

# Precision Geometric Levelling for the Control of Vertical Displacements in the Recovery and Reinforcement of Concrete Beam, a Case Study

## Nivelación Geométrica de Precisión para el Control de Desplazamientos Verticales en la Recuperación y Refuerzo de una Viga de Concreto, Estudio de Caso

M. Françoso \*, I. Pizarro <sup>1\*</sup>\*\*, L. de Almeida \*, M. da Silva \*

\* Universidade Estadual de Campinas, Campinas, BRASIL

\*\* Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, COSTA RICA

Fecha de Recepción: 29/10/2018

Fecha de Aceptación: 09/04/2019

PAG 205-214

### Abstract

Monitoring and control of large size civil works was an important and well known application area for topographical and geodetic methods, with a wide range of articles published. However, documented experiences applying precision geodetic methods in monitoring in a smaller scale (structural elements: beams, columns, slabs, etc.) are sparse. The main objective of this study is to evaluate and compare the use of precision geometric levelling technique with instrumentation with displacement transducers (structural instrumentation method) in vertical displacement control in a concrete beam with excessive deformation, being subjected to recovery processes and reinforcement. Although precision geometric levelling is not considered a modern technique in the structures monitoring, it is cost-effective feasible, accurate, and highly precise, with acceptable uncertainties and results, considering procedures normally followed in the processes of recovery and reinforcement related to this type of works. The results have shown that precision geometric levelling is an effective alternative, with remarkable advantages in assembling times and installation, as well as in monitoring post-recovery process of structures (medium and long term), and as the possibility of establishing a correlation between the behaviour of the monitored points. In addition, precision geometric levelling is a valid alternative to be implemented jointly with structural instrumentation techniques, especially where redundancy needs to be obtained in the observations.

**Keywords:** Geometric levelling, monitoring, vertical displacements, structural elements

### Resumen

El control y monitoreo de obras civiles de gran tamaño siempre fue una importante y conocida área de aplicación de métodos geodésicos y topográficos, con una amplia gama de trabajos publicados. Sin embargo, las experiencias documentadas usando métodos geodésicos de precisión en el monitoreo a una escala menor (elementos estructurales como: vigas, columnas, losas, etc.), son escasos. El objetivo del presente trabajo es evaluar y comparar el uso de la nivelación geométrica de precisión con la instrumentación con transductores de desplazamientos (método de instrumentación estructural), en el control de desplazamientos verticales en una viga de concreto con excesivas deformaciones, sujeta a trabajos de recuperación y refuerzo. Si bien la nivelación geométrica de precisión no es considerada una técnica moderna en el monitoreo de estructuras, es económicamente factible, con alta precisión e exactitud, con aceptables resultados e incertidumbres, considerando los procedimientos que normalmente se siguen en trabajos de recuperación y refuerzo de este tipo de obras. Los resultados demostraron que la nivelación geométrica de precisión es una alternativa útil, con notables ventajas en el tiempo de montaje e instalación, así como en el monitoreo de la estructura post-recuperación (a mediano y largo plazo) y con la posibilidad de establecer correlación entre el comportamiento de los puntos monitoreados. Además, la nivelación geométrica de precisión es una opción válida para ser implementada en conjunto con técnicas de instrumentación estructural, especialmente cuando se requiere redundancia en las observaciones

**Palabras clave:** Nivelación geométrica, monitoreo, desplazamientos verticales, elementos estructurales

## 1. Introducción

Un alto porcentaje de las manifestaciones patológicas de las construcciones se originan principalmente en la fase de proyecto debido a errores en la concepción y durante la ejecución de las obras, aumentando considerablemente los costos y provocando muchos problemas durante el uso.

Uno de los efectos asociados a la ocurrencia de las manifestaciones patológicas en los elementos de hormigón estructural es su excesiva deformación. Las vigas y losas se deforman debido a la carga que se les impone, a los efectos de la fluencia lenta del hormigón y de la temperatura, entre otros. En términos generales, dichas deformaciones se pueden entender como una respuesta frente a la carga externa y a la exposición al medio ambiente (Baroni, 2003), que afecta no

solo al comportamiento de esa parte sino a toda la estructura como un todo.

El comportamiento insatisfactorio de una estructura no significa que esté condenada a la falla y que sea completamente inadecuada, aun cuando su vida útil se haya iniciado de manera inadecuada debido a una falla en el proyecto o en su ejecución. En la mayoría de los casos, una intervención técnica inmediata permite la rehabilitación de la estructura, que busque restablecer las condiciones definidas originalmente en el proyecto (recuperación) o que permita hacer los ajustes en la capacidad de resistencia de los elementos estructurales de acuerdo al uso (refuerzos) (Reis, 2001).

El proceso de rehabilitación de la estructura se inicia determinando las condiciones reales, con el objetivo de evaluar las anomalías existentes, las causas, medidas y métodos que deben considerarse para su recuperación o refuerzo. Existen tres etapas básicas: datos topográficos, análisis y diagnóstico.

<sup>1</sup> Autor de correspondencia:

Universidade Estadual de Campinas, Campinas, BRASIL

E-mail: ipizarro@itcr.ac.cr



Después de realizar un diagnóstico preciso, se escoge una técnica adecuada, que incluya la selección de los materiales, equipos y labores necesarios para la ejecución de la obra (Souza y Ripper 1998). En la recuperación de obras de gran tamaño, usualmente, la etapa de datos topográficos y la ejecución de la solución adoptada, incluye el monitoreo y control de la estructura y de sus elementos.

El monitoreo de las deformaciones o desplazamientos permite hacer el seguimiento del comportamiento de la estructura, además de contribuir con información que puede ayudar en el proceso de la toma de decisión, asegurando también la correcta ejecución de las obras de recuperación, de acuerdo con el proyecto de corrección.

