

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Análisis de deformaciones y deflexiones en vigas de hormigón y arcos
de hormigón armado por medio del método de Correlación Digital de
Imágenes**

Carlos Alberto Mejía Carrillo

Eva Lantsoght, Ph.D., Directora de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, julio de 2015

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Análisis de deformaciones y deflexiones en vigas de hormigón y arcos de hormigón armado por medio del método de Correlación Digital de Imágenes

Carlos Mejía Carrillo

Eva Lantsoght, Ph.D.
Directora de Tesis

Alfredo Valarezo, Ph.D.
Miembro del Comité de Tesis

Fernando Romo, MS.
Director de Ingeniería Civil
Miembro del Comité de Tesis

Ximena Córdova, Ph.D.
Decana Escuela de Ingeniería
Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, julio de 2015

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: _____

Nombre: Carlos Alberto Mejía Carrillo

C. I.: 1718813148

Lugar: Quito

Fecha: Julio de 2015

DEDICATORIA

A toda mi familia, mi novia y amigos que han sido un gran apoyo en estos 5 años de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi directora de tesis Ph.D. Eva Lantsoght por todos sus conocimientos, paciencia y ayuda que me supo brindar a lo largo del estudio realizado. Además, al Ph.D. Alfredo Valarezo y a todos los profesores de la Facultad de Ingeniería Civil, quienes han estado prestos a dar una guía durante mi periodo universitario y realización de tesis.

RESUMEM

A lo largo de la historia se ha utilizado métodos invasivos para el análisis de deflexiones y deformaciones en estructuras de hormigón en el laboratorio, sin embargo el avance de la tecnología ha permitido desarrollar nuevos métodos alternativos considerados no invasivos, como lo es la técnica de correlación digital de imágenes (DIC), con la cual es posible llegar a resultados muy precisos en el análisis de estructuras. El estudio consiste en realizar ensayos a flexión en vigas de hormigón y arcos de hormigón armado en base a los métodos ASTM estándar de la resistencia a la flexión del concreto: usando 3 puntos de carga, designación C78/C78M-10 y usando un punto de carga en el centro, designación C293/C293M-10. Durante los ensayos se realizará una filmación, la misma que posteriormente se convertirá en imágenes, donde se aplicará la correlación digital. Los resultados obtenidos serán las deflexiones, deformaciones y campos de deformaciones del área analizada en cada una de las geometrías. Finalmente una vez obtenidos todos los resultados se podrá encontrar el porcentaje de error existente entre la técnica DIC y los medidos por de los transformadores diferenciales de variación lineal (LVDTs) o deformímetros en base a los equipos utilizados durante el estudio. En conclusión, los resultados finales del estudio muestran que no fue posible alcanzar valores de presión en deflexiones y deformaciones por medio del método aplicado.

ABSTRACT

Throughout history invasive methods for analyzing deflections and deformations have been used in concrete structures at the laboratory, but the advancement of technology has allowed the development of new non-invasive alternative methods such as digital image correlation (DIC). With this technique it is possible to obtain accurate results in the structural analysis. The current study consists of performing a flexural test in plain concrete beams and reinforced concrete arches based on the ASTM standard methods for the flexural strength of Concrete (Using Simple Beam with Third –Point Loading), designation C78 / C78M-10 and for the flexural strength of Concrete (Using Simple Beam with Center- Point Loading), designation C293 / C293M-10. All tests were recorded with a camera, then transferred into images in order to apply the digital image correlation technique. The analysis leads to the following results: displacements, strains and strain fields of the surface under analysis. Finally, once all the results are obtained, the percentage of error between the displacement derived from the DIC technique and the one measured by the Linear Variable Differential Transformer (LVDTs) can be found. In conclusion, the final results of the study show that it was not possible to reach accuracy on the values of in deflections and strains by the applied method.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	7
Abstract.....	8
Introducción (Capítulo 1).....	13
Explicación de la técnica	13
Antecedentes.....	14
El problema.....	15
Hipótesis	16
Pregunta de investigación	16
Propósito y significado del estudio.....	16
Marco teórico	17
Presunciones del estudio.....	19
Revisión de la literatura (Capítulo 2).....	21
Aplicación de la técnica en otras áreas.....	21
Aplicación en estructuras de hormigón.	23
Revisión de los métodos ASTM estándar utilizados en los ensayos.....	25
Metodología y diseño de la investigación (Capítulo 3)	30
Montaje de los ensayos.....	30
Funcionamiento y Aplicación de la técnica DIC.....	32
Análisis de datos (Capítulo 4)	39
Análisis en vigas de hormigón.	39
Análisis en arcos de hormigón armado:	58
Sesgos del estudio:	69
Conclusiones y recomendaciones (capitulo 5)	72
Referencias:.....	75
Anexos:	77

TABLAS

- Tabla 1: Propiedades de las vigas de hormigón.....31
- Tabla 2: Propiedades de los arcos de hormigón armado.....31
- Tabla 3: Resumen de las deflexiones obtenidas con ambos métodos en vigas de hormigón sin refuerzo de dimensiones iguales y porcentaje de error.....69
-
- Tabla 4: Deflexiones obtenidas con ambos métodos en viga de hormigón sin refuerzo y porcentaje de **error**.69
- Tabla 5: Resumen de las deflexiones obtenidas con ambos métodos en arcos de hormigón armado y porcentaje de error.....70

FIGURAS

- Figura 1: Montaje de los equipos. E. López-Alba et al., 2010).....23
- Figura 2: Ensayo de carga y descarga en la viga de un puente. (Michel Küntz et al., 2006).....24
- Figura 3: Esquema para el ensayo de resistencia a flexión del hormigón con 2 puntos de carga. ASTM C78/C78M-10.....26
- Figura 4: Esquema para el ensayo de resistencia a flexión del hormigón con un punto de carga en el centro. ASTM C293/C293M-10.....28
- Figura 5: Imágenes captadas por la cámara digital de cada una de las geometrías analizadas.....30
- Figura 6: Montaje del estudio en vigas 1-8.....31
- Figura 7: Montaje del estudio en viga 9.....32
- Figura 8: Montaje del estudio en Arco 1.....32
- Figura 9: Montaje del estudio en Arco 2.....32
- Figura 10: esquema de la metodología para la correlación digital de imágenes.....33
- Figura 11: metodología por medio de elementos finitos para el cálculo de deformaciones.....34
- Figura 12: Esquema de funcionamiento del algoritmo.....35

• Figura 13: Montaje de las vigas de hormigón del estudio con todos los equipos.....	37
• Figura 14: Montaje de los arcos de hormigón armado.....	37
• Figura 15: Zona de estudio en vigas 1-8.....	39
• Figura 16: Zona de estudio en viga 9.....	40
• Figura 17: Resultado del Análisis DIC.....	41
• Figura 18: Diagrama de Carga vs Deflexión.....	41
• Figura 19: Resultado del Análisis DIC.....	42
• Figura 20: Diagrama de Carga vs Tiempo.....	42
• Figura 21: Resultado del Análisis DIC.....	43
• Figura 22: Diagrama de Carga vs Deflexión.....	43
• Figura 23: Resultado del Análisis DIC.....	44
• Figura 24: Diagrama de Carga vs Deflexión.....	44
• Figura 25: Resultado del Análisis DIC.....	45
• Figura 26: Diagrama de Carga vs Deflexión.....	45
• Figura 27: Resultado del Análisis DIC.....	46
• Figura 28: Diagrama de Carga vs Deflexión.....	46
• Figura 29: Resultado del Análisis DIC.....	47
• Figura 30: Diagrama de Carga vs Deflexión.....	47
• Figura 31: Resultado del Análisis DIC.....	48
• Figura 32: Diagrama de Carga vs Deflexión.....	48
• Figura 33: Resultado del Análisis DIC.....	50
• Figura 34: Campo de deformaciones.....	50
• Figura 35: Resultado del Análisis DIC.....	51
• Figura 36: Campo de deformaciones.....	51
• Figura 37: Resultado del Análisis DIC.....	52
• Figura 38: Campo de deformaciones.....	52
• Figura 39: Resultado del Análisis DIC.....	53
• Figura 40: Campo de deformaciones.....	53
• Figura 41: Resultado del Análisis DIC.....	54
• Figura 42: Campo de deformaciones.....	54
• Figura 43: Resultado del Análisis DIC.....	55

• Figura 44: Campo de deformaciones.....	55
• Figura 45: Resultado del Análisis DIC.....	56
• Figura 46: Campo de deformaciones.....	56
• Figura 47: Resultado del Análisis DIC.....	57
• Figura 48: Campo de deformaciones.....	57
• Figura 49: Zonas de estudio en el arco 1.....	59
• Figura 50: Zonas de estudio en el arco 2.....	59
• Figura 51: Resultado del Análisis DIC hasta el momento de medición de los deformímetros.....	60
• Figura 52: Diagrama de Carga vs Deflexión.....	60
• Figura 53: Resultado del análisis DIC hasta su fall.....	61
• Figura 54: Resultado del Análisis DIC hasta el momento de medición de los deformímetros.....	61
• Figura 55: Diagrama de Carga vs Deflexión.....	62
• Figura 56: Resultado del Análisis DIC.....	64
• Figura 57: Campo de deformaciones.....	64
• Figura 58: Resultado del Análisis DIC.....	65
• Figura 59: Campo de deformaciones.....	65
• Figura 60: Resultado del Análisis DIC.....	66
• Figura 61: Campo de deformaciones.....	66
• Figura 62: Campo de deformaciones zona central.....	67
• Figura 63: Campo de deformaciones zona media.....	67
• Figura 64: Campo de deformaciones zona externa.....	68

INTRODUCCIÓN (CAPÍTULO 1)

La correlación digital de imágenes (DIC), es una técnica experimental, la cual nos permite a partir de imágenes obtenidas durante el ensayo, medir desplazamientos, deformaciones y campos de deformación producidas en la viga. La técnica consiste en obtener imágenes digitales durante el ensayo desde su estado inicial, el cual es considerado como referencia, hasta su estado final o deformado.

Las ventajas de la técnica establecidas por el estudio realizado por E. López-Alba et al., 2010 son las siguientes:

- El montaje del ensayo es sencillo, pues se necesita una cámara digital, la cual debe estar aislada del ensayo y sujeta apropiadamente de manera que garantice no sufrir vibración o movimiento alguno.
- Es versátil debido a que puede aplicarse a varios estudios tales como: piezas mecánicas y estructuras. Es una técnica no invasiva.
- No genera discontinuidades y se puede identificar claramente la zona a ser analizada.
- Los algoritmos que emplea no necesitan altos requerimientos computacionales, ya que incluso se puede adaptar el ensayo para realizar el análisis en tiempo real.

De igual manera esta técnica presenta desventajas, como la dependencia a la alta calidad de imágenes tomadas durante el ensayo, la capacidad de la cámara para grabar varios cuadros por segundo, evitándose de esta manera la pérdida de información sobre

todo al momento de la fractura o falla, dado que los pixeles captados al borde del punto de medición pueden llevar a distorsionar los resultados.

La aplicación de esta técnica para estructuras de hormigón y hormigón armado ha ido en aumento debido a la evolución de la cámara de video y a la capacidad que estas tienen para guardar videos con más de 60 cuadros por segundo, ya que los desplazamientos y deformaciones que se obtienen en los ensayos son muy pequeños, además al momento que las estructuras de hormigón sin refuerzo fallan, lo hacen súbitamente, siendo imperceptible para el ojo humano.

Antecedentes:

Entre los años 1960 y 1970, científicos en inteligencia artificial y robótica empezaron a desarrollar algoritmos para ser usados mediante visión artificial y metodologías de estéreo visión en paralelo con aplicaciones de fotogrametría referencial. (J.Schwider, 1990). A medida que las técnicas basadas en imágenes digitales fueron mejorando, el campo experimental de la ingeniería fue buscando aplicaciones de estas técnicas como: holografía, moiré, interferometría, etc. En la década de los 80s, se da a conocer una de las primeras investigaciones, donde con imágenes 2D, a través del espesor promedio, las aplicaciones de ultra-sonido proponen un acercamiento para la conversión de imágenes de ultrasonido digitalizados en las estimaciones de los desplazamientos superficiales locales. Para ello, compararon la localización de pequeñas regiones en una imagen digital del objeto ensayado antes y después de ser aplicada la carga, de esta manera obtuvieron una medición de campo completo para los desplazamientos producidos entre ambos estados. (M.Sutton et al., 1983). Posteriormente, este método fue mejorado, incluyendo en el algoritmo numérico

optimizaciones mediante el método de Newton- Raphson, dando lugar al desarrollo de la técnica Correlación Digital de Imágenes. (E. López-Alba et al., 2010).

Dado que la técnica DIC nos permite realizar el análisis de deformaciones en estructuras y obtener los campos de deformaciones en un área de estudio seleccionada, esto abrió la posibilidad de comparar estas deformaciones con las obtenidas por medio de la modelación en un software de elementos finitos.

Estudios como el de E. López-Alba et al., 2010, en el cual se ha probado esta técnica con probetas de acero en contacto, en dicho estudio para aplicar la técnica DIC, se generó sobre ellas una distribución no uniforme de color negro sobre un fondo blanco obteniéndose una escala de grises en la zona de estudio para poder aplicar la técnica y así conseguir resultados en los cuales se logró 0.01 píxeles de precisión en medidas de desplazamientos y 0.01% para deformaciones.

Los estudios realizados en estructuras de hormigón por medio del método DIC se han realizado en laboratorios y en estructuras ya existentes como puentes, un ejemplo de esto es la investigación liderada por realizado por M. Küntz et al., 2006, en la cual se realizó un análisis del comportamiento de las grietas en una viga de hormigón armado que formaba parte de un puente en operación.

De acuerdo a la búsqueda e investigación realizada en el país, no se ha podido encontrar registros de ensayos en los cuales se ha aplicado esta técnica para estructuras de hormigón y hormigón armado, de esta manera no se puede tener una referencia sobre estudios similares en el medio.

La precisión de la técnica depende de la calidad y resolución de las imágenes a ser analizadas, esto se refiere a la cantidad de píxeles que existe en las imágenes, ya que mientras mayor número de píxeles tiene la imagen mayor precisión se obtiene en los

resultados. También es importante el número de cuadros por segundo que capta la cámara porque de esta manera existe una mejor correlación entre las imágenes.

Existen varias técnicas para el análisis de deflexiones y deformaciones, las cuales son in situ y deben ser colocadas en la estructura que va a ser analizada, sin embargo los sensores utilizados en los métodos invasivos solo pueden aplicarse para la medición de pequeños desplazamientos como es el caso de los transformadores diferenciales de variación lineal (LVDTs) o deformímetros y medidores de deformaciones (strain gauge). A pesar de que estos métodos son confiables existe pérdida de información, pues no es posible analizar toda el área debido a que debe existir separación entre cada instrumento.

No obstante el desarrollo de las cámaras digitales ha beneficiado al campo del análisis de deformaciones por el método de correlación digital de imágenes, el cual al ser un método no invasivo, permite además analizar toda el área requerida para el estudio, sin que exista pérdida de información. De este método es posible obtener la misma información, que en los métodos antes mencionados. Por estas razones nace la pregunta principal del estudio: ¿Cómo y hasta qué punto, la técnica de correlación digital de imágenes con los instrumentos utilizados para el estudio, es confiable para el análisis de deflexiones y deformaciones en las estructuras de hormigón estudiadas?

Muchas de las técnicas no invasivas tienen un margen de error, sin embargo son aceptadas si la variación de resultados se encuentra dentro de los límites permisibles para que los ensayos analizados con este método puedan tener datos confiables.

Propósito y significado del estudio.

Este proyecto consiste en ensayar vigas de hormigón a flexión, al mismo tiempo que se filmara el ensayo con una cámara que permite lograr por lo menos 60 cuadros por segundo, de modo que se pueda alcanzar el contraste necesario para obtener

deflexiones y deformaciones en las vigas. Finalmente, con los resultados alcanzados en los especímenes del estudio, se podrá encontrar la variación que existe en el análisis de deflexiones de los métodos utilizados.

Una vez encontrada la variación existente de la técnica DIC para el análisis de deflexiones y deformaciones en vigas de hormigón, con la capacidad de los instrumentos utilizados, esta puede ser útil para posteriores ensayos en laboratorio con estructuras de hormigón y así ahorrar tiempo y recursos. Dado que en el Ecuador no se ha encontrado publicaciones sobre ensayos utilizando la técnica, es importante conocer y entender como esta puede ser aplicada en el medio.

Siendo el propósito determinar las deformaciones y deflexiones en vigas de hormigón por medio de la correlación digital de imágenes, existen varios conceptos fundamentales que se deben definir previamente para el completo entendimiento del desarrollo del estudio. Entre estos conceptos se encuentran:

Correlación:

En probabilidad y estadística, la correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra: si tenemos dos variables (A y B) existe correlación si al aumentar los valores de A lo hacen también los de B y viceversa.

Hormigón:

“El hormigón es un material pétreo obtenido de la combinación cuidadosa de cemento, agregado fino, agregado grueso y agua que tiene la propiedad de endurecerse con la forma y dimensiones de la estructura deseada”. (Nilson, Darwin & Dolan, 2010).

Viga:

Se denomina viga a un elemento estructural lineal que trabaja principalmente a flexión. En las vigas, la longitud predomina sobre las otras dos dimensiones y suele ser horizontal. (Diccionario electrónico, worldreferences.com)

Flexión pura:

Se produce cuando un elemento prismático se encuentra sometido a momentos pares iguales y opuestos que actúan en el mismo plano longitudinal. (Beer, Johnston, 2009).

Deflexión:

En análisis estructural, la deflexión hace referencia al grado en el que un elemento estructural se deforma bajo la aplicación de una fuerza. (Beer, Johnston, 2009).

Pixel:

El píxel es la unidad más pequeña y diminuta de una imagen digital y está presente en un inmensurable número para formar una imagen completa. Cada píxel es una unidad homogénea de color que en suma y con una importante variación de colores dan como resultado una imagen más o menos compleja. (Diccionario, definición abc)

Esfuerzos causados por flexión

En las vigas la flexión genera momentos internos; en un diagrama de momentos flectores internos, un momento positivo significa que en su sección transversal, la fibra inferior al eje neutro (que coincide con el eje centroidal) está sometida a esfuerzos normales de tensión, y la fibra superior al eje neutro estará sometida a esfuerzos normales de compresión. Sin embargo, estos esfuerzos no se distribuyen en forma constante, como en los esfuerzos normales directos, sino que tienen una distribución variable, a partir del eje neutro hasta las fibras extremas. Se puede deducir como es el

comportamiento de la sección transversal cuando el momento flector interno es negativo, y de igual manera, que en el eje neutro, los esfuerzos normales son nulos, y máximos para cada caso en las fibras extremas.(Cursos virtuales , Universidad Nacional de Colombia).

Esfuerzo a compresión del concreto (f_c')

Es el esfuerzo máximo de compresión en el concreto, medido en carga por unidad de área. (Nilson, Darwin & Dolan, 2010).

Esfuerzo de fluencia en el acero (f_y)

Es el esfuerzo de fluencia para el acero de refuerzo en estructuras de concreto. En la curva de esfuerzo vs deformación, obtenida al someter a tensión una barra de acero, es el del esfuerzo para el cual el acero deja de ser elástico y adquiere deformaciones permanentes. (Beer, Johnston, 2009).

Falla cortante:

Conocida también como falla por tracción diagonal, se caracteriza debido a que las fisuras son inclinadas. (O. Bolivar, 2003).

Porcentaje de error:

La primera fórmula se llama también "porcentaje de error", sobre todo cuando sabemos que uno de los valores es exacto:

$$\frac{|\text{valor aproximado} - \text{valor exacto}|}{|\text{valor exacto}|} * 100$$

En el siguiente estudio se va a realizar las siguientes presunciones:

- El valor de las deflexiones, obtenido por los deformímetros es un valor referencial.

- El valor obtenido en las deformaciones es un estimado, ya que no se dispone de otro método.

La propuesta de este trabajo es realizar el análisis de deflexiones y deformaciones por el método de la correlación digital de imágenes, a vigas de hormigón y arcos de hormigón armado. Para los ensayos de laboratorio se seguirá las normas establecidas por la ASTM para el método estándar de ensayos de resistencia a flexión del concreto: usando una viga simplemente apoyada con carga en el centro, designación C293/C293M –10; 2010 y usando una viga simplemente apoyada con 2 puntos de carga, designación C78/C78M –10; 2010.

Finalmente los resultados de deflexión encontrados por la técnica serán comparados con los obtenidos por los deformímetros y de esta manera calcular el porcentaje de error que existe, además se encontrara el valor de las deformaciones y la forma del campo de deformaciones para cada una de las estructuras analizadas.

REVISIÓN DE LA LITERATURA (CAPÍTULO 2)

Dado que la investigación realizada está basada en ensayos de laboratorio, es importante analizar ensayos previamente publicados, ya que estos proporcionan una guía para el estudio, suministran mayor información sobre la técnica y dan sugerencias para evitar errores en la obtención de datos.

Aplicación de la técnica en otras áreas.

Para poder tener un mejor entendimiento de la técnica es importante conocer la aplicación que esta tiene dentro de las diferentes áreas de estudio en la ingeniería. Esta técnica por lo general ha sido manejada en el campo de la Ingeniería Mecánica para pruebas de probetas de acero, tuberías cilíndricas y piezas sometidas a cambios de temperatura. (E. López-Alba et al., 2010).

La técnica de la correlación digital de imágenes se la desarrolló en los años 80s, uno de los primeros estudios en aplicar la técnica fue el realizado por M.Sutton et al., 1983. En sus inicios existían 2 métodos para realizar los ensayos: El primero consistía en medir el desplazamiento relativo entre 2 puntos específicos en la superficie del objeto a prueba sin embargo, la distribución de deformación global del objeto no podía ser determinada directamente, mientras que el segundo estudio radicaba en realizar un mallado en la superficie del objeto antes que la deformación ocurra.

A parte de ensayos donde se somete los objetos a carga externa, también se han realizado análisis en cambios de temperatura, tal como el estudio realizado por J. Lyons et al., 1996, quien es uno de los primeros en utilizar la técnica DIC para medir los desplazamientos y deformaciones en objetos sometidos a 650°C. Posteriormente el estudio realizado por B M B Grant et al., 2009, pudo hacer pruebas con temperaturas de

1400 °C , consiguiendo comparar los resultados por medio del módulo de Young y el coeficiente de expansión térmica de níquel.

La ventaja de la correlación digital de imágenes es que nos permite monitorear la variación de deformaciones al momento que se producen los agrietamientos y por lo tanto, es más precisa al compararla con la técnica tradicional mediante el uso de los strain gauge, lo cuales solo nos permite obtener el promedio de deformaciones en zonas muy pequeñas. Esta variación de deformaciones es posible obtenerla gracias a que la técnica es capaz de correlacionar la imagen digital de un objeto antes y después de la deformación, posteriormente determinando el desplazamiento y el campo de deformación basado en la posición de la imagen. (T. Shih-heng and S. Chung-Huan, 2010).

Inclusive esta técnica a demostrado precisión a escala nanométrica, esto se pudo comprobar con la ayuda de un microscopio de fuerza atómica para determinar nano agrietamientos formados en nano materiales (Dost et al 1999,2003).

Estructura del ensayo.

Para poder realizar los ensayos utilizando la técnica DIC a parte de una cámara de alta resolución, se necesita un algoritmo, el cual sea capaz de procesar la larga secuencia de imágenes grabadas en el ensayo dinámico. Han existido continuas mejoras del algoritmo tal como la propuesta por B. Pan et al., 2013, donde se elimina el cálculo redundante propuesto por el método convencional de DIC y en su lugar se utilizó la estrategia de juego aditivo y el clásico algoritmo de Newton –Raphson, sin sacrificar la precisión en el registro de sub pixeles, de esta manera lograron establecer un método equivalente al propuesto anteriormente pero con mayor capacidad de procesar los datos y en menor tiempo.

La aplicación del método DIC se la puede lograr con cámaras digitales para mediciones en 2D o con 2 cámaras digitales para mediciones en 3D. La ventaja de trabajar con 3D en vez de con 2D, es que se puede obtener deformaciones de especímenes que no tengan superficies planas y se puede obtener información de varias superficies al mismo tiempo. (M. Sutton et al., 2000).



Figura 1: Montaje de los equipos. E. López-Alba et al., 2010

Aplicación en estructuras de hormigón.

Los ensayos a flexión en vigas de hormigón armado nos ayudan a entender el comportamiento del hormigón y del acero en conjunto, dado que en este ensayo se puede observar como el acero trabaja a tensión y el hormigón a compresión. Es importante tener en cuenta en caso de utilizar hormigón de alta resistencia en ensayos a flexión de vigas, debido a que los estudios realizados por M. Rashid y M. Mansur en 2005, al trabajar con hormigones de una resistencia a la compresión en un rango de 40 y 130 MPa, encontraron que el código vigente del ACI, correspondiente al comité 363 no otorgaba las predicciones reales, puesto que en la práctica el momento de agrietamiento y las deflexiones eran mayores a las esperadas. Además, la ductilidad en vigas de hormigón armado se ve reducida por el incremento en la resistencia del hormigón. Por

lo tanto, todos estos factores deben entrar en consideración al momento del diseño de vigas con hormigones de más de 80 MPa.

La mayoría de ensayos para medir deflexiones en vigas de hormigón armado han usado métodos convencionales, tales como: LVDT, strain gauge y strain gauge electrónicos; sin embargo estos estudios poseen varias desventajas ya que son costosos y el tiempo perdido en la preparación del espécimen es alto además, de no ser posible obtener todo el campo de deformaciones, por lo que nuevas técnicas no invasivas se han desarrollado a lo largo de las dos últimas décadas. Un claro ejemplo de las nuevas técnicas es la velocidad de imagen de partícula, la cual se basa en evaluar el desplazamiento y los campos deformados analizando sucesivamente las imágenes del campo sometido a deformación, la gran ventaja de esta técnica es que permite evaluar todo el campo de deformaciones del objeto. (Ardalan Hosseini et al., 2014).

La mayoría de publicaciones coinciden que la precisión en la técnica de la correlación digital de imágenes en vigas de hormigón es muy alta, por lo que el método puede ser utilizado en diferentes tipos de ensayos tales como: el estudio en vigas de hormigón armado simplemente apoyadas (Ardalan Hosseini et al., 2007) y los ensayos de carga y descarga en las vigas de un puente. (Michel Küntz et al., 2006).



Figura 2: Ensayo de carga y descarga en la viga de un puente. (Michel Küntz et al., 2006).

Debido a que la técnica solo nos da información de la superficie analizada, no se puede conocer el daño progresivo interno de la estructura. Por esta razón el estudio realizado por Benard Otieno OMONDI en 2015, demuestra que con la combinación de la técnica de correlación digital de imágenes y la técnica de emisiones acústicas es posible realizar un monitoreo de los agrietamientos en estructuras de hormigón, ya que mientras que con la técnica DIC se puede encontrar el lugar exacto de las grietas en la superficie, la técnica de emisiones acústicas ofrece un medio para tener cualitativamente el conocimiento del progreso interno de la fractura.

