

# Interlaboratory Study on Precision Statement of Using a Terrestrial Laser Scanner to Verify Concrete Tolerance

by Leo (Lingfeng) Zhang, Mike Hernandez, James Dare, Mack Kowalski, and Ezra Che

**T**his article covers a study designed to revisit an ongoing debate regarding the use of three-dimensional (3-D) laser scanners for evaluating concrete construction tolerances. Scanner hardware and software, as well as general practices, continue to evolve, so how has this progress affected the accuracy of scan measurements?

Starting as early as the mid-2010s, laser scanners have been used to evaluate floor flatness and levelness as well as the accuracy of built structures. A 2018 World of Concrete workshop on laser scanners led to a call for action: a jobsite laser scanning study was needed to validate the accuracy, repeatability, and reproducibility of this class of tools. A study plan was subsequently developed to determine if laser scanners had the technical capability to evaluate horizontal and vertical tolerances as specified in ACI SPEC-117-10(15)<sup>1</sup> as well as provide data suitable for determining floor flatness  $F_F$  and floor levelness  $F_L$  per ASTM E1155/E1155M.<sup>2</sup>

The results were published in two *Concrete International* articles.<sup>3,4</sup> Based upon the overall capabilities of the eight participants, the authors of Reference 3 concluded that “it would be appropriate to use a laser scanner for specification compliance when measuring a vertical tolerance of 5/8 in. (15.9 mm) or more and a horizontal tolerance of 1 in. [25.4 mm] or more.” However, an examination of the tabulated data shows that three of the participants were able to achieve much better results than the overall group, both in terms of improved accuracy compared to a total station as well as smaller standard deviations. Could their results be more broadly achieved today? Let’s find out.

## Laser Scanning Background

Laser scanning technology, now ubiquitous in fields ranging from archaeology to medicine, has a fascinating history rooted in the innovative spirit of the twentieth century. While its origins can be traced back to the 1960s, it wasn’t until the late 1990s that laser scanning truly began to revolutionize how people capture and interact with the world.

Early attempts at laser scanning were rudimentary, involving lights, projectors, and cameras to capture surface data. These systems were slow, cumbersome, and lacked the accuracy of modern technology. However, the development of LiDAR (light detection and ranging) in 1985 marked a significant turning point. By using laser pulses to measure distances, LiDAR enabled faster and more accurate 3-D data capture.

The late 1990s saw laser scanning gain popularity in engineering and surveying, thanks in large part to the groundbreaking Cyrax scanner developed by Cyra Technologies. This portable scanner paved the way for wider adoption of the technology. The 2000s brought further advancements with the introduction of 360-degree scanners and significant improvements in speed, accuracy, and portability.

## A spectrum of scanning methods

Today, laser scanning encompasses a variety of techniques, each with its own strengths and applications:

- **Terrestrial Laser Scanning (TLS)**—Often referred to as ground-based LiDAR, TLS involves setting up a scanner on a tripod to capture highly accurate 3-D data of surrounding environments. This method is widely used in surveying, construction, and architectural documentation;

- **Mobile Laser Scanning (MLS)**—MLS systems are mounted on vehicles, enabling rapid data collection over large areas. This is particularly useful for mapping roads, railways, and infrastructure;
- **Airborne Laser Scanning (ALS)**—Mounted on aircraft or drones, ALS systems capture data from above, making them ideal for large-scale mapping, forestry management, and aerial surveys; and
- **Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)**—SLAM technology allows scanners to map an environment while simultaneously determining their location within that environment. This is particularly useful for indoor mapping and robotic navigation.

This diverse range of scanning methods has broadened the applications of laser scanning, making it an essential tool for numerous industries.

### Building the future—Laser scanning in construction

One of the most impactful applications of laser scanning lies within the construction industry. Here, it's transforming workflows and improving efficiency at every stage of a project's life cycle:

- **Pre-construction**—Laser scanning allows for the creation of highly accurate 3-D models of existing sites, providing crucial information for planning and design. This helps identify potential clashes or challenges before construction begins, reducing costly rework;
- **Construction monitoring**—By regularly scanning a site during construction, progress can be tracked against the original design. This helps identify any deviations early on, ensuring that the project stays on schedule and within budget;
- **Quality control**—Laser scanning enables precise measurements and comparisons, ensuring that construction adheres to quality standards and specifications. This minimizes errors and reduces the need for redesign; and
- **As-built documentation**—Upon project completion, laser scanning provides a comprehensive and accurate record of the as-built structure. This valuable documentation can be used for facility management, renovations, and future expansions.

Specific examples of laser scanning in action include:

- **Renovation and restoration**—Laser scanning is invaluable for projects involving existing structures, especially historical buildings. It allows for the creation of detailed digital models that capture intricate architectural features, aiding in preservation efforts and ensuring accurate restoration;
- **Safety exclusion zones, environmental sensitivity, and emergency response**—The scanned context of a proposed building will identify overhead power lines, fire hydrants, mature trees, and storm inlets. Location of power lines and emergency service points will help inform crane setup and site logistics. Mature trees that will be preserved through construction and storm drains also affect concrete pumping and concrete truck washout planning;

- **Mechanical, electrical, and plumbing (MEP) coordination**—Laser scanning helps identify potential clashes between MEP systems and structural elements, streamlining coordination and preventing costly on-site conflicts;
- **Structural analysis**—Scan data can be used to assess the structural integrity of buildings and infrastructure, identifying areas of concern and facilitating maintenance or repair work; and
- **Prefabrication**—Laser scanning supports the growing trend of prefabrication by enabling precise measurements and digital models that ensure accurate fabrication of components off-site.

### Study Scope Design

This study was designed to comply with ASTM E691-23, “Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method.”<sup>5</sup> The focus was on the application of TLS systems, as TLS is widely acknowledged to be the most precise and accurate scanning technique and has been widely adopted to verify dimensions and locations on construction projects. The objectives were to determine the precision, repeatability, and reproducibility of TLS technology when used to verify that constructed concrete elements are within specified tolerances; to provide a bias estimate; to update the conclusions from the previously mentioned study; and to provide insights on factors that could introduce errors in tolerance compliance results. It should be noted that this study was designed to assess the performance of TLS technology on a construction jobsite, rather than in a controlled environment. This study was not intended to reassess the suitability of laser scanning for the F-number system. Further, the study was not designed to compare hardware or software systems.

### Participants and testing area

This study involved 13 participants from various regions across the United States (ASTM E691-23 states that a minimum of six “laboratories” must participate in a study, and it recommends that at least eight are engaged to allow for attrition). The participants volunteered to conduct the testing on a construction site in Santa Cruz, CA, USA, on July 27-28, 2024 (Table 1). The testing area was on Level 2 Pour Area 1 of a building being constructed by The Conco Companies. This level consisted of a post-tensioned (PT) slab that had been placed on July 16 and stressed on July 24. The PT slab formwork remained in place under the test area so the structural dead load would not affect the slab edge or slab opening target locations. The testing area also included columns that were cast on July 23 and shotcrete walls that were placed on July 22. The testing area was cleared for access and safety (Fig. 1).

The participants included contractors, surveyors, service providers, and representatives of scanner manufacturers.

**Table 1:**  
Construction site testing of various TLS equipment

Participant	Role	Region	Hardware	Registration software	Scan setups (1st/2nd)	Experience, years
1	Service provider	Northeast	FARO Premium 70	FARO SCENE 2023.1	20/18	10 to 15
2	Contractor	Southwest	Leica RTC360	Leica Cyclone Register360 V2024.0.1	11/12	15+
3	Contractor	Southwest	FARO Focus Premium 350	FARO SCENE	16/17	10 to 15
4	Manufacturer	Southeast	FARO Focus Premium 350m	FARO Scene 2023.1 and 2024	17/13	Less than 5
5	Contractor	Southwest	Leica RTC360	Leica Cyclone Register360 Plus	12/11	5 to 10
6	Service provider	Northwest			7/6	10 to 15
7	Manufacturer	Midwest			12/10	5 to 10
8	Contractor	Northeast			8/10	Less than 5
9	Surveyor	Southwest	Leica P50	Leica Cyclone	6/5	10 to 15
10	Manufacturer	Rocky Mountain	Trimble X9	FieldLink and Realworks	8/8	5 to 10
11	Surveyor	Southwest		Trimble Realworks	9/8	10 to 15
12	Contractor	Northwest	Leica RTC360	Leica Cyclone Register360 Plus	7/6	10 to 15
13	Manufacturer	Northeast	Z+F Imager 5016	Z+F LaserControl	7/7	15+



**Fig. 1: Testing area, participants, and their TLS instruments (partial)**

While the organizers did not rigorously screen the participants, all the participants were self-qualified to conduct the test with extensive experience in laser scanning. Prior to the testing, two virtual meetings were hosted to help the participants understand the testing tasks and plan the survey accordingly. They were also asked to check and adjust the scanners before the field effort. Then during the test, each participant was given sufficient time to properly operate the equipment.

**Testing material**

“Testing material” consisted of 19 checkpoints, which were either 6 in. (152 mm) black and white (B/W) targets printed on sheets of uncoated, 100 lb paper and affixed to concrete surfaces using a spray adhesive (Fig. 2) or the intersections of fine chalk lines (Fig. 3). Checkpoints 200 to 205 consisted of B/W paper targets on vertical concrete surfaces. Checkpoints 100 to 103 consisted of B/W paper targets on the slab surface, with a 6 in. offset from the slab edge. Checkpoints 300 to 308 consisted of six chalk lines snapped on the surface of a concrete wall to form nine intersection points. The testing material also included 12 control points (CP1 through CP12), which consisted of B/W paddle targets (Fig. 4). Refer to Fig. 5 for a detailed plan of the target distribution.

The positions of the checkpoints and control points were established and independently surveyed by two licensed survey crews (from BKF and KW) and two field engineering crews (from Conco and K&K). Two crews also completed a close-out survey of the control targets to confirm the targets were not disturbed during the 2-day testing period. Least square adjustments were performed on the surveyed points, and final values were agreed upon by the four survey crews.





Fig. 2: One of the black and white (B/W) paper targets used during testing



Fig. 3: Concrete wall with fine chalk lines



Fig. 4: The control points consisted of B/W paddle targets designed to be rotated around the center axes for line-of-sight measurements