Tradicionalmente, las obras de gran tamaño se monitorean mediante técnicas e instrumental geodésico de alta precisión y exactitud, que incluyen niveles de precisión, estaciones totales, equipos fotogramétricos y láser escáner (Mills y Barber, 2004) (Costantino y Angelini, 2014) (Sabuncu y Ozener, 2014) (Beshr, 2015) (Capra et al., 2015) (Mill et al., 2015) (Lienhart, 2017) (Lienhart et al., 2017) (Kovačič y Motoh, 2019). Últimamente, estas técnicas han sido implementadas con sistemas de posicionamiento satelital (GNSS, Sistema Global de Navegación por Satélite) (Acosta et al., 2018). A menor escala, más específicamente de los elementos que conforman una estructura (vigas, columnas, fundaciones, losas, etc.), el monitoreo se realiza empleando técnicas de instrumentación estructural, usando sensores de deformación, transductores de desplazamiento, acelerómetros, inclinómetros, extensómetros, etc., (Erol, 2010) (Detchev et al., 2011) (Díaz et al., 2018) (Kovačič y Motoh, 2019).

Este estudio se enfoca en el monitoreo de la viga principal, construida en hormigón armado, de una construcción de gran tamaño, durante el proceso de recuperación de su capacidad de apoyo. Se emplearon dos técnicas: nivelación geométrica de precisión e instrumentación con transductores de desplazamiento. (Carvalho et al., 2001) y (El-Ashmawy, 2017) desarrollaron estudios similares, en el laboratorio, con mediciones de desplazamiento en vigas de hormigón premoldeado y en vigas I de acero usando equipos topográficos y transductores de desplazamiento. En esos estudios se detalla la metodología empleada, la elección de los aparatos adecuados y el procedimiento para medir los desplazamientos en los puntos de interés. (Kovačič y Motoh, 2019) y (Mill et al., 2015) evaluaron la aplicación de las técnicas geodésicas usando niveles de precisión, estaciones totales y láser escáner terrestre para determinar el rango y distribución espacial de las deformaciones de un puente durante ensayos de carga estática. (Palazzo et al., 2005) también usaron técnicas y equipos para fines geodésicos para monitorear el

desplazamiento vertical de losas premoldeadas de hormigón armado en tres puentes que fueron sometidos a ensayos de carga. (Rönholm et al., 2009) compararon y analizaron los datos encontrados por tres técnicas aplicadas (láser escáner terrestre, fotogrametría y estación total); los resultados fueron obtenidos usando un comparador para la medición de los desplazamientos realizados en vigas de hormigón de laboratorio. Finalmente, (Henriques y Casaca, 2001) aplicaron la nivelación geométrica para controlar el desplazamiento vertical de diferentes tipos de construcciones. Todas estas investigaciones indican que las técnicas geodésicas son adecuadas para monitorear y controlar la deformación tanto en las estructuras como en sus elementos, como es el caso de (Mascort-Albea et al., 2016) (Ata et al., 2018) (Mrówczyńska et al., 2018) (Okieimute et al., 2018).

La nivelación geométrica de precisión se considera una técnica confiable, siendo muy precisa para las mediciones del desplazamiento vertical (Henriques y Casaca 2001) (Mulahusić et al. 2018) (Tang et al. 2018). Es la mejor forma de determinar las elevaciones, ya que permite obtener resultados de mayor calidad en el proceso de monitoreo. La técnica usa equipos de alta precisión (niveles de precisión, miras de INVAR) y estrictos procedimientos para la toma y recopilación de datos (Bannister et al., 1998) (Silva y Segantine, 2015). El procesamiento de datos es relativamente simple y conocido (Mill et al., 2015). A pesar de ser una técnica geodésica consolidada para el monitoreo de grandes estructuras, es muy poco utilizada para los desplazamientos verticales, especialmente en las obras de recuperación y refuerzo de los elementos estructurales.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el uso de la nivelación geométrica de precisión para el monitoreo y control de los desplazamientos verticales de los elementos estructurales sometidos a obras de recuperación y refuerzo.

## 2. Estudio de caso (Descripción de la obra)

El Teatro del Instituto de Artes Unicamp ("Teatro-Laboratório do Instituto de Artes") en Brasil es un edificio de hormigón armado, en fase constructiva, que consta de dos módulos: el teatro (módulo principal) y el edificio de entrada que ofrece el acceso al teatro, formado por tres pisos, subterráneo, entreplanta y un piso general superior (denominado módulo anexo), sumando una superficie total de 5.668,73 m<sup>2</sup> (Figura 1), ubicado en la Universidad de Campinas dentro de la Ciudad Universitaria "Zeferino Vaz" en Campinas, Sao Paulo.



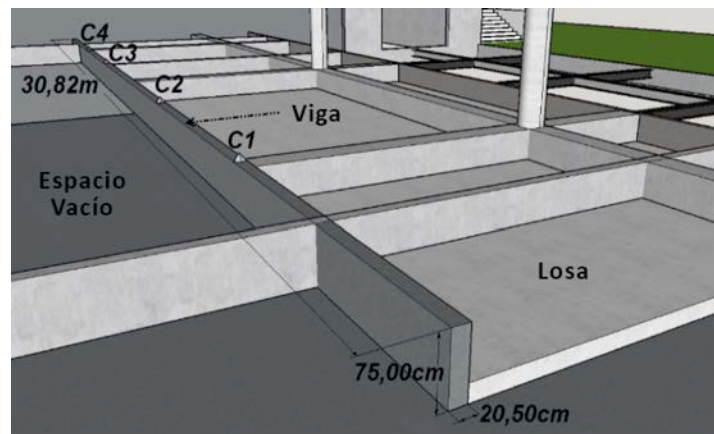
**Figura 1.** Teatro del Instituto de Artes, UNICAMP

Se preparó un informe sobre el estudio técnico realizado en el lugar de la obra, debido a las no conformidades encontradas en la ejecución de la primera fase, que comprendía la superestructura, impermeabilización y techumbre. Entre las manifestaciones patológicas se encontraron grietas en los muros y en las vigas, causadas por desplazamientos verticales excesivos. La fuente de estas patologías está relacionada con las deficiencias detectadas en la ejecución de la obra.