Revisión de los métodos ASTM estándar utilizados en los ensayos.

Los métodos estándar establecidos por la ASTM a analizar son: método para la resistencia a la flexión del concreto (usando una viga simplemente apoyada con dos puntos de carga), designación C78/C78M-10; 2010 y el método para la resistencia a la flexión del concreto (usando una viga simplemente apoyada con un punto de carga en el centro), designación C293/C293M-10; 2010.

El primer método estándar consiste en encontrar el módulo de ruptura del concreto por medio del ensayo de laboratorio sometido a una viga simplemente apoyada con 2 puntos de carga, los cuales deben estar ubicados a tres tercios de la luz.

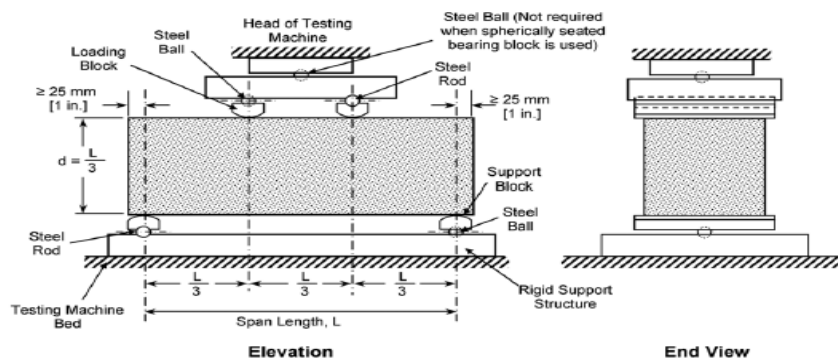


Figura 3: Esquema para el ensayo de resistencia a flexión del hormigón con 2 puntos de carga. ASTM C78/C78M-10.

En la Figura 3 se muestra las dimensiones del espécimen y el correcto montaje para realizar el ensayo, sin embargo se necesitan requerimientos mínimos para los equipos en los cuales se va a realizar el ensayo, ya que las máquinas manuales que no proporcionen carga continua sin interrupciones, no son permitidas. Además, los especímenes deben tener superficies lisas, ya que las vigas hechas en moldes deben ser ensayadas con las caras lisas sobre los rodillos y los instrumentos de medición a ser utilizados durante el ensayo deben estar correctamente sujetos a la viga.

El cálculo de la velocidad de carga está dado por la siguiente fórmula:

$$r = \frac{Sdb^2}{L} \quad (1)$$

Dónde:

r = la velocidad de carga, [N/min]

S = velocidad de incremento del máximo esfuerzo en la cara de la viga expuesta a tensión, [MPa/min]

b = ancho promedio del espécimen, [mm]

d = altura promedio del espécimen, [mm]

L = longitud del claro, [mm]

Una vez finalizado el ensayo se procede al cálculo de la resistencia a flexión del concreto o su módulo de ruptura, el cual depende del lugar donde inicio la fractura de la cara sometida a tensión. Si la falla ocurre dentro del tercio medio del claro la fórmula es la siguiente:

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (2)$$

Dónde:

R = módulo de ruptura, [MPa].

P = carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo, [N].

L = longitud del claro, [mm].

b = ancho promedio del espécimen, [mm].

d = altura promedio del espécimen, [mm].

En caso de que la fractura haya ocurrido afuera del tercio medio del claro hasta un 5% adicional de la longitud del claro, la formula a emplearse es la siguiente:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (3)$$

Dónde:

a = la distancia promedio de la línea de falla y el apoyo más cercano de la cara sometida a tensión.

Si la falla se produce afuera de los límites establecidos, se procede a descartar el ensayo.

El segundo método consiste en encontrar el módulo de ruptura del concreto por medio del ensayo de laboratorio sometido a una viga simplemente apoyada con un punto de carga en el centro de acuerdo la ASTM designación C293/C293M-10; 2010.

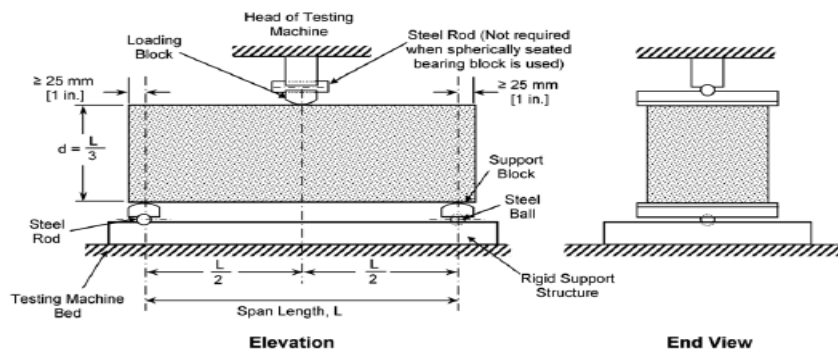


Figura 4: Esquema para el ensayo de resistencia a flexión del hormigón con un punto de carga en el centro. ASTM C293/C293M-10.

En la Figura 4 se muestra las dimensiones del espécimen y el correcto montaje para realizar el ensayo. Sin embargo, se necesitan requerimientos mínimos para los equipos en los cuales se va a realizar el ensayo, dado que máquinas manuales que no proporcionen carga continua sin interrupciones no son permitidas. Además, los especímenes deben tener superficies lisas, ya que las vigas hechas en moldes deben ser ensayadas con las caras lisas sobre los rodillos y los instrumentos de medición a ser utilizados durante el ensayo deben estar correctamente sujetos a la viga.

El cálculo de la velocidad de carga está dado por la siguiente fórmula:

$$r = \frac{2Sdb^2}{3L} \quad (4)$$

Dónde:

r = la velocidad de carga, [N/min]

S = velocidad de incremento del máximo esfuerzo en la cara de la viga expuesta a tensión, [MPa/min]

b = ancho promedio del espécimen, [mm]

d = altura promedio del espécimen, [mm]

L = longitud del claro, [mm]

Para el cálculo del módulo de ruptura se utiliza la siguiente formula:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (5)$$

Dónde:

R = módulo de ruptura, [MPa].

P = carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo, [N].

L = longitud del claro, [mm].

b = ancho promedio del espécimen, [mm].

d = altura promedio del espécimen, [mm].

METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN (CAPÍTULO 3)

Montaje de los ensayos.

Antes de empezar los ensayos es importante preparar los especímenes a ser analizados, para obtener un mayor contraste en la zona de estudio se procederá a pintar las vigas de color blanco y colocar stickers circulares cada 1 cm, de modo que con la correcta iluminación durante el ensayo, el lente de la cámara pueda captar toda la cara de la viga y no existan zonas más opacas que otras, como se muestra en la Figura 5.

a)



b)



c)

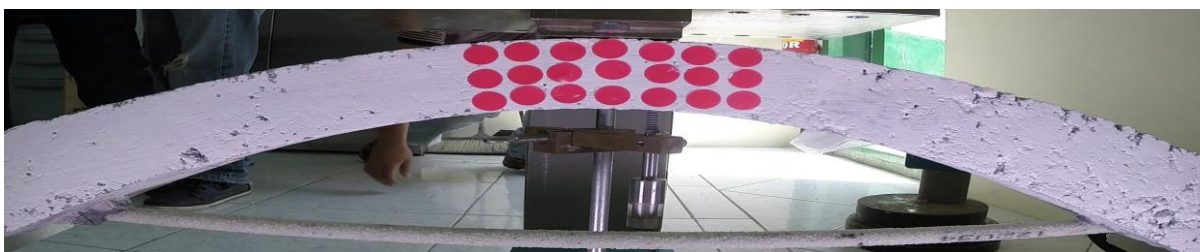


Figura 5: Imágenes captadas por la cámara digital de cada una de las geometrías analizadas

a) Viga de hormigón b) Arco triangular de hormigón armado c) Arco circular de hormigón armado

La siguiente investigación está basada en ensayos de laboratorio realizados a vigas de hormigón y arcos de hormigón armado, según los métodos estándar para la resistencia a flexión del concreto, designaciones C78/C78M-10 y C293/C293M-10, en las cuales se realizara un análisis de deformaciones y deflexiones por el método de correlación digital de imágenes. Las deflexiones producidas al momento del ensayo serán medidas por los deformímetros colocados en la mitad de las vigas y arcos.

La información detalla de cada ensayo realizado se encuentra en los reportes de laboratorio anexos a este documento. A continuación en la Tabla 1 y Tabla 2 se encuentran las propiedades de cada espécimen probado en el estudio.

Tabla 1: Propiedades de las vigas de hormigón

Viga	Peso (g)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Largo (cm)	f'_c (Mpa)
1	7800	9,9	9,9	34,5	31
3	7460	9,9	9,9	34,5	31
4	7620	9,9	9,9	34,5	31
5	7450	9,9	9,9	34,5	31
6	7830	9,9	9,9	34,5	31
7	7490	9,9	9,9	34,5	31
8	8080	9,9	9,9	34,5	31
9	14660	14	16	95	33

Tabla 2: Propiedades de los arcos de hormigón armado

Arco	Peso (g)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Largo (cm)	f'_c (Mpa)	Varilla de Refuerzo	
						f_y (Mpa)	f_u (Mpa)
1	15000	8,7	19,5	98	55	435	435
2	14500	8,7	20	98	55	435	435

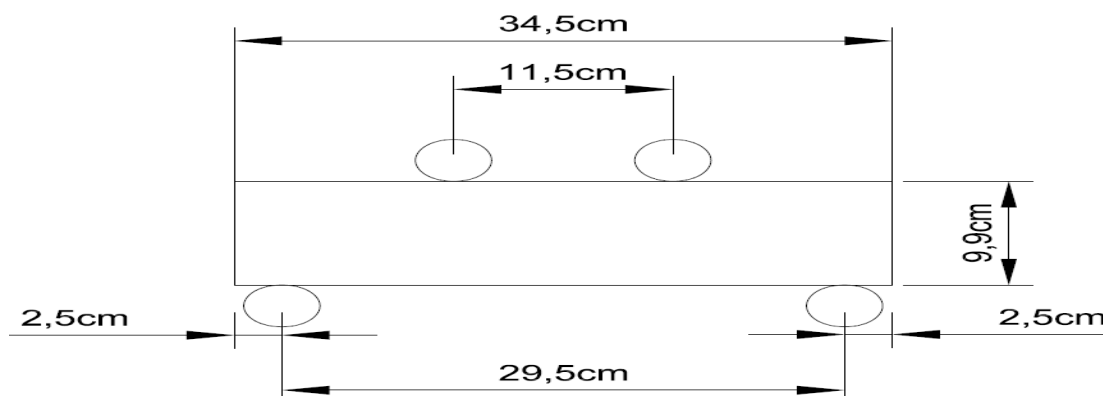


Figura 6: Montaje del estudio en vigas 1-8

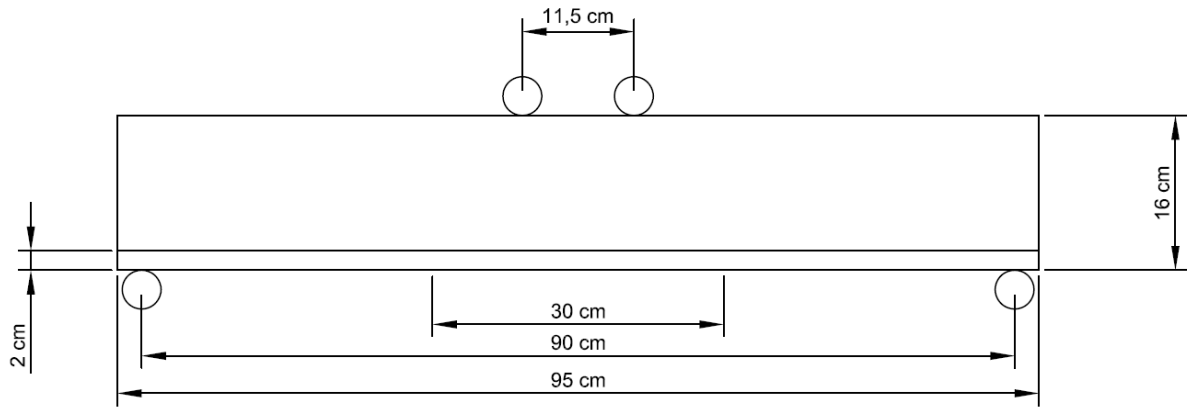


Figura 7: Montaje del estudio en viga 9

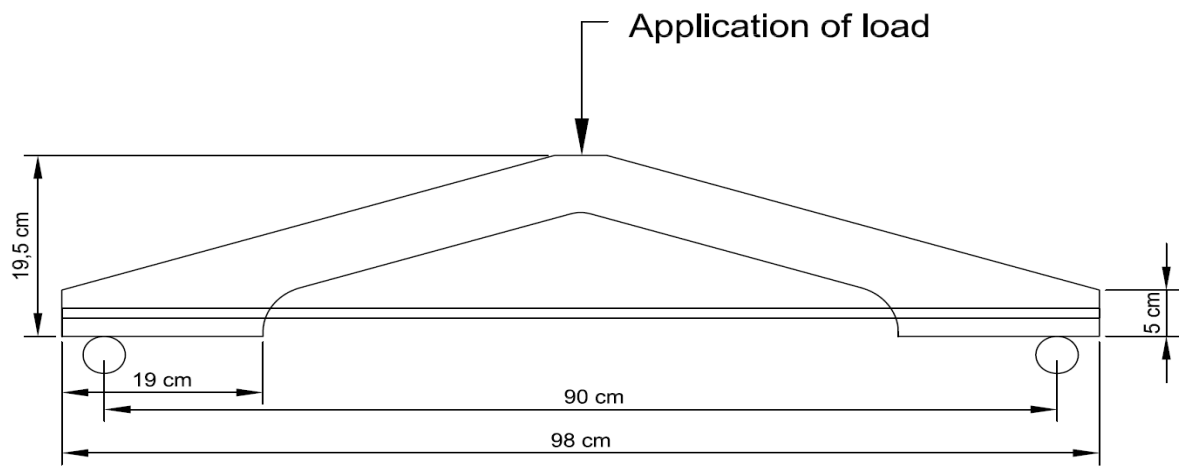


Figura 8: Montaje del estudio en Arco 1

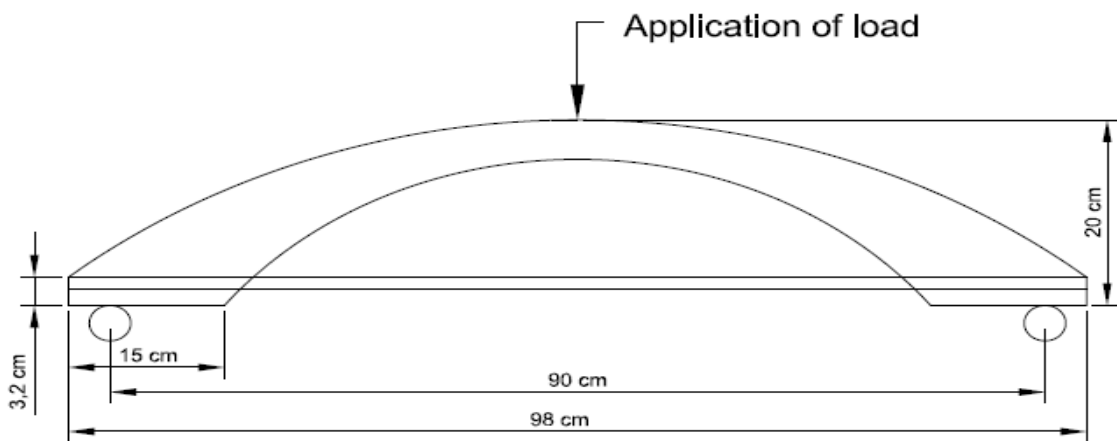


Figura 9: Montaje del estudio en Arco 2

Funcionamiento y Aplicación de la técnica DIC.

La técnica DIC consiste en realizar una filmación durante el ensayo, ya sea de una estructura sometida a tracción, compresión o a flexión, para luego convertir la filmación del ensayo en fotografías, las mismas que van a depender de los cuadros por

segundo que disponga la cámara filmadora a ser utilizada. La cámara de video debe estar totalmente aislada del ensayo para que no exista movimiento externo alguno que provoque la distorsión de la imagen. En este estudio se trabajara con 60 cuadros por segundo y una resolución de imagen de 1920 x 1080 pixeles.

Una vez obtenidas las fotografías, se procederá a realizar el análisis de deflexiones y deformaciones por medio del código escrito en la plataforma de Matlab y publicado en el intercambio de archivos de MATLAB CENTRAL por Elizabeth Jones el 14 de agosto del 2013 y actualizado hasta el 22 de mayo del 2015.

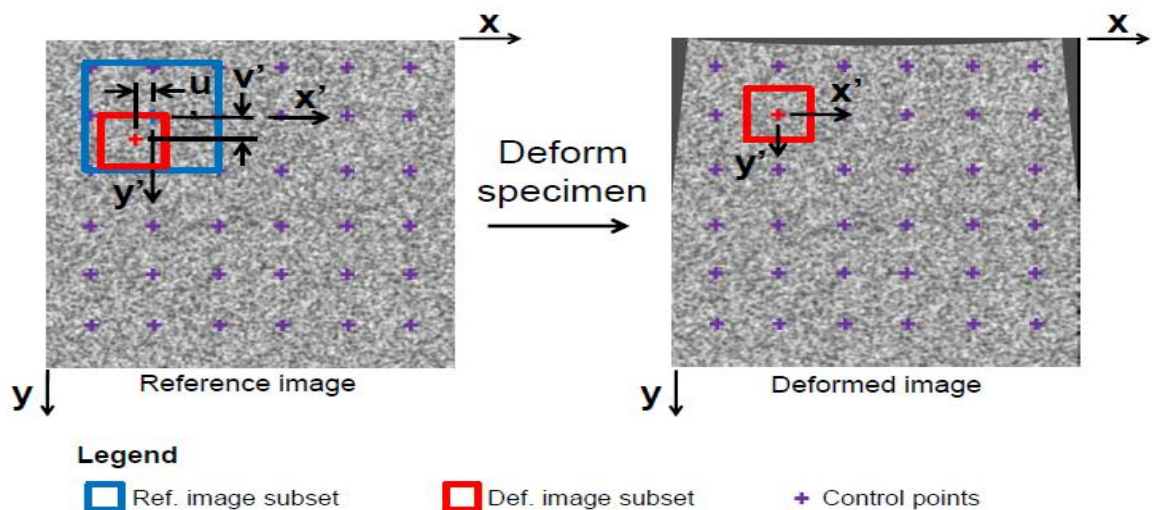


Figura 10: esquema de la metodología para la correlación digital de imágenes

La Figura 10 indica el proceso que realiza el código para la correlación de imágenes, donde primero realiza una cuadrícula con puntos de control, a través de estos puntos de control se ubica una sub-imagen en la imagen de referencia o no deformada, luego se debe analizar en la imagen deformada como la sub-imagen cambio de posición, para finalmente ubicarla en la imagen no deformada y establecer los desplazamientos producidos en los ejes X y Y por medio de vectores de posición. Por medio de este proceso el algoritmo nos da como resultado los desplazamientos en cada imagen analizada.

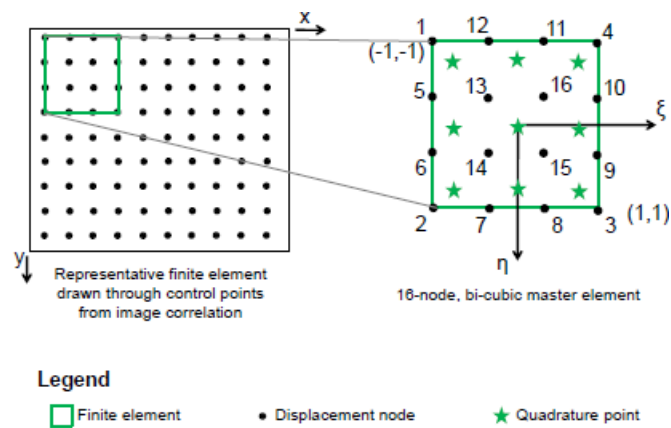


Figura 11: metodología por medio de elementos finitos para el cálculo de deformaciones

Las deformaciones son obtenidas por la interpolación de desplazamientos usando funciones con elementos finitos. La Figura 11 muestra la metodología para el cálculo de deformaciones que usa el algoritmo por medio de elementos finitos, donde los desplazamientos están dados como una cuadrícula de puntos de control (círculos negros), un elemento finito de 16 nodos (caja verde) se dibuja a través de los puntos de control. Este elemento se asigna a un elemento principal, con coordenadas locales η y ε , y los desplazamientos se interpolan sobre el elemento principal utilizando elementos finitos con funciones bi-cúbicas. Las derivadas de los desplazamientos interpolados son calculadas en los nueve puntos del elemento (estrellas verdes), para luego mapear de vuelta al elemento original.

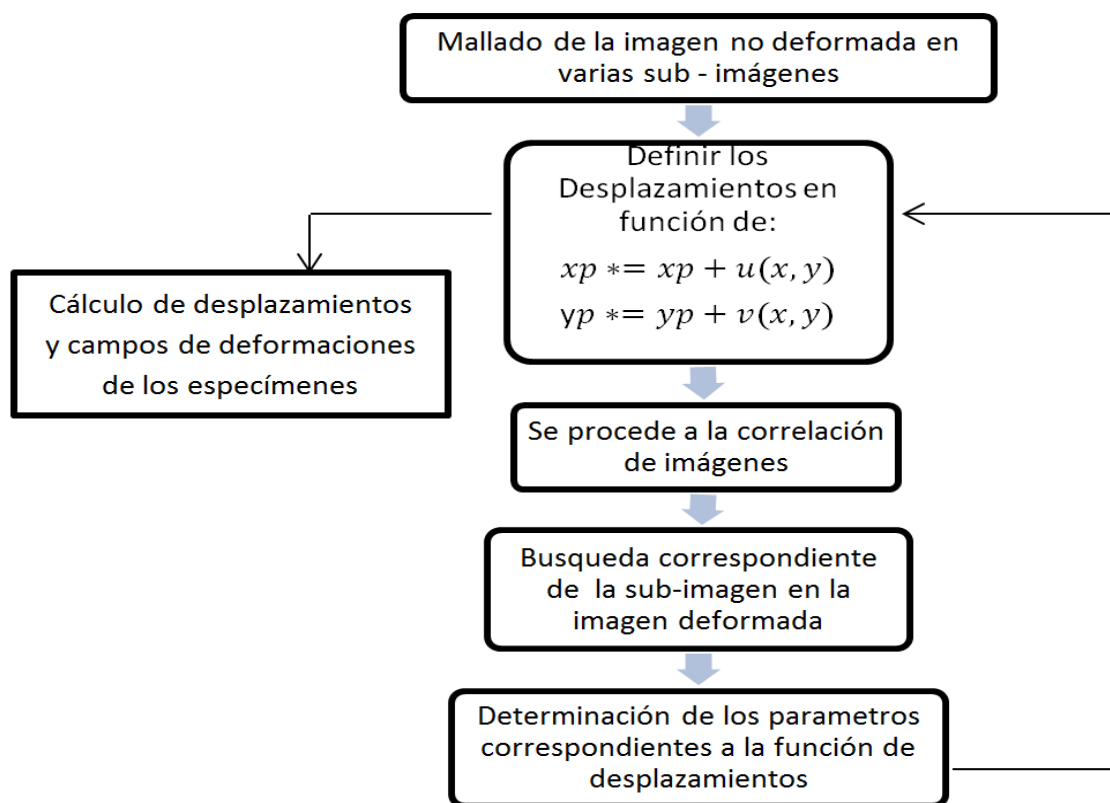


Figura 12: Esquema de funcionamiento del algoritmo

En la Figura 12 se muestra el esquema con los pasos que sigue el código para el cálculo de deflexiones y deformaciones. Los comandos a ser utilizados para el análisis de las imágenes son:

1. `image_setup_GUI`.
2. `correlate_images_GUI`.
3. `compute_data_GUI`.
4. `visualize_data_GUI`.

El primer comando organiza las imágenes a ser analizadas, en caso que las imágenes estén a color el programa automáticamente las convierte en blanco y negro. El segundo comando realiza la correlación de imágenes, para ello el código pide realizar un mallado de la zona a ser analizada y encuentra los desplazamientos producidos. El tercer comando encuentra curvas de tendencia e interpola los desplazamientos, además calcula las deformaciones usando funciones con elementos finitos. Finalmente el último comando despliega los resultados obtenidos de deflexiones y deformaciones en varias formas.

Justificación de la metodología seleccionada.

La metodología seleccionada permite por medio del análisis de deformaciones y deflexiones, encontrar las deflexiones y deformaciones en toda el área de estudio de la estructura. Por lo que los resultados de deflexiones obtenidos por el código serán comparados con los medidos por los deformímetros y de esta manera encontrar el porcentaje de error que existe en la técnica.

Al tomar como referencia el método estándar para la resistencia a flexión del concreto, designación C78/C78M-10, se garantiza que no exista una falla por corte, dado que en el tercio de la mitad de la viga el cortante es 0 y el momento es igual.

Herramienta de investigación utilizada.

Las herramientas fundamentales de investigación en el estudio, son los ensayos de laboratorio de vigas de hormigón y arcos de hormigón armado sometidos a flexión, a diferentes velocidades de carga. Para poder grabar toda la información requerida se utilizó la cámara Go Pro Hero 3, la cual dispone de una calidad para captura de video de 720 p a 60 cuadros por segundo y al momento de convertir el video en fotografías se obtiene una resolución de 1920 x 1080 pixeles. Se proporcionó luz por medio de lámparas led ubicadas al lado derecho e izquierdo de la cara expuesta al video, para que de esta manera no existan puntos de sombra.



Figura 13: Montaje de las vigas de hormigón del estudio con todos los equipos



Figura 14: Montaje de los arcos de hormigón armado

Una vez realizada la revisión literaria y explicado el procedimiento que se va a utilizar en el ensayo, es posible comprender como funciona la técnica y bajo que parámetros es posible su aplicación. Además, al conocer las propiedades de los especímenes que van a ser analizados el lector puede tener un mejor entendimiento de los resultados obtenidos, los cuales van a ser presentados en el siguiente capítulo.

ANÁLISIS DE DATOS (CAPÍTULO 4)

En el capítulo anterior se explicó la metodología de la técnica y su correcto montaje en los ensayos siguiendo los procedimientos estándar establecidos por la ASTM. En este capítulo, se revisará los resultados obtenidos de deflexiones y deformaciones por el método de correlación digital de imágenes, tanto en las vigas de hormigón como en los arcos de hormigón armado, para luego hacer el respectivo análisis y comparación de los datos obtenidos entre el método DIC y los deformímetros, de esta manera en la sección de sesgos del estudio se obtendrá el porcentaje de error que existe al emplear la técnica con los equipos utilizados.

Análisis en vigas de hormigón.