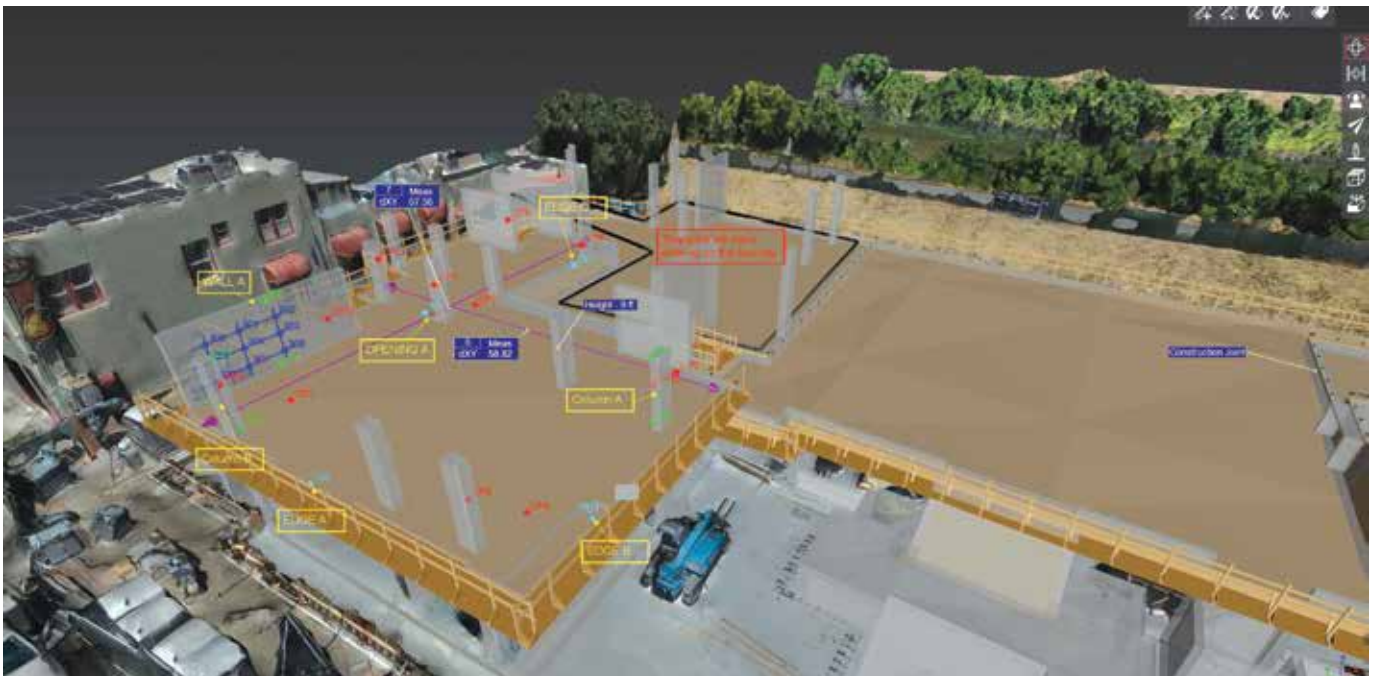


Fig. 5: Plan of target distribution: four control points CP1-4 on slab + eight control points CP5-12 on vertical surfaces; four B/W paper targets on slab edge (100 to 103); four B/W paper targets on column face (200 to 203); two B/W paper targets on wall face (204, 205); and six clear chalk lines on the wall face forming nine intersection points (300 to 308)

The coordinates of the control points were distributed to the scanning participants in a csv format (Point ID, Northing, Easting, Elevation) by email. Participants were asked to determine Northing (Y), Easting (X), and Elevation (Z) coordinates for the 19 checkpoints, using as many of the 12 control points as they deemed necessary for registration (geo-referencing) during post-processing of the point clouds generated by their scanners.

### Testing activities

A pre-testing reception and meeting sponsored by the ASCC Foundation was held on July 26, 2024, the day before Test Day 1, to ensure all participants were familiar with the mission and to distribute files necessary for communicating their results. These files included a Revit model, a two-dimensional (2-D) CAD model, two formatted Excel data sheets, and a survey. The Revit and CAD models provided design locations for the points in the testing area, and they shared the same origin as the control points on the testing site. Excel sheet B.1 was formatted for inputting Northing, Easting, and Elevation values on the checkpoints. Excel sheet B.2 was formatted for inputting the distance deviation values compared to the design locations for Column A, Column B, Wall A, Edge A, Edge B, Edge C, and Opening A (Fig. 5). The survey included questions regarding data collection and registration files for future study. Participants were also asked to provide ASTM E575 data exchange files for their scans. These files will be used by the authors in a follow-up analysis.

Each participant performed scans twice over the weekend to meet the minimum requirement for a repeatability study, and each participant applied their own best practices and workflow individually (they were free to select the TLS setup points and scan densities they deemed necessary to establish setup positions).

### Data Analysis

#### Part 1a – Precision statement

This study includes 10 paper targets and nine chalk-line intersections, collectively referred to as “targets” in the context below. Nineteen target x, y, and z coordinates from each participant on both days were arranged in rows and columns in a spreadsheet (B.1). Two participants were unable to provide chalk-line intersection coordinates due to scanning setup parameters and photo capturing limitations that prevented the intersections from being visible in the point cloud data. Additionally, one participant was unable to return coordinates for checkpoint 101 due to data capturing and line-of-sight limitations. The total returned values are 456 counts for each coordinate x, y, and z. Each target coordinate (x, y, and z) exists in 3-D space. The vector magnitude on the 2-D plane was calculated using the square root of the sum of the squares of x and y coordinates, and the vector magnitude in 3-D was calculated using the square root of the sum of the squares of x, y, and z coordinates;

2-D and 3-D values were included in the same spreadsheet. Then, cell statistics were calculated per ASTM E691-23, Section 15.4,<sup>5</sup> which provided the cell average, cell deviation, *h*-value between-laboratory consistency, and *k*-value within-laboratory consistency of test results of the participant. Next, precision statistics were calculated per ASTM E691-23, Sections 15.5 and 15.6, which provide the repeatability standard deviation and reproducibility standard deviation (Fig. 6). Meanwhile, consistency statistics *h* and *k* were calculated per ASTM E691-23, Section 15.7, and *h*-value and *k*-value graphs were provided (Fig. 7). The *h* and *k* graphs provide an overall picture of the variability of the results as well as single out the outliers to be investigated. In this study, a significance level of 1.0% was chosen for the *h* and *k* analysis, as the data judgment suggested that using a higher significance level would not result in an excessive number of outliers. The results showed that four targets from participants 3, 10, and 13 fell outside the 2.41 critical value in the *h* study, while two targets from participants 3 and 8 fell outside the 2.54 critical value in the *k* study. These six outliers were investigated and deemed not significant enough to be excluded from the analysis. Therefore, all data were retained for the precision statement analysis and bias estimation.

The repeatability standard deviation (Sr) and reproducibility standard deviation (SR) for each target are

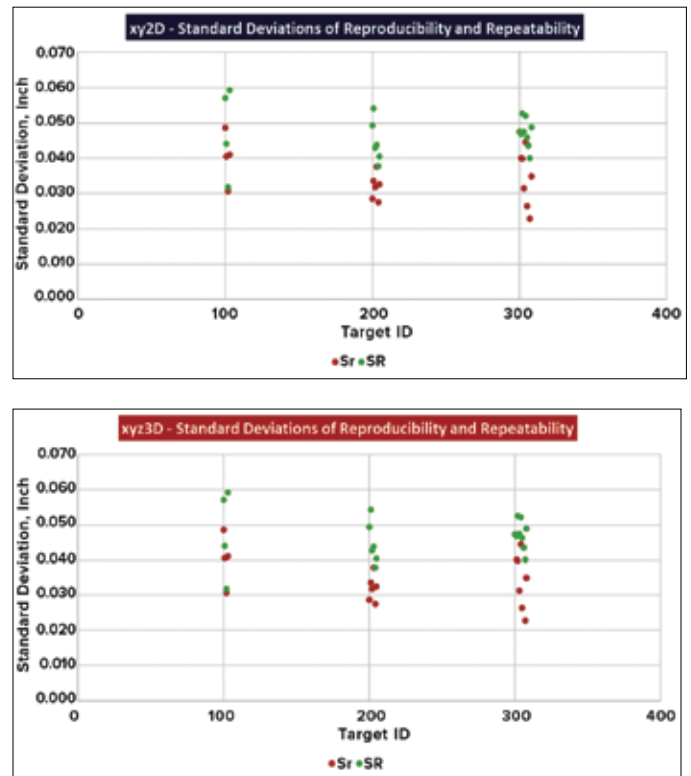


Fig. 6: Precision statistics: repeatability standard deviation and reproducibility standard deviation for 2-D (top) and 3-D (bottom) values (Note: 1 in. = 25.4 mm)

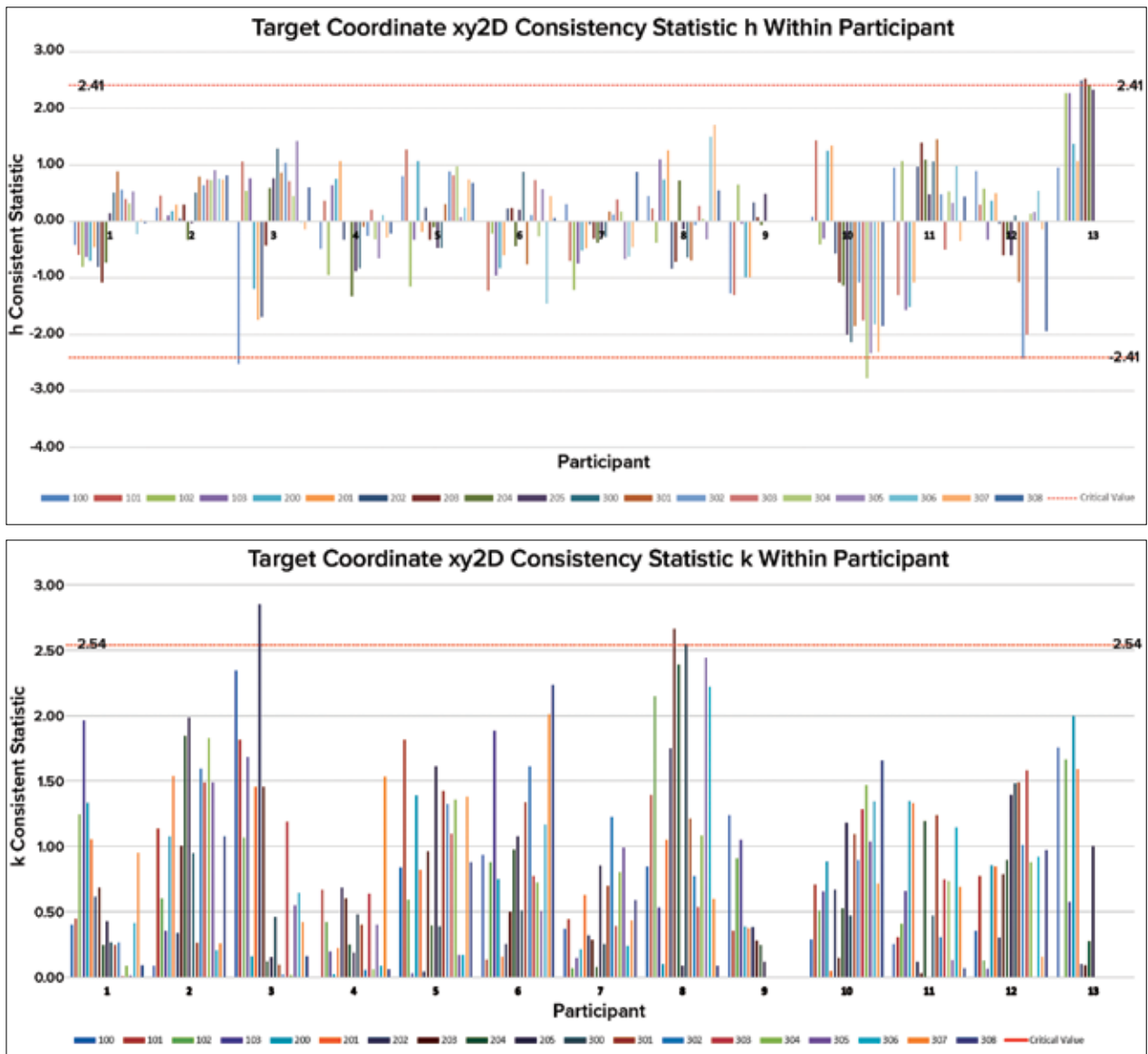


Fig. 7: Consistency statistics: *h*—the between-laboratory and *k*—the within-laboratory consistency of test results of participants

presented in Fig. 6. The data show that the standard deviation ranges from 0.020 to 0.060 in. (0.5 to 1.5 mm), with minimal variation between B/W targets on horizontal surfaces (100 series), B/W targets on vertical surfaces (200 series), and chalk-line intersections. Thus, the 95% repeatability and reproducibility limits, according to Eq. (12) and (13) in ASTM E691-23, range from 0.056 to 0.168 in. (1.4 to 4.3 mm), approximately 1/8 in. (3.2 mm).