El proyecto de corrección para la rehabilitación de las vigas que presentaban una deformación excesiva implicaba

minimizar los desplazamientos verticales mediante nivelación estructural e implementación de cuatro columnas metálicas como refuerzos, buscando restaurar la capacidad de carga original, además de restablecer la seguridad estructural.

En relación con el estudio de caso, se seleccionó una viga que formaba parte de la primera losa, ubicada en el módulo anexo del edificio. Se trata de una viga de hormigón armado, soportada en sus extremos por muros de columnas de sección transversal rectangular de 75,00cm de alto x 20,50cm de ancho y 30,82m de largo (Figura 2).



**Figura 2.** Viga del primer piso sometida al proceso de recuperación

### 3. Metodología

Se ejecutó el proceso de levantamiento estructural a fin de restaurar la capacidad de carga de la estructura y disminuir los desplazamientos verticales de la viga. Simultáneamente, se realizó el monitoreo usando dos técnicas en paralelo: nivelación geométrica de precisión e instrumentación con transductores de desplazamiento.

#### 3.1 Monitoreo del desplazamiento vertical, usando el método de nivelación geométrica de precisión

Para el monitoreo se usó un nivel de precisión Carl Zeiss modelo NI005A con mira de INVAR. Según las especificaciones, el nivel tenía una desviación estándar de  $\pm 0,5$  mm/km en doble nivelación, con péndulo compensador y micrómetro de placa plana paralela. La mira de INVAR era de doble graduación (Lectura Izquierda (LR) y Lectura Derecha (RR)), de 1,75m de altura, intervalos equivalentes a dm/2 y divisiones cada 5mm. La incertidumbre de lectura del nivel/mira era de décimas de milímetro.

Los puntos de control y el nivel de referencia fueron marcados con pernos de cabeza plana, fijados al hormigón de modo que las observaciones se hicieran siempre en los

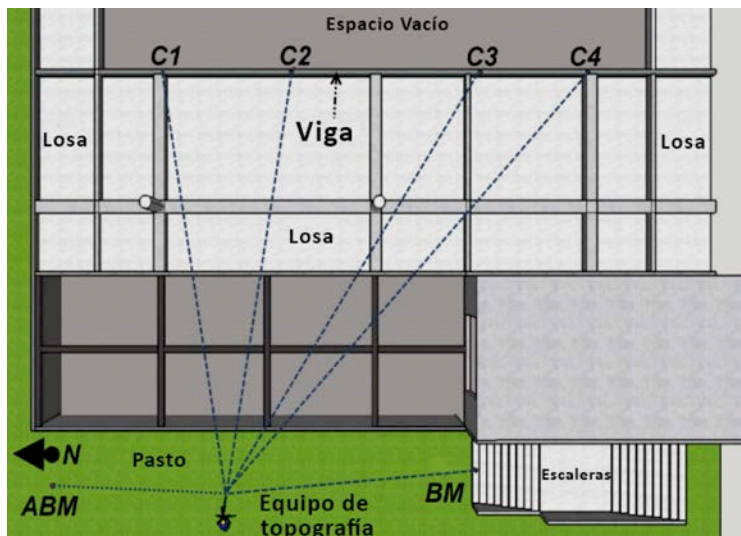
mismos lugares. Los puntos monitoreados se denominaron de izquierda a derecha, como: C1, C2, C3 y C4 con transductores ubicados a 20,00cm. Ver detalles en (Figura 3) (Figura 4) (Figura 5a).

El monitoreo de los desplazamientos se realizó en tres etapas:

1. Sin la carga aplicada – Antes del proceso de levantamiento estructural para establecer las deformaciones iniciales y las diferencias en el desplazamiento vertical.

2. Con la carga aplicada – Durante el proceso de levantamiento estructural, para controlar la reducción del desplazamiento de acuerdo a la carga aplicada.

3. Posterior a la aplicación de la carga - Después del proceso de levantamiento estructural e implementación de las columnas metálicas, para conocer las deformaciones iniciales y las diferencias en el desplazamiento final.

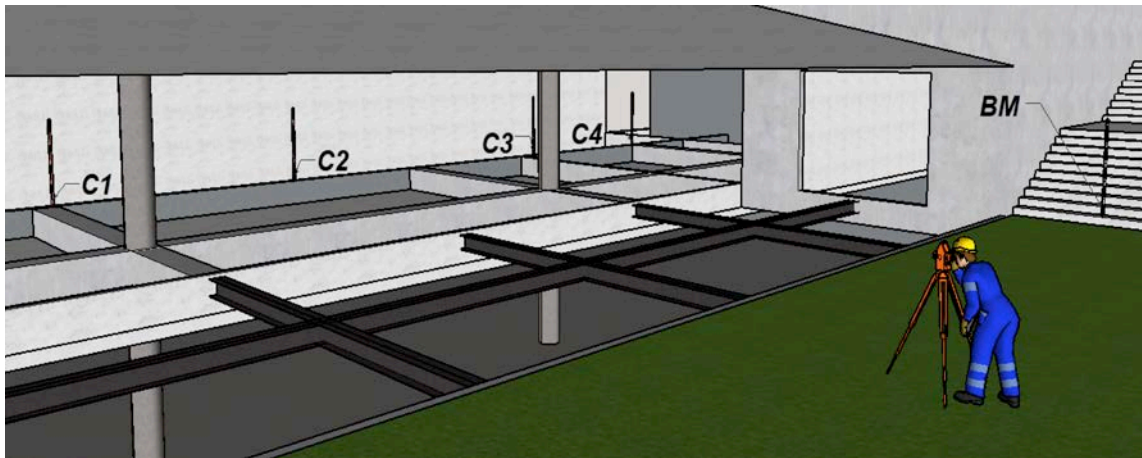


**Figura 3.** Plano de la viga monitoreada, con los puntos de control (C1, C2, C3, C4), punto de referencia (BM), punto de referencia auxiliar (ABM) y ubicación del equipo de topografía