Para el análisis en vigas 1 a la 8 de hormigón sin refuerzo se tomó una superficie de análisis en cada viga de 29.5 cm de ancho y 9.9 cm de altura sobre la cual se colocó el mallado, como se muestra en la Figura 15, la distancia entre los puntos del mallado fue de 1.3 mm y el área del sub-conjunto o sub-imagen de 13.5 mm x 13.5 mm. La viga 2 se utilizó para la calibración de los equipos, por esta razón no se obtuvo ningún dato para el análisis.

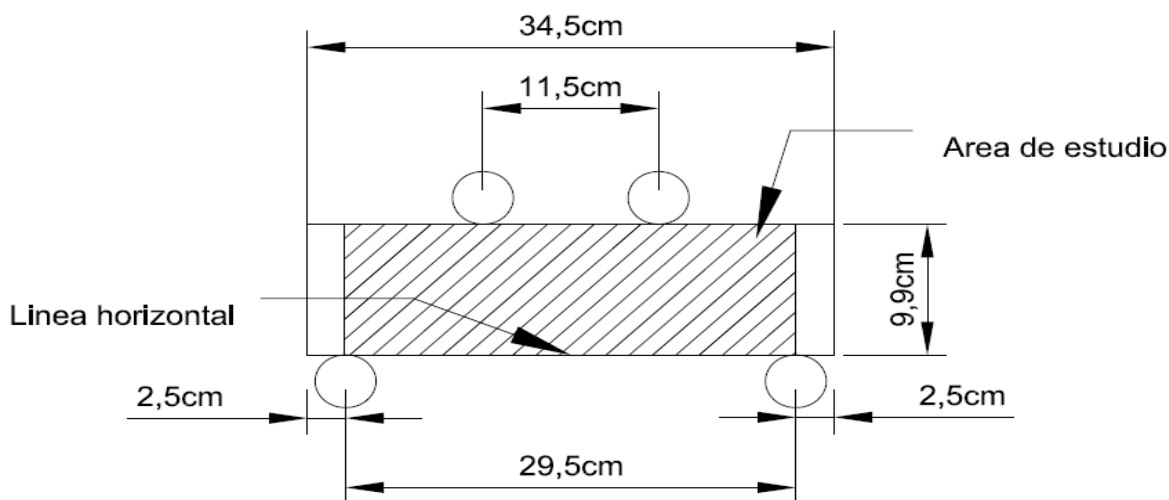


Figura 15: Zona de estudio en vigas 1-8

Debido a que la viga 9 tiene diferentes dimensiones se tomó una otra área de estudio, misma que se muestra en la Figura 16.

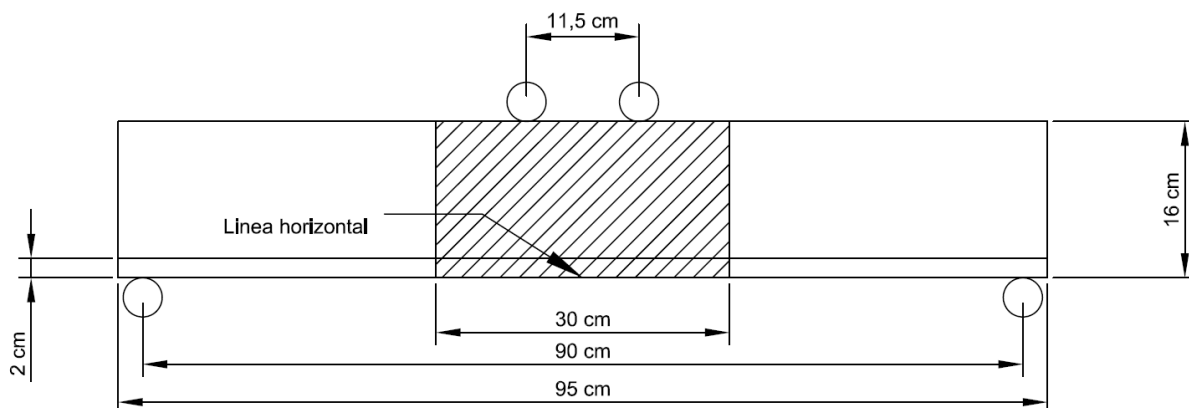


Figura 16: Zona de estudio en viga 9

Es importante indicar que antes de realizar el ensayo en las vigas de hormigón, se hizo el cálculo para encontrar la fuerza máxima a la cual iba a fallar el espécimen, que fue de 8 kN, sin embargo el valor real al que se produjo la falla fue de 23 kN. Por lo que se confirma el argumento de M. Rashid y M. Mansur en 2005, encontraron que el código vigente del ACI, correspondiente al comité 363 no otorgaba las predicciones reales, puesto que en la práctica el momento de agrietamiento y las deflexiones eran mayores a las esperadas.

Análisis de deflexiones:

En las siguientes imágenes que muestran el resultado del análisis DIC, se puede observar la correlación de las primeras 60 fotografías las cuales son el punto inicial de referencia, el siguiente conjunto de puntos son el resultado de la correlación de las últimas 60 fotografías hasta su falla, por esta razón se puede observar el salto que existe

entre los dos conjuntos de resultados, de esta manera se ahorró tiempo en el cálculo y se llegó al resultado final que es encontrar la deflexión máxima.

Los resultados obtenidos por medio de la técnica de correlación digital de imágenes y los medidos por los deformímetros al momento del ensayo son:

Viga 1:

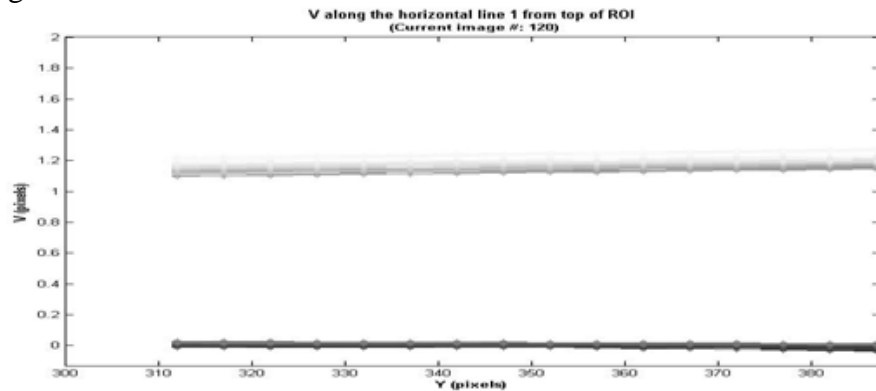


Figura 17: Resultado del Análisis DIC

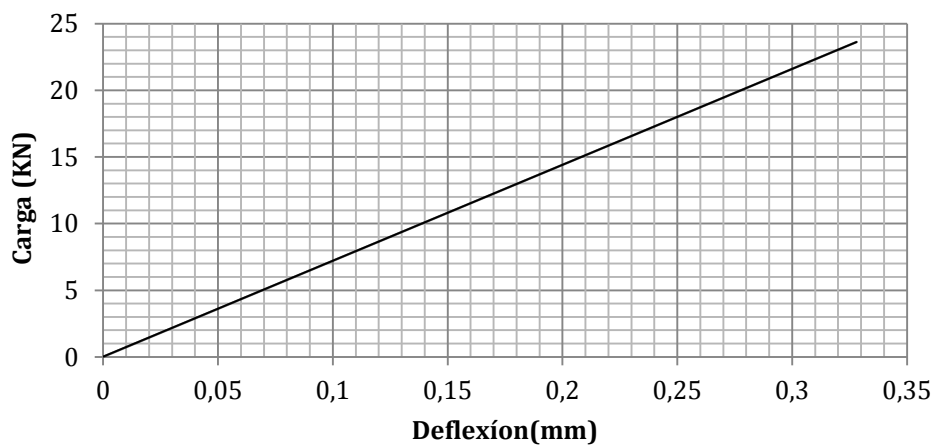


Figura 18: Diagrama de Carga vs Deflexión

La Figura 17 muestra como la deflexión va aumentando antes de la falla, ya que los puntos siguen una misma tendencia a lo largo de una línea horizontal que se encuentra en la mitad del área de estudio. Por medio de los LVDTs se obtuvo un desplazamiento máximo de 0.328 mm y por medio de la técnica DIC se obtuvo 1.23 pixeles, lo cual es igual a 0.325 mm.

Viga 3:

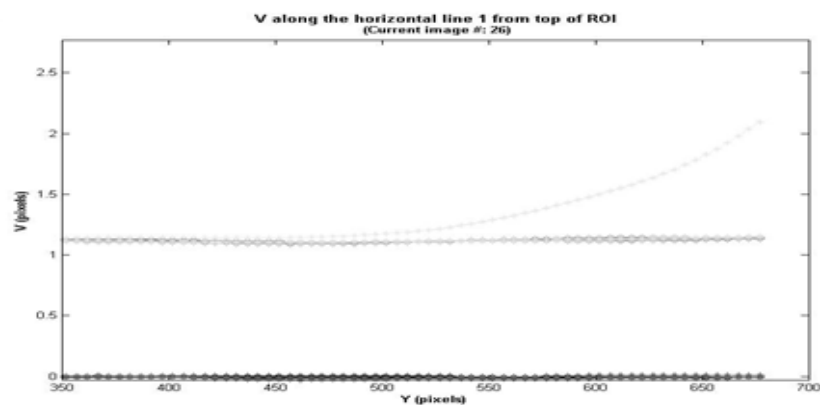


Figura 19: Resultado del Análisis DIC

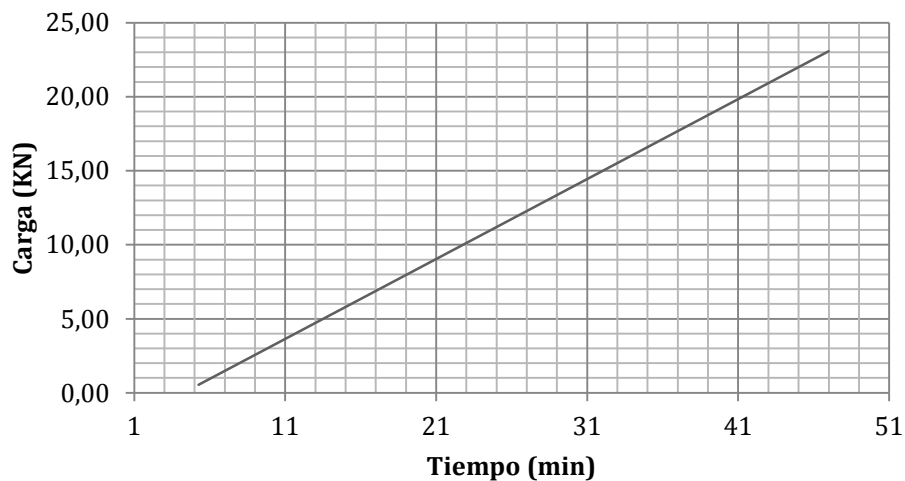


Figura 20: Diagrama de Carga vs Tiempo

En esta viga no se pudo obtener una lectura de los LVDTs, dado que no estuvieron en la posición correcta. Por medio de la técnica DIC se obtuvo 2.2 pixeles, lo cual es igual a 0.582mm.

Viga 4:

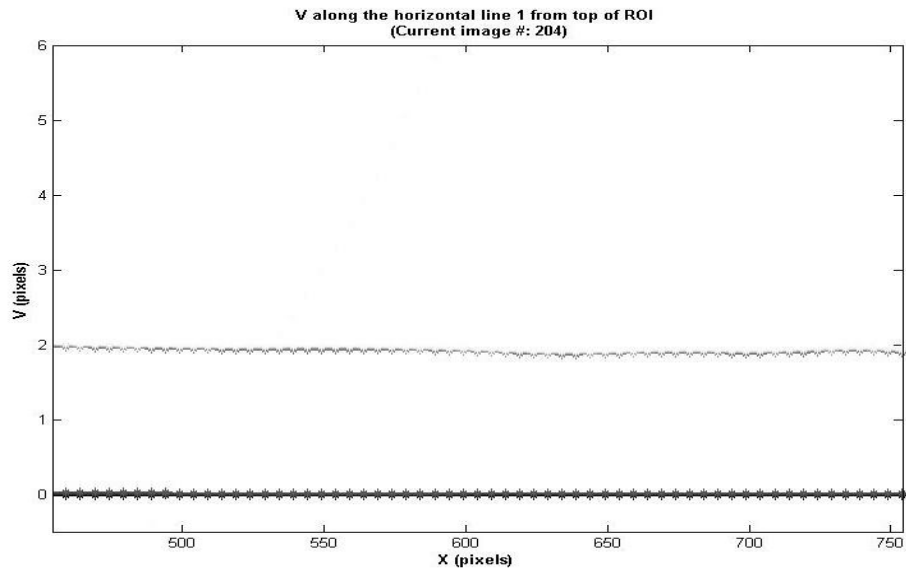


Figura 21: Resultado del Análisis DIC

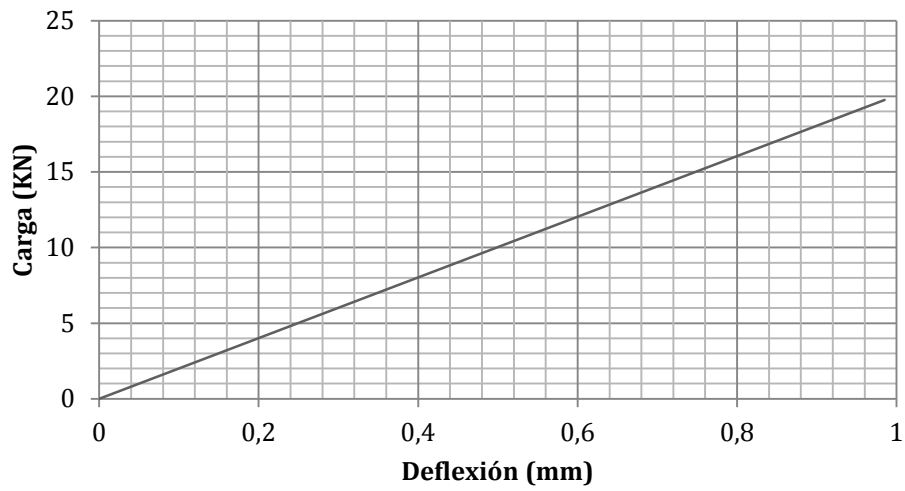


Figura 22: Diagrama de Carga vs Deflexión

Por medio de los LVDTs se obtuvo un desplazamiento máximo de 0.964 mm y por medio de la técnica DIC se obtuvo 2.3 pixeles, lo cual es igual a 0.608 mm.

Viga 5:

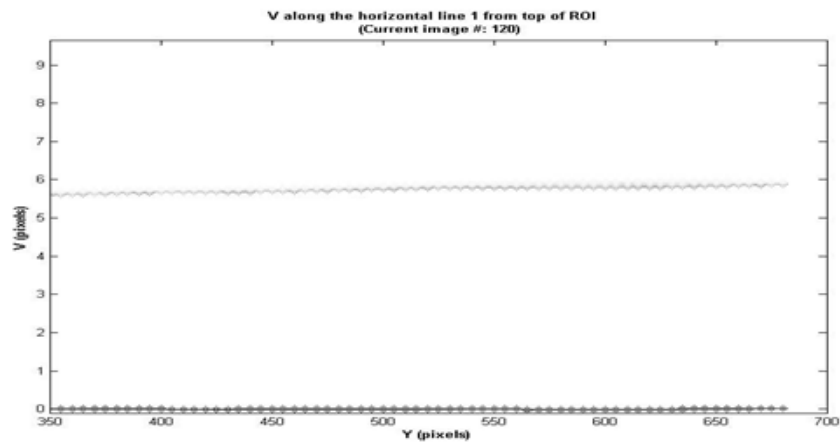


Figura 23: Resultado del Análisis DIC

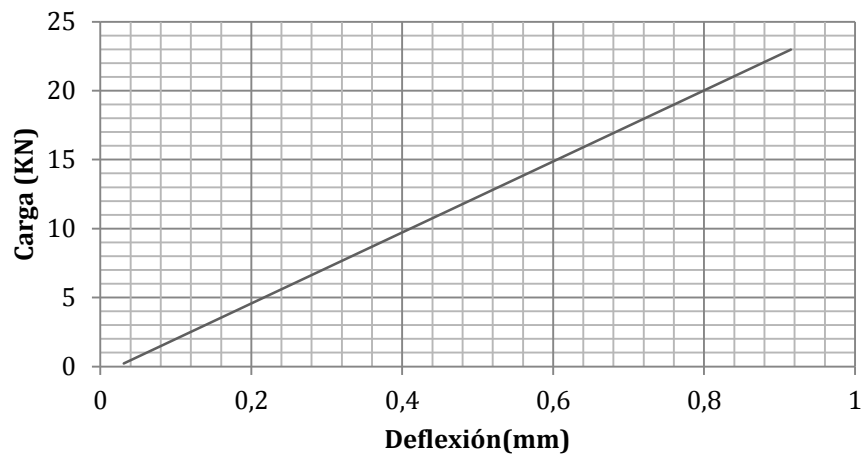


Figura 24: Diagrama de Carga vs Deflexión

Por medio de los LVDTs se obtuvo un desplazamiento máximo de 0.964 mm y por medio de la técnica DIC se obtuvo 3.8 píxeles, lo cual es igual a 1.005 mm.

Viga 6:

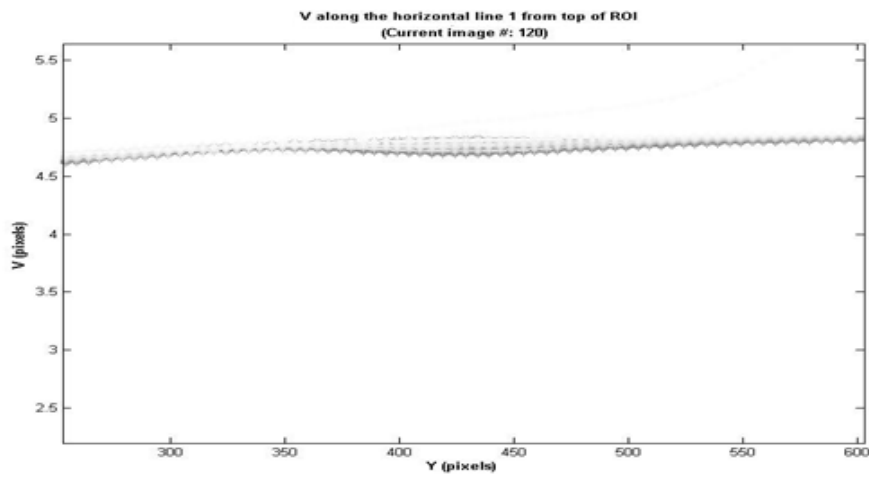


Figura 25: Resultado del Análisis DIC

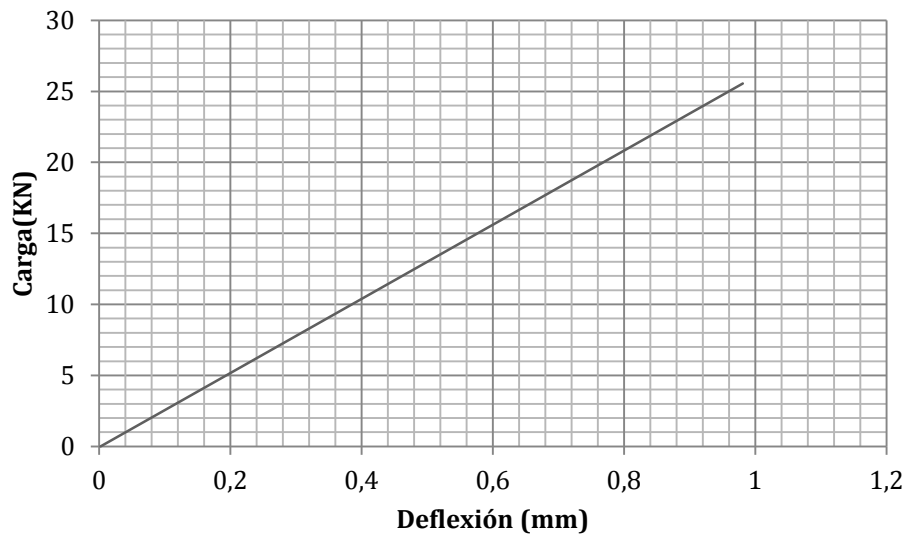


Figura 26: Diagrama de Carga vs Deflexión

Por medio de los LVDTs se obtuvo un desplazamiento máximo de 0.961 mm y por medio de la técnica DIC se obtuvo 4.6 píxeles, lo cual es igual a 1.217mm.

Viga 7:

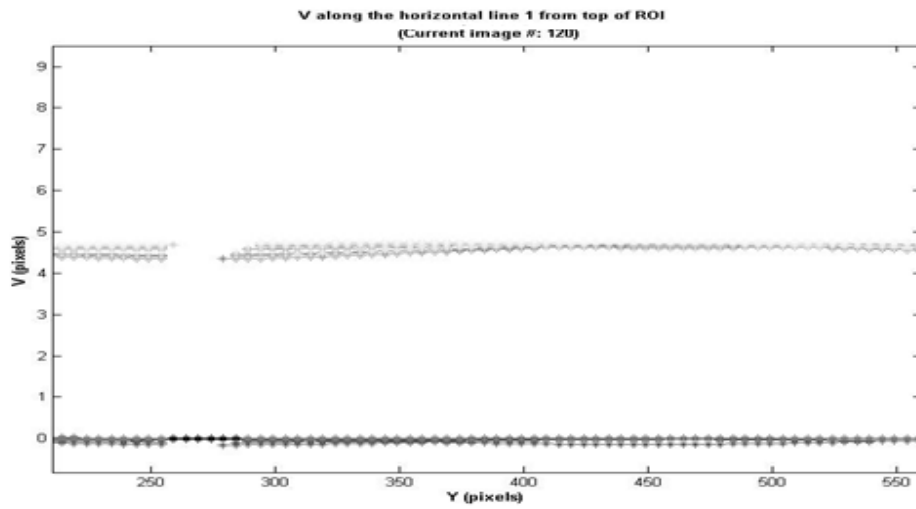


Figura 27: Resultado del Análisis DIC

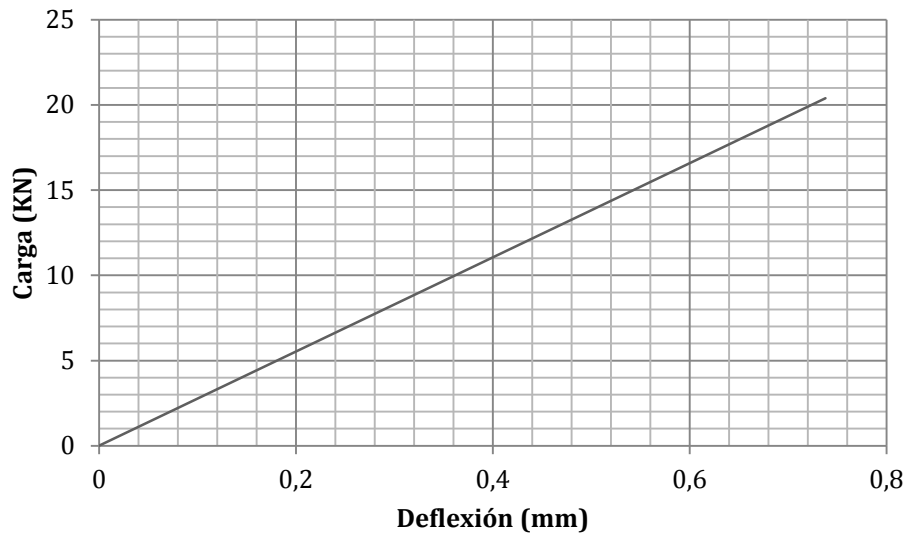


Figura 28: Diagrama de Carga vs Deflexión

Por medio de los LVDTs se obtuvo un desplazamiento máximo de 0.738 mm y por la técnica DIC se obtuvo 4.2 píxeles, lo cual es igual a 1.1 mm.

Viga 8:

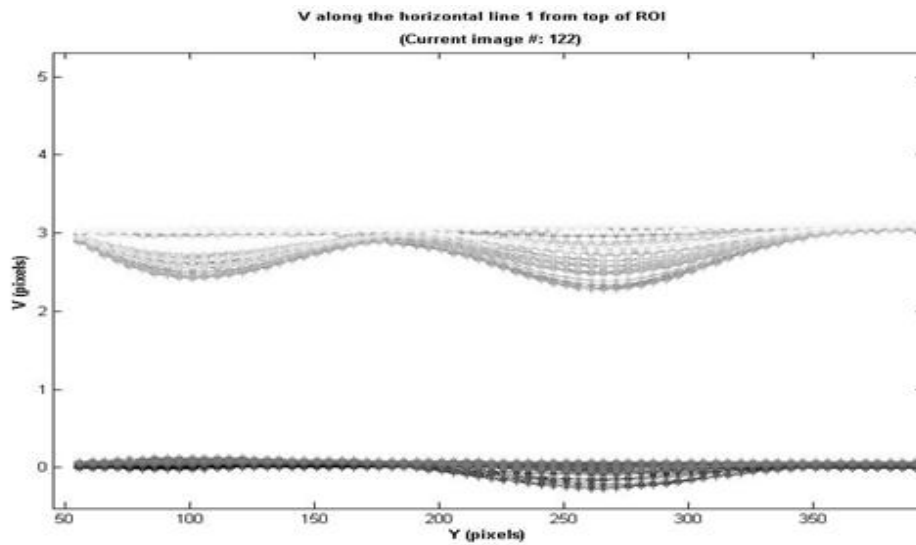


Figura 29: Resultado del Análisis DIC

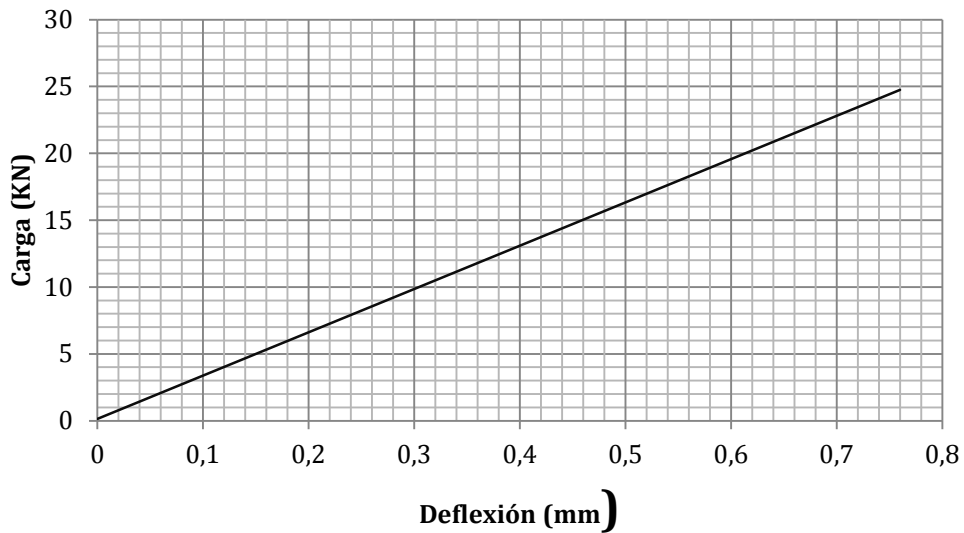


Figura 30: Diagrama de Carga vs Deflexión

Por medio de los LVDTs se obtuvo un desplazamiento máximo de 0.747 mm y por medio de la técnica DIC se obtuvo 3 píxeles, lo cual es igual a 0.793mm.