### Part 1b – Bias estimate

Two 1 second Leica total stations and one 0.5 second Trimble total station were used to establish reference ground truth measurements. Least squares adjustments were applied to all measurements at control points CP1 to 12, and the coordinates for all checkpoints were surveyed by four different parties, who reached a consensus on the

final values. Root mean square error (RMSE) is a commonly used metric to assess the accuracy of a model or measurement system by calculating the square root of the average squared differences between predicted and observed values. It provides a measure of how well a model’s predictions match actual observed data. A lower RMSE value indicates better accuracy, while a higher value suggests greater discrepancies between predicted and observed results. In this study, 456 target coordinates (*x*, *y*, and *z*) were entered into a spreadsheet as predicted values, and the corresponding errors were calculated using the target coordinates (*x*, *y*, and *z*) from total station measurements as observed values. The square root of the sum of squares was then computed to determine the 2-D error on the *x-y* plane and the 3-D error in space. Coefficients for the 95% confidence level (1.9600 for 1-D,



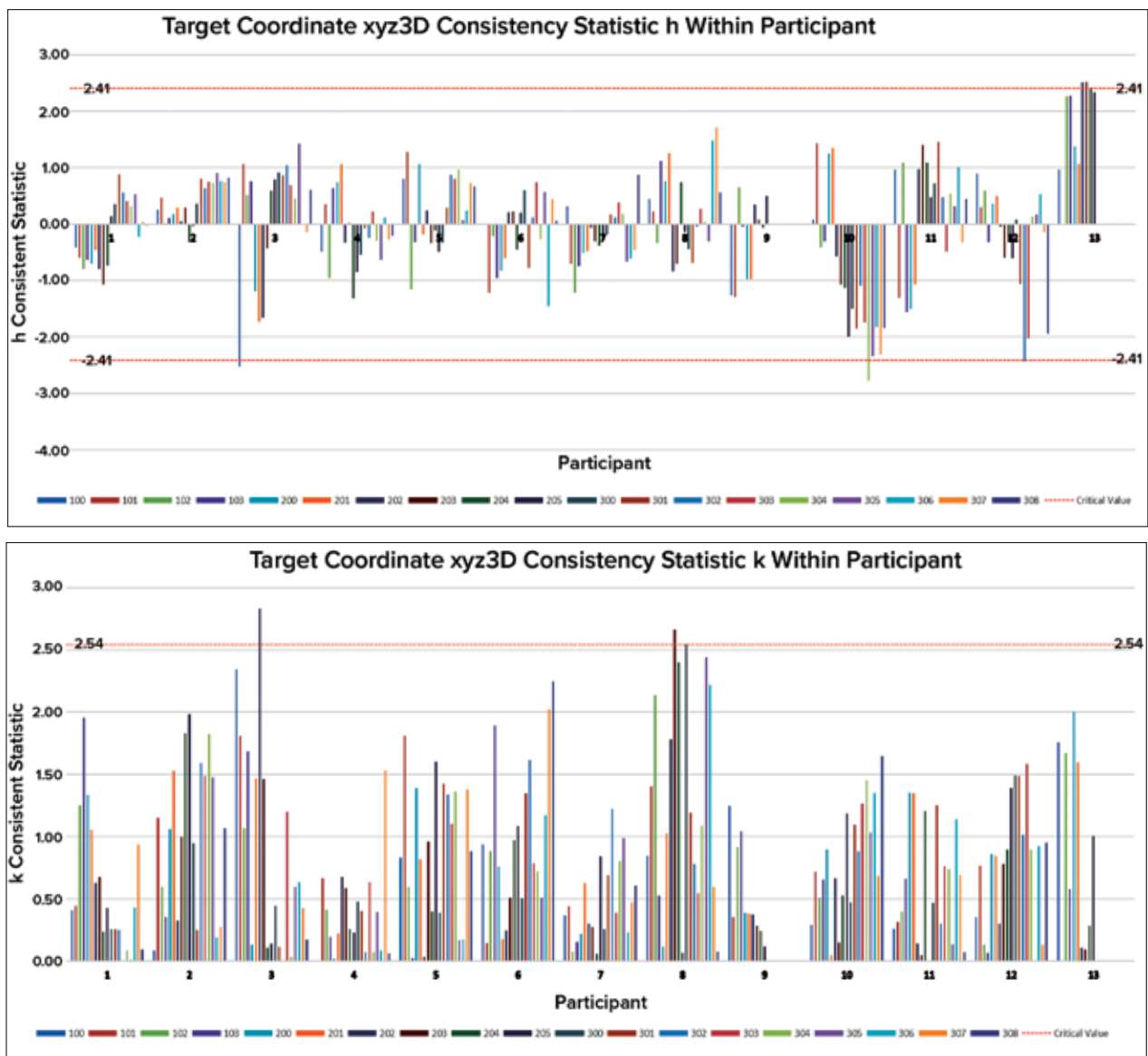


Fig. 7: Continued from previous page

1.7308 for 2-D, and 1.6166 for 3-D) were applied.<sup>7</sup> From the 456 data points, the 2-D RMSE at the 95% confidence level was calculated to be 0.125 in. (3.2 mm), and the 3-D RMSE at 95% was 0.142 in. (3.6 mm); refer to Table 2.

### Part 1c – Comparison with 2018 study

The conclusion of the 2018 ASCC laser scan study highlighted that, due to the significantly smaller errors observed in the top three participants, using their standard deviations (SDs) as the standard uncertainty values would reduce the horizontal and vertical tolerances by approximately 50% and 30%, respectively. Table 3 indicates that the results of all 13 participants align with those of the top three participants from the 2018 study. Figure 8 presents histograms showing the error relative to ground truth values for 456 targets from all participants.

### Part 2 – Tolerance interpretation from each participant with statistics

When it comes to as-built drawings showing deviations of existing concrete elements from their design locations—whether on the x-y plane or the z elevation—various drawing or report styles are used. These include spot as-builts indicating deviations from the design location in a 3-D model, 2-D CAD format or PDF drawing, slab elevation heat maps, vertical plumbness heat maps or section profiles, gridded elevation markups, scan-to-BIM models, 3-D deviation heat maps, and more. We know that processes such as averaging, resampling, smoothing, meshing, or best-fit techniques applied to point cloud data can introduce errors. One of the objectives of this study is to examine how these operations affect the end result when using a relatively precise and accurate point cloud data set.

**Table 2:**  
Target errors from laser scan versus total station, in.

Bias statistics	Y	X	Z	XY (2D)	XYZ (3D)
Mean	-0.012	-0.002	-0.011	0.061	0.078
Range	0.377	0.354	0.397	0.251	0.323
Minimum	-0.203	-0.212	-0.184	0.002	0.008
Maximum	0.174	0.142	0.214	0.252	0.331
Count	456.000	456.000	456.000	456.000	456.000
RMSE	0.053	0.049	0.050	0.072	0.088
Confidence level (95.0%)	0.104	0.097	0.098	0.125	0.142

Note: 1 in. = 25.4 mm

**Table 3:**  
Results of all 13 participants from the 2018 study

	2018 study, 8 participants			2018 study, 3 participants with lowest errors			2024 study, 13 participants		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Count	310	310	310	114	114	114	456	456	456
Standard dev., in.	0.125	0.106	0.082	0.056	0.074	0.057	0.049	0.052	0.049
8 X U, in.	<b>1.002</b>	<b>0.852</b>	<b>0.653</b>	0.445	0.590	0.456	<b>0.395</b>	<b>0.413</b>	<b>0.393</b>
Min. tolerance	1 in. or > horizontal		5/8 in. vertical				1/2 in. or > horizontal and vertical		

Note: 1 in. = 25.4 mm

All participants were provided with a Revit model and a 2-D CAD file displaying the concrete elements to be examined. These digital design files share the same coordinate system as the survey controls provided, allowing the location and elevation deviations from the design to be inspected by overlaying the point cloud data with the digital design files. Participants were instructed to return deviation values from the design at four areas on the slab edge and slab openings (targets 100, 101, 102, and 103), as well as at two column surfaces (top and bottom) and walls (top and bottom). To ensure consistency in comparison, targets from the 100 and 200 series can be used to evaluate deviations at the same spots. Alternatively, the actual edges of the slabs can be used, as the targets near the edges were established with an exact 6 in. offset. Similarly, the column concrete surfaces can be used, as the targets were directly attached to the concrete surfaces.

Ground truth was established by importing total station measurements of these targets into an Autodesk Civil3D floor plan. Perpendicular measurements were taken from the total station points to the concrete elements to determine the deviation values on the x-y plane for all 10 targets (or concrete elements). Similarly, deviations in the z-axis for the four slab targets were calculated by subtracting the design elevations from the total station elevation measurements at these four targets. The deviation values were analyzed using their absolute values.

Eight participants were able to provide deviation values,

resulting in 80 data points for the x-y plane and 32 data points for the z-axis used in the analysis. Table 4 presents the statistics and comparison of the 10 target (concrete element) deviation values from the 19 target coordinates measured directly from the laser scan. The standard deviations of the XY and Z deviations were approximately double those of the direct laser scan measurements, indicating that errors were introduced when participants analyzed the deviations from the design. One contributing factor identified was that one target was located in a depressed area of the slab, meaning the design slab elevation did not align with the “flat” area, which some participants failed to account for, resulting in human error. Figure 9 provides an example illustrating how point cloud noise, the best-fit algorithm, or human error can affect the end result when determining tolerance compliance. The deviation measurements, ranging from 0.017 to 0.030 in. (0.43 to 0.76 mm), were observed from the best plane extraction (blue plane), point cloud on the edge, and two meshing parameters. This example covers a small area, but the impact could be more significant at a larger scale.

### Conclusion and Recommendations

The 2018 ASCC laser scan study suggested that it would be appropriate to use a laser scanner for specification compliance when measuring a vertical tolerance of 5/8 in. or more and a horizontal tolerance of 1 in. or more. It was also found that the top three participants with the lowest errors



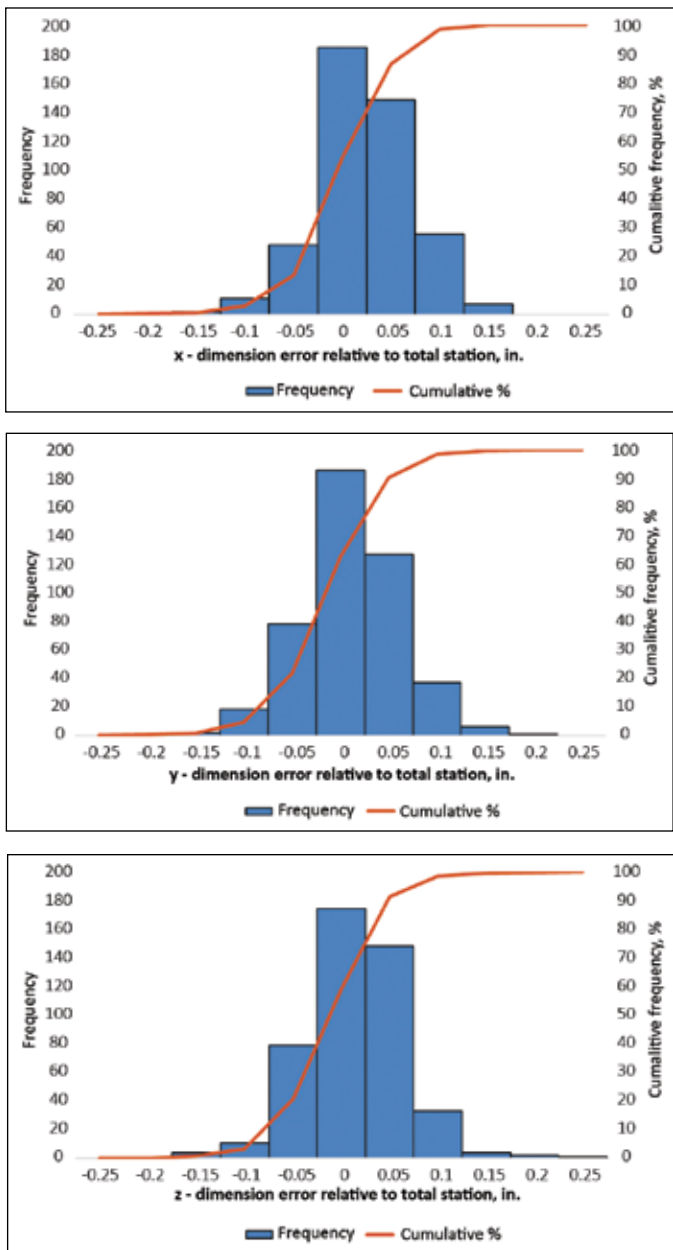


Fig. 8: Histograms showing the error relative to ground truth values for 456 targets from all participants (Note: 1 in. = 25.4 mm)

Table 4:

Comparison of 10 target (concrete element) deviation values from 19 target coordinates measured directly from the laser scan

Statistic	19 target coordinates		Deviation from scan to design on 10 targets	
	X and Y target analysis	Z target analysis	X and Y deviation from design	Z deviation from design
Count	456	456	80	32
Minimum, in.	0.002	-0.184	0.000	0.000
Maximum, in.	0.252	0.214	0.263	0.431
Average, in.	0.061	-0.011	0.068	-0.011
SD, in.	0.038	0.049	0.065	0.112

Note: 1 in. = 25.4 mm

were able to reduce the horizontal and vertical tolerance by approximately 50% and 30%, respectively, by using SDs as the standard uncertainty values. A concept of uncertainty ratio was introduced to determine how much measurement tolerance should be allocated for construction accuracy. ANSI/NCSL Z540.3:2006<sup>8</sup> test uncertainty ratio (TUR) 1:4 was introduced and applied in that study.