En las tres etapas, el nivel se instaló fuera del edificio, en el mismo punto, con línea de visión accesible al punto de referencia y a los cuatro puntos de control (Figura 3) (Figura 4). En la primera etapa, se realizó una serie de lecturas para conocer el estado de deformación inicial de la viga. En la segunda etapa, se realizaron seis series de lecturas, con el objetivo de seguir la aplicación gradual de las cargas. En este proceso, las cargas fueron aplicadas a intervalos de diez minutos, teniendo el tiempo necesario para evaluar, mediante inspección visual, el estado de la estructura y realizar el levantamiento de la serie de lecturas. En la tercera etapa, se

tomaron cuatro series de lecturas en diferentes fechas. En esta etapa, se esperaba la acomodación de la estructura, después de la aplicación de la última carga, además de la implementación de las columnas de refuerzo.

Los datos se recopilaron en una hoja de cálculo especial (Tabla 1), para realizar el cálculo constante “in situ” y así asegurar la coherencia y precisión de cada observación, además de determinar los desplazamientos temporales. Se usó la misma hoja de cálculo para ajustar la nivelación y el cálculo de desplazamiento permanente de cada punto monitoreado.



**Figura 4.** Vista lateral de la instalación del equipo topográfico en relación a la ubicación del punto de referencia (BM) y de los puntos de control (C1, C2, C3 y C4)

**Tabla 1.** Hoja de cálculos para recopilar los datos

Punto	Lectura atrás		Lectura adelante		Cálculos Lectura atrás (dm/2)		Constante de la mira, atrás
	LR	RR	LR	RR	LR	RR	
BM							
C1							

Cálculos Lectura adelante (dm/2)		Constante de la mira, adelante	LED	RED	ED
LR	RR				

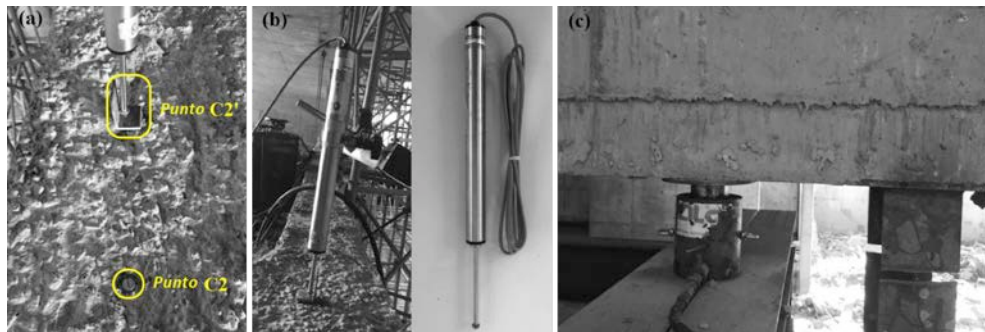
  

Elevación	Corrección	Elevación ajustada	Diferencias entre elevaciones	Desplazamientos verticales

### 3.2 Monitoreo del desplazamiento vertical, usando transductores de desplazamiento

El monitoreo de instrumentación se realizó con un computador habilitado con un sistema de adquisición de datos, "System 5000", modelo "5100b Scanner" de marca "Micro-Measurements" y cuatro transductores de desplazamiento de la misma marca, calibrado con una precisión de una milésima de milímetro (Figura 5b). La técnica de instrumentación se usó exclusivamente en la segunda etapa de monitoreo, con adquisición de datos a cada segundo.

Usando un modelo estructural de elementos finitos, se determinaron las cargas que se podían aplicar a la estructura, para restablecer las condiciones del proyecto. El gato estructural y los transductores se colocaron en puntos cercanos a la instalación de las columnas metálicas. La elección de esos puntos de control se hizo con el objetivo de hacer un seguimiento de la recuperación de los desplazamientos para realizar a futuro una comparación con aquellos obtenidos numéricamente.



**Figura 5.** (a) Ubicación de los puntos de control (C2 y C2'); (b) Transductores de desplazamiento y (c) Gato usado para aplicar las cargas y cortar las columnas temporalmente

## 4. Comparación de los valores de desplazamiento vertical

A fin de evaluar el uso de la nivelación geométrica de precisión para monitorear los desplazamientos verticales en los elementos estructurales sometidos a trabajos de recuperación, se adoptaron como técnica de referencia en esta comparación los resultados de la instrumentación con transductores de desplazamiento, dada su alta precisión (una millonésima de milímetro), y que normalmente se usan en este tipo de monitoreo.

La (Tabla 2a) muestra los valores de desplazamiento encontrados por los transductores de desplazamiento durante el proceso de nivelación estructural. Las cargas presentadas en la primera columna son las aplicadas en cada gato, por fase de carga, usando un total de 4 gatos. Como se puede apreciar se aplicaron cargas graduales con incrementos de 3,15 ton-fuerza (tf), excepto en el último caso que fue de 1,55 tf, pues era el incremento necesario para completar la carga del proyecto, 17,30 tf. Los puntos C1', C2', C3' y C4' corresponden a los cuatro transductores de desplazamiento ubicados sobre la viga y cerca de los lugares donde se ubicaban los gatos.