Viga 9:

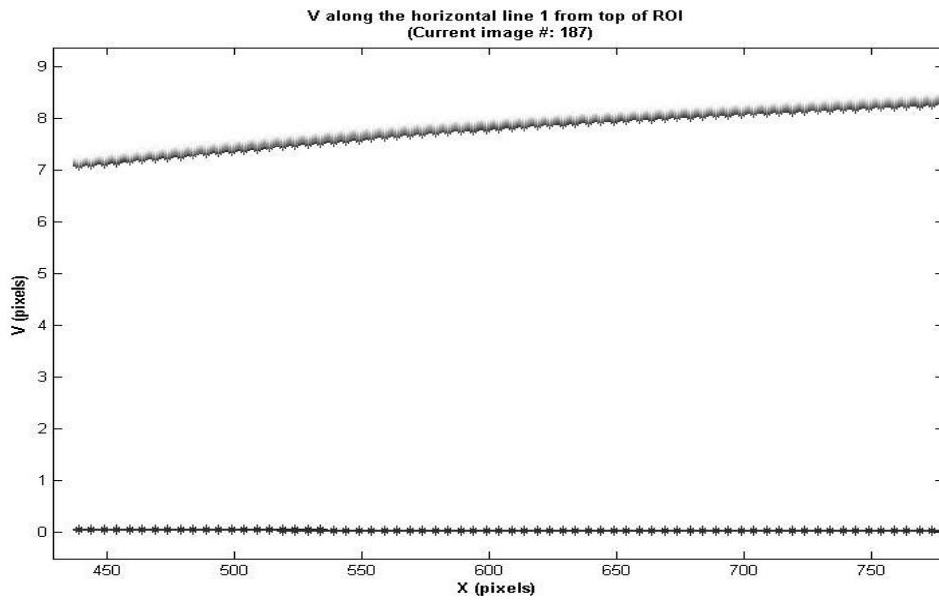


Figura 31: Resultado del Análisis DIC

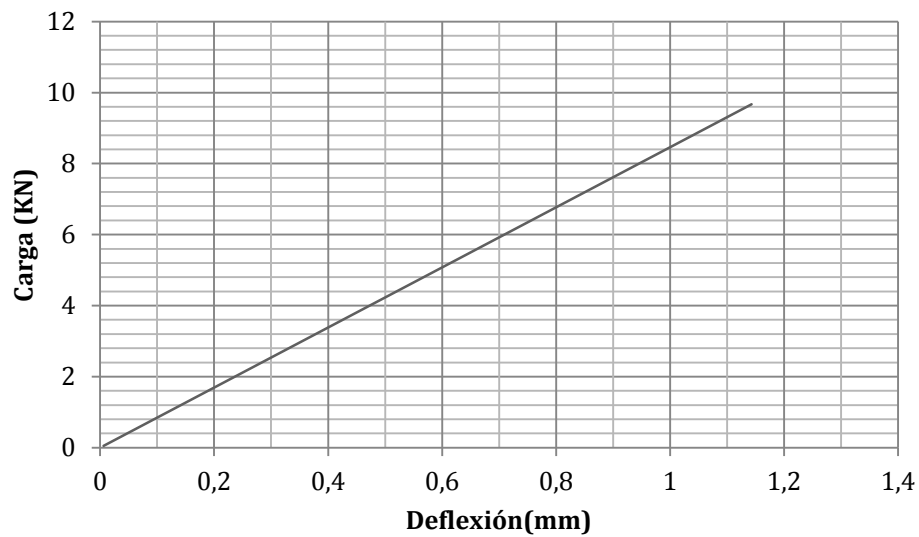


Figura 32: Diagrama de Carga vs Deflexión

Por medio de los LVDTs se obtuvo un desplazamiento máximo de 1.13 mm y por medio de la técnica DIC se obtuvo 7 pixeles, lo cual es igual a 1.85mm.

Análisis de deformaciones:

La deformación esperada en las vigas 1-8, se calcula por medio de las siguientes expresiones:

Dónde:

$$I = \frac{1}{12} 0.1 * 0.1^3 = 8.3 * 10^{-6} [m^4]; \quad E_c = 4700 * \sqrt{31} = 26168 [MPa]; \quad P_{\max} = 24 \text{ kN}$$

$$M = 12 \text{ kN} * 0.09 \text{ m} = 1.08 \text{ kN*m};$$

$$y = 0.05 [m] \text{ (distancia del eje neutro a la fibra más externa).}$$

Radio de curvatura:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (6)$$

Deformación a flexión:

$$\varepsilon = \frac{y}{\rho} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{M y}{E I} \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{1.08 * 10^3 \text{ N m} * (0.05 \text{ m})}{8.3 * 10^{-6} \text{ m}^4 * (26168 * 10^6 \text{ Pa})}$$

$$\varepsilon = 249 \mu\varepsilon$$

La máxima deformación en tensión que soporta el hormigón es:

Capacidad del hormigón a tensión:

$$f'_t = \frac{7.5}{12} \overline{f'_c} \quad (9)$$

Deformación a tracción: $\varepsilon = \frac{f'_t}{E_c} \quad (10)$

$$\varepsilon = \frac{3.4 \text{ MPa}}{26168 \text{ MPa}}$$

$$\varepsilon = 129 \mu\varepsilon$$

Viga 1:

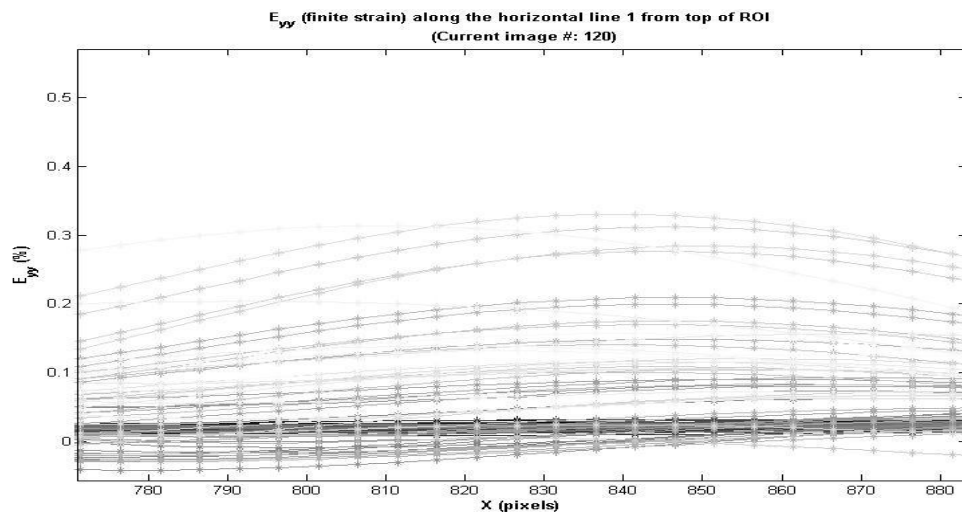


Figura 33: Resultado del Análisis DIC

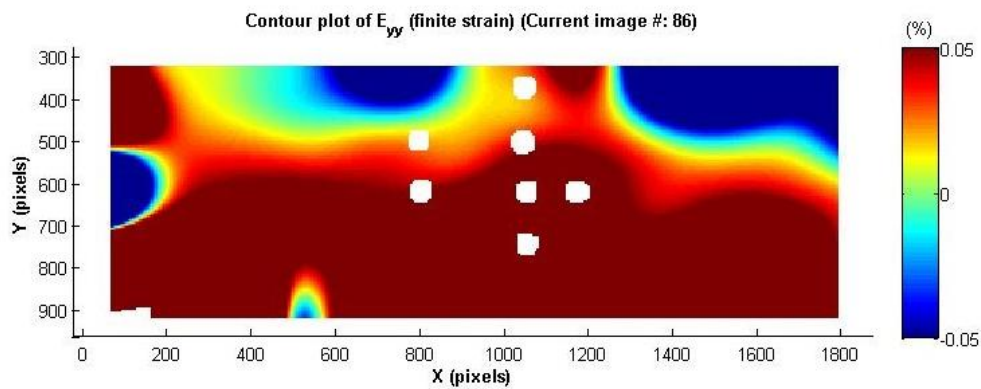


Figura 34: Campo de deformaciones

La Figura 33 nos muestra la variación de la deformación a lo largo de una línea horizontal ubicada en el extremo inferior del, donde el valor máximo de la deformación es de 0.003. El análisis del resultado se encuentra al final de esta sección, donde se explica porque no es posible obtener este valor. En Figura 34 se expone el campo de deformaciones, en el cual se puede apreciar las fibras en tensión (rojo) y las fibras en compresión (azul), la imagen tomada corresponde al instante donde la viga alcanza su máxima deflexión.

Viga 3:

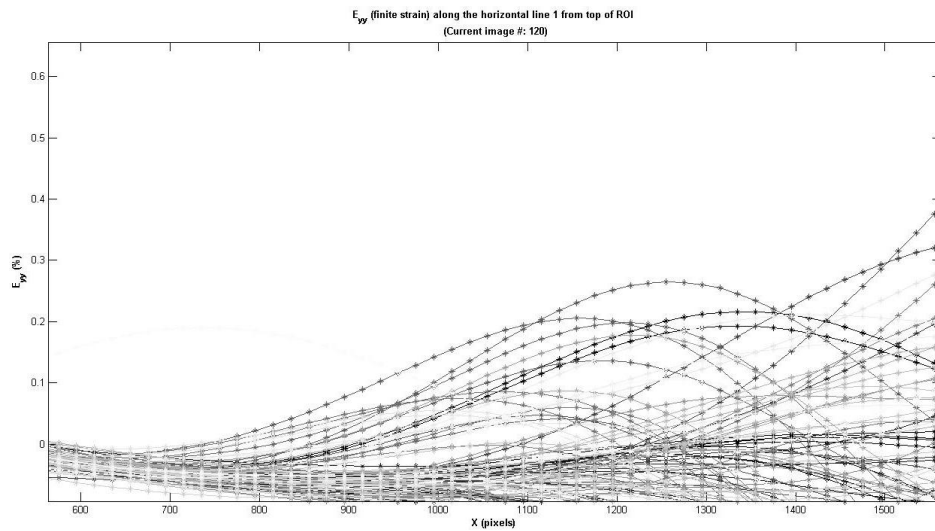


Figura 35: Resultado del Análisis DIC

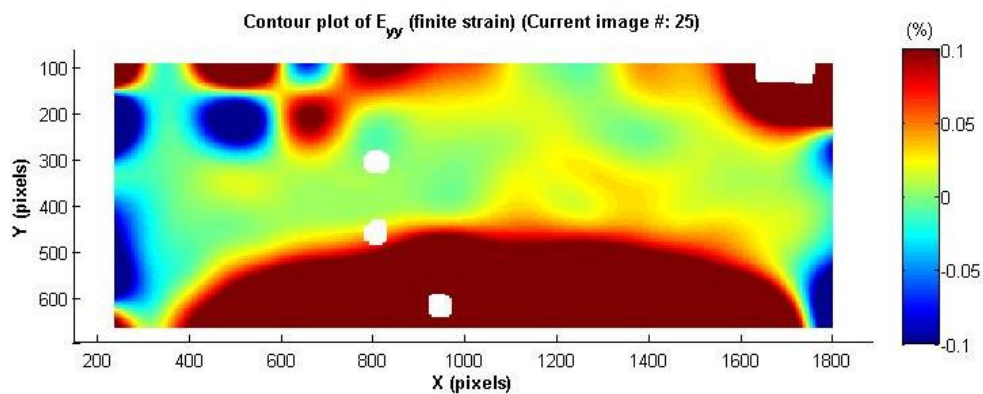


Figura 36: Campo de deformaciones

La Figura 35: Resultado del Análisis DIC muestra las deformaciones obtenidas por la correlación digital de imágenes, donde el valor máximo de la deformación es de 0.0039. En Figura 36 se expone el campo de deformaciones, en el cual se puede apreciar las fibras en tensión (rojo) y las fibras en compresión (azul), la imagen tomada corresponde al instante donde la viga alcanza su máxima deflexión.

Viga 4:

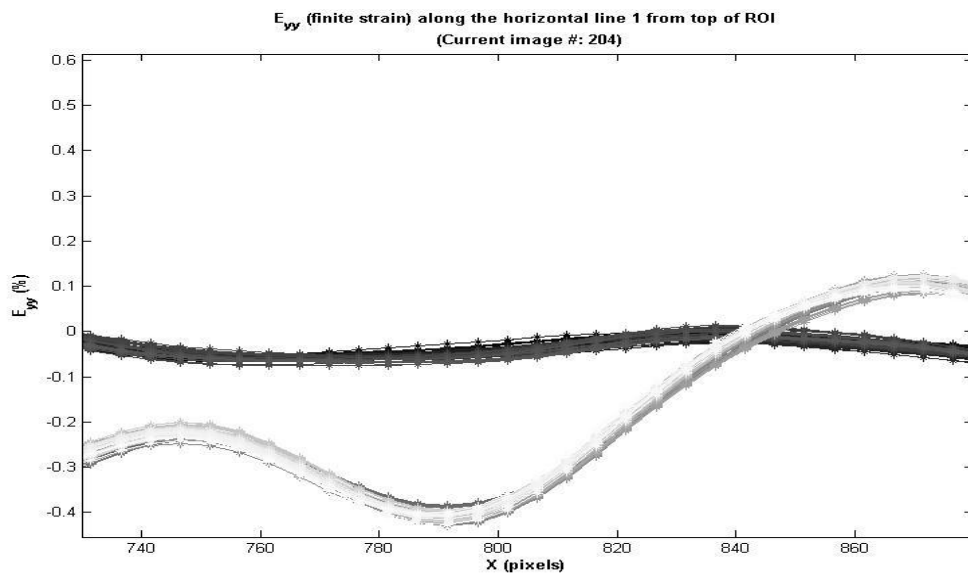


Figura 37: Resultado del Análisis DIC

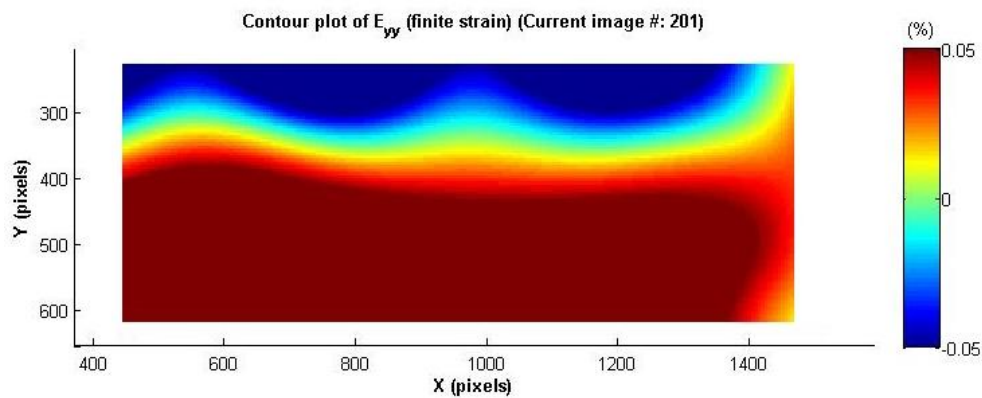


Figura 38: Campo de deformaciones

La Figura 37 muestra las deformaciones obtenidas por la correlación digital de imágenes, donde el valor máximo de la deformación es de 0.004. En Figura 38 se muestra el campo de deformaciones, en el cual se puede apreciar las fibras en tensión (rojo) y las fibras en compresión (azul), la imagen tomada corresponde al instante donde la viga alcanza su máxima deflexión.

Viga 5:

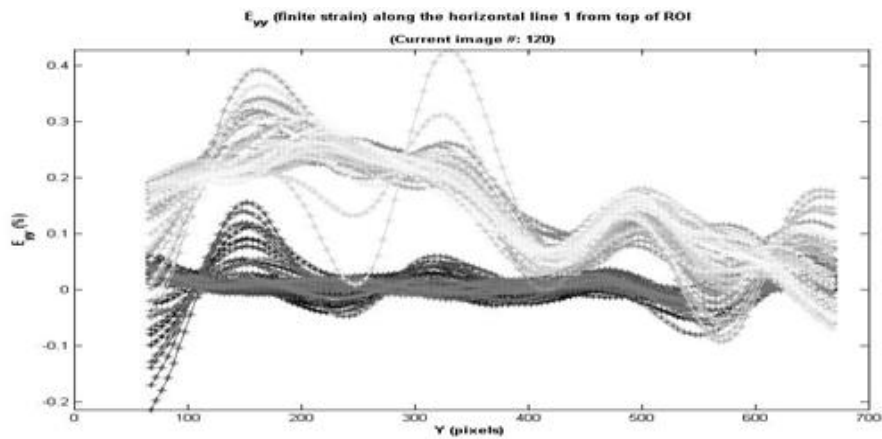


Figura 39: Resultado del Análisis DIC

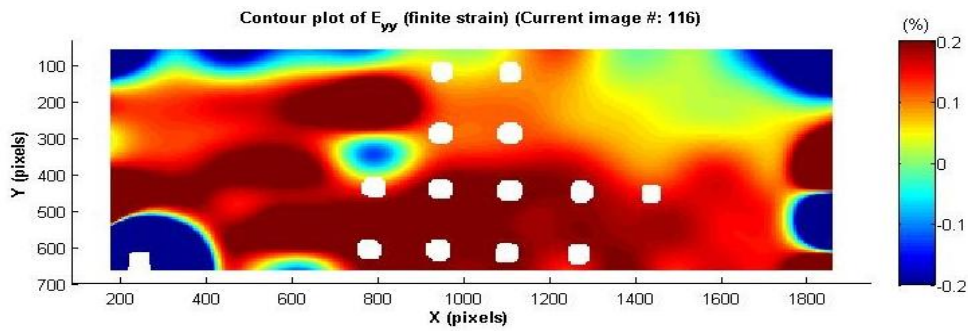


Figura 40: Campo de deformaciones

La Figura 39 muestra las deformaciones obtenidas por la correlación digital de imágenes, donde el valor máximo de la deformación es de 0.0043. En Figura 40 se muestra el campo de deformaciones, en el cual se puede apreciar las fibras en tensión (rojo) y las fibras en compresión (azul), la imagen tomada corresponde al instante donde la viga alcanza su máxima deflexión. La uniformidad del campo se ve afectada a la alta variación de las deformaciones (Figura 39) obtenidas por la técnica, debido a que no se obtuvo el contraste deseado para que exista una buena correlación y por lo tanto no se puede apreciar un comportamiento claro entre las fibras a compresión y tensión.

Viga 6:

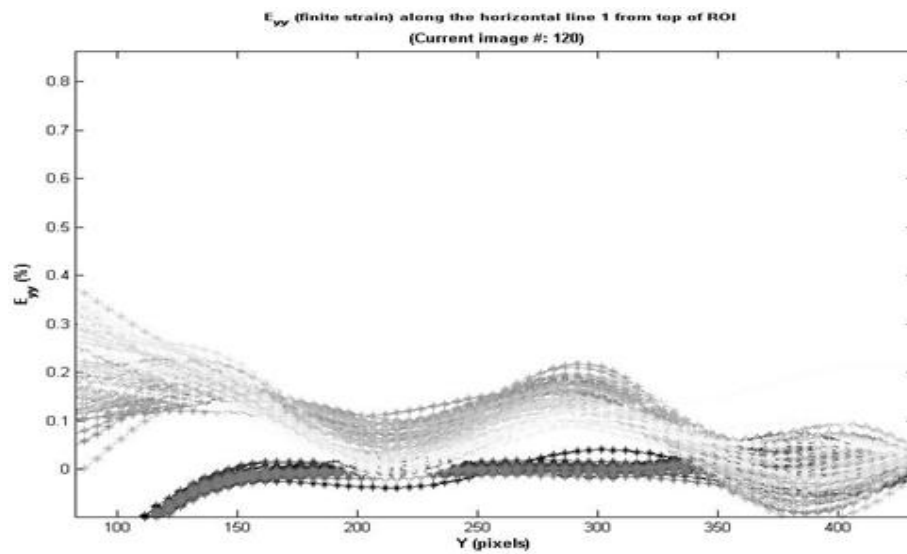


Figura 41: Resultado del Análisis DIC

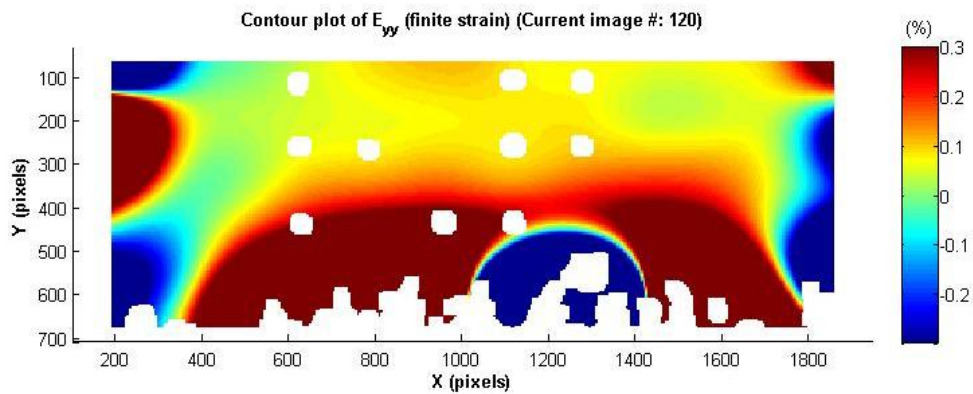


Figura 42: Campo de deformaciones

La Figura 41 muestra las deformaciones obtenidas por la correlación digital de imágenes, donde el valor máximo de la deformación es de 0.0038. En Figura 42 se muestra el campo de deformaciones, en el cual se puede apreciar las fibras en tensión (rojo) y las fibras en compresión (azul), la imagen tomada corresponde al instante donde la viga alcanza su máxima deflexión.

Viga 7:

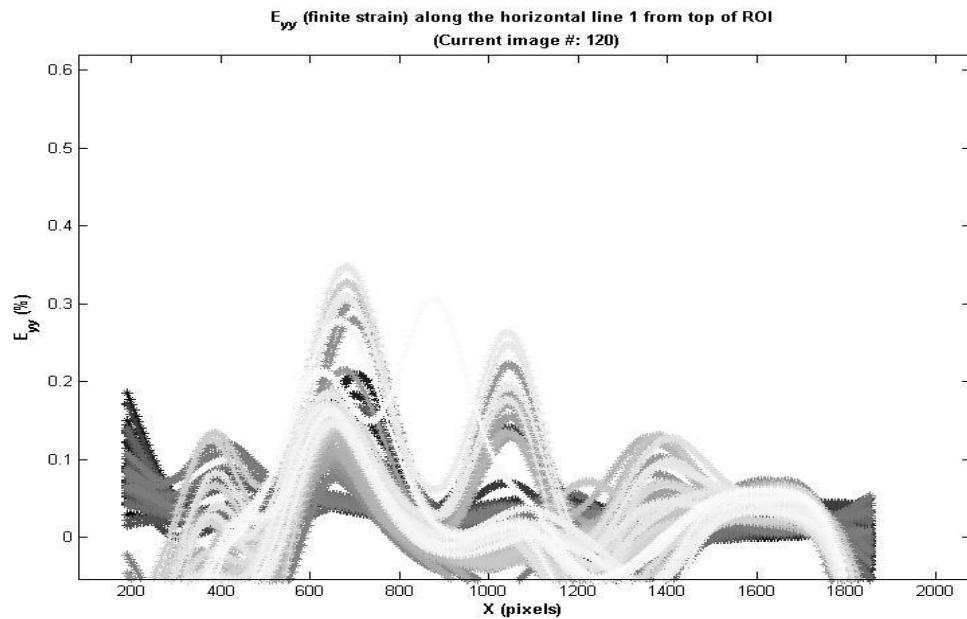


Figura 43: Resultado del Análisis DIC

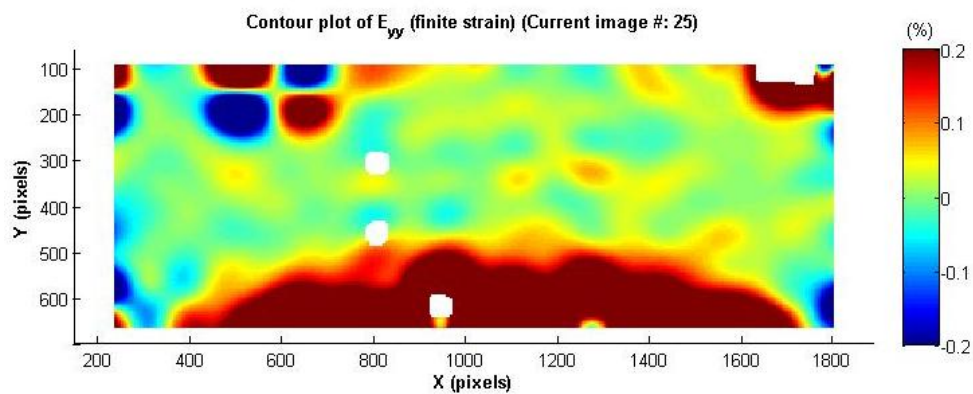


Figura 44: Campo de deformaciones

La Figura 43 muestra las deformaciones obtenidas por la correlación digital de imágenes, donde el valor máximo de la deformación es de 0.0038. En Figura 44 se muestra el campo de deformaciones, en el cual se puede apreciar las fibras en tensión (rojo) y las fibras en compresión (azul), la imagen tomada corresponde al instante donde la viga alcanza su máxima deflexión.