In summary, it was suggested that the ratio between the standard deviation of the mean (or individual measurements) and the construction tolerance should be 1:8.

The U.S. Institute of Building Documentation (USIBD) Level of Accuracy (LOA) Specification Guide<sup>9</sup> provides heuristic guidance for sensor measurement standard deviation in regard to overall tolerance. Generally, the SD has to be roughly one-fifth of the overall tolerance for  $P = 30\%$  and  $1-a = 95\%$  to match the manufacturing requirements, where  $P$  represents the proportion of measurement tolerance in regard to overall tolerance<sup>8</sup>.

ACI PRC-117.114, “Guide for Tolerance Compatibility in Concrete Construction,”<sup>10</sup> provides an example in Section 3.4.4. It is reasonable to have a measurement precision at 99.7% confidence level (three standard deviations) to be one-third of the construction tolerance.

Based on similar studies and recommendations from various industries, as well as the analysis from this study, the authors repeated the 8x measurable SD to the applicable concrete construction tolerance in the conclusions. It is reasonable to recommend the use of a TLS for specification compliance when measuring horizontal and/or vertical tolerances of 0.5 in. (13 mm) or more.

Recognizing the growing importance of laser scanning in construction, ACI Subcommittee 117-L, Laser Scanning, has focused its efforts on concrete verification using TLS for this study. This emphasis stems from the unique advantages TLS offers over other methods for this purpose. First, TLS provides highly accurate and dense 3-D data capture, enabling precise measurements of concrete surfaces. This level of detail is crucial for identifying subtle deviations from design specifications and ensuring compliance with tolerances. Secondly, TLS offers a noncontact measurement approach, minimizing the risk of damaging or disturbing the concrete

surface during inspection. This is particularly important for freshly placed concrete or delicate finishes. Finally, TLS enables efficient data collection, reducing the time and labor required for comprehensive inspections compared to traditional methods.

So, what is next? While the adoption of laser scanning and reality capture technologies in the concrete industry enhances project efficiency, reduces costs, and improves quality and safety, it is important to acknowledge the potential dependency on such technologies. Overreliance on equipment and software that may become outdated or prone to technical issues could pose challenges. Many organizations, including but not limited to ACI Subcommittee 117-L, The COMMITTEE (a new testing organization), the Reality Capture Network (RCN), and the U.S. Institute of Building Documentation (USIBD), have taken steps to test these

technologies. Therefore, the authors encourage further studies to evaluate these technologies on active construction projects to better understand their long-term viability and limitations in real-world applications.

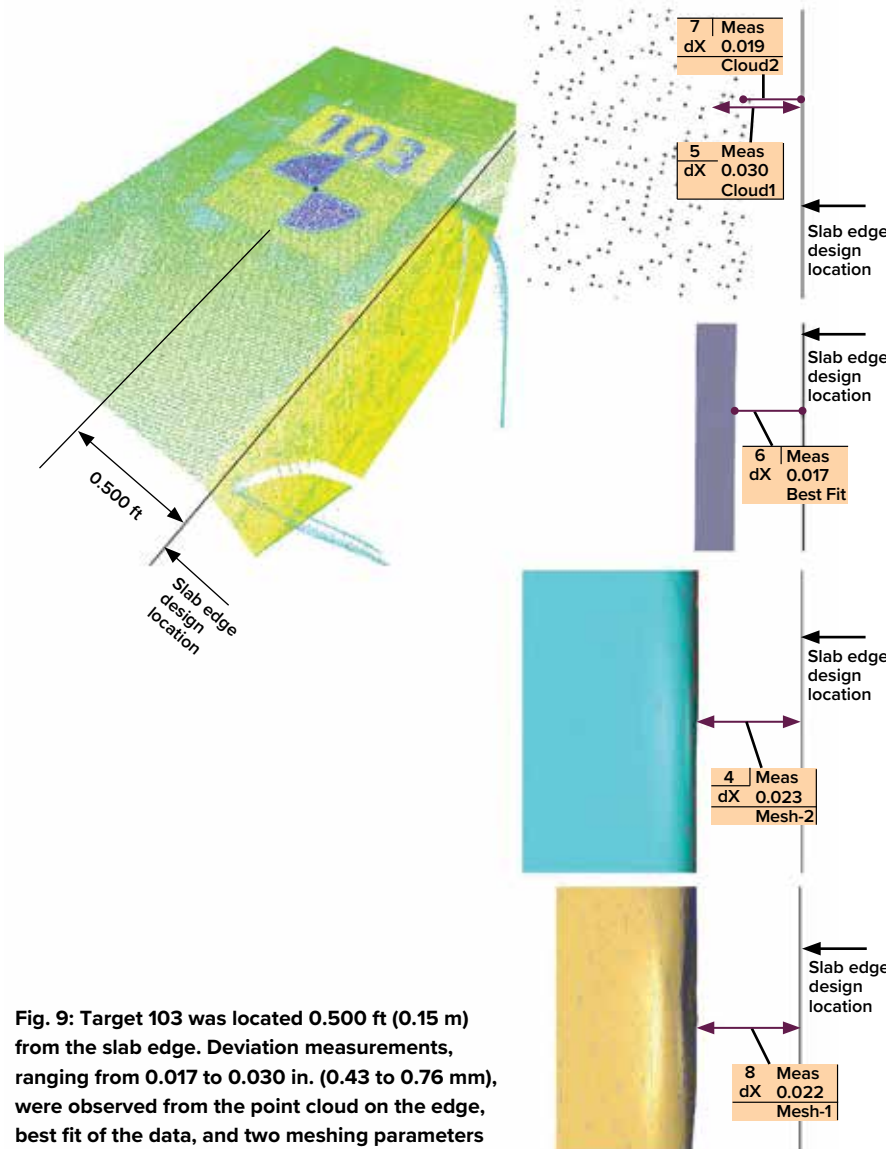
### Project Credits

The authors acknowledge the following individuals and companies for supporting the study: Bruce Suprenant, Concrete Consultant; Scott Anderson and Michael Schneider, ASCC Foundation; James Klinger, Ray Hefner, and Erica Stone, ASCC; Rex Donahey, ACI; Chad Watson, Mike Leon, Mariah Garcia, and Jose Laguna, The Conco Companies; Nick Garcia and Francisco Choto, Western National Contractors; Chris Garcia and Josh DeStefano, DPR Construction; Juergen Mauer and Joseph Carter, Z+F USA, Inc.; Joe Merritt, Baker Construction; John Marino, FARO Technologies, Inc.;

Michael Harvey, Leica Geosystems; Mike Collins, BKF Engineers; Chuck McCallum and Marilynn Stratton, Kier + Wright; David Larson, BuildingPoint Pacific; and Rothbucher System.

Study participants included:

- Melinda Hanneson and Lukas Duruttya, DiCarlo Precision Instrument, Inc.;
- Keaton Clark, DPR Construction;
- Eric Peterson, Webcor Construction;
- Noah Wells, FARO Technologies, Inc.;
- Javier Lagarde, Rodrigo Jimenez, Hunter Keck, and Luis Sierra, The Conco Companies;
- Mack Kowalski, Kettler & Kowalski LiDAR Scanning Services;
- Ted Moberg, Leica Geosystems;
- Yesenia Agreda and Jose Monroy, Baker Construction;
- Sanela Domitrovic, Colby Qualls, Jose Guzman, and Servando Renteria, BKF Engineers;
- Steven Ostrowski, Trimble Inc.;
- Casey R. Lynch, Chuy Martinez, Javier Martinez, Ricardo Martinez, and Steven Ramirez, Kier + Wright;
- Gabriel Kettler, Turner Construction; and
- Andrew Thierwechter, Z+F USA, Inc.



**Fig. 9:** Target 103 was located 0.500 ft (0.15 m) from the slab edge. Deviation measurements, ranging from 0.017 to 0.030 in. (0.43 to 0.76 mm), were observed from the point cloud on the edge, best fit of the data, and two meshing parameters

### References

1. Joint ACI-ASCC Committee 117, "Specification for Tolerances for Concrete Construction and Materials and Commentary (ACI SPEC-117-10) (Reapproved 2015)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2010, 76 pp.

2. ASTM E1155/E1155M-23, "Standard Test Method for Determining  $F_F$  Floor Flatness and  $F_L$  Floor Levelness Numbers," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, 9 pp.

3. Paul, W.; Klinger, J.; and Suprenant B.A., "ASCC 3-D Laser Scanning Study, Part 1: Eight participants used scanners to determine target coordinates," *Concrete International*, V. 41, No. 1, Jan. 2019, pp. 22-29.

4. Paul, W.; Klinger, J.; and Suprenant, B.A., "ASCC 3-D Laser Scanning Study, Part 2: Eight participants used scanners to determine F-numbers," *Concrete International*, V. 42, No. 2, Feb. 2020, pp 30-36.

5. ASTM E691-23, "Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, 23 pp.

6. ASTM E2807-11(2019), "Standard Specification for 3D Imaging Data Exchange, Version 1.0," ASTM International, West Conshohocken,

PA, 2023, 26 pp.

7. Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; and Wasle, E., *GNSS – Global Navigation Satellite Systems*, SpringerWienNewYork, 2008, 516 pp.

8. ANSI/NCSL Z540.3:2006 (R2013), "Requirements for the Calibration of Measuring and Test Equipment," National Conference of Standards Laboratories, Glen Ellyn, IL, 2013, 21 pp.

9. "USIBD Level of Accuracy (LOA) Specification Guide," U.S. Institute of Building Documentation, 2016, 30 pp.

10. Joint ACI-ASCC Committee 117, "Guide for Tolerance Compatibility in Concrete Construction (ACI PCR-117.1-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 47 pp.

Selected for reader interest by the editors.



ACI member **Leo (Lingfeng) Zhang** is a Virtual Construction Manager at The Conco Companies, Concord, CA, USA. He is a member of ACI Committee 131, Building Information Modeling of Concrete Structures, and Joint ACI-ASCC Committee 117, Tolerances. He is Chair of ACI Subcommittee 117-L, Laser Scanning. Zhang received his BS in material

physics from Dalian University of Technology, Dalian, China, and his MS in construction management from the University of Florida, Gainesville, FL, USA.