Considerando las características estructurales, geométricas y la excesiva deformación, observadas originalmente en la viga, se esperaba que, para la misma carga aplicada, sus desplazamientos verticales sobre los puntos extremos fueran menores a los desplazamientos en los puntos de control internos. Dicho comportamiento se

mantuvo como un estándar para casi todas las cargas aplicadas, como se puede verificar en la (Tabla 2a). El mayor desplazamiento vertical ocurrió en el punto de control C2' con 26,817mm. Los desplazamientos definitivos usando la técnica geodésica se determinaron después de procesar y ajustar las campañas de nivelación geométricas (Tabla 2b).

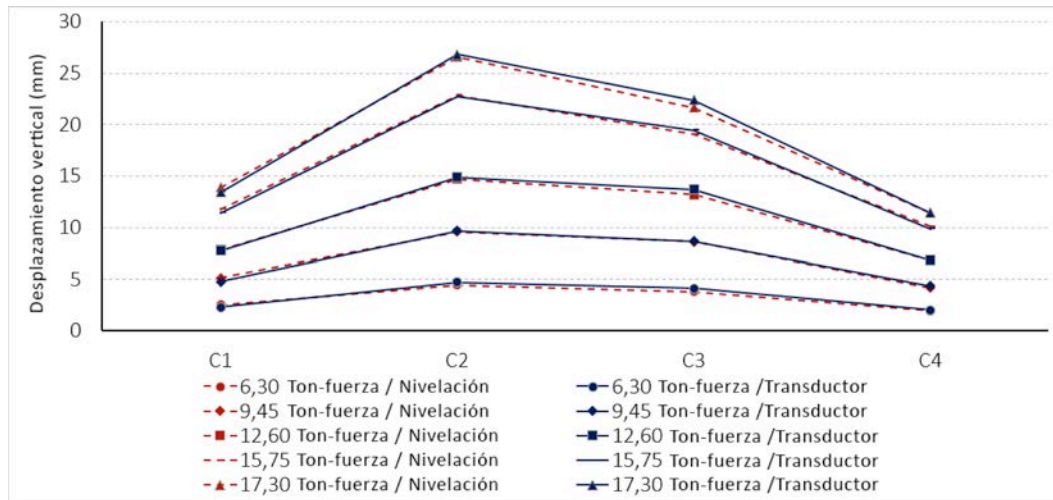
Para el análisis de los resultados, se calculó la diferencia de los desplazamientos obtenidos por las dos técnicas y se presentan en la (Tabla 3a). Dada la naturaleza de los estudios y las técnicas usadas, las diferencias de desplazamiento son el producto de la comparación directa entre las magnitudes medidas por estos dos métodos. Sin embargo, es importante mencionar que los puntos de control de la nivelación se ubicaron cerca de los puntos de monitoreo de los transductores, pero no exactamente en los mismos lugares, un hecho que explica parcialmente las diferencias obtenidas. La mayor y menor desviación estándar calculada para las diferencias corresponde al punto C3 (con un valor de  $\pm 0,227$ mm) y a los puntos C1 y C4 (con un valor de  $\pm 0,128$ mm) respectivamente. Las desviaciones estándar y la diferencia de porcentaje relativo con órdenes de magnitudes similares fueron alcanzadas en el laboratorio por otros autores, como (Carvalho et al. 2001) (Gordon y Lichti 2007) (Rönholm et al. 2009) y (El-Ashmawy 2017), usando técnicas de similares características y equipos geodésicos. El gráfico de la Figura 6 muestra las mismas diferencias, además de los desplazamientos de los puntos de control, de acuerdo a cada técnica, y una visión amplia del comportamiento de las deformaciones en una viga, dada la carga aplicada.

**Tabla 2.** Desplazamientos verticales obtenidos a través de: (a) transductores de desplazamiento y (b) nivelación geométrica

(a) Transductores de desplazamiento					(b) Nivelación geométrica				
Carga aplicada (tf)	Desplazamiento(mm)				Carga aplicada (tf)	Desplazamiento(mm)			
	C1'	C2'	C3'	C4'		C1	C2	C3	C4
6,30	2,319	4,741	4,131	2,019	6,30	2,538	4,475	3,838	1,950
9,45	4,791	9,674	8,669	4,364	9,45	5,125	9,563	8,637	4,200
12,60	7,739	14,871	13,670	6,825	12,60	7,825	14,687	13,175	6,850
15,75	11,398	22,690	19,434	9,854	15,75	11,775	22,825	19,025	10,075
17,30	13,438	26,817	22,381	11,427	17,30	13,888	26,575	21,662	11,400

**Tabla 3.** (a) Diferencias entre los desplazamientos verticales y (b) diferencias de porcentaje relativo, obtenidos por comparación de los resultados de las dos técnicas aplicadas

(a) Diferencias entre desplazamientos (mm)					(b) Diferencia porcentual relativa				
Carga aplicada (tf)	C1	C2	C3	C4	Carga aplicada (tf)	C1	C2	C3	C4
6,30	0,219	-0,266	-0,293	-0,069	6,30	9,42%	-5,61%	-7,10%	-3,42%
9,45	0,334	-0,111	-0,032	-0,164	9,45	6,97%	-1,15%	-0,36%	-3,76%
12,60	0,086	-0,184	-0,495	0,025	12,60	1,11%	-1,23%	-3,62%	0,37%
15,75	0,377	0,135	-0,409	0,221	15,75	3,31%	0,59%	-2,10%	2,24%
17,30	0,450	-0,242	-0,719	-0,027	17,30	3,34%	-0,90%	-3,21%	-0,24%



**Figura 6.** Gráfico comparativo de los resultados obtenidos con la nivelación y con los transductores de desplazamiento

Se evaluaron también los resultados de la nivelación a través de la diferencia de porcentaje relativo (Tabla 3b), con los desplazamientos medidos por los transductores como medidas de referencia. Se observa que las mayores diferencias de porcentajes relativos están asociadas a los valores de desplazamiento menores, generados en las cargas iniciales (6,30 tf y 9,45 tf). Aunque las mayores diferencias entre los desplazamientos ocurrieron en la tercera etapa de carga de 12,60 tf.