Viga 8:

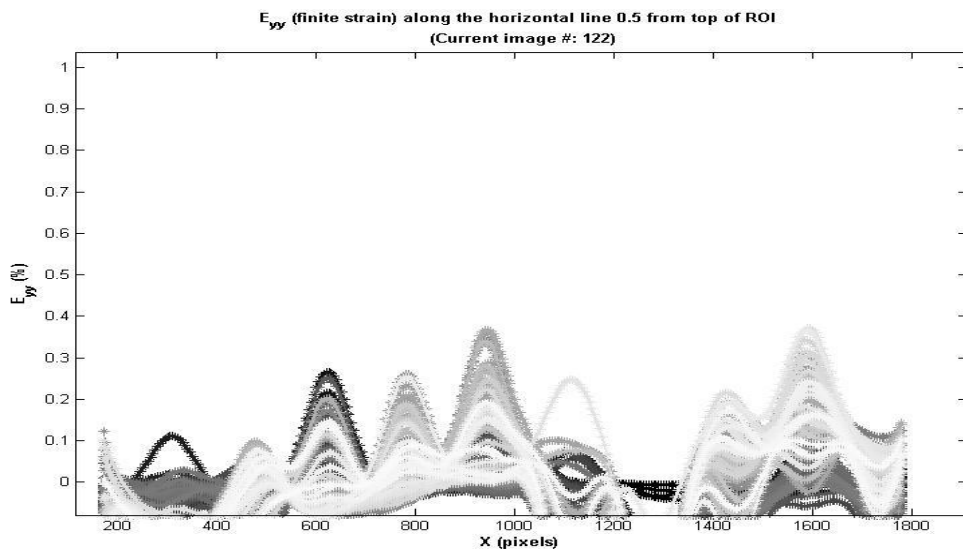


Figura 45: Resultado del Análisis DIC

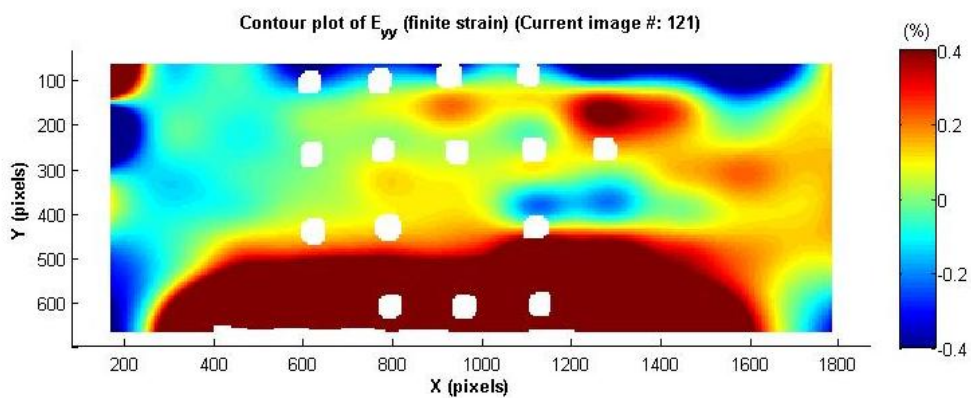


Figura 46: Campo de deformaciones

La Figura 45 muestra las deformaciones obtenidas por la correlación digital de imágenes, donde el valor máximo de la deformación es de 0.0038. En Figura 46 se muestra el campo de deformaciones, en el cual se puede apreciar las fibras en tensión (rojo) y las fibras en compresión (azul), la imagen tomada corresponde al instante donde la viga alcanza su máxima deflexión.

Viga 9:

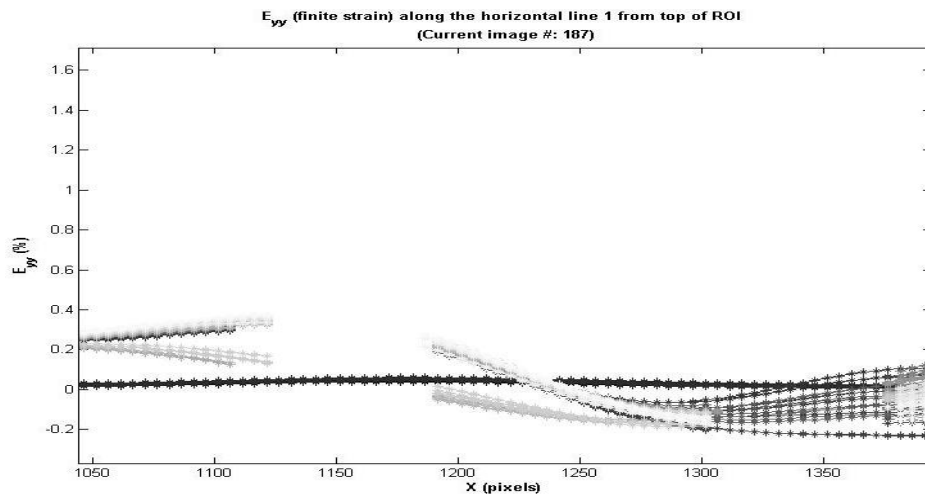


Figura 47: Resultado del Análisis DIC

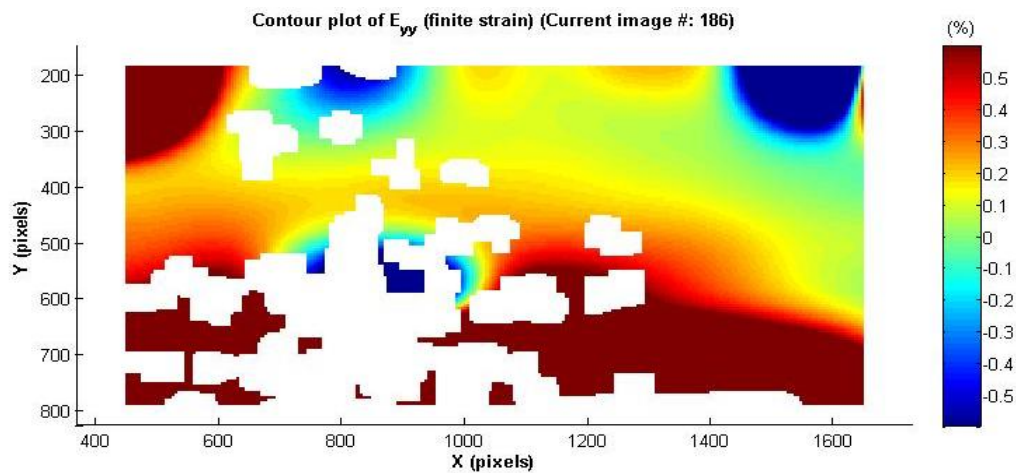


Figura 48: Campo de deformaciones

La Figura 47 muestra las deformaciones obtenidas por la correlación digital de imágenes, donde el valor máximo de la deformación es de 0.0038. En Figura 48 se expone el campo de deformaciones, en el cual se puede apreciar las fibras en tensión (rojo) y las fibras en compresión (azul), la imagen tomada corresponde al instante donde la viga alcanza su máxima deflexión. Las zonas donde aparecen los espacios en blanco se producen debido a la mala correlación de las imágenes, ya que en esa zona se pidió información al no obtener un buen contraste, por esta razón se produce los espacios en blanco tanto en el análisis de deflexiones Figura 47 como en el campo de deformaciones Figura 48.

Las vigas de hormigón sin refuerzo por medio de la técnica DIC alcanzaron deformaciones entre 0.3%-0.43%. Esto quiere decir que no es posible alcanzar estos valores, ya que estamos analizando las fibras en tensión y estas deformaciones son esperadas cuando el hormigón se encuentra a compresión. Los resultados finales de las deformaciones obtenidas en cada uno de los especímenes analizados por medio de la técnica DIC fueron mayores a los obtenidos por el cálculo, por esta razón la aplicación de la técnica con los instrumentos y código utilizados, no fue posible llegar al valor de las deformaciones reales que sufre la estructura. Las fotografías empleadas para el análisis fueron de 1920 x 1080 píxeles, por lo que se identifica la necesidad de utilizar una cámara digital que otorgue fotografías con un mayor número de píxeles y así llegar a resultados más precisos. Además, el código utilizado no ha permitido encontrar valores coherentes con el estudio, por lo que se requiere cambiar de programa de modo que se pueda obtener los resultados esperados.

Análisis en arcos de hormigón armado:

Para el análisis en arcos de hormigón se lo realizó en 3 zonas sobre las cuales se colocó el mallado como se muestra en la Figura 49 y Figura 50. La distancia entre los puntos del mallado fue de 1.3 mm el área del sub-conjunto o sub-imagen de 5.5 mm x 5.5 mm.

Para el análisis en arcos de hormigón se lo realizó en 3 zonas sobre las cuales se colocó el mallado como se muestra en la Figura 49 y Figura 50. La distancia entre los puntos del mallado fue de 1.3 mm el área del sub-conjunto o sub-imagen de 5.5 mm x 5.5 mm.

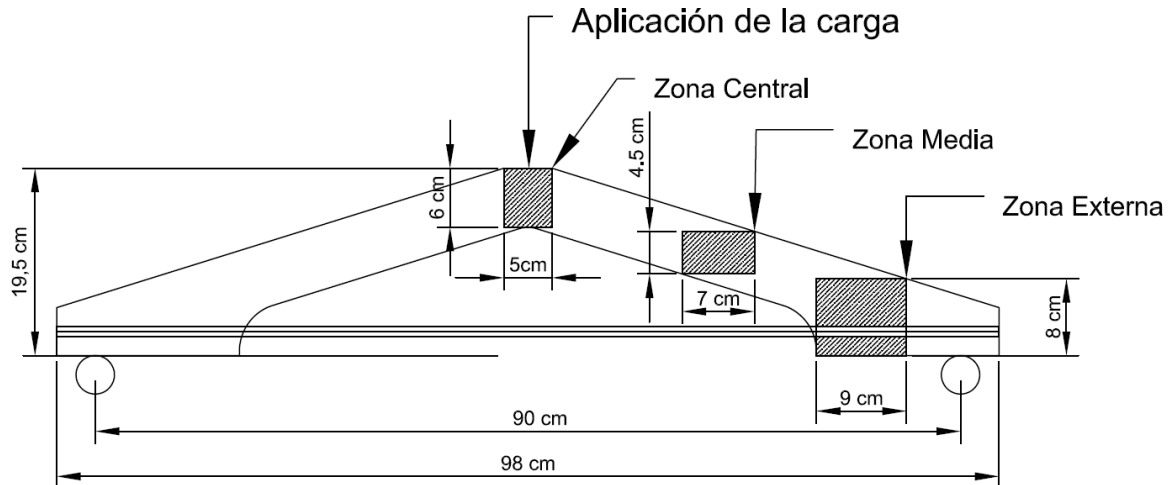


Figura 49: Zonas de estudio en el arco 1

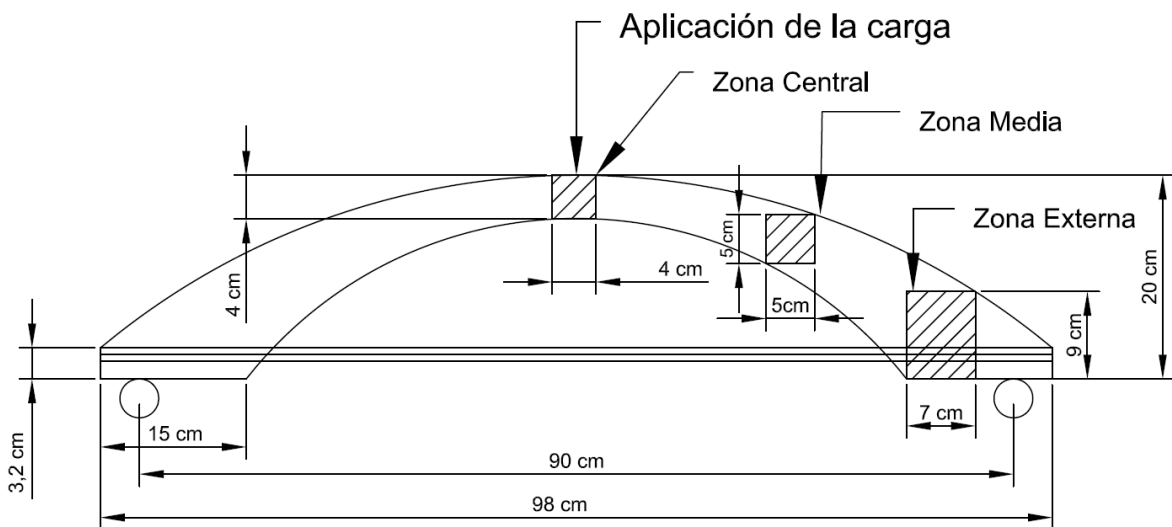


Figura 50: Zonas de estudio en el arco 2

Análisis de deflexiones:

El análisis de deflexiones en cada arco se lo realizó únicamente en la zona central debido a que fue el único lugar donde se colocó los deformímetros. La medición de deflexiones con deformímetros no se mantuvo hasta la ruptura para evitar daños en los equipos de medición, por lo que la comparación entre los resultados obtenidos con

los deformímetros y la técnica DIC se lo hace hasta el momento en el cual se retiraron los mismos, además por medio de la técnica DIC se obtuvo las deflexiones finales de cada uno de los arcos.

Los siguientes resultados son mediciones en el centro de los arcos, debido a que los deformímetros fueron colocados en el centro del espécimen.

Arco 1:

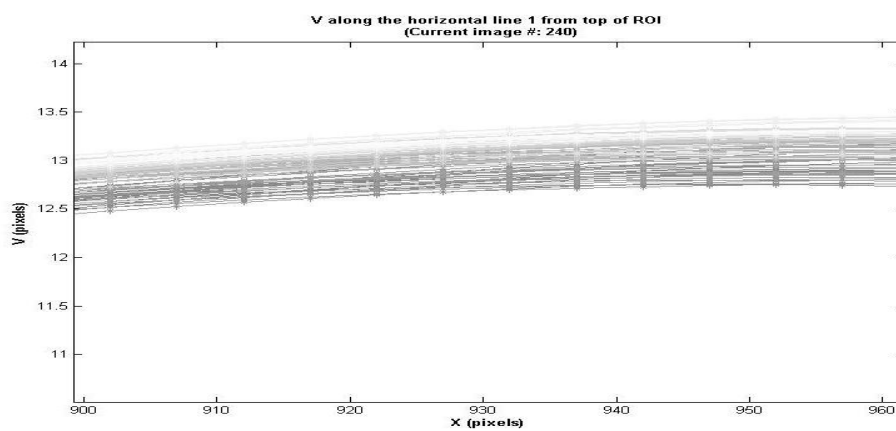


Figura 51: Resultado del Análisis DIC hasta el momento de medición de los deformímetros

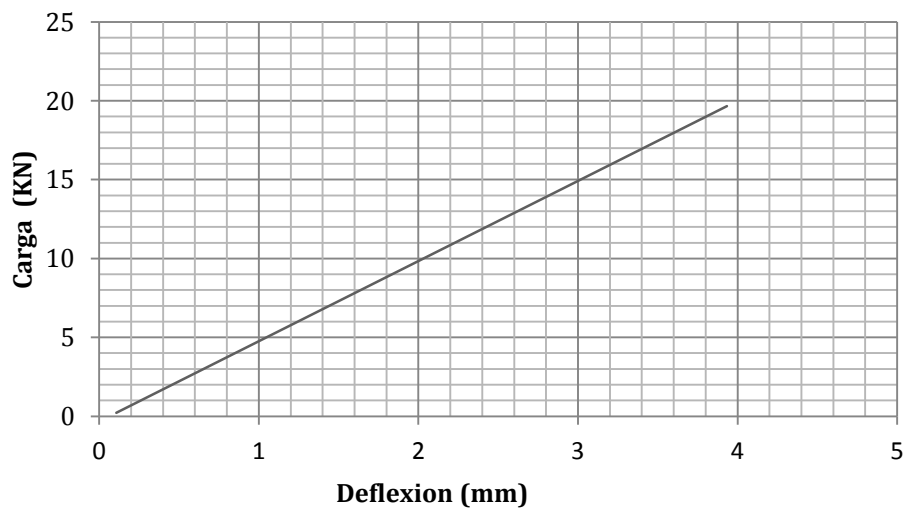


Figura 52: Diagrama de Carga vs Deflexión

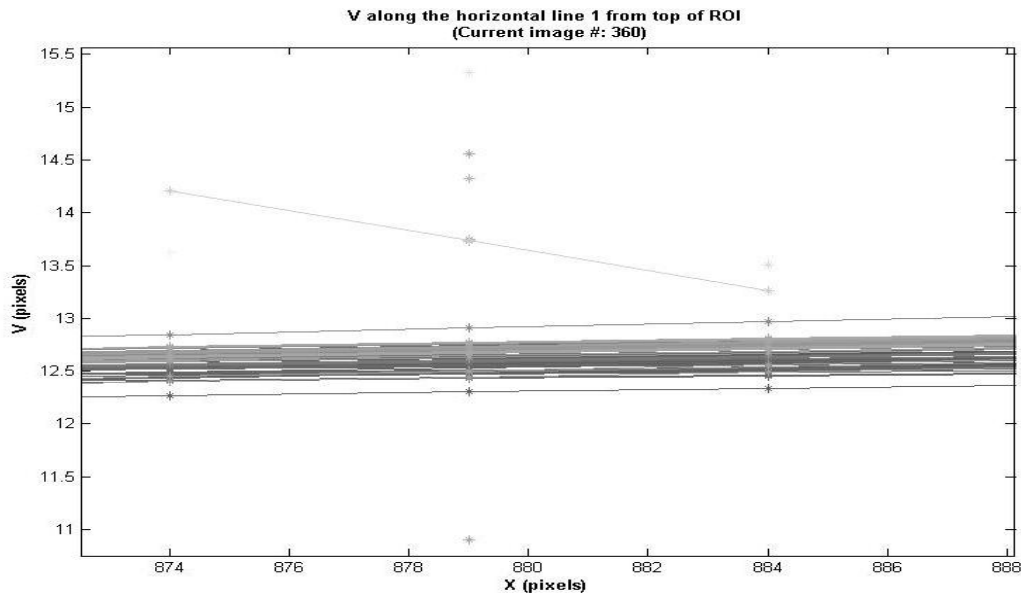


Figura 53: Resultado del análisis DIC hasta su falla

La Figura 51 muestra la deflexión obtenida por la técnica DIC hasta el instante de medición de los deformímetros, el resultado fue igual a 13.5 píxeles, lo cual es igual a 3.57 mm. Por medio de los deformímetros la deflexión máxima fue de 3.93 mm. Finalmente en la Figura 53 se muestra la deflexión máxima obtenida por la técnica DIC, la misma que es igual a 15.4 píxeles o 4.07 mm.

Arco 2:

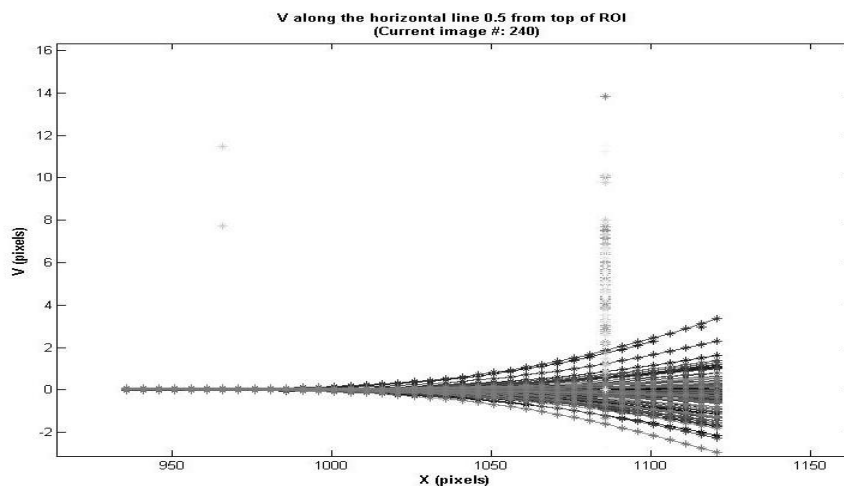


Figura 54: Resultado del Análisis DIC hasta el momento de medición de los deformímetros

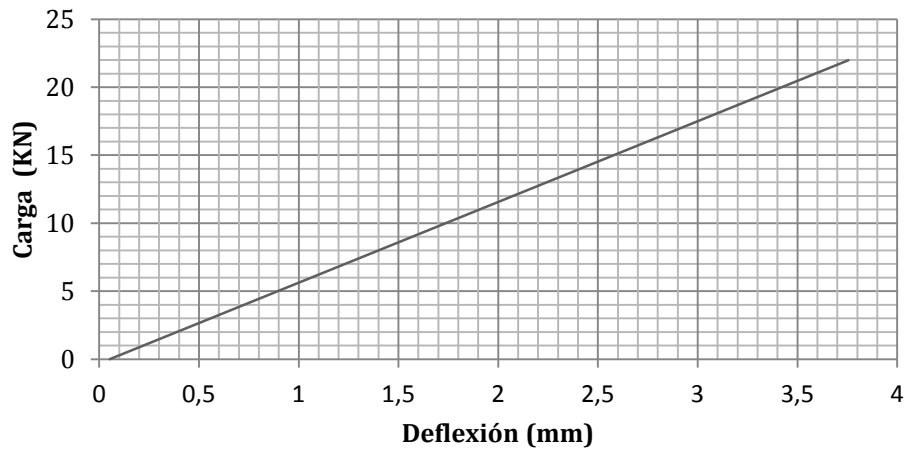


Figura 55: Diagrama de Carga vs Deflexión

La Figura 54 muestra la deflexión obtenida por la técnica DIC hasta el instante de medición de los deformímetros, el resultado fue igual a 14 píxeles, lo cual es igual a 3.70 mm. En la Figura 55 se puede apreciar el diagrama de carga vs deformación, donde la deflexión máxima fue de 3.75 mm.

Debido a la mala correlación de imágenes provocadas por el movimiento de la cámara en la parte final del ensayo no fue posible obtener la deflexión final del espécimen, ya que el cambio en el ángulo de enfoque genera resultados erróneos a los captados en el estado inicial de referencia.

Análisis de deformaciones:

La deformación esperada en los arcos de hormigón armado, se calcula por medio de las siguientes expresiones:

Dónde:

$$E_f = 54100; E_c = 4750 * \sqrt{55} = 35226 \text{ [MPa]}; P_{\max} = 37,67 \text{ kN}$$

$$M = 37,67 \text{ kN} * 0,45 \text{ m} = 16,95 \text{ kN*m.}$$

$$d = 168 \text{ mm}$$

Ecuación para encontrar el momento interno

$$M = A_f * \varepsilon_f * E_f * d - K * c \quad (11)$$

Compatibilidad de deformaciones

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} * \frac{d - c}{c} \quad (12)$$

Ecuación de equilibrio (T=C)

$$A_f * f_f = \beta_1 * f_c * b * c \quad (13)$$

$$A_f * \varepsilon_f * E_f = \beta_1 * (\varepsilon_c * E_c) * b * c$$

Por medio de diagrama de Thorenfeldt se calculó el momento interno del espécimen, donde el valor de c se lo obtuvo por la ecuación de equilibrio. Con el valor de c se realizó la iteración para encontrar la deformación producida en el hormigón al aplicarse un momento de 16,95 kN*m. La deformación en el hormigón es de:

$$\varepsilon_{cu} = 0.001975$$

Debido a que no se obtuvo la curva de esfuerzo vs deformaciones en los cilindros provenientes de la mezcla de hormigón con la cual se hizo los especímenes, no es posible comparar los resultados de las deformaciones máximas a compresión del hormigón utilizado, con los de la técnica DIC.

Arco 1 zona central:

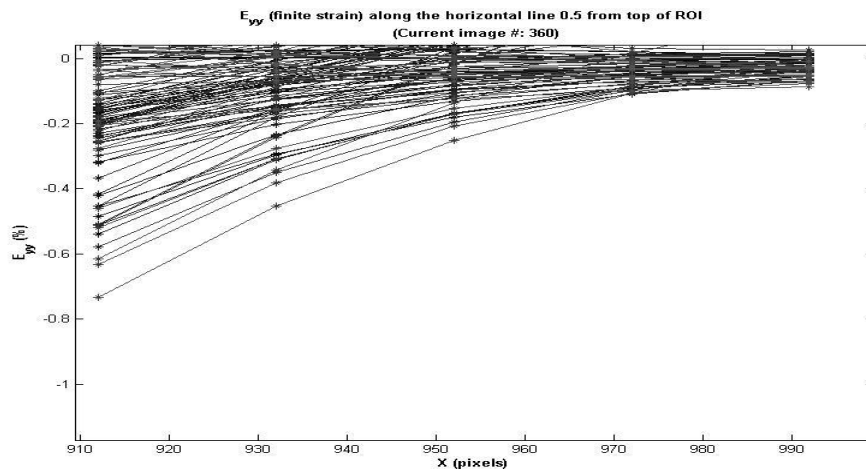


Figura 56: Resultado del Análisis DIC

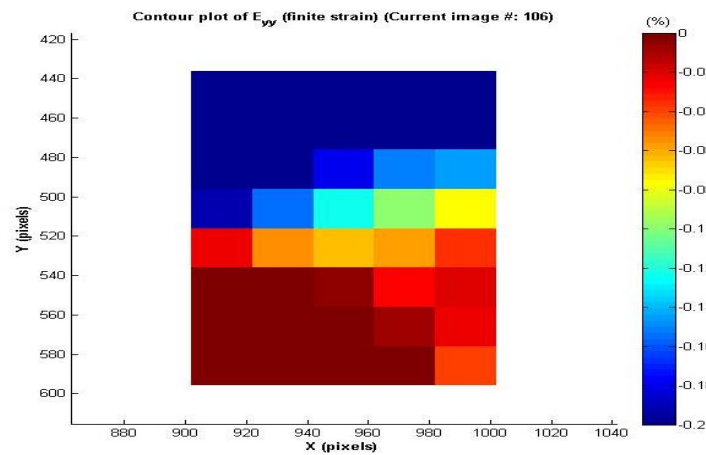


Figura 57: Campo de deformaciones

La Figura 56 muestra las deformaciones obtenidas por la correlación digital de imágenes, donde el valor máximo de la deformación es de -0.006. Esto nos indica que toda la zona se encuentra a compresión y es donde se concentra la mayor deformación de toda la estructura.

En Figura 57 se muestra el campo de deformaciones, en el cual se puede apreciar las fibras de color azul que se encuentran en la parte superior de la zona analizada son zonas de mayor compresión, mientras que en la parte inferior se observa las fibras de menor compresión en color rojo.

Arco 1 zona media:

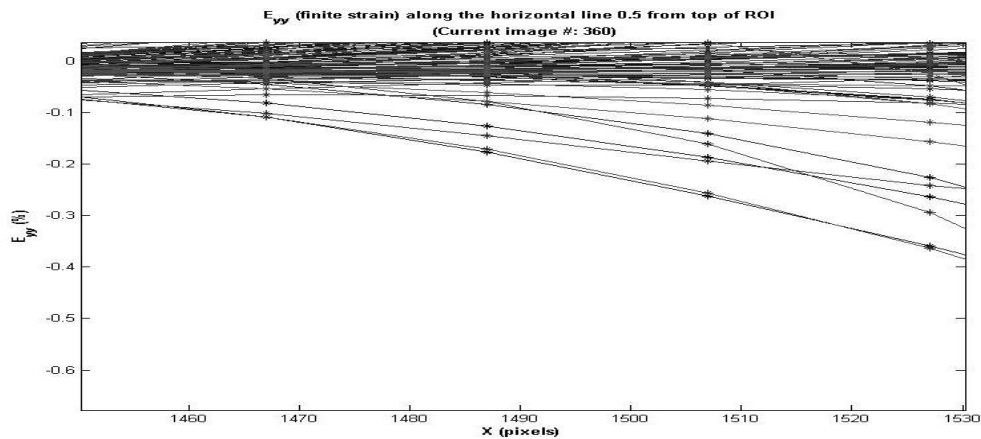


Figura 58: Resultado del Análisis DIC

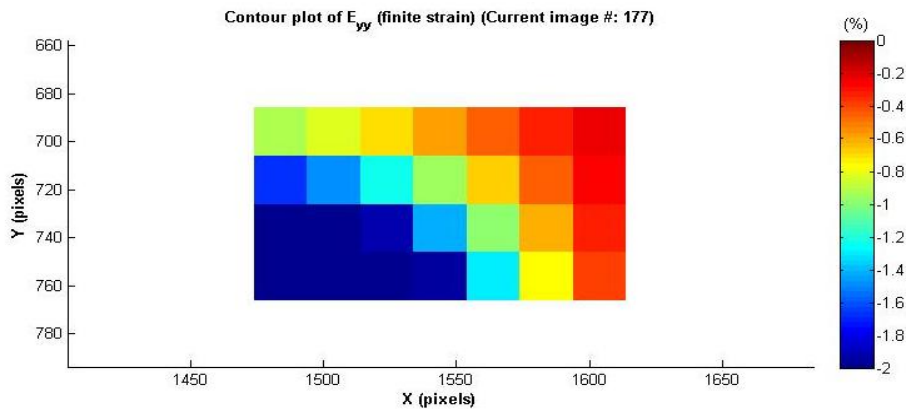


Figura 59: Campo de deformaciones

La Figura 58 muestra las deformaciones obtenidas por la correlación digital de imágenes, donde el valor máximo de la deformación es de -0.0038 . Toda el área analizada está a compresión.