**Mike Hernandez**, FACI, is the ASCC Technical Director. Hernandez has over 25 years of construction operations experience and is a licensed professional engineer in Colorado and Florida. He is a member of ACI Committee 131 and Joint ACI-ASCC Committee 117 as well as several other ACI committees. He also serves as Co-Chair of the ASCC Technical, Finishing,

and Sustainability Committees.



**James Dare** is a Flooring Consultant working for the CoGri Group of companies. He has over 15 years of experience in the industrial concrete flooring industry and has been involved in designing, surveying, testing, constructing, and rectifying high-tolerance floors for the logistics industry. He has been involved in many studies

to investigate survey methods and equipment to achieve the high accuracies required to measure floor surface regularity for current and future automated warehouse systems. He is based in the United Kingdom but works worldwide supporting clients and the global CoGri Group offices.



**Mack Kowalski** is dedicated to exploring reality capture techniques. He is a member of ACI Subcommittee 117-L. He previously headed the survey department of a major construction company. His interest in LiDAR technology grew over time, leading him to join a leading Leica dealership in 2022. He co-founded LiDAholics

Consulting L.L.C. and K&K Laser Scanning, where he continues to contribute to industry advancement. He also shares his expertise through writing for *xyHt* magazine and contributing to *LiDAR News*.



**Ezra Che** is a Research Assistant Professor of Geomatics at Oregon State University, Corvallis, OR, USA. His research focuses on efficient 3-D point cloud processing and applications as well as geospatial data error modeling. He is also CTO and a co-founder of EZDataMD, a tech transfer company providing technical solutions in 3-D point cloud data processing and

applications through custom software development, application testing, surveying, and technology consulting. Che serves as the Data Analytics Lead for the NSF Natural Hazards Engineering Research Infrastructure RAPID Facility, an Associate Editor of the *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, and as an Editorial Board member of the *Photogrammetric Record*.

## Estudio Inter laboratorio sobre la Precisión al Usar un Escáner Láser Terrestre para Verificar Tolerancias en el Concreto

Por Leo (Lingfeng) Zhang, Mike Hernández, James Dare, Mack Kowalsky y Ezra Che

Este artículo aborda un estudio diseñado para reconsiderar un debate en curso sobre el uso de escáneres láser tridimensionales (3D) para evaluar las tolerancias en la construcción de concreto. Tanto el hardware y software de los escáneres como las prácticas generales continúan evolucionando, por lo que surge la pregunta, ¿cómo ha afectado este progreso la precisión de las mediciones por escaneo?

A partir de mediados de la década de 2010, los escáneres láser se han utilizado para evaluar la planicidad y nivelación de los pisos, así como la precisión de las estructuras construidas. Un taller sobre escáneres láser en el *World of Concrete* de 2018 despertó la inquietud de que se necesitaba un estudio sobre el uso de escáneres láser en campo para validar la precisión, repetibilidad y reproducibilidad de esta clase de herramientas. Posteriormente, se desarrolló un plan de estudio para determinar si los escáneres láser tenían la capacidad técnica para evaluar las tolerancias horizontales y verticales según lo especificado en ACI SPEC-117-10(15)<sup>1</sup>, así como proporcionar datos adecuados para determinar la planicidad de pisos  $F_F$  y la nivelación de pisos  $F_L$  según ASTM E1155/E1155M.<sup>2</sup>

Los resultados se publicaron en dos artículos de *Concrete International*.<sup>3,4</sup> Basado en las capacidades generales de los ocho participantes, los autores de la referencia 3 concluyeron que “sería apropiado utilizar un escáner láser para verificar el cumplimiento de las especificaciones cuando se mida una tolerancia vertical de 5/8 de pulgada (15.9 mm) o más y una tolerancia horizontal de 1 pulgada [25.4 mm] o más”. Sin embargo, un examen de los datos tabulados muestra que tres de los participantes pudieron lograr resultados mucho mejores que el grupo en general, tanto en términos de mayor precisión en comparación con una estación total, como en menores desviaciones estándar. ¿Podrían sus resultados alcanzarse de manera más amplia hoy en día? Vamos a averiguarlo.

La tecnología de escaneo láser, ahora se ubica en campos que van desde la arqueología hasta la medicina, tiene una historia fascinante enraizada en el espíritu innovador del siglo XX. Aunque sus orígenes se remontan a la década de 1960, no fue hasta finales de la década de 1990 que el escaneo láser comenzó a revolucionar la manera en que las personas capturan e interactúan con el mundo.

Los primeros intentos de escaneo láser fueron rudimentarios, involucrando luces, proyectores y cámaras para capturar datos de superficie. Estos sistemas eran lentos, torpes y carecían de la precisión de la tecnología moderna. Sin embargo, el desarrollo de LiDAR (detección y medición por láser) en 1985 marcó un punto de inflexión significativo. Al utilizar pulsos láser para medir distancias, LiDAR permitió una captura de datos 3D más rápida y precisa.

A finales de la década de 1990, el escaneo láser ganó popularidad en la ingeniería y la topografía, gracias en gran parte al innovador escáner Cyrax desarrollado por Cyra Technologies. Este escáner portátil allanó el camino para una adopción más amplia de la tecnología. En los años 2000 se dieron avances adicionales con la introducción de escáneres de 360 grados y mejoras significativas en velocidad, precisión y portabilidad.

### Una Revisión de Métodos de Escaneo

Hoy en día, el escaneo láser abarca una variedad de técnicas, cada una con sus propias fortalezas y aplicaciones:

- **Escaneo Láser Terrestre (TLS):** También conocido como LiDAR basado en el suelo, el Escaneo Láser Terrestre (TLS por sus siglas en inglés) implica configurar un escáner en un trípode para capturar datos 3D altamente precisos de los entornos circundantes. Este método se utiliza ampliamente en topografía, construcción y documentación arquitectónica.
- **Escaneo Láser Móvil (MLS):** Los sistemas MLS se montan en vehículos, lo que permite la recolección rápida de datos sobre grandes áreas. Esto es particularmente útil para la cartografía de carreteras, ferrocarriles e infraestructura.
- **Escaneo Láser Aerotransportado (ALS):** Montados en aeronaves o drones, los sistemas ALS capturan datos desde el aire, lo que los hace ideales para la cartografía a gran escala, la gestión forestal y las encuestas aéreas.



- **Localización y Mapeo Simultáneos (SLAM):** La tecnología SLAM permite que los escáneres mapeen un entorno mientras determinan simultáneamente su ubicación dentro de ese entorno. Esto es particularmente útil para el mapeo interior y la navegación robótica.

Esta diversa gama de métodos de escaneo ha ampliado las aplicaciones del escaneo láser, convirtiéndolo en una herramienta esencial para numerosas industrias.

## Construyendo el Futuro: El Escaneo Láser en la Construcción

Una de las aplicaciones más impactantes del escaneo láser se encuentra en la industria de la construcción. Dentro de esta industria, el escaneo láser está transformando los flujos de trabajo y mejorando la eficiencia en cada etapa del ciclo de vida de un proyecto:

- **Pre-construcción:** El escaneo láser permite la creación de modelos 3D altamente precisos de los sitios existentes, proporcionando información crucial para la planificación y el diseño. Esto ayuda a identificar posibles conflictos o desafíos antes de que comience la construcción, reduciendo costosas modificaciones.
- **Monitoreo de la construcción:** Al realizar escaneos periódicos en el sitio durante la construcción, se puede seguir el progreso en comparación con el diseño original. Esto ayuda a identificar cualquier desviación de manera temprana, asegurando que el proyecto se mantenga dentro del cronograma y el presupuesto.
- **Control de calidad:** El escaneo láser permite mediciones precisas y comparaciones, asegurando que la construcción se ajuste a los estándares y especificaciones de calidad. Esto minimiza errores y reduce la necesidad de rediseñar.
- **Documentación de “obra terminada”:** Al finalizar el proyecto, el escaneo láser proporciona un registro completo y preciso de la estructura tal como se construyó. Esta valiosa documentación se puede utilizar para la gestión de instalaciones, renovaciones y futuras expansiones.

Ejemplos específicos de escaneo láser en acción:

- **Renovación y restauración:** El escaneo láser es invaluable en proyectos que involucran estructuras existentes, especialmente edificios históricos. Permite la creación de modelos digitales detallados que capturan características arquitectónicas intrincadas, ayudando en los esfuerzos de preservación y asegurando una restauración precisa.
- **Zonas de exclusión por seguridad, sensibilidad ambiental y respuesta a emergencias:** El análisis del contexto escaneado de un edificio propuesto permite identificar líneas eléctricas aéreas, hidrantes, árboles maduros y sumideros de tormentas. La ubicación de las líneas eléctricas y los puntos de servicios de emergencia ayuda a planificar la instalación de grúas y la logística del sitio. Los árboles maduros que se preservarán durante la construcción y los drenajes de tormenta afectan la planificación de bombeo de concreto y lavado de camiones de concreto.
- **Coordinación de sistemas mecánicos, eléctricos y de plomería (MEP):** El escaneo láser ayuda a identificar posibles conflictos entre los sistemas MEP y los elementos estructurales, facilitando la coordinación y evitando costosos conflictos en el sitio.
- **Análisis estructural:** Los datos de escaneo pueden utilizarse para evaluar la integridad estructural de edificios e infraestructuras, identificando áreas de preocupación y facilitando trabajos de mantenimiento o reparación.
- **Prefabricación:** El escaneo láser respalda la creciente tendencia de la prefabricación, permitiendo mediciones precisas y modelos digitales que garantizan una fabricación exacta de componentes fuera del sitio.

## Alcance del Estudio

### Diseño

Este estudio fue diseñado para cumplir con la norma ASTM E691-23, “Práctica estándar para realizar un estudio Inter laboratorio para determinar la precisión de un método de prueba”.<sup>5</sup> El enfoque estuvo en la aplicación de los sistemas TLS (Escaneo Láser Terrestre), ya que TLS es ampliamente reconocido como la técnica de escaneo más precisa y exacta, y se ha adoptado ampliamente para verificar dimensiones y

ubicaciones en proyectos de construcción. Los objetivos del estudio fueron determinar la precisión, repetibilidad y reproducibilidad de la tecnología TLS cuando se utiliza para verificar que los elementos de concreto construidos están dentro de las tolerancias especificadas, proporcionar una estimación de sesgo, actualizar las conclusiones del estudio mencionado previamente, y proporcionar información sobre los factores que podrían introducir errores en los resultados de cumplimiento de tolerancia.

Es importante destacar que este estudio fue diseñado para evaluar el rendimiento de la tecnología TLS en un sitio de construcción, y no en un entorno controlado. Además, este estudio no tenía la intención de reevaluar la idoneidad del escaneo láser para el sistema de números F (F-number system). Tampoco fue diseñado para comparar diferentes sistemas de hardware o software.

### Participantes y Área de Prueba

El estudio involucró a 13 participantes de diversas regiones de los Estados Unidos (la norma ASTM E691-23 establece que se debe contar con un mínimo de seis “laboratorios” para participar en un estudio, y recomienda al menos ocho para permitir la deserción). Los participantes se ofrecieron voluntariamente para realizar las pruebas en un sitio de construcción en Santa Cruz, California, EE. UU., los días 27 y 28 de julio de 2024 (Tabla 1). El área de prueba estaba ubicada en el Área de Colado 1 del Nivel 2 de un edificio en construcción por parte de The Conco Companies. Este nivel consistía en una losa postensada (PT) que fue colocada el 16 de julio y tensada el 24 de julio. El encofrado de la losa postensada permaneció en su lugar bajo el área de prueba para evitar que la carga muerta estructural afectara los bordes de la losa o las ubicaciones de los objetivos de apertura de la losa. El área de prueba también incluía columnas que fueron coladas el 23 de julio y paredes de concreto lanzado que fueron colocadas el 22 de julio. El área de prueba fue preparada para permitir con seguridad su acceso (Fig. 1).