La (Figura 7) presenta el comportamiento de cada punto de control de manera aislada, con los desplazamientos verticales experimentados según las cargas aplicadas. Los gráficos facilitan la comparación de los resultados en cada punto, además permiten un análisis de correlación entre las variables involucradas (Carga y Desplazamiento).

Es evidente que independientemente de las magnitudes de los desplazamientos o de la técnica empleada, los cuatro gráficos presentan curvas con tendencias y formas similares, sugiriendo una fuerte correlación lineal entre las variables. El coeficiente de correlación ( $R^2$ ), que explica la proporción de la variación entre los datos, en todos los casos, fue superior al 99%.

Como se mencionó anteriormente, se realizó el monitoreo con niveladores en las tres etapas definidas en el

estudio, con el fin de seguir el comportamiento de la viga, antes, durante y después del proceso de reforzamiento y rehabilitación. En la (Figura 8) se presenta ese comportamiento, en términos del desplazamiento vertical de acuerdo a las etapas y series de lecturas. La tendencia de las cuatro curvas en la segunda etapa quedó aclarada en el párrafo anterior; sin embargo, las variaciones de los desplazamientos en la etapa 3 coinciden con las situaciones siguientes:

- 1) En la transición entre las etapas 2 y 3, después de 24 horas del proceso de recuperación con nivelación estructural, la estructura sufrió aumentos menores en los desplazamientos de los puntos extremos (C1= 0,225mm y C4=0,300mm) y una disminución en los puntos internos (C2 = 0,225mm y C3 = 0,350mm)
- 2) 3 días después, la última carga aplicada tuvo que ser ajustada, con el objetivo de implementar las cuatro columnas, observándose luego un incremento significativo de los desplazamientos, principalmente en los puntos de control internos (C1 = 1,387mm, C2 = 2,925mm, C3 = 2,325mm, C4 = 1,375mm) y



3) por último, al retirar los gatos, la viga descansó sobre las columnas reforzadas. En esta etapa, como era de esperar, los desplazamientos disminuyeron hasta valores similares a

los determinados en la última carga aplicada (17,30 tf) en la etapa 2.

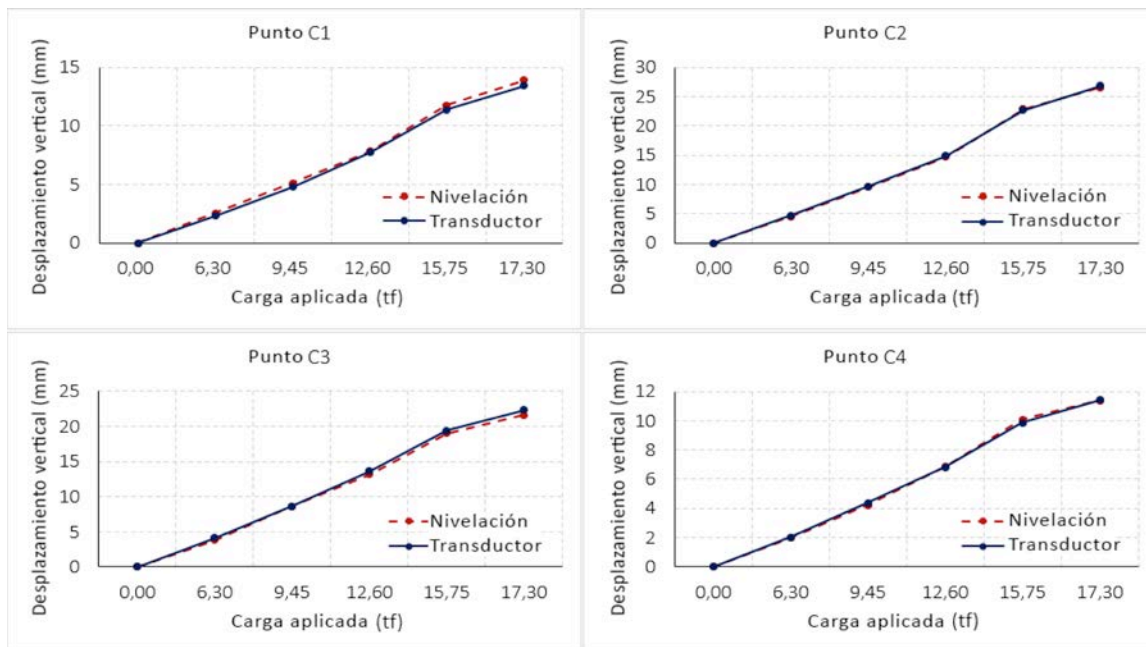


Figura 7. Desplazamiento vertical según la carga aplicada en cada punto de control, usando las dos técnicas de monitoreo