En Figura 59 se muestra el campo de deformaciones, en el cual se puede apreciar las fibras de color azul que se encuentran en la parte izquierda del área analizada son

zonas de mayor compresión, mientras que en la sección derecha se observa las fibras de menor compresión en color rojo.

Arco 1 zona externa:

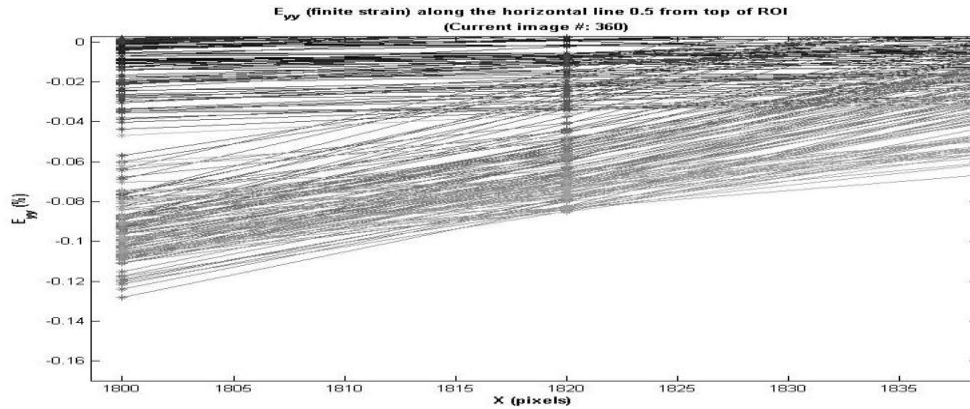


Figura 60: Resultado del Análisis DIC

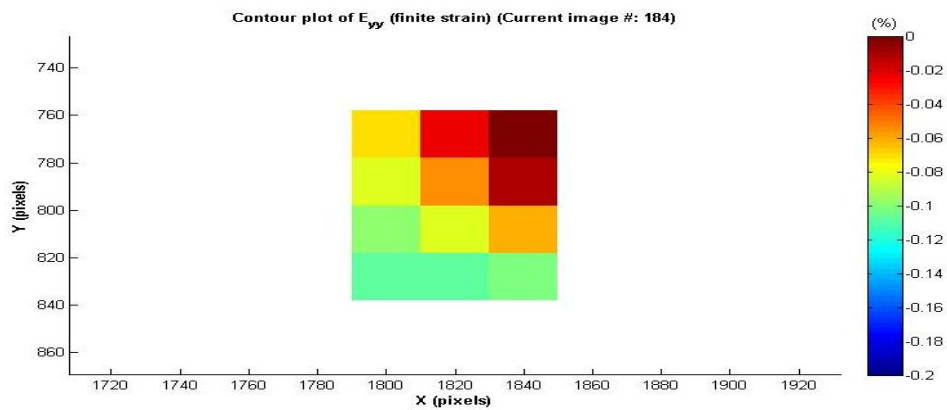


Figura 61: Campo de deformaciones

La Figura 60 muestra las deformaciones obtenidas por la correlación digital de imágenes, donde el valor máximo de la deformación es de -0.0012. Toda el área analizada se encuentra a compresión.

En Figura 61 se muestra el campo de deformaciones, en el cual se puede apreciar las fibras de color verde que se encuentran en la parte inferior del área analizada son zonas de mayor compresión, mientras que en la sección superior se observa las fibras de menor compresión en color rojo y rojo oscuro.

Arco 2:

Por las razones previamente explicadas sobre a la mala calidad de las imágenes obtenidas al final del video, en este arco no se pudo obtener el valor de las deformaciones reales y el único resultado obtenido fue la forma del campo de deformaciones.

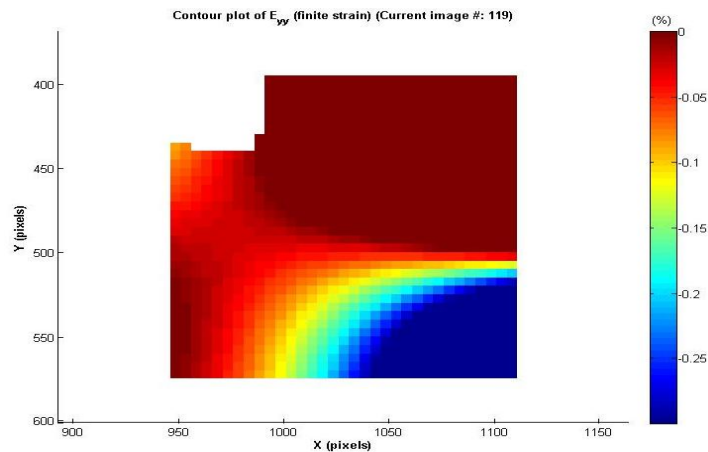


Figura 62: Campo de deformaciones zona central

En Figura 62 se muestra el campo de deformaciones, en el cual se puede apreciar las fibras de color azul que se encuentran en la parte inferior del área analizada son zonas de mayor compresión, mientras que en la sección superior se observa las fibras de menor compresión en color rojo y rojo oscuro.

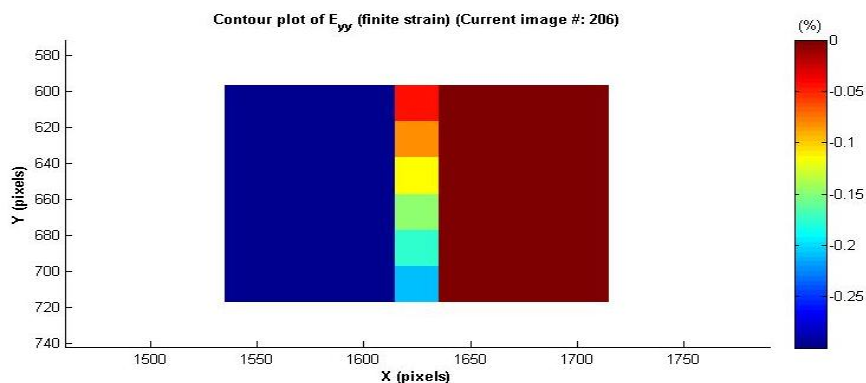


Figura 63: Campo de deformaciones zona media

En la Figura 63 se muestra el campo de deformaciones, en el cual se puede apreciar las fibras de color azul que se encuentran en la parte izquierda del área

analizada son zonas de mayor compresión, mientras que en la sección superior se observa las fibras de menor compresión en color rojo y rojo oscuro.

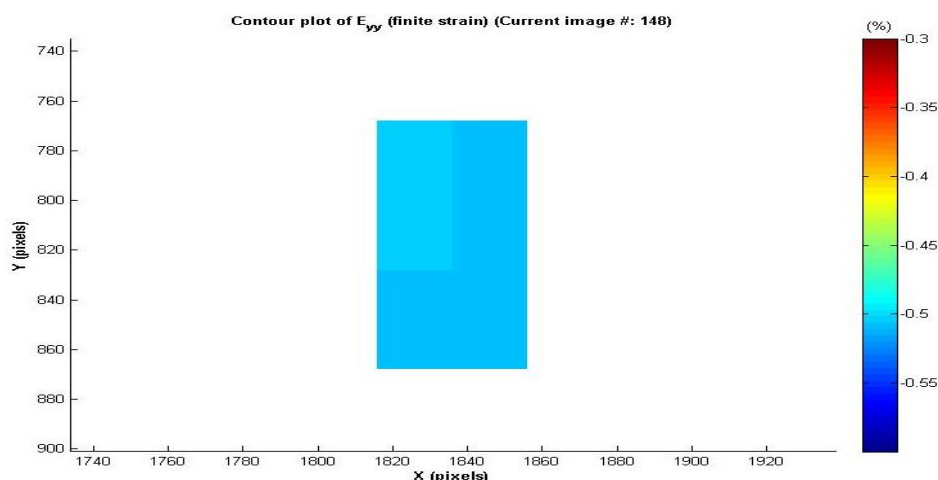


Figura 64: Campo de deformaciones zona externa

En Figura 64 se muestra el campo de deformaciones, en el cual se puede apreciar las fibras de color celeste que se encuentran en la parte inferior del área analizada son zonas de mayor compresión, mientras que en la sección superior se observa las fibras de menor compresión en color celeste claro.

Los arco de hormigón armado por medio de la técnica DIC alcanzaron deformaciones entre 0.12%-0.6%. Al comparar el resultado estimado por medio del cálculo realizado y el obtenido por la técnica DIC en la zona central podemos observar que existe una variación del 25 % ,por esta razón la aplicación de la técnica con los instrumentos y código utilizados, no fue posible llegar al valor de las deformaciones reales que sufre la estructura. Las fotografías empleadas para el análisis fueron de 1920 x 1080 pixeles, por lo que se identifica la necesidad de utilizar una cámara digital que otorgue fotografías con un mayor número de pixeles y de esta manera llegar a resultados más precisos. Sin embargo los resultados demuestran que la técnica tiene menor porcentaje de error cuando se analiza estructuras con desplazamientos mayores.

Para evitar errores que conlleven a la mala correlación en las imágenes, es importante sujetar adecuadamente la cámara con el objetivo de no sufrir movimiento

durante el ensayo, ya que el ángulo de enfoque no puede cambiar durante el mismo porque se altera la correlación con respecto al estado no deformado o de referencia de la estructura.

Sesgos del estudio:

El porcentaje de error de las deflexiones entre nuestro valor referencial, medido por los deformímetros, y el obtenido por la técnica DIC para cada una de las estructuras analizadas es el siguiente:

Tabla 3: Resumen de las deflexiones obtenidas con ambos métodos en vigas de hormigón sin refuerzo de dimensiones iguales y porcentaje de error.

Espécimen	Deflexión LDVTs (mm)	Deflexión técnica DIC (píxeles)	Deflexión técnica DIC (mm)	% de error
viga 1	0,328	1,23	0,33	0,9
viga 4	0,964	2,3	0,61	58,6
viga 5	0,964	3,8	1,01	4,1
viga 6	0,961	4,6	1,22	21,0
viga 7	0,738	4,2	1,11	33,5
viga 8	0,747	3	0,79	5,8
			Promedio	20,7
			Desviación estándar	22,300034
			Coficiente de variación	1,079862

Tabla 4: Deflexiones obtenidas con ambos métodos en viga de hormigón sin refuerzo y porcentaje de error.

Espécimen	Deflexión LDVTs (mm)	Deflexión técnica DIC (píxeles)	Deflexión técnica DIC (mm)	% de error
viga 9	1,13	7	1,85	38,9

Dado que las primeras 8 vigas tuvieron la misma geometría y fueron realizadas con la misma mezcla de hormigón, se obtuvo el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación del porcentaje de error encontrado entre los 2 métodos utilizados para la medición de deflexiones, sin embargo como muestra la variación que existe en la mayoría de las vigas estimadas es mayor al 5%, por lo que se consigue un coeficiente de variación de 107%. Estos resultados demuestran que el método empleado en el estudio no es el adecuado para el análisis de deflexiones en vigas de hormigón sin refuerzo, ya que no se tiene el refuerzo para que trabaje a tracción las deflexiones máximas son muy pequeñas.

En la Tabla 4 se muestra el resultado de las deflexiones obtenidas en la viga 9, la misma que tiene una geometría distinta a las demás y por lo tanto no es posible comparar el porcentaje de error obtenido con el de las 8 primeras vigas. En este espécimen también se evidencia el alto porcentaje de error obtenido, ya que de igual forma que en las primeras vigas se trabajó con hormigón sin refuerzo.

Para conseguir mayor precisión en los resultados es recomendable aplicar la técnica con imágenes de mayor resolución. Dado que en estudios como el de Benard Otieno OMONDI en 2015, se ha utilizado imágenes con una resolución de 2452 x 2056 píxeles.

Tabla 5: Resumen de las deflexiones obtenidas con ambos métodos en arcos de hormigón armado y porcentaje de error.

Espécimen	Deflexión LDVTs (mm)	Deflexión técnica DIC (píxeles)	Deflexión técnica DIC (mm)	% de error
Arco 1	3,93	13,5	3,57	10,1
Arco 2	3,75	14	3,70	1,4

Los resultados del análisis de deflexiones para arcos de hormigón armado son mostrados por la Tabla 5, aquí se puede observar que el porcentaje de error máximo es de 10.1%, debido a que la variación entre los resultados medidos por los 2 métodos no

es muy grande, sin embargo no es posible comparar los porcentajes de error ya que las geometrías y las dimensiones de los arcos son diferentes. En estos especímenes la aplicación la técnica DIC tiene mejores resultados y esto se debe a que las deflexiones son mayores que en las vigas de hormigón sin refuerzo, lo que nos indica que el método aplicado en este estudio nos da mayor presión al momento de analizar desplazamiento mayores, no obstante se requiere de un mayor número de ensayos para poder concluir si es recomendable utilizar la técnica en el análisis de deflexiones para estructuras de hormigón armado.

Importancia del estudio.

Con los resultados obtenidos a lo largo del estudio se pudo identificar que problemas presentó la técnica y donde se obtuvieron mejores resultados. Se identifica claramente que al estudiar el comportamiento de vigas de hormigón sin refuerzo es necesario trabajar con imágenes que tengas un mayor número de píxeles y con otro software, de esta manera se recomienda que en estudios posteriores se tome en cuenta estos factores desde el inicio, con la intención de obtener resultados con un porcentaje de error que se encuentre dentro de los límites aceptables.

Durante el estudio se confirmó que el método aplicado responde de mejor manera al analizar desplazamientos mayores, como es el caso de los arcos de hormigón armado, en los cuales el porcentaje de error disminuyó considerablemente. De tal modo que se identifica el potencial que tiene la técnica para el análisis de estructuras.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES (CAPITULO 5)

Este estudio consistió en el análisis de deflexiones y deformaciones por medio del método de correlación digital de imágenes, para lo cual se realizó en el laboratorio 9 vigas de hormigón, donde la resistencia a la compresión de dicho hormigón fue de 31 MPa y 2 arcos de hormigón armado con una resistencia a la compresión de 55 MPa y un esfuerzo ultimo de 435 MPa de la varilla de refuerzo. Antes del ensayo se pintó cada uno de los especímenes de blanco y se colocó stickers circulares cada 1 cm para obtener un mejor contraste en las imágenes.

Se ensayó cada uno de los especímenes a los 28 días, para de esta manera alcanzar la máxima resistencia a la compresión del hormigón. Durante los ensayos se proporcionó la iluminación adecuada, se ubicó la cámara digital en el centro de la cara expuesta a flexión y se colocó los deformímetros para medir la deflexión. Al finalizar cada ensayo se procedió a obtener la fotografías de la filmación, en el estudio se trabajó con 60 cuadros por segundo y una resolución de imágenes de 1920 x 1080 pixeles.

Las imágenes fueron analizadas por el código de Matlab bajo los parámetros previamente explicados para obtener como resultado la deflexión, la deformación y el campo de deformaciones de cada uno de los especímenes estudiados.

Las deflexiones encontrados con la técnica DIC fueron comparados con las medidas por los deformímetros y de esta manera se calculó el porcentaje de error existente. Los resultados en vigas de hormigón sin refuerzo demostraron que el método empleado en el estudio no es el adecuado al tener un porcentaje de error que varía entre 0.9% y 58%. Por otro lado los resultados del análisis de deflexiones para arcos de hormigón armado muestran un porcentaje de error máximo es de 10.1%, debido a que la variación entre los resultados medidos por los 2 métodos no es muy grande, sin embargo no es posible comparar los porcentajes de error pues las geometrías de las

dimensiones de los arcos son diferentes. En estas estructuras la aplicación la técnica DIC tiene mejores resultados y esto se debe a que las deflexiones son mayores que en las vigas de hormigón sin refuerzo, por lo que se puede concluir que el método aplicado en este estudio nos da mayor presión al momento de analizar desplazamiento mayores, no obstante se requiere de un mayor número de ensayos para poder concluir si es recomendable utilizar la técnica en el análisis de deformaciones para estructuras de hormigón armado.

Las deformaciones por medio de la técnica DIC alcanzaron valores entre 0.3%-0.43% en vigas de hormigón sin refuerzo, sin embargo no es posible llegar a estos valores, debido a que las fibras analizadas se encontraban en tensión y estos resultados solo son posible en compresión. Por esta razón se concluye que con el método aplicado no es posible llegar al valor de las deformaciones reales que sufre la estructura, además las deformaciones no fueron obtenidas in situ, impidiendo así la comparación de los resultados obtenidos. Por otra parte los arcos de hormigón armado por medio de la técnica DIC alcanzaron deformaciones entre 0.12%-0.6% a compresión. Al comparar el resultado estimado por el cálculo realizado y el obtenido por la técnica DIC en la zona central podemos observar que existe una variación del 50 %, de tal manera que con la metodología aplicada no es posible llegar al valor real de las deformaciones.

Debido a la variación existen en los resultados del estudio se recomienda utilizar cámaras digitales que proporcionen fotografías con una resolución mayor a la utilizada en el estudio, ya que aumentado el número de píxeles la correlación digital de imágenes es más precisa. Es recomendable aumentar el número de cuadros por segundo, de tal manera que se pueda captar la falla en un mayor número de fotografías, esto ayudará a tener más precisión al momento de encontrar las deflexiones y deformaciones máximas como la presión alcanzada en los estudios de E. López-Alba et al., 2010, donde se

obtuvo resultados de 0.01 pixeles de precisión en medidas de desplazamientos y 0.01% para deformaciones. Finalmente, debido a las limitaciones que tiene el software utilizado, se sugiere utilizar otro programa para el análisis de deformaciones.

REFERENCIAS:

- Beer, F, Johnston. E, Dewolf. J, Mazurek. D.(2010). *Mecánica de Maeriales*. Mexico: McGraw-Hill.
- Bolivar. O. (2003). *Diseño a Cortante*. Universidad Nacional De Colombia. Cursos Virtuales.
- Dost. M, Rummmler. N, Kieselstein. E, Erb. R, Hillmann. V, Großer. V. (1999) Correlation analysis at grey scale patterns in an in-situ measuring module for microsystem technology. *Materials mechanics –Fracture mechanics – micromechanics*, (eds.) T Winkler, A Schubert, Berlin/Chemnitz, 259–266.
- Dost. M, Vogel. D, Winkler. T, Vogel. J, Erb. R, Kieselstein. E. (2003) How to detect cross correlation algorithms in digitized video images for object identification, movement evaluation and deformation analysis. *Proceedings of SPIE Vol. 5048, Nondestructive Detection and Measurement for Homeland Security (USA: Bellingham, WA)*.
- Grant. B, Stone. H, Withers. P, Preuss. M. (2009). High-temperature strain field measurement using digital image correlation. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* May 1, 2009 vol. 44 no. 4 263-271.
- Hosseini. A, Mostofinejad. D and Hajjalilue-Bonab. M. (2014). Displacement and Strain Field Measurement in Steel and RC Beams Using Particle Image Velocimetry. *American Society of Civil Engineers*.
- Kozicki. J, Tejchman. J.(2007). Experimental Investigations of Strain Localization in Concrete using Digital Image Correlation (DIC) Technique. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*. Vol. 54 (2007), No. 1, pp. 3-24.
- Küntz. M, Jolin. M, Bastien. J, Perez. F, and Hild. F.(2006). Digital image correlation analysis of crack behavior in a reinforced concrete beam during a load test. *Canadian journal of civil engineers*. 33: 1418–1425.
- López-Alba. E, Díaz. F, Dorado. R, López-García. R. (2010). Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto. *Asociación española de ingeniería mecánica*
- Lyons. J, Liu. J, Sutton. M. (1996). High-temperature deformation measurements using digital-image correlation. *Experimental Mechanics*, March 1996, Volume 36, Issue 1, pp 64-70.
- Pan. B, Li. K & Tong. W. (2013). Fast, Robust and Accurate Digital Image Correlation Calculation without Redundant Computations. *Experimental Mechanics* 53:1277–1289.
- Rashid. M and Mansur. M.(2005). Reinforced High Strength Concrete Beams in Flexure. *ACI Structural Journal*. May-June Title no. 102-S47

- Schwider. J. (1990). "*Advanced evaluation techniques in interferometry*," in Progress in Optics, E.Wof Ed. ElsevierSci. Pub Co., Amsterdam.
- Shah. S y Kishen. C. (2011). Fracture Properties of Concrete–Concrete Interfaces Using Digital Image Correlation. Society for Experimental Mechanics (2011) 51:303–313 8 Mayo 2010.
- Shih-Heng. T y Chung-Huan. S. (2010). Application of digital-image-correlation techniques in analysing cracked cylindrical pipes. Indian Academy of Sciences. Vol. 35, Part 5, October. pp. 557–567.
- Sutton. M, Walters. W, Peters. W, Ranson. W, McNeill. S. (1983). Determination of displacements using an improved digital image correlation method. Image and Vision Computing, Elsevier; I (3): 133-139.
- Sutton. M. Chao.Y, Helm. F and McNeill. S (2000). "Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision" *Photomechanics*, pp. 323-372.

ANEXOS:

Politécnico
Universidad San Francisco de Quito

ICV Laboratory Report 2015-01

May 31, 2015

Testing of plain concrete beams for analysis with Digital Image Correlation

Authors:

Carlos Mejia

Dr. ir. E.O.L. Lantsoght

Ing. Mario Calderon

Ing. Francisco Jativa

Testing of plain concrete beams for analysis with Digital Image Correlation

Authors:

Carlos Mejia

Dr. ir. E.O.L. Lantsoght

Ing. Mario Calderon

Ing. Francisco Jativa

© 2015

COPYRIGHT

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the university.

Contents

1	Introduction.....	81
2	Goals of experiments	82
3	Description of the specimens and test setup	83
3.1	Plain concrete beams	83
3.1.1	Mix Desing.....	83
3.1.2	Concrete compressive strength.....	83
3.2	Geometry of specimens.....	83
3.3	Test setup of first series	84
4	First series: plain beams in four-point bending.....	85
4.1	Beam 1 - test results.....	85
4.1.1	Observations.....	85
4.1.2	Load-displacement diagram.....	87
4.2	Beam 2 - test results.....	87
4.2.1	Observations.....	87
4.3	Beam 3 - test results.....	87
4.3.1	Observations.....	87
4.3.2	Load Vs Time diagram	88
4.4	Beam 4 - test results.....	88
4.4.1	Observations.....	88
4.4.2	Load-displacement diagram.....	89
4.5	Beam 5 - test results.....	89
4.5.1	Observations.....	89
4.5.2	Load-displacement diagram.....	90
4.6	Beam 6 - test results.....	91
4.6.1	Observations.....	91
4.6.2	Load-displacement diagram.....	92
4.7	Beam 7 - test results.....	92
4.7.1	Observations.....	92
4.7.2	Load-displacement diagram.....	93
4.8	Beam 8 - test results.....	93
4.8.1	Observations.....	93
4.8.2	Load-displacement diagram.....	94
5	Conclusions	94
6	References.....	95

1 INTRODUCTION

A research project with respect to the application of the Digital Image Correlation measurement technique to concrete specimens is initiated. The different types of concrete specimens that are studied are plain concrete specimens and reinforcement concrete specimens. This report focuses on the description of the experiments that were carried out on the plain concrete specimens that have the same dimensions and mix design.

Analysis and interpretation of the results in function of the digital image correlation technique will be reported elsewhere.

2 GOALS OF EXPERIMENTS

As the main goal of the experiments is to study the application of the Digital Image Correlation technique to plain and reinforced concrete, simple plain concrete specimens are used for the analysis.

The following objectives are stated for the experiments on plain concrete specimens:

- To use the digital image correlation measurements to find the displacements in the specimen;
- To use the digital image correlation measurements to find the strain field in the specimen;
- To compare the displacements from the digital image correlation measurements to the measurements of the LVDT;
- To capture the propagation of the crack at failure.

3 DESCRIPTION OF THE SPECIMENS AND TEST SETUP

3.1 Plain concrete beams

3.1.1 Mix Design

Table 1: Concrete mix design

<i>Relation W/C final</i>	<i>0,357</i>
<i>Relation Agg/C final</i>	<i>3,640</i>
<i>% Additive/C</i>	<i>1,190</i>
<i>% silica fume /C</i>	<i>2,000</i>
<i>Ton cement/m³</i>	<i>0,454</i>
<i>Concrete Density t/m³</i>	<i>2,317</i>
<i>Cost USD\$/m³</i>	<i>107,29</i>

The Table 1 shows the mix design that was used for the specimens, where the type of cement is Holcim "GU" , coarse agregate is Stone number 8 , Silica Fume is ASTM C240, a super plastifier Rheovil 1000.

3.1.2 Concrete compressive strength

Table 2: Concrete compressive strength

<i>N (cylinder)</i>	<i>f_{cr} (MPa)</i>
<i>1</i>	<i>34</i>
<i>3</i>	<i>32</i>
<i>4</i>	<i>29</i>
<i>5</i>	<i>33</i>
<i>6</i>	<i>34</i>
<i>7</i>	<i>37</i>
<i>8</i>	<i>34</i>
<i>Average (f_{cr})</i>	<i>33</i>
<i>S</i>	<i>2,45</i>
<i>f_c</i>	<i>30</i>
	<i>31</i>

Table 2 shows the test that was performing in 8 cylindres at 29 days, in order to get the concrete compressive stregh, which is 30 MPa.

3.2 Geometry of specimens

To study the application of the DIC technique to plain concrete, simple standard-sized beams were made in the ICV Concrete Laboratory of Universidad San Francisco de Quito.

The beams were 10cm × 10 cm × 35 cm, and their exact measurements, including the weight, are given in Table 3. A sketch of the beams is shown in Fig. 1.