Fig. 1: Vista parcial del área de prueba, participantes y sus instrumentos de Escaneo Láser Terrestre (TLS)

Tabla 1: Pruebas en el sitio de construcción de diversos equipos de Escaneo Láser Terrestre (TLS)

Participante	Rol	Región	Hardware	Software de registro	Configuraciones de escaneo (1ª/2ª)	Experiencia (años)
1	Proveedor de Servicio	Noreste	FARO Premium 70	FARO SCENE 2023.1	20/18	10 a 15
2	Contratista	Suroeste	Leica RTC360	Leica Cyclone Register360 V2024.0.1	11/12	15+
3	Contratista	Suroeste	FARO Focus Premium 350	FARO SCENE	16/17	10 a 15
4	Fabricante	Sureste	FARO Focus Premium 350m	FARO Scene 2023.1 y 2024	17/13	Menor a 5
5	Contratista	Suroeste	Leica RTC360	Leica Cyclone Register360 Plus	12/11	5 a 10
6	Proveedor de Servicio	Noroeste			7/6	10 a 15
7	Fabricante	Oeste Medio			12/10	5 a 10
8	Contratista	Noreste			8/10	Menor a 5
9	Topógrafos	Suroeste	Leica P50	Leica Cyclone	6/5	10 a 15
10	Fabricante	Montañas rocallosas	Trimble X9	FieldLink and Realworks	8/8	5 a 10
11	Topógrafos	Suroeste		Trimble Realworks	9/8	10 a 15
12	Contratista	Noroeste	Leica RTC360	Leica Cyclone Register360 Plus	7/6	10 a 15
13	Fabricante	Noreste	Z+F Imager 5016	Z+F LaserControl	7/7	15+



Los participantes incluyeron contratistas, topógrafos, proveedores de servicios y representantes de fabricantes de escáneres.

Aunque los organizadores no realizaron una selección rigurosa de los participantes, todos los participantes estaban calificados por su experiencia en escaneo láser. Antes de las pruebas, se organizaron dos reuniones virtuales para ayudar a los participantes a comprender las tareas de prueba y planificar el levantamiento topográfico en consecuencia. También se les pidió que revisaran y ajustaran los escáneres antes de la prueba en campo. Durante la prueba, cada participante tuvo tiempo suficiente para operar correctamente el equipo.

### Material de Prueba

El “material de prueba” consistió en 19 puntos de control, que fueron objetivos de 6 pulgadas (152 mm) en blanco y negro impresos en hojas de papel de 100 lb sin recubrimiento y adheridos a superficies de concreto utilizando un adhesivo en aerosol (Figura 2), o en las intersecciones de finas líneas de tiza (Figura 3). Los puntos de control del 200 al 205 consistieron en objetivos de papel en blanco y negro colocados en superficies verticales de concreto. Los puntos de control 100 al 103 consistieron en objetivos de papel blanco y negro colocados en la superficie de la losa, con un desplazamiento de 6 pulgadas (152 mm) desde el borde de la losa. Los puntos de control 300 al 308 consistieron en seis líneas de tiza trazadas sobre la superficie de una pared de concreto para formar nueve puntos de intersección. El material de prueba también incluyó 12 puntos de control (CPI a CP12), que consistieron en objetivos en forma de paleta blanco y negro (Figura 4). Consulte la Fig. 5 para un plano detallado de la distribución de los objetivos.

Las posiciones de los puntos de control y los puntos de verificación fueron establecidas y levantadas independientemente por dos equipos de topógrafos licenciados (de BKF y KW) y dos equipos de ingeniería de campo (de Conco y K&K). Dos equipos también realizaron un levantamiento de cierre de los puntos de control para confirmar que los targets no fueron alterados durante el período de prueba de 2 días. Se realizaron ajustes de mínimos cuadrados sobre los puntos levantados y los valores finales fueron acordados por los cuatro equipos de topografía.

Las coordenadas de los puntos de control fueron distribuidas a los participantes del escaneo en formato CSV (ID de punto, Coordenada Norte, Coordenada Este, Elevación) por correo electrónico. Se les pidió a los participantes que determinaran las coordenadas Norte (Y), Este (X) y Elevación (Z) de

los 19 puntos de verificación, utilizando los puntos de control (hasta 12) que consideraran necesarios para la georreferenciación durante el post-procesamiento de las nubes de puntos generadas por sus escáneres.



Fig. 2: Uno de los objetivos de papel en blanco y negro utilizados durante las pruebas



Fig. 3: Muro de concreto con líneas finas de tiza



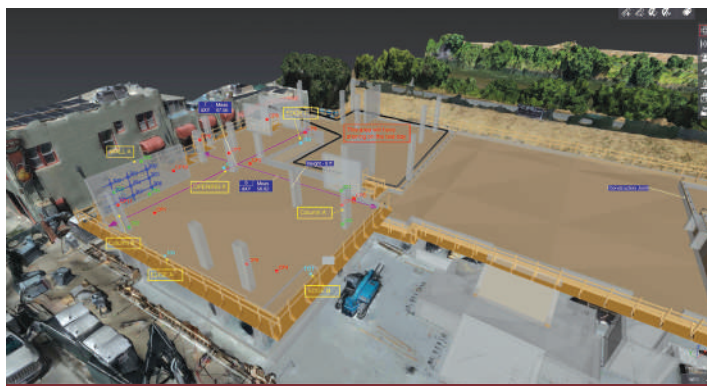
Fig. 4: Los puntos de control consistieron en objetivos en forma de paleta blanco y negro diseñados para ser rotados alrededor de los ejes centrales para realizar mediciones de línea de visión

## Actividades de Prueba

Se organizó una reunión de recepción previa a la prueba patrocinada por la Fundación ASCC el 26 de julio de 2024, un día antes del primer día de pruebas, para asegurar que todos los participantes estuvieran familiarizados con la misión y para distribuir los archivos necesarios para la comunicación de sus resultados. Estos archivos incluían un modelo de Revit, un modelo CAD bidimensional (2-D), dos hojas de datos en formato Excel y un levantamiento topográfico. Los modelos Revit y CAD proporcionaban las ubicaciones de diseño de los puntos en el área de prueba, y compartían el mismo origen que los puntos de control en el sitio de pruebas. Hoja de Excel B.1: Formateada para ingresar los valores de Coordenada Norte, Este y Elevación de los puntos de verificación. Hoja de Excel B.2: Formateada para ingresar las desviaciones de distancia en comparación con las ubicaciones de diseño para columnas, paredes, bordes y aberturas (Fig. 5).

El levantamiento incluyó preguntas sobre la recopilación de datos y los archivos de registro para futuros estudios. También se solicitó a los participantes que proporcionaran los archivos de intercambio de datos ASTM E57<sup>5</sup> para sus escaneos. Estos archivos serán utilizados por los autores en un análisis posterior.

Cada participante realizó escaneos dos veces durante el fin de semana para cumplir con el requisito mínimo para un estudio de repetibilidad. Cada uno aplicó sus propias mejores prácticas y flujo de trabajo de forma individual (se les dio libertad para seleccionar los puntos de configuración del TLS y las densidades de escaneo que consideraran necesarias para establecer las posiciones de configuración).



**Fig. 5:** Plano de distribución de los objetivos: cuatro puntos de control CP1-4 en la losa y ocho puntos de control CP5-12 en superficies verticales; cuatro objetivos de papel blanco y negro en el borde de la losa (100 a 103); cuatro objetivos de papel blanco y negro en la cara de la columna (200 a 203); dos objetivos de papel blanco y negro en la cara de la pared (204, 205); y seis líneas de tiza claras en la cara de la pared formando nueve puntos de intersección (300 a 308)

## Análisis de Datos

### Parte 1a - Declaración de la Precisión

Este estudio incluye 10 puntos de control en papel y 9 intersecciones de líneas de tiza, conocidos colectivamente como “targets” en el contexto siguiente. Las coordenadas x, y, y z de los 19 puntos de control fueron organizadas en filas y columnas en una hoja de cálculo (B.1). Dos participantes no pudieron proporcionar las coordenadas de las intersecciones de las líneas de tiza debido a limitaciones de los parámetros de configuración del escáner y la captura fotográfica que no permitieron que las intersecciones fueran visibles en los datos de la nube de puntos. Además, un participante no pudo devolver las coordenadas del punto de verificación 101 debido a limitaciones de captura de datos y línea de visión. El total de valores devueltos es de 456 registros para cada coordenada x, y, y z. Cada coordenada de objetivo (x, y, y z) existe en el espacio 3-D. La magnitud del vector en el plano 2-D se calculó utilizando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las coordenadas x e y, y la magnitud del vector en 3-D se calculó utilizando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las coordenadas x, y, y z. Los valores 2-D y 3-D fueron incluidos en la misma hoja de cálculo.

Luego, se calcularon las estadísticas de la celda según ASTM E691-23, Sección 15.4<sup>6</sup>, lo que proporcionó el promedio de la celda, la desviación de la celda, el valor *h* de la consistencia entre laboratorios y el valor *k* de la consistencia dentro de los laboratorios de los resultados de la prueba del participante. Posteriormente, se calcularon las estadísticas de precisión según ASTM E691-23, Secciones 15.5 y 15.6, que proporcionan la desviación estándar de repetibilidad y la desviación estándar de reproducibilidad (Figura 6). Mientras tanto, las estadísticas de consistencia *h* y *k* fueron calculadas según ASTM E691-23, Sección 15.7, y se proporcionaron gráficos de los valores *h* y *k* (Figura 7). Los gráficos *h* y *k* ofrecen una visión general de la variabilidad de los resultados y destacan los valores atípicos que deben ser investigados. En este estudio, se eligió un nivel de confianza del 1.0% para el análisis *h* y *k*, ya que el juicio de los datos sugirió que usar un nivel de confianza más alto no resultaría en un número excesivo de valores atípicos. Los resultados mostraron que cuatro targets de los participantes 3, 10 y 13 cayeron fuera del valor crítico 2.41 en el estudio *h*, mientras que dos targets de los participantes 3 y 8 cayeron fuera del valor crítico 2.54 en el estudio *k*. Estos seis valores atípicos fueron investigados y considerados no lo suficientemente significativos como para ser excluidos del análisis. Por lo tanto,



todos los datos se retuvieron para el análisis de la declaración de precisión y la estimación de sesgo.

La desviación estándar de repetibilidad (Sr) y la desviación estándar de reproducibilidad (SR) para cada target se presentan en la Figura 6. Los datos muestran que la desviación estándar varía entre 0.020 y 0.060 pulgadas (0.5 a 1.5 mm), con variación mínima entre los objetivos blanco y negro en superficies horizontales (serie 100), objetivos blanco y negro en superficies verticales (serie 200) e intersecciones de líneas de tiza. Así, los límites de repetibilidad y reproducibilidad al 95%, según las Ecuaciones (12) y (13) de ASTM E691-23, varían entre 0.056 y 0.168 pulgadas (1.4 a 4.3 mm), aproximadamente 1/8 de pulgada (3.2 mm).