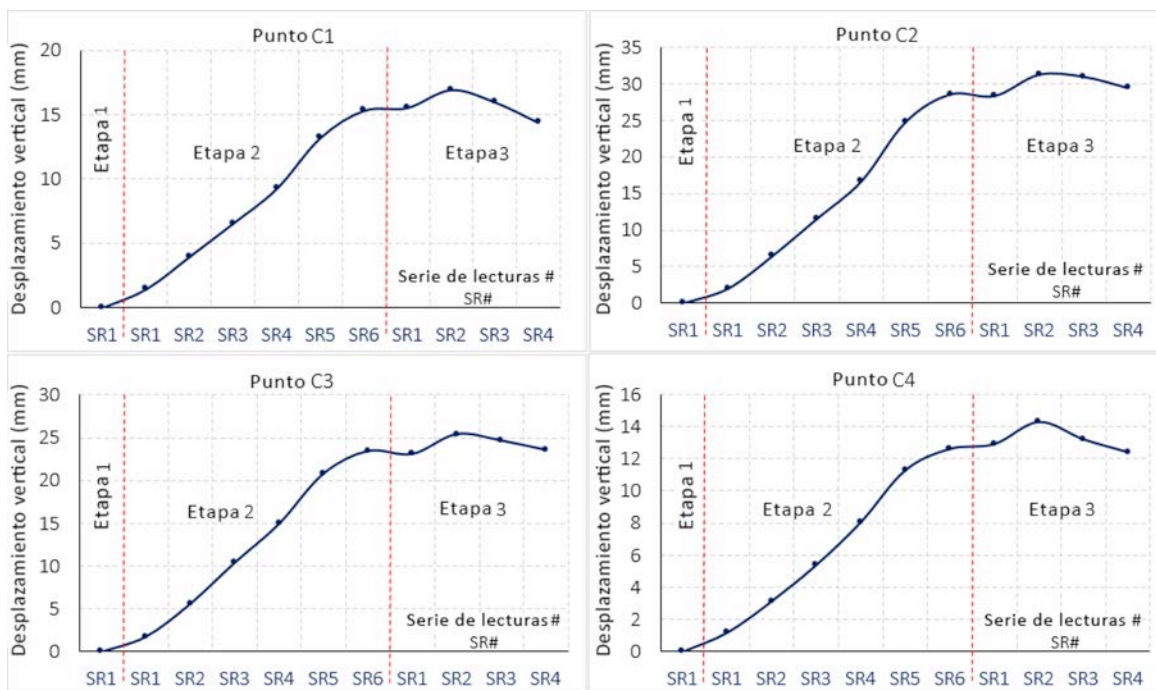


Figura 8. Curvas de comportamiento de los desplazamientos en cada punto monitoreado durante las tres etapas, usando la nivelación geométrica de precisión





## 4. Conclusiones

Basados en la comparación de los procedimientos y de los resultados alcanzados por las dos técnicas empleadas en este estudio, se confirma la utilidad de la nivelación geométrica de precisión para controlar y monitorear los desplazamientos verticales en los elementos estructurales sometidos a obras de refuerzo y recuperación. Por lo tanto, es una técnica confiable y precisa debido principalmente a sus procedimientos bien definidos tanto en la oficina como en la obra, protocolos estrictos para la toma, recopilación y procesamiento de los datos, así como el empleo de equipos de alta precisión. Por consiguiente, la nivelación geométrica de precisión es una alternativa válida para implementar en conjunto con las técnicas de instrumentación estructural, especialmente donde se debe lograr la redundancia en las observaciones, en la recopilación de datos o en el monitoreo de los puntos en los lugares donde la instrumentación con aparatos (sensores) no es accesible.

Si bien la nivelación geométrica no es considerada una técnica moderna en el monitoreo de las estructuras, es económicamente factible, de alta precisión y exactitud,

presenta resultados e incertidumbres aceptables, considerando los procedimientos que normalmente se siguen en los trabajos de recuperación y refuerzo de este tipo de obras.

Algunas diferencias significativas entre la nivelación e instrumentación estructural están relacionadas con el tiempo de montaje e instalación de los equipos. La preparación del trabajo que incluye la colocación de los transductores de desplazamiento requiere de una instalación y desinstalación laboriosa. El uso de la nivelación geométrica exige un equipo de trabajo calificado para el manejo de los instrumentos y cálculos previos.

Con la nivelación es posible monitorear el comportamiento de la estructura post recuperación (a mediano y largo plazo) sin tener la necesidad de exponer los aparatos, que en el caso de los instrumentos es muy costoso, además del alto riesgo de daño a los sensores, en caso de colapso de la estructura.

La técnica de la instrumentación normalmente presenta escasa o nula redundancia en los datos, es limitada para medir las variaciones, sólo es posible en el punto sometido a monitoreo, y no es posible establecer correlaciones entre los puntos.