Table 3: Properties of beams

Beam	Weight(g)	Width (cm)	Height (cm)	Length (cm)
1	7800	9,9	9,9	34,5
3	7460	9,9	9,9	34,5
4	7620	9,9	9,9	34,5
5	7450	9,9	9,9	34,5
6	7830	9,9	9,9	34,5
7	7490	9,9	9,9	34,5
8	8080	9,9	9,9	34,5

3.3 Test setup of first series

The plain concrete specimens were tested in four-point bending. A sketch of the test setup is given in Fig. 1. The chosen test setup is based on ASTM C78/C78M:2010.

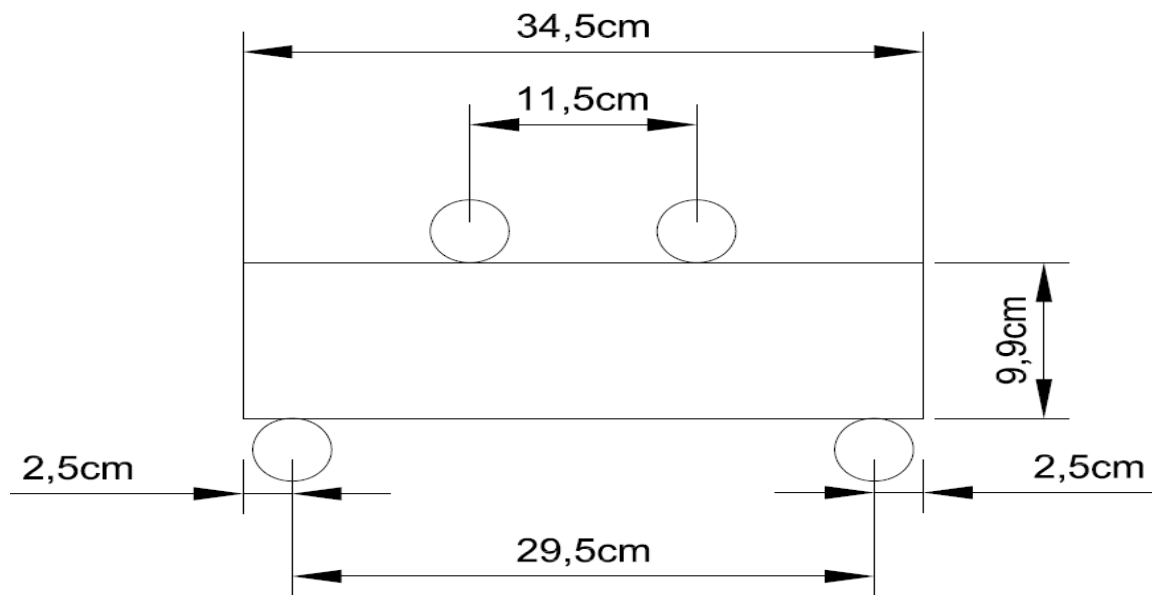


Fig. 1: Overview of test setup. (Based on: ASTM C78/C78M:2010). Measurements in[cm].

4 FIRST SERIES: PLAIN BEAMS IN FOUR-POINT BENDING

4.1 *Beam 1 – test results*

4.1.1 *Observations*

Test date: January 29th 2015

LVDT 1 (Channel 3) was placed in the center of the beam. LVDT 2 (Channel 2) was placed 3,35cm out of the center of the beam.

The measurement points were applied with a center-to-center distance of 116 mm and a face-to-face distance of 100mm.

An overview photograph of beam 1 in the test setup is given in Fig. 2.

The experiment was started at 16h27'25'' with a speed of 1%. The force was applied in a displacement-controlled way. An overview of the different loading rates that were used is given in Table 4. Different loading rates were used because with a very slow loading rate, the effect of creep resulted in a slow reduction of the load instead of an increase of the load. The maximum total load on the jack was 23,68kN. The broken specimen is shown in Fig. 3. The failure pattern at both sides of the beam is given in Fig. 4 and Fig. 5.

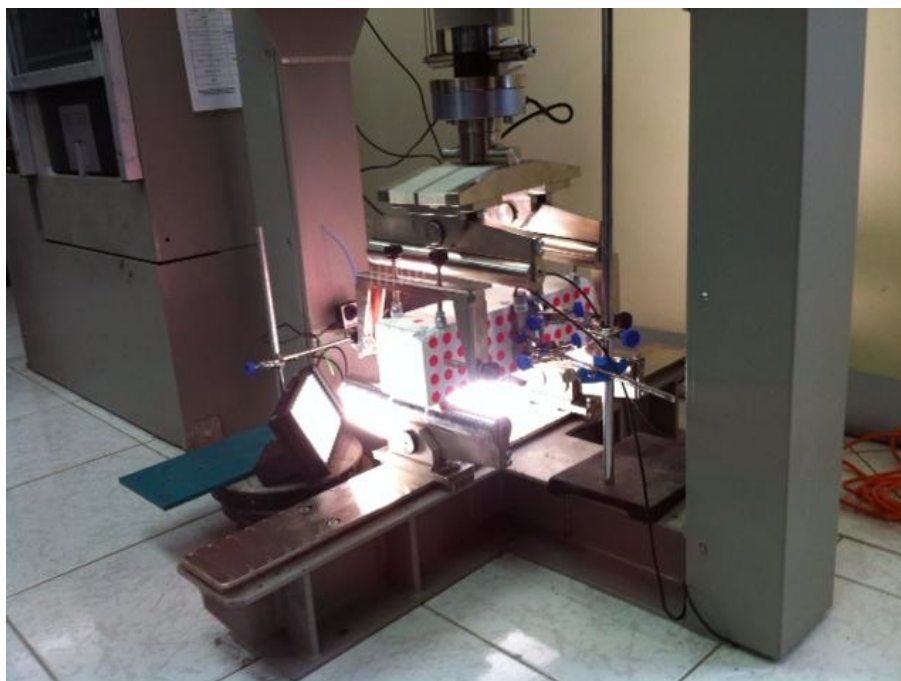


Fig. 2: Beam 1 in test setup.

Table 4: Loading scheme of beam 1

Time since start of test	Loading rate
0'	1%
19'15''	2%
21'30''	2,5%
24'20''	3%

27'00''	1%
28'25''	2%
29'10''	2,5%
32'40''	3%
1h21'00''	3,5%
1h22'15''	4%



Fig. 3: Broken specimen after test.

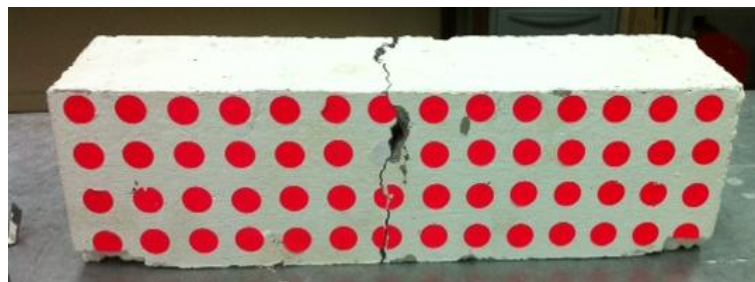


Fig. 4: Failure pattern for beam 1 at the side of the LVDTs.

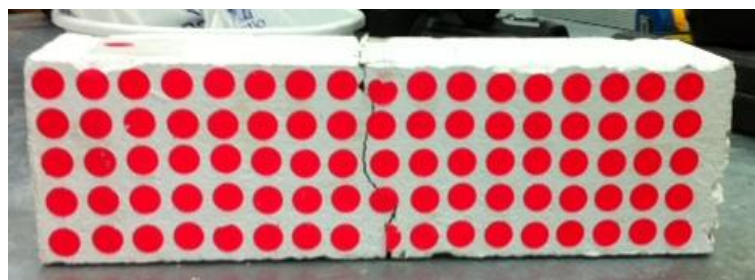


Fig. 5: Failure pattern for beam 1 at the side of the camera

4.1.2 Load-displacement diagram

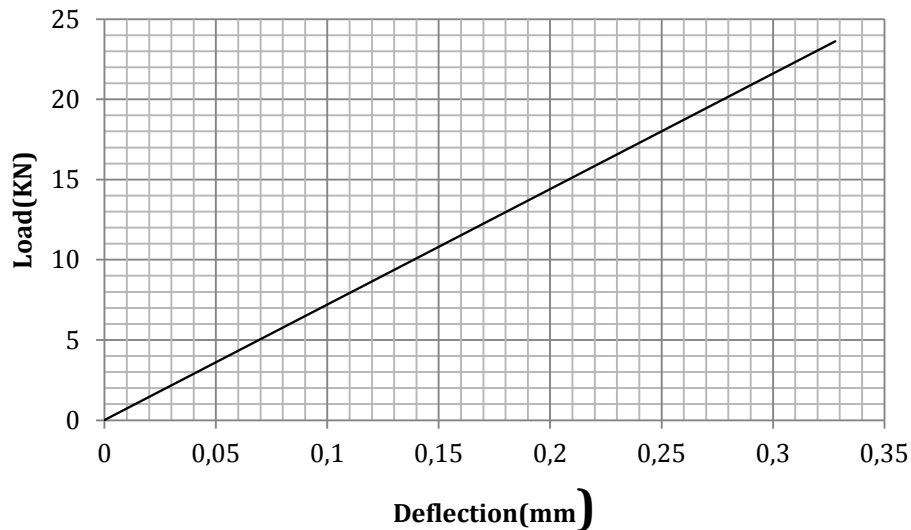


Fig. 6: Load – displacement diagram

4.2 Beam 2 – test results

4.2.1 Observations

Beam 2 was not tested as part of this series of experiments, as it was used to check the proper functioning of the flexural test setup and was accidentally broken in the process.

4.3 Beam 3 – test results

4.3.1 Observations

Test date: February 2nd 2015

LVDT 1 (Channel 3) was placed in the center of the beam. LVDT 2 (Channel 2) was placed 3 cm out of the center of the beam.

The measurement points were applied with a center-to-center distance of 20mm and a face-to-face distance of 10mm.

The test was started at 13h50 by preloading the beam. The channels were activated at 13h52.

A speed of 3,5% was used.

The total duration of the test was 47'13''.

The maximum total load on the jack was 23,08kN. The failure pattern at both sides of the beam is given in Fig. 7 and Fig. 8. As the supports of the LVDTs were touching the jack in the experiment, a good reading of the LVDTs could not be ensured.



Fig. 7: Failure pattern for beam 3 at the side of the LVDTs.

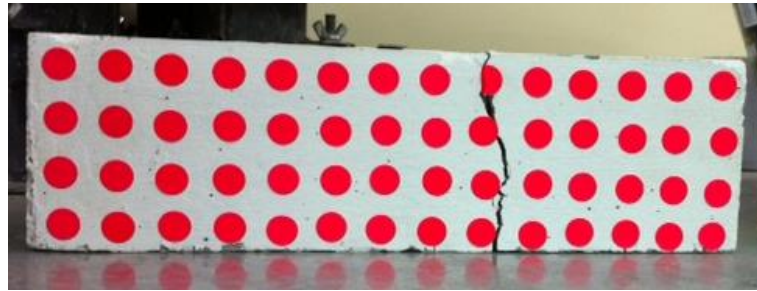


Fig. 8: Failure pattern for beam 3 at the side of the camera

4.3.2 Load Vs Time diagram

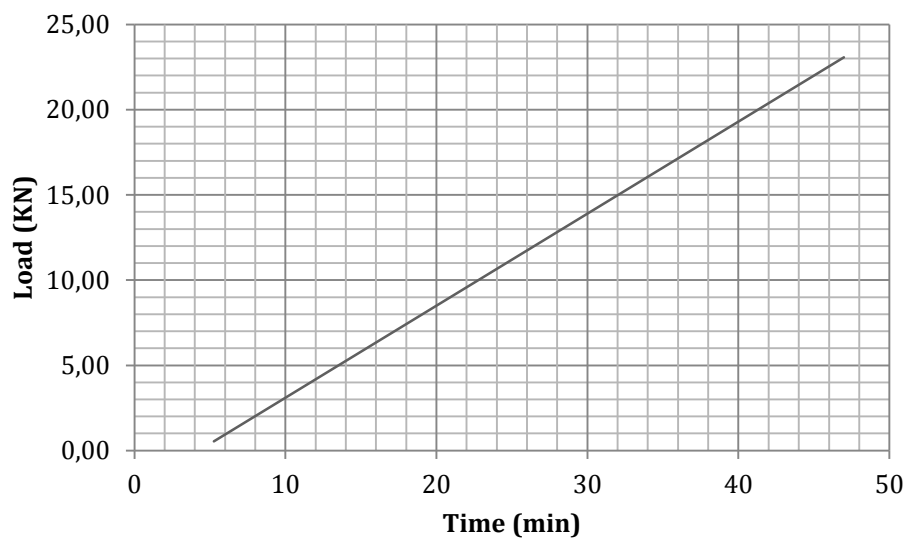


Fig. 9: Load -Time diagram

4.4 Beam 4 – test results

4.4.1 Observations

Test date: February 2nd 2015

LVDT 1 (Channel 3) was placed in the center of the beam. LVDT 2 (Channel 2) was not used.

The measurement points were applied with a center-to-center distance of 20mm and a face-to-face distance of 10mm.

A speed of 4,5% was used.

The total duration of the test was 4'38''.

The maximum total load on the jack was 19,76kN. The displacement at failure was 0,98mm. The failure pattern at both sides of the beam is given in Fig. 10 and Fig. 11.



Fig. 10: Failure pattern for beam 4 at the side of the LVDTs.

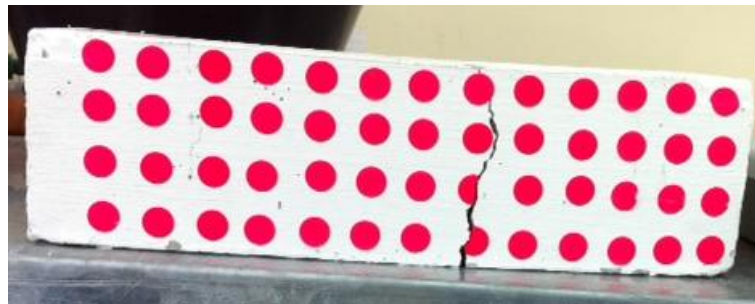


Fig. 11: Failure pattern for beam 4 at the side of the camera

4.4.2 Load-displacement diagram

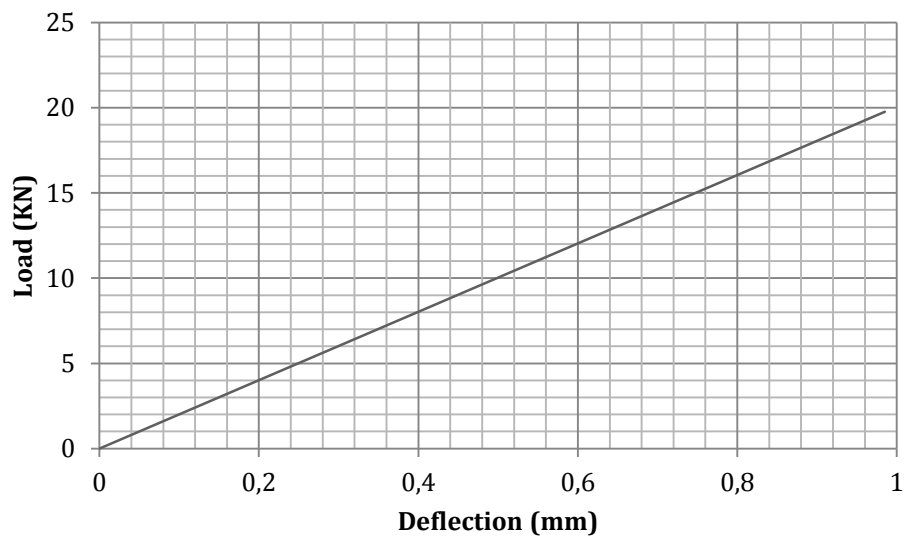


Fig. 12: Load – displacement diagram

4.5 Beam 5 – test results

4.5.1 Observations

Test date: February 2nd 2015

LVDT 1 (Channel 3) was placed in the center of the beam. LVDT 2 (Channel 2) was not used.

The measurement points were applied with a center-to-center distance of 20mm and a face-to-face distance of 10mm.

A speed of 5% was used.

The total duration of the test was 1'06''.

The maximum total load on the jack was 22,98 kN. The displacement at failure was 0,915 mm the failure pattern at both sides of the beam is given in Fig. 13.



Fig. 13: Failure pattern for beam 5 at the side of the LDVT

4.5.2 Load-displacement diagram

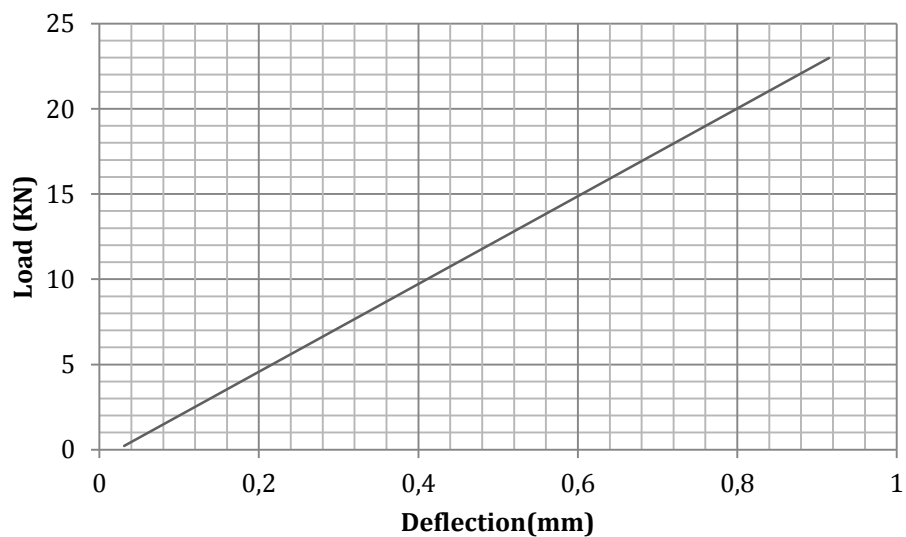


Fig. 14: Load – displacement diagram

4.6 Beam 6 – test results

4.6.1 Observations

Test date: February 2nd 2015

LVDT 1 (Channel 3) was placed in the center of the beam. LVDT 2 (Channel 2) was not used.

The measurement points were applied with a center-to-center distance of 20mm and a face-to-face distance of 10mm.

A speed of 5,5 % was used.

The total duration of the test was 1'21''.

The maximum total load on the jack was 25,55 kN. The displacement at failure was 0.981mm. The failure pattern at both sides of the beam is given in Fig. 15



Fig. 15: Failure pattern for beam 6 at the side of the camera

4.6.2 Load-displacement diagram

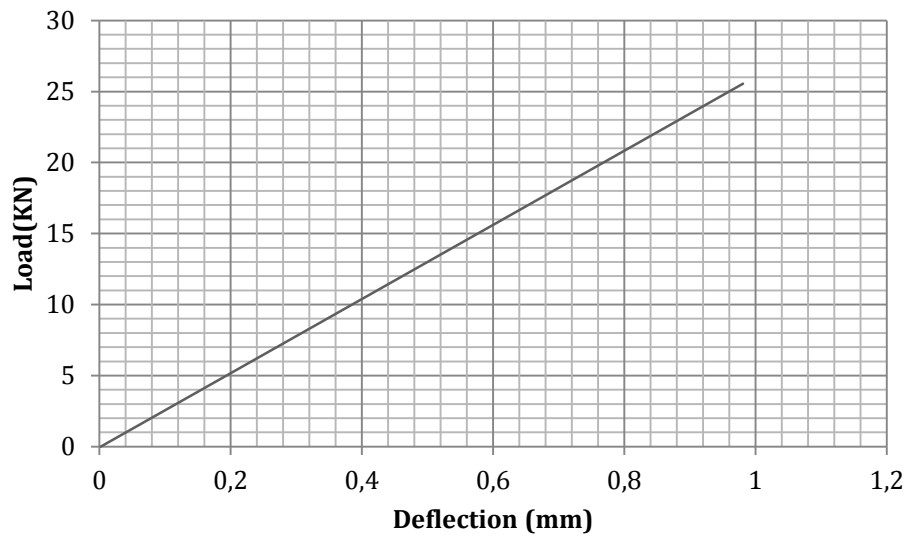


Fig. 16: Load – displacement diagram

4.7 Beam 7 – test results

4.7.1 Observations

Test date: February 2nd 2015

LVDT 1 (Channel 3) was placed in the center of the beam. LVDT 2 (Channel 2) was not used.

The measurement points were applied with a center-to-center distance of 20mm and a face-to-face distance of 10mm.

A speed of 6 % was used.

The total duration of the test was 1'39''.

The maximum total load on the jack was 20,39 kN. The displacement at failure was 0,738 mm. The failure pattern at both sides of the beam is given in Fig. 17.

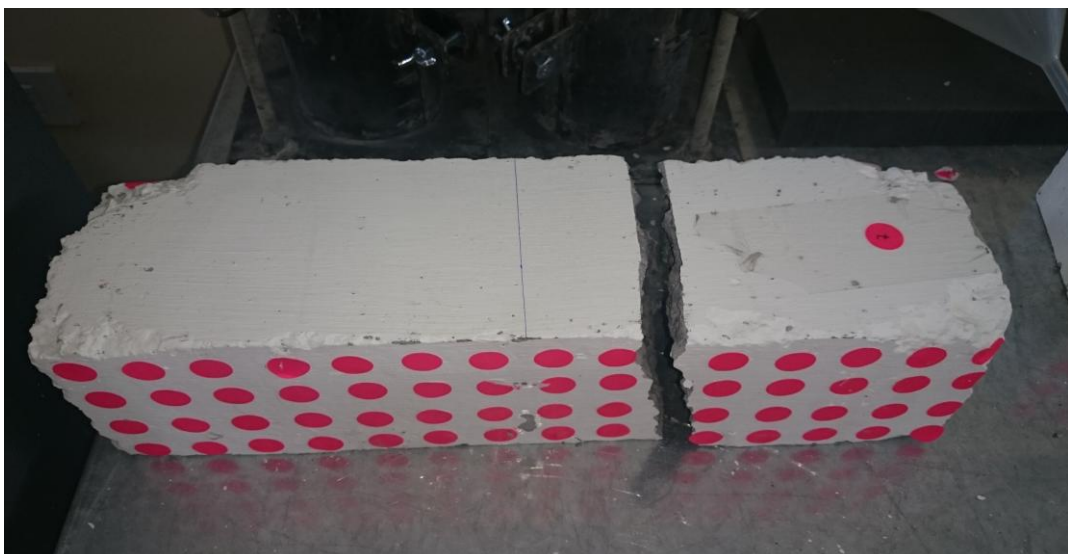


Fig. 17: Failure pattern for beam 7 at the side of the LDVT

4.7.2 Load-displacement diagram

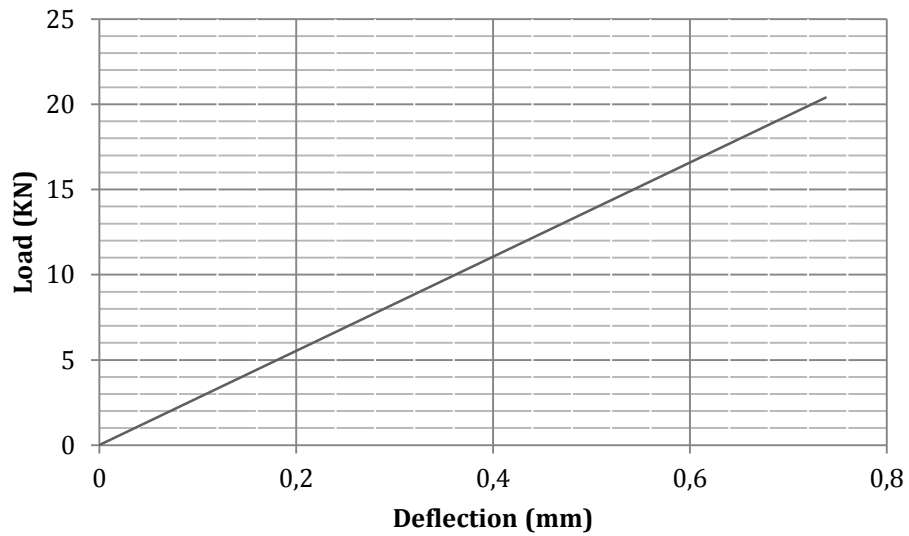


Fig. 18: Load – displacement diagram

4.8 Beam 8 – test results

4.8.1 Observations

Test date: February 2nd 2015

LVDT 1 (Channel 3) was placed in the center of the beam. LVDT 2 (Channel 2) was not used.

The measurement points were applied with a center-to-center distance of 20mm and a face-to-face distance of 10mm.

A speed of 6,5% was used.

The total duration of the test was 0'45''.

The maximum total load on the jack was 24,75 kN. The displacement at failure was 0,76 mm. The failure pattern at both sides of the beam is given in Fig. 19.



Fig. 19: Failure pattern for beam 8 at the side of the LDVT

4.8.2 Load-displacement diagram

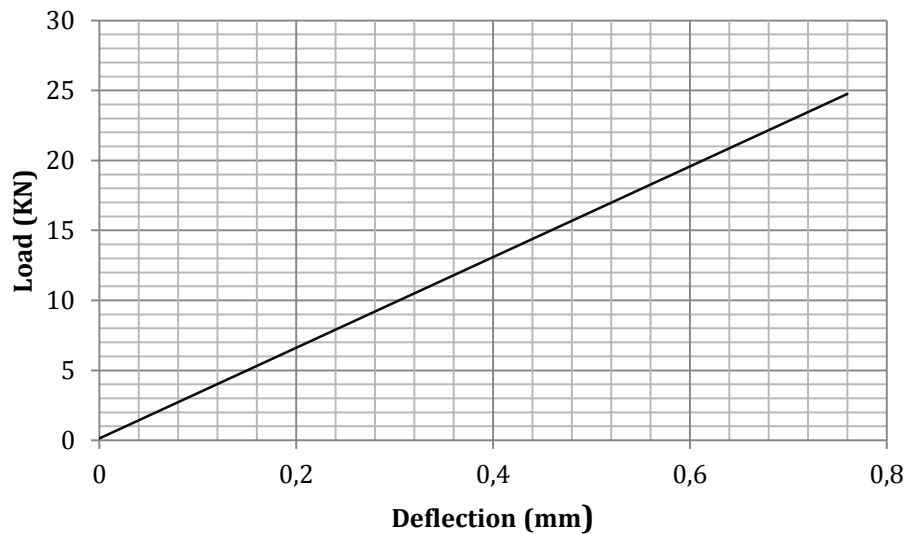


Fig. 20: Load – displacement diagram

5 CONCLUSIONS

- Concrete subjected to a four-point bending test fails in a brittle way, as such, all the beams that were tested collapsed in 0,05 seconds.
- The largest deflection was 0,964 mm and the smallest deflection was 0,328 mm.
- Because the beams fail very fast, it was not possible to capture the propagation of the crack.
- It was not possible to reduce the time of the collapse by testing the specimen at a different loading rate.
- These experimental results serve the purposed of comparing the deformation obtained with the LVDTs and the deformation calculated from the photographs taken with the digital image correlation technique.