### Parte 1b – Estimación del sesgo

Se utilizaron dos estaciones totales Leica de 1 segundo y una Trimble de 0.5 segundos para establecer las mediciones de referencia en el terreno. Se aplicaron ajustes por mínimos cuadrados a todas las mediciones de los puntos de control CPI a CP12, y las coordenadas de todos los puntos de verificación fueron levantadas por cuatro partes diferentes, quienes llegaron a un consenso sobre los valores finales. El error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) es una métrica comúnmente utilizada para evaluar la precisión de un modelo o sistema de medición, calculando la raíz cuadrada de

la diferencia promedio al cuadrado entre los valores predichos y observados. El RMSE proporciona una medida de qué tan bien las predicciones de un modelo coinciden con los datos observados reales. Un valor más bajo de RMSE indica mayor precisión, mientras que un valor más alto sugiere discrepancias mayores entre los resultados predichos y los observados. En este estudio, se introdujeron 456 coordenadas de los puntos de control (x, y, y z) en una hoja de cálculo como valores predichos. Luego, se calcularon los errores correspondientes utilizando las coordenadas de los puntos de control (x, y, y z) obtenidas de las mediciones con la estación total como valores observados. Posteriormente, se

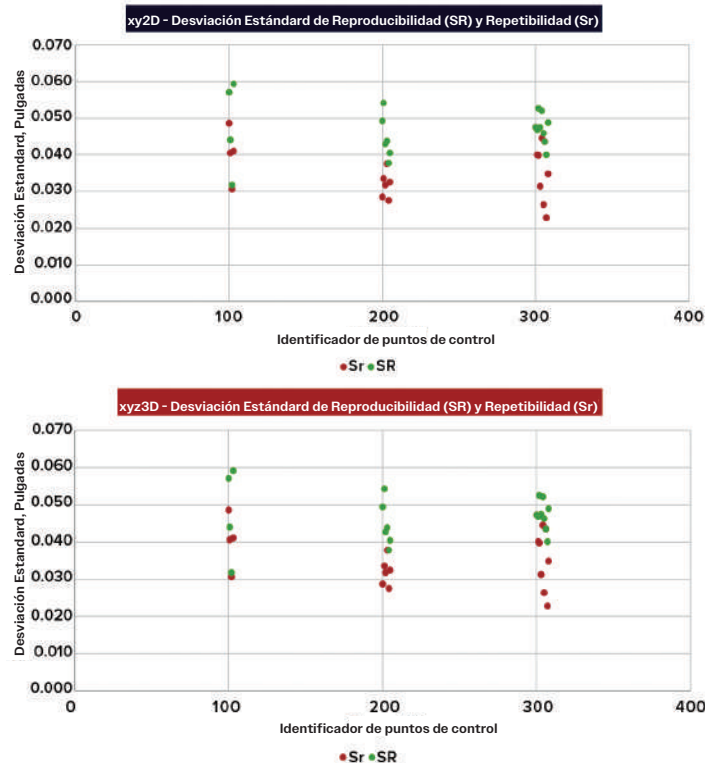


Fig. 6: Estadísticas de precisión: desviación estándar de repetibilidad y desviación estándar de reproducibilidad para los valores en 2-D (arriba) y 3-D (abajo) (Nota: 1 pulgada = 25.4 mm)

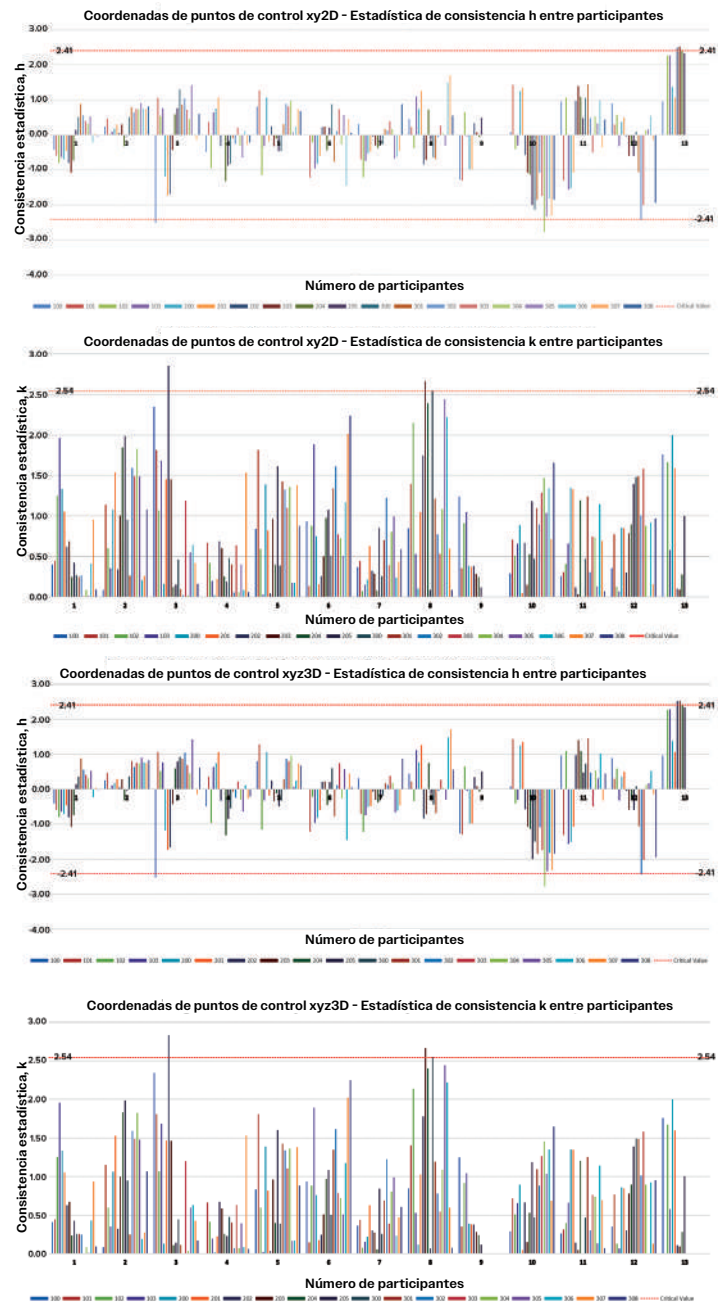


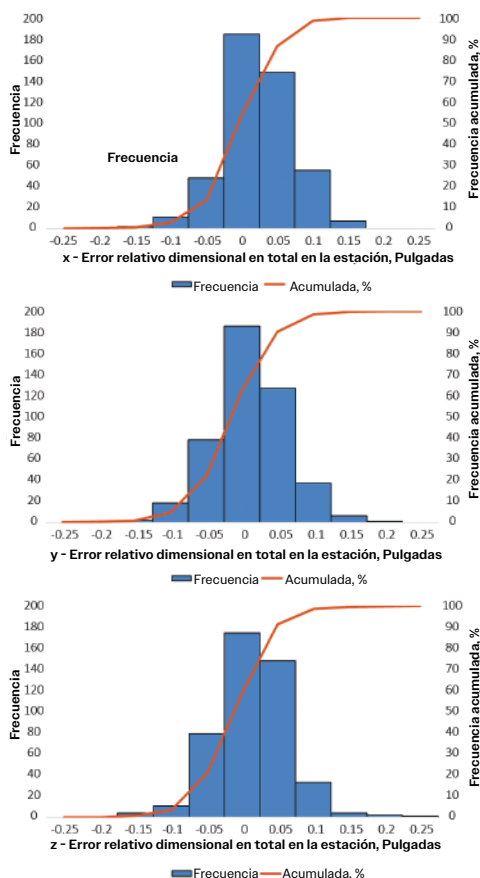
Fig. 7: Estadísticas de consistencia: h consistencia entre laboratorios y k consistencia dentro del laboratorio de los resultados de las pruebas de los participantes

calculó la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados para determinar el error en 2-D en el plano x-y y el error en 3-D en el espacio.

Se aplicaron los coeficientes para el nivel de confianza del 95% (1.9600 para 1-D, 1.7308 para 2-D y 1.6166 para 3-D)<sup>7</sup>. De los 456 puntos de datos, el RMSE en 2-D al nivel de confianza del 95% se calculó como 0.125 pulgadas (3.2 mm), y el RMSE en 3-D al 95% fue de 0.142 pulgadas (3.6 mm); ver Tabla 2.

### Parte 1c – Comparación con el estudio de 2018

La conclusión del estudio de escaneo láser de ASCC de 2018 destacó que, debido a los errores significativamente más pequeños observados en los tres principales participantes, usar sus desviaciones estándar (SD) como los valores de incertidumbre estándar reduciría las tolerancias horizontales y verticales en aproximadamente un 50% y un 30%, respectivamente. La Tabla 3 muestra que los resultados de los 13 participantes se alinean con los de los tres principales participantes del estudio de 2018. La Figura 8 presenta histogramas que muestran el error relativo a los valores de referencia para 456 puntos de control de todos los participantes.



**Fig. 8: Histogramas que muestran el error relativo a los valores de referencia para 456 objetivos de todos los participantes (Nota: 1 pulgada = 25.4 mm)**

## Parte 2 – Interpretación de tolerancias por cada participante con estadísticas

Cuando se trata de planos de construcción que muestran las desviaciones de los elementos de concreto existentes con respecto a sus ubicaciones de diseño (ya sea en el plano x-y o la elevación z), se utilizan diversos estilos de planos o informes. Estos incluyen planos de obra reales que indican las desviaciones de la ubicación de diseño en un modelo 3-D, formatos CAD 2-D o dibujos en PDF, mapas de calor de elevación de losas, mapas de plomada vertical o perfiles de sección, marcas de elevación en cuadrícula, modelos scan-to-BIM, mapas de calor de desviaciones 3-D, entre otros. Sabemos que procesos como el promedio, remuestreo, suavizado, malla o técnicas de mejor ajuste aplicadas a los datos de la nube de puntos pueden introducir errores. Uno de los objetivos de este estudio es examinar cómo estas operaciones afectan el resultado final al usar un conjunto de datos de nube de puntos relativamente preciso y exacto.

A todos los participantes se les proporcionó un modelo en Revit y un archivo CAD 2D que mostraba los elementos de concreto a examinar. Estos archivos de diseño digital comparten el mismo sistema de coordenadas que los controles de levantamiento topográfico proporcionados, lo que permite inspeccionar las desviaciones de ubicación y elevación respecto al diseño superponiendo los datos de la nube de puntos con los archivos de diseño digital.

Se instruyó a los participantes que devolvieran los valores de desviación respecto al diseño en cuatro áreas del borde de la losa y las aberturas de la losa (objetivos 100, 101, 102 y 103), así como en dos superficies de columnas (superior e inferior) y paredes (superior e inferior). Para garantizar la consistencia en la comparación, se pueden utilizar los objetivos de las series 100 y 200 para evaluar las desviaciones en los mismos puntos. Alternativamente, se pueden usar los bordes reales de las losas, ya que los objetivos cercanos a los bordes se establecieron con un desplazamiento exacto de 6 pulgadas. De manera similar, se pueden utilizar las superficies de concreto de las columnas, ya que los objetivos se fijaron directamente a las superficies de concreto.

La referencia fue establecida importando mediciones de estación total de estos objetivos en un plano de planta de Autodesk Civil 3D. Se tomaron mediciones perpendiculares desde los puntos de la estación total hasta los elementos de concreto para determinar los valores de desviación en el plano xy para los 10 objetivos (o elementos de concreto). De

manera similar, las desviaciones en el eje z para los cuatro objetivos de la losa se calcularon restando las elevaciones de diseño de las mediciones de elevación tomadas con la estación total en estos cuatro objetivos. Los valores de desviación se analizaron utilizando sus valores absolutos.

Ocho participantes lograron proporcionar valores de desviación, lo que resultó en 80 puntos de datos para el plano xy y 32 puntos de datos para el eje z que se usaron en el análisis. La Tabla 4 presenta las estadísticas y la comparación de los valores de desviación de los 10 objetivos (elementos de concreto) a partir de las 19 coordenadas objetivo-medidas directamente desde el escaneo láser. Las desviaciones estándar de las desviaciones en XY y Z fueron aproximadamente el doble que las de las mediciones directas del escaneo láser, lo que indica

que se introdujeron errores cuando los participantes analizaron las desviaciones del diseño.

