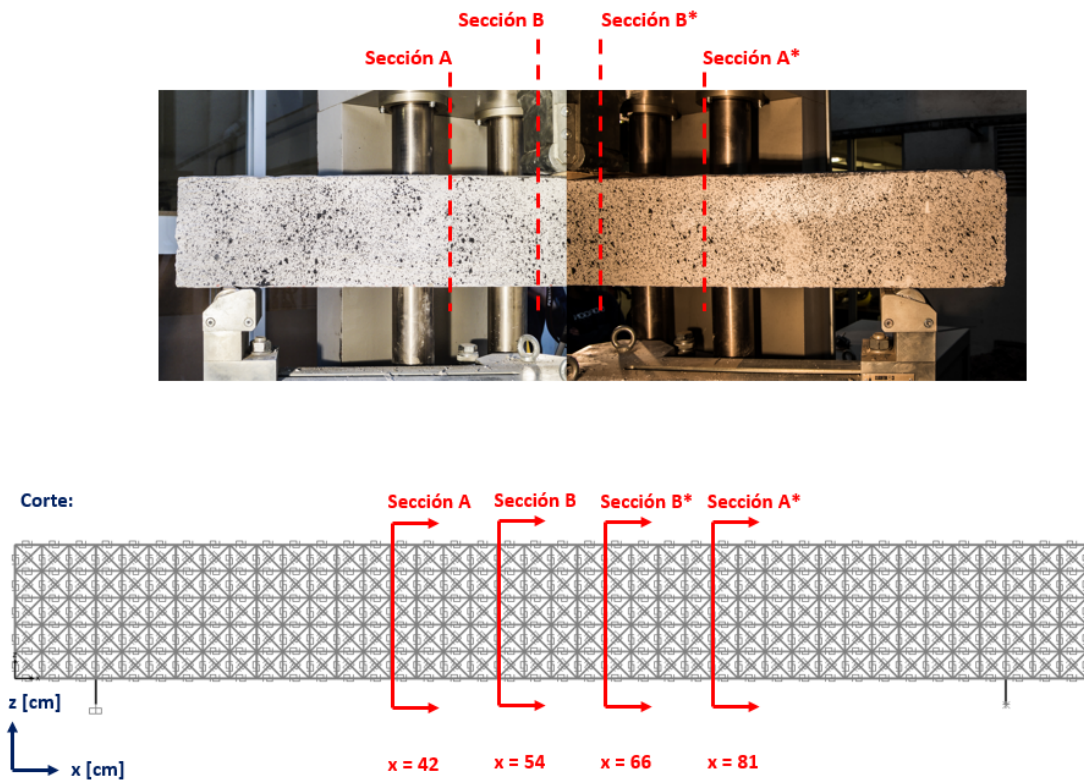


Figura F.1: Secciones consideradas para realizar las comparaciones en la viga 1.

F.2. Viga 2

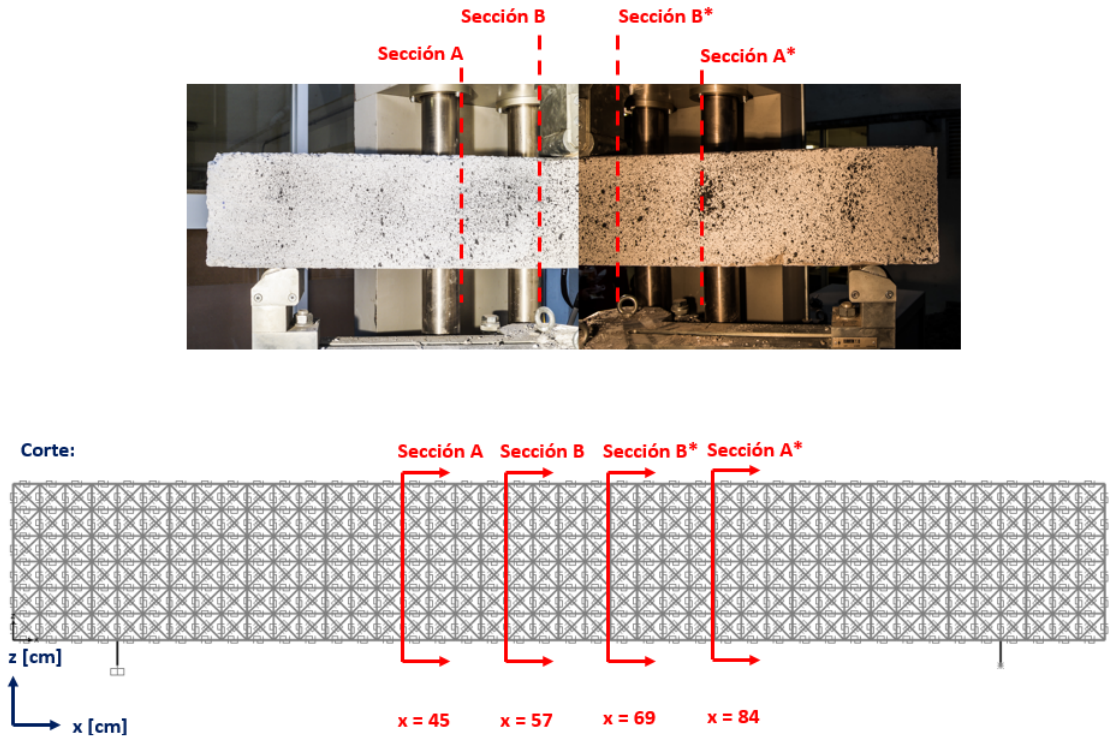


Figura F.2: Secciones consideradas para realizar las comparaciones en la viga 2.