6 REFERENCES

- (2010). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM International. Designation: C78/C78M

Politecnico
Universidad San Francisco de Quito

ICV Laboratory Report 2015-02

May 31, 2015

**Testing of Reinforced concrete arches and T-beam for analysis with
Digital Image Correlation**

Authors:

Carlos Mejia

Dr. ir. E.O.L. Lantsoght

Ing. Francisco Jativa

Politecnico
Universidad San Francisco de Quito

ICV Laboratory Report 2015-01

May 31, 2015

Testing of Reinforced concrete arches for analysis with Digital Image Correlation

Authors:

Carlos Mejia

Dr. ir. E.O.L. Lantsoght

Ing. Francisco Jativa

© 2015

COPYRIGHT

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the university.

Contents

1	Introduction	99
2	Goals of experiments	100
3	Description of the specimens and test setup	101
3.1	Specimens	101
3.1.1	Mix design	101
3.1.2	Concrete compressive strength	101
3.1.3	FRP Reinforcement	101
3.1.4	Geometry of specimens	102
3.2	Test setup	102
4	Test in three-point bending	103
4.1	Arch 1 – test results	103
4.1.1	Observations	103
4.1.2	Load-displacement diagram	105
4.2	Arch 2 – test results	105
4.2.1	Observations	105
4.2.2	Load-displacement diagram	106
4.3	T-Beam – test results	107
4.3.1	Observations	107
4.3.2	Load-displacement diagram	107
5	Conclusions	108
6	References	109

INTRODUCTION

A research project with respect to the application of the Digital Image Correlation measurement technique to concrete specimens is initiated. The different types of concrete specimens that are studied are plain concrete specimens and reinforcement concrete specimens. This report focuses on the description of the experiments that were carried out on the reinforced concrete specimens.

The specimens described in this report are two arches that were prepared for the ACI Student Competition in Kansas City, MO, USA and a T- beam from the Catholic University of Ecuador. The arches and T-beam were loaded in the middle with a single concentrated load and the load was applied in a deformation-controlled way. The measurements were carried out with an LVDT as well as with Digital Image Correlation. Besides the test results of these specimens, the concrete mix of the arches is reported as well.

The goal of this report is to report solely on the experiments that were carried out. Analysis and interpretation of the results in function of the digital image correlation technique will be reported elsewhere.

GOALS OF EXPERIMENTS

As the main goal of the experiments is to study the application of the Digital Image Correlation technique to plain and reinforced concrete, first plain concrete specimens ([Mejia et al., 2015](#)) were used for the analysis, reported separately, and secondly available reinforced concrete specimens were tested.

The following objectives are stated for the experiments on reinforced concrete specimens:

- To use the digital image correlation measurements to find the displacements in the specimen;
- To use the digital image correlation measurements to find the strain field in the specimen;
- To compare the displacements from the digital image correlation measurements to the measurements of the LVDT.
- To capture the propagation of the crack at failure.

DESCRIPTION OF THE SPECIMENS AND TEST SETUP

Specimens

The mix design of the T-beam is not available, due to the fact that the beam was not designed and made in the laboratory.

Mix design

Table 5: Mix design for 1 m³ of concrete

Material	Volume (m ³)
Coarse aggregate	0,262
Fine aggregate	0,318
Cement	0,229
Admixture	0.015
Water	0,157
Air	0,020

The Table 5 shows the mix design that was used for the two arches tested in the laboratory, where the type of cement is Blended cement meeting ASTM C1157 from Holcim, coarse and fine aggregate are from Toachi and the Super Plastifier is Rheovil 1000.

Concrete compressive strength

Table 6: Concrete compressive strength at 28 days

<i>N (cylinder)</i>	<i>f_{cr} (MPa)</i>
1	54,6
2	54,8
3	54,7
<i>Average (f_{cr})</i>	54,7
<i>S</i>	0,1
<i>f'_c</i>	54,56
	57,97

The Table 6 shows the result of the compressive strength that was performing in 3 cylinders at 28 days; these results only belong to the arches, which their compressive strength is 55 MPa. The compressive strength of the T-Beam was obtained with other data and is 33 MPa.

FRP Reinforcement

Table 7: Properties of the reinforcement

bar	diameter (mm)	fy (MPa)	fu (Mpa)
#3	9,5	435	435
#4	12	435	435

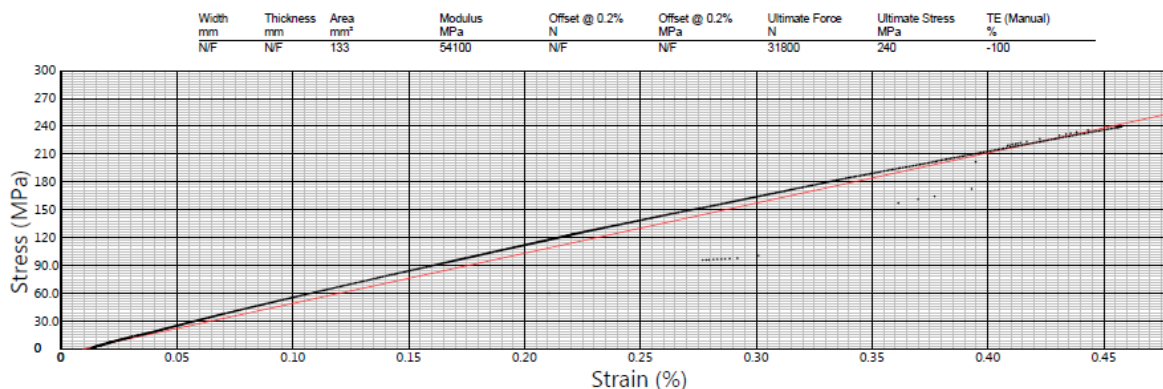


Fig. 21: stress vs strain diagram of the reinforcement

For the reinforced concrete arches, it was used a Fiber Reinforced Polymer from Equisplast with a diameter of 12 mm. Fig. 21 shows one of the 8 tests that was performed to the bars in order to obtain its properties. The results indicate that this type of reinforcement doesn't have a yield plateau, which means that it only can reach an ultimate stress because it doesn't have ductility.

Geometry of specimens

Table 8: Properties of arches and T-beam

Specimen	Weight (g)	Width (cm)	Height (cm)	Length (cm)
Arch 1	15000	8,7	19,5	98
Arch 2	14500	8,7	20	98
T-beam	14660	14	16	95

Test setup

Both arches were tested in three-point bending and the T-beam in four-point bending. The chosen test setup is based on ASTM C293/C293M:2010 for the arches and C78/C78M:2010 for the T-beam.

The distance between the supports is 90 cm. The load is applied in the center of the arches.

The support consists of rollers; their width can be assumed to be no more than 5mm. The load is applied on a square plate of 5cm x 5cm. A sketch of the test setup of Arch 1 can be seen in Fig. 22, Arch 2 in Fig. 23 and the T-beam in Fig. 4.

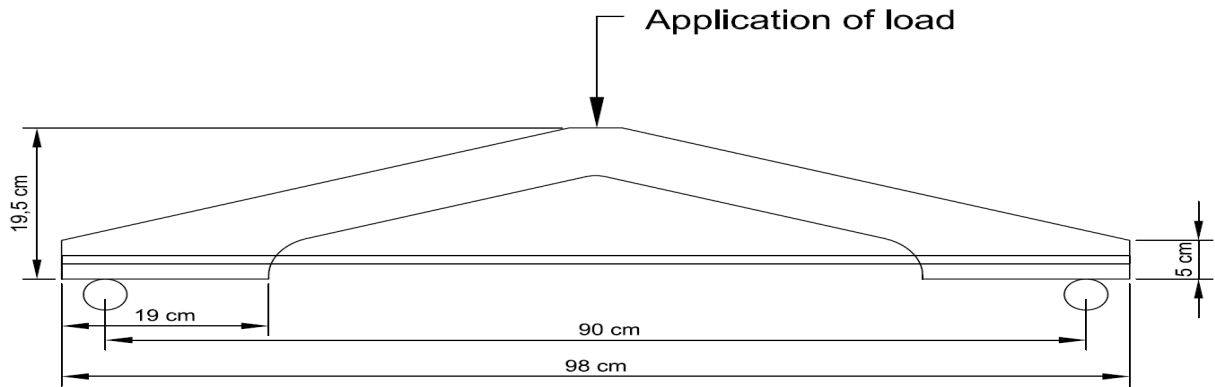


Fig. 22: Overview of test setup for arch 1

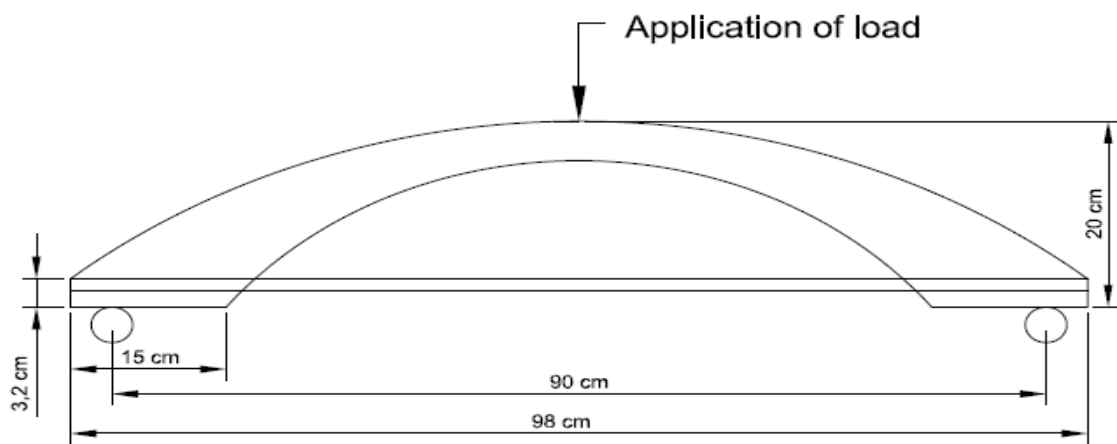


Fig. 23: Overview of test setup for arch 2

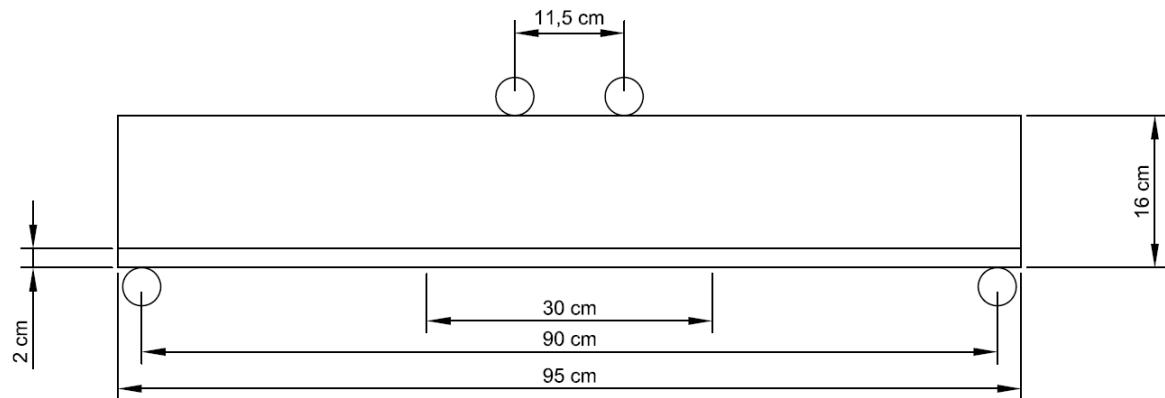


Fig. 24: Overview of test setup for T-beam.

TEST IN THREE-POINT BENDING AND FOUR-POINT BENDING

Arch 1 – test results

Observations

Test date: February 20th 2015

LVDT 1 (Channel 3) was placed in the center of the beam. LVDT 2 (Channel 2) was not used.

The test was started at 10h29 by preloading the beam.

A speed of 6% was used.

The total duration of the test was 05'15''.

The maximum total load on the jack was 37.67 kN. The failure pattern and critical crack propagations given in Fig. 7 for the side at which the DIC measurements were taken. As the supports of the LVDTs were touching the jack in the experiment, a good reading of the LVDTs could not be ensured. To avoid damage to the measurement equipment, the LVDTs were removed before failure was reached.

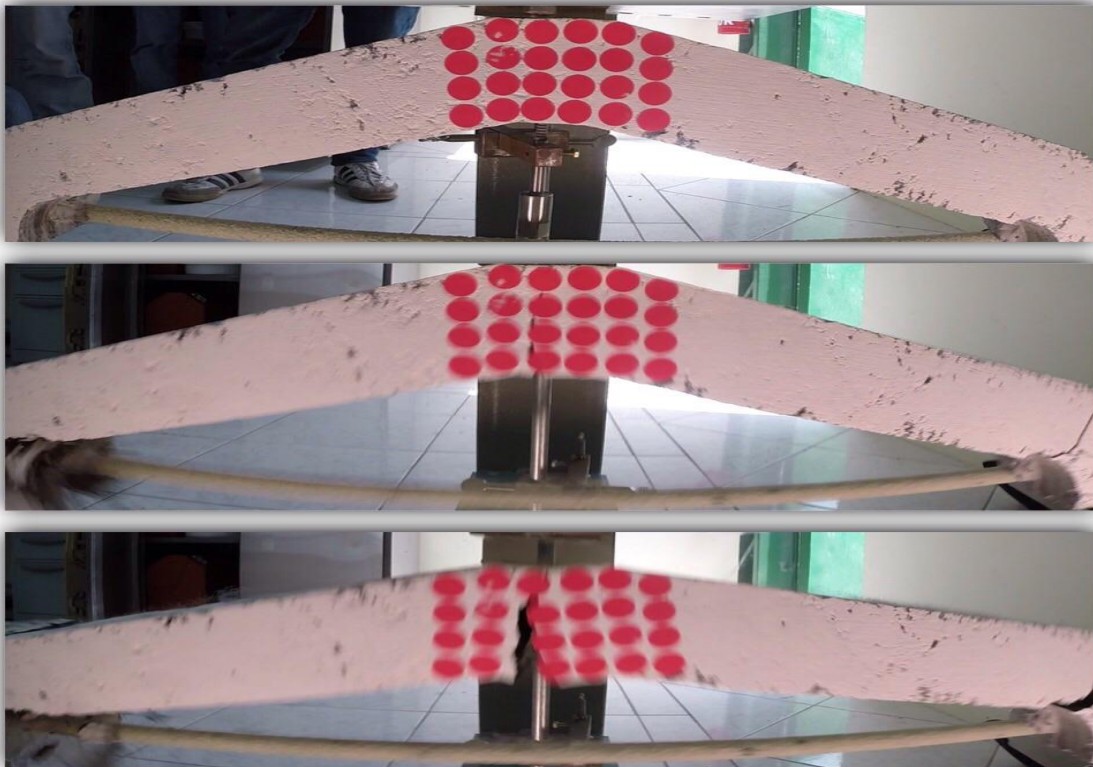


Fig. 25: Failure pattern for Arch 1 at the opposite side of the LVDTs.

Load-displacement diagram

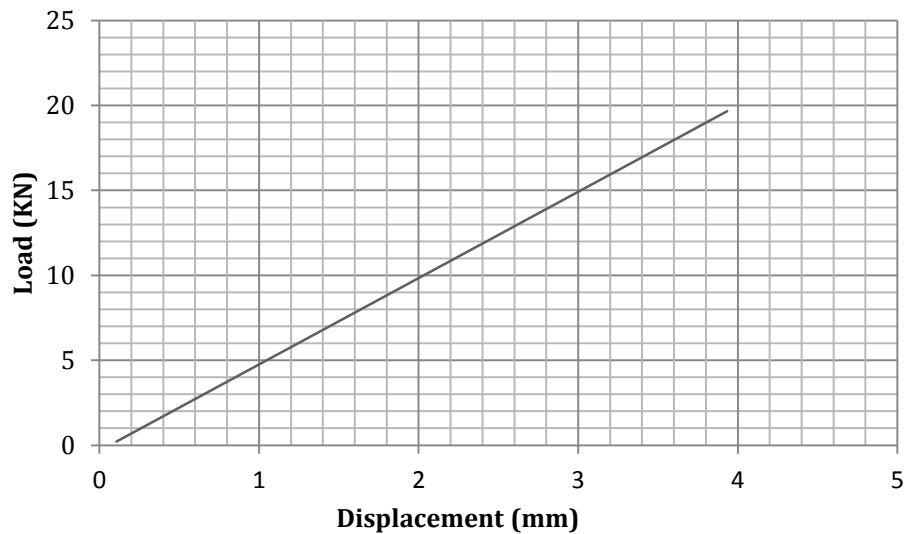


Fig. 26: Load – displacement diagram

The Fig. 26 shows the displacements until the LVDT was removed from the test.

Arch 2 – test results

Observations

Test date: February 20th 2015

LVDT 1 (Channel 3) was placed in the center of the beam. LVDT 2 (Channel 2) was not used.

The test was started at 10h44 by preloading the beam.

A speed of 6% was used.

The total duration of the test was 03'50''.

The maximum total load on the jack was 29,87kN. The failure pattern and crack propagation at the side of the DIC measurements is given in Fig.7. To avoid damage to the measurement equipment, the LVDTs were removed before failure was reached.

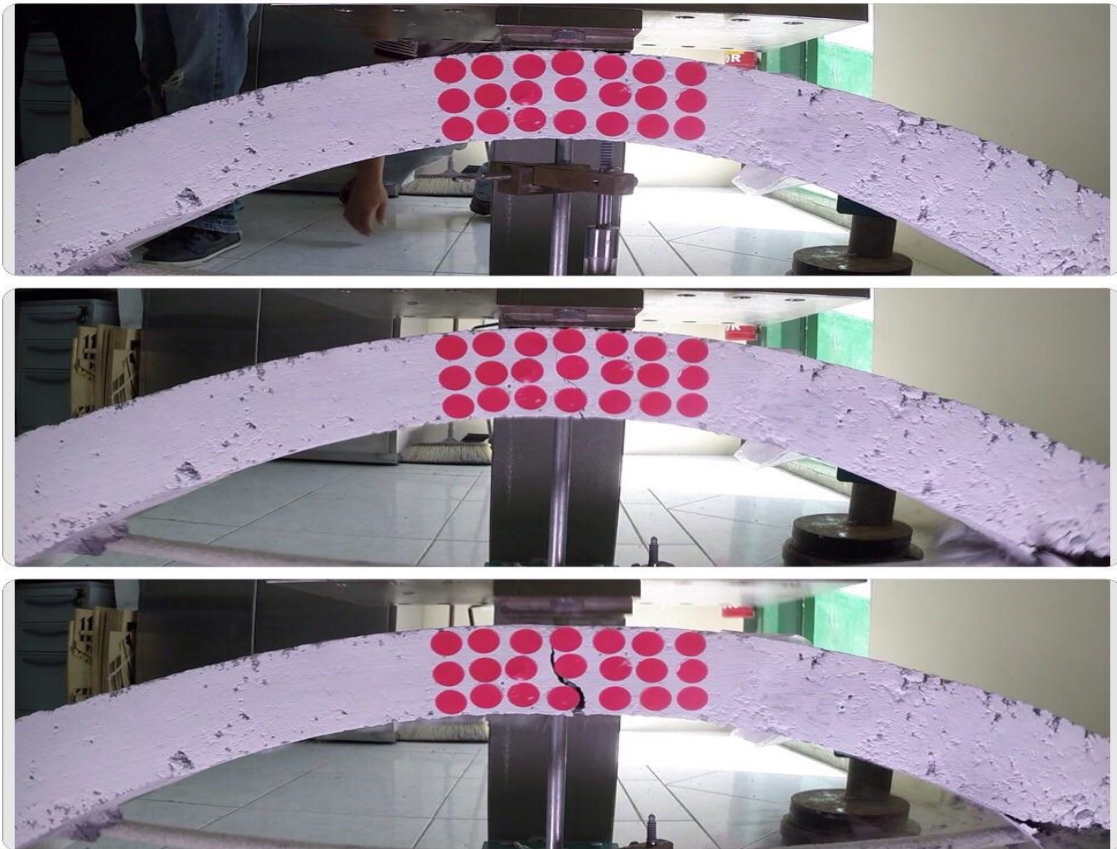


Fig. 27: Failure pattern for Arch 2 at opposite side of the LVDT.

Load-displacement diagram

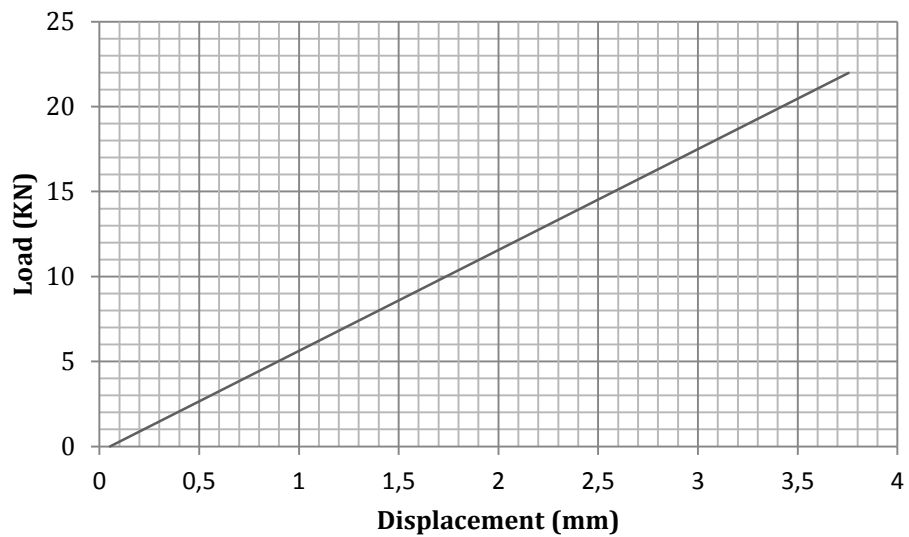


Fig. 28: Load – displacement diagram

The Fig. 28 shows the displacements until the LVDT was removed from the test.

T- Beam – test results

Observations

Test date: March 26th 2015

LVDT 1 (Channel 3) was placed in the center of the beam. LVDT 2 (Channel 2) was not used.

The test was started at 13h35 by preloading the beam.

A speed of 6 % was used.

The total duration of the test was 01'08''.

The maximum total load on the jack was 9,67 kN. The displacement at failure was 1,14 mm. The failure pattern at both sides of the beam is given in Fig. 29.

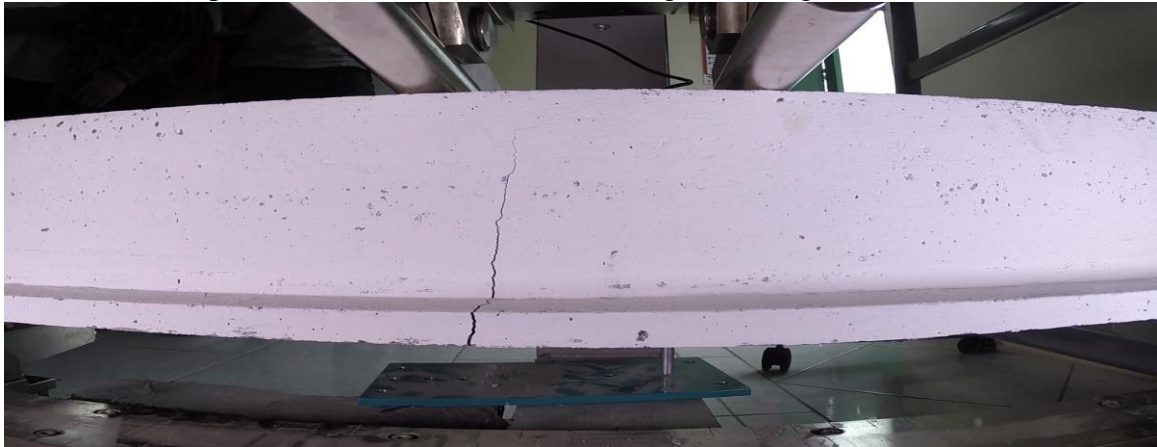


Fig. 29: Failure pattern for T- beam at opposite side of the LDVT

Load-displacement diagram

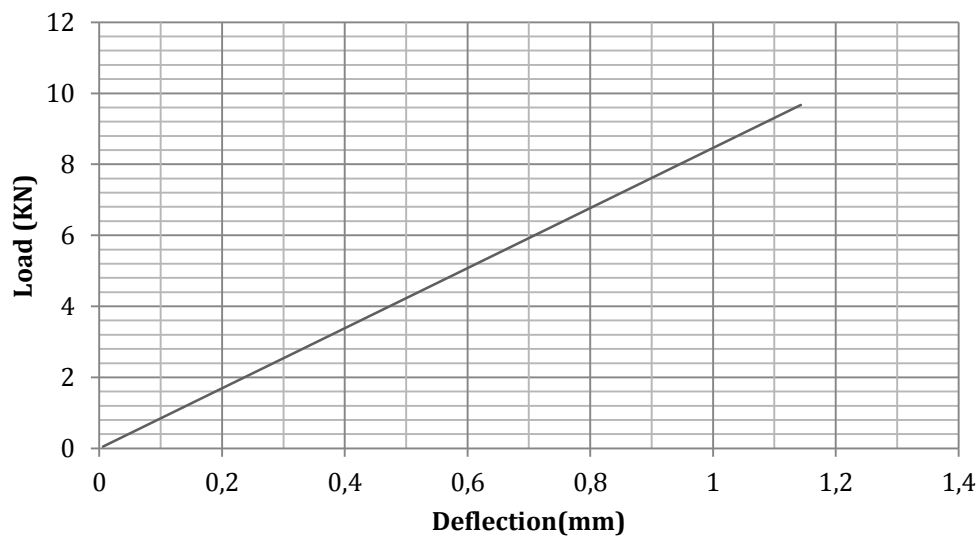


Fig. 30: Load – displacement diagram

CONCLUSIONS

- This report contains the measurements of two arches tested in three-point bending with a concrete compressive strength of 55 MPa and reinforced with FRP bars with ultimate tensile strength of 435 MPa.
- As the tested specimens were arches, the FRP bar was subjected to uniform tension while the concrete was subjected to uniform compression.
- The failure was caused by the loss of bond between the bar and the concrete, for this reason the bar didn't reach the ultimate tensile strength during the test.
- As the LVDTs were removed before failure to protect the measurement equipment, the maximum displacement could not be measured.
- The maximum displacement will be determined with the DIC technique.
- Because reinforced concrete arches were used, it was possible to capture the propagation of the critical crack.

REFERENCES

- (2010). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM International. Designation: C78/C78M.
- (2010). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading). ASTM International. Designation: C293/C293M.
- Mejia, C., Lantsoght, E. O. L., Calderon, M. and Jativa, F.(2015). "Testing of plain concrete beams for analysis with Digital Image Correlation," *ICV Laboratory Report 2015-05*. Universidad San Francisco de Quito, 20pp.