## 5. Referencias

- Acosta E., Lacy M., Ramos M., Cano J., Herrera A., Aviles M., Gil A. (2018)**, Displacements Study of an Earth Fill Dam Based on High Precision Geodetic Monitoring and Numerical Modeling. *Sensors*. 18(5), 1369: 1-15. <https://doi.org/10.3390/s18051369>.
- Ata E., Hoşbaş R., Pirtti A. (2018)**, Monitoring the Structural Deformation of Davutpasa Barrack by Using Geodetic Methods. *Technical Gezette*. 25(3): 944–947. <https://doi.org/10.17559/TV-20150219031334>.
- Bannister A., Raymond S., Baker R. (1998)**, *Surveying*. Harlow, Essex, England: Addison Wesley Longman Ltd.
- Baroni H. (2003)**, Avaliação do comportamento dos deslocamentos transversais ao longo do tempo em vigas de concreto armado não convencional. Dissertation. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Beshr A. (2015)**, Structural deformation monitoring and analysis of highway bridge using accurate geodetic techniques. *Engineering*. 7(8): 488–498. <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2015.78045>.
- Capra A., Bertacchini E., Castagnetti C., Rivola R., Dubbini M. (2015)**, Recent approaches in geodesy and geomatics for structures monitoring. *Rendiconti Lincei*. 26(1): S53–S61. doi: 10.1007/s12210-015-0436-z.
- Carvalho R., Lopes S., Françoso M. (2001)**, Utilização de equipamentos de topografia para controle de deformação de estruturas. In: XX Congresso Brasileiro de Cartografia, Porto Alegre, pp. 1-6, CD-ROM.
- Costantino D., Angelini M. (2014)**, Structural Monitoring with Geodetic Survey of Quadrifoglio Condominium (LECCE). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-5/W3: 179–187. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W3-179-2013.
- Detchev I., Habib A., El-Badry M. (2011)**, Estimation of vertical deflections in concrete beams through digital close range photogrammetry. In: *The ISPRS Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Calgary, Canada, pp. 219-224.
- Díaz E., Robles P., Tomás R. (2018)**, Multitechnical approach for damage assessment and reinforcement of buildings located on subsiding areas: Study case of a 7-story RC building in Murcia (SE Spain). *Engineering Structures*. 173: 744–757. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.031>.
- El-Ashmawy K. (2017)**, Developing and testing a method for deformations measurements of structures. *Geodesy and Cartography*. 43(1): 35–40. <https://doi.org/10.3846/20296991.2017.1305545>.
- Erol B. (2010)**, Evaluation of High-Precision Sensors in Structural Monitoring. *Sensors*. 10(12): 10803–10827. <https://doi.org/10.3390/s101210803>.
- Gordon S., Lichti D. (2007)**, Modeling Terrestrial Laser Scanner Data for Precise Structural Deformation Measurement. *Journal of Surveying Engineering*. 133(2): 72–80. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2007\)133:2\(72\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2007)133:2(72)).
- Henriques M.J., Casaca J.M. (2001)**, Monitoring vertical displacements by means of geometric levelling. In: PB Lourenço & P Roca (eds.), *Proceedings of the 3rd International Seminar on Historical Constructions*, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, pp. 403-412.
- Kovačič B., Motoh T. (2019)**, Determination of static and dynamic response of structures with geodetic methods in loading tests. *Acta Geodaetica et Geophysica*. <https://doi.org/10.1007/s40328-019-00251-x>.
- Lienhart W. (2017)**, Geotechnical monitoring using total stations and laser scanners: critical aspects and solutions. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 7(3): 315–324. doi: 10.1007/s13349-017-0228-5.
- Lienhart W., Ehrhart M., Grick M. (2017)**, High frequent total station measurements for the monitoring of bridge vibrations. *Journal of applied geodesy*. 11(1): 1–8. <https://doi.org/10.1515/jag-2016-0028>.
- Mascort-Albea E., Jaramillo-Morilla A., Ruiz-Jaramillo J. (2016)**, Proposed methodology for measurement, survey and assessment of vertical



- deformation of structures. *Structural Survey*. 34(3): 276–296. <https://doi.org/10.1108/SS-02-2016-0006>.
- Mill T., Ellmann A., Kiisa M., Idnurm J., Idnurm S., Horemuz M., Aavik A. (2015)**, Geodetic monitoring of bridge deformations occurring during static load testing. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 10 (1): 17–27. <http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2015.03>.
- Mills J., Barber D. (2004)**, Geomatics Techniques for Structural Surveying. *Journal of Surveying Engineering*. 130(2): 56–64. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2004\)130:2\(56\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2004)130:2(56)).
- Mrówczyńska M., Grochowska E., Gibowski S. (2018)**, Monitoring vertical displacements of an engineering object with masonry walls. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. z.65(1/18): 53-62. doi:10.7862/rb.2018.6.
- Mulahusić A., Topoljak J., Tuno N., Ademović N., Vojniković E. (2018)**, Analysis of leveling network of viaduct Koševo. e-Zbornik: Electronic Collection of Papers of the Faculty of Civil Engineering.8(15): 40-50. <https://hrcak.srce.hr/203802>; [orcid.org/0000-0003-3099-8265](https://orcid.org/0000-0003-3099-8265).
- Okiemute E., Ono M., Oduyebo O. (2018)**, Monitoring and Analysis of Vertical and Horizontal Deformations of a Large Structure Using Conventional Geodetic Journal of Environment and Earth Science. 8(12): 52-61. <https://ssrn.com/abstract=3308857>.
- Palazzo D., Santos Filho M., Moreira A. (2005)**, A utilização de técnicas geodésicas no monitoramento de estruturas pré-moldadas. In: Encontro Nacional de Pesquisa Projeto Produção em Concreto Pré-moldado, São Carlos (SP), 03-04 November.
- Reis L. (2001)**, Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado. Dissertation. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Rönholm P., Nuikka M., Suominen A., Salo P., Hyyppä H., Pöntinen P., Haggren H., Vermeer M., Puttonen J., Hirsi H., Kukko A., Kaartinen H., Hyyppä J., Jaakkola A. (2009)**, Comparison of measurement techniques and static theory applied to concrete beam deformation. *The Photogrammetric Record*. 24 (128): 351–371. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2009.00548.x>.
- Sabuncu A., Ozener H. (2014)**, Monitoring vertical displacements by precise levelling: a case study along the Tuzla Fault, Izmir, Turkey. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 5(4): 320–333. <http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2013.810179>.
- Silva I., Segantine P. (2015)**, Topografia para engenharia: teoria e prática de geomática. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Souza V., Ripper T. (1998)**, Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: Pini.
- Tang Y., Kujawski E., Sztubecki J. (2018)**, Improved Leveling Approach and Its Application in Civil Engineering. *Journal of Surveying Engineering*. 144(4): 06018002-1/06018002-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000264](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000264).