Un factor que contribuyó a este resultado fue que un objetivo estaba ubicado en un área deprimida de la losa, lo que significa que la elevación de diseño de la losa no se alineaba con el área “plana”, algo que algunos participantes no tuvieron en cuenta, lo que resultó en errores humanos. La Figura 9 proporciona un ejemplo que ilustra cómo el ruido en la nube de puntos, el algoritmo de mejor ajuste o el error humano pueden afectar el resultado final al determinar el cumplimiento de tolerancias.

Se observaron mediciones de desviación, que varían entre 0.017 y 0.030 pulgadas (0.43 a 0.76 mm), a partir de la mejor extracción del plano (plano azul), la nube de puntos en el borde y dos parámetros de mallado. Este ejemplo cubre un área pequeña, pero el impacto podría ser más significativo a mayor escala.

**Tabla 2:**  
**Errores de objetivo de escaneo láser vs estación total, en pulgadas**

Estadísticas de sesgo	Y	X	Z	XY (2D)	XYZ (3D)
Media	-0.012	-0.002	-0.011	0.061	0.078
Rango	0.377	0.354	0.397	0.251	0.323
Mínimo	-0.203	-0.212	-0.184	0.002	0.008
Máximo	0.174	0.142	0.214	0.252	0.331
Conteo	456.000	456.000	456.000	456.000	456.000
RMSE	0.053	0.049	0.050	0.072	0.088
Nivel de confianza (95.0%)	0.104	0.097	0.098	0.125	0.142

Nota: 1 pulg. = 25.4 mm

**Tabla 3:**  
**Resultados de los 13 participantes del estudio de 2018**

	2018, 8 participantes			2018, 3 participantes con menores errores			2024, 13 participantes		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Conteo	310	310	310	114	114	114	456	456	456
Desviación estándar (pulg.)	0.125	0.106	0.082	0.056	0.074	0.057	0.049	0.052	0.049
8 X U. L.	<b>1.002</b>	<b>0.852</b>	<b>0.653</b>	0.445	0.590	0.456	<b>0.395</b>	<b>0.413</b>	<b>0.393</b>
Tolerancia mínima	1 pulg. o > horizontal		5/8 pulg. vertical				1/2 pulg. or > horizontal y vertical		

Nota: 1 pulg. = 25.4 mm

**Tabla 4:**  
**Comparación de los valores de desviación de 10 objetivos (elemento de concreto) obtenidos a partir de 19 coordenadas objetivo medidas directamente desde el escaneo láser**

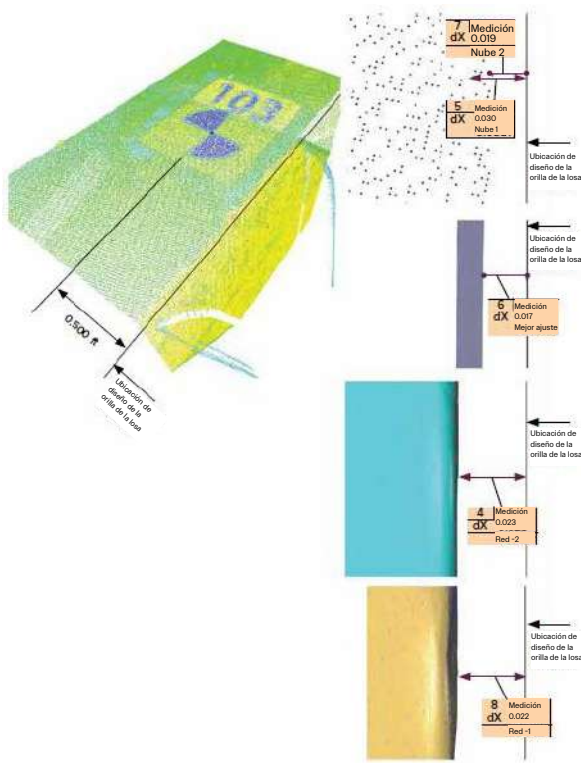
19 coordenadas objetivo			Desviación del escaneo al diseño en 10 objetivos	
Estadísticas	Análisis de objetivos en X e Y	Análisis de objetivos en Z	Desviación del diseño en X y Y	Desviación del diseño en Z
Conteo	456	456	80	32
Mínimo (pulg.)	0.002	-0.184	0.000	0.000
Máximo (pulg.)	0.252	0.214	0.263	0.431
Promedio (pulg.)	0.061	-0.011	0.068	-0.011
Desviación estándar (pulg.)	0.038	0.049	0.065	0.112

Nota: 1 pulg. = 25.4 mm

## Conclusión y Recomendaciones

El estudio de escaneo láser de ASCC de 2018 sugirió que sería apropiado utilizar un escáner láser para el cumplimiento de especificaciones cuando se mide una tolerancia vertical de 5/8 pulgadas o más y una tolerancia horizontal de 1 pulgada o más. También se encontró que los tres principales participantes con los errores más bajos pudieron reducir la tolerancia horizontal y vertical en aproximadamente un 50% y 30%, respectivamente, al utilizar las desviaciones estándar (SD) como los valores de incertidumbre estándar. Se introdujo un concepto de “razón de incertidumbre” para determinar cuánto de la tolerancia de medición debería asignarse a la precisión de la construcción. Se introdujo y aplicó la prueba de incertidumbre de la norma ANSI/NCSL Z540.3:2006<sup>8</sup> con una relación TUR (razón de incertidumbre de prueba) de 1:4 en ese estudio.

En resumen, se sugirió que la relación entre la desviación estándar de la media (o mediciones individuales) y la tolerancia de construcción debería ser de 1:8.



**Fig. 9:** El objetivo 103 se encontraba a 0.500 pies (0.15 m) del borde de la losa. Se observaron mediciones de desviación, que varían entre 0.017 y 0.030 pulgadas (0.43 a 0.76 mm), a partir de la nube de puntos en el borde, el mejor ajuste de los datos y dos parámetros de malla.

La Guía de Especificaciones del Nivel de Precisión (LOA)<sup>9</sup> del Instituto de Documentación de Edificaciones de EE.UU. (USIBD) proporciona directrices heurísticas para la desviación estándar de medición de sensores en relación con la tolerancia general. Generalmente, la desviación estándar debe ser aproximadamente una quinta parte de la tolerancia general para  $P = 30\%$  y  $1-\alpha = 95\%$ , para cumplir con los requisitos de fabricación, donde  $P$  representa la proporción de la tolerancia de medición en relación con la tolerancia general.<sup>8</sup>

El ACI PRC-117.114, “Guía para la Compatibilidad de Tolerancias en la Construcción de Concreto”,<sup>10</sup> proporciona un ejemplo en la Sección 3.4.4. Es razonable tener una precisión de medición con un nivel de confianza del 99.7% (tres desviaciones estándar) que sea una tercera parte de la tolerancia de construcción.

Basado en estudios similares y las recomendaciones de diversas industrias, así como el análisis de este estudio, los autores repitieron el factor de 8 veces la desviación estándar medible para la tolerancia aplicable en la construcción de concreto en las conclusiones. Es razonable recomendar el uso de un TLS (escáner láser terrestre) para el cumplimiento de especificaciones al medir tolerancias horizontales y/o verticales de 0.5 pulgadas (13 mm) o más.

Reconociendo la creciente importancia del escaneo láser en la construcción, el Subcomité 117-L de la ACI, especializado en escaneo láser, ha enfocado sus esfuerzos en la verificación de concreto utilizando TLS para este estudio. Este énfasis se debe a las ventajas únicas que el TLS ofrece en comparación con otros métodos para este propósito. En primer lugar, el escaneo láser terrestre (TLS) proporciona una captura de datos 3-D densa y altamente precisa, lo que permite mediciones exactas de las superficies de concreto. Este nivel de detalle es crucial para identificar desviaciones sutiles de las especificaciones de diseño y garantizar el cumplimiento de las tolerancias.

En segundo lugar, el TLS ofrece un enfoque de medición sin contacto, lo que minimiza el riesgo de dañar o alterar la superficie de concreto durante la inspección. Esto es particularmente importante para el concreto recién colocado o acabados delicados. Por último, el TLS permite una recolección de datos eficiente, reduciendo el tiempo y la mano de obra requeridos para realizar inspecciones completas en comparación con los métodos tradicionales.

¿Qué sigue? Si bien la adopción del escaneo láser y las tecnologías de captura de realidad en la industria del concreto mejora la eficiencia del proyecto, reduce los costos y mejora la calidad y seguridad,



es importante reconocer la posible dependencia de tales tecnologías. La sobre dependencia de equipos y software que pueden volverse obsoletos o propensos a problemas técnicos podría presentar desafíos. Muchas organizaciones, incluyendo, pero no limitándose a ACI Subcomité 117-L, The COMMITTEE (una nueva organización de pruebas), la Red de Captura de Realidad (RCN) y el Instituto de Documentación de Edificaciones de EE.UU. (USIBD), han tomado medidas para probar estas tecnologías. Por lo tanto, los autores fomentan más estudios para evaluar estas tecnologías en proyectos de construcción activos con el fin de comprender mejor su viabilidad a largo plazo y las limitaciones en aplicaciones reales.

## Créditos del Proyecto

Los autores agradecen a las siguientes personas y empresas por su apoyo en el estudio: Bruce Suprenant, Consultor de Concreto; Scott Anderson y Michael Schneider, Fundación ASCC; James Klinger, Ray Hefner y Erica Stone, ASCC Rex Donahay, ACI; Chad Watson, Mike Leon, Mariah Garcia y Jose Laguna, The Conco Companies; Nick Garcia y Francisco Choto, Western National Contractors; Chris Garcia y Josh DeStefano, DPR Construction; Juergen Mauer y Joseph Carter, Z+F USA, Inc.; Joe Merritt, Baker Construction John Marino, FARO Technologies, Inc.; Michael Harvey, Leica Geosystems; Mike Collins, BKF Engineers; Chuck McCallum y Marilyn Stratton, Kier + Wright; David Larson, BuildingPoint Pacific; y Rothbucher System.

Los participantes del estudio incluyeron:

- Melinda Hanneson y Lukas Duruttya, DiCarlo Precision Instrument, Inc.;
- Keaton Clark, DPR Construction;
- Eric Peterson, Webcor Construction;
- Noah Wells, FARO Technologies, Inc.;
- Javier Lagarde, Rodrigo Jimenez, Hunter Keck y Luis Sierra, The Conco Companies;
- Mack Kowalski, Kettler & Kowalski LiDAR Scanning Services;
- Ted Moberg, Leica Geosystems;
- Yesenia Agreda y Jose Monroy, Baker Construction;
- Sanela Domitrovic, Colby Qualls, Jose Guzman y Servando Renteria, BKF Engineers;
- Steven Ostrowski, Trimble Inc.;
- Casey R. Lynch, Chuy Martinez, Javier Martinez, Ricardo Martinez y Steven Ramirez, Kier + Wright;
- Gabriel Kettler, Turner Construction
- Andrew Thierwechter, Z+F USA, Inc.

## Referencias

1. Joint ACI-ASCC Committee 117, "Specification for Tolerances for Concrete Construction and Materials and Commentary (ACI SPEC-117-10) (Reapproved 2015)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2010, 76 pp.
2. ASTM E1155/E1155M-23, "Standard Test Method for Determining FF Floor Flatness and FL Floor Levelness Numbers," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, 9 pp.
3. Paul, W.; Klinger, J.; and Suprenant B.A., "ASCC 3-D Laser Scanning Study, Part 1: Eight participants used scanners to determine target coordinates," Concrete International, V. 41, No. 1, Jan. 2019, pp. 22- 29.
4. Paul, W.; Klinger, J.; and Suprenant, B.A., "ASCC 3-D Laser Scanning Study, Part 2: Eight participants used scanners to determine F-numbers," Concrete International, V. 42, No. 2, Feb. 2020, pp 30-36.
5. ASTM E691-23, "Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, 23 pp.
6. ASTM E2807-11(2019), "Standard Specification for 3D Imaging Data Exchange, Version 1.0," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, 26 pp.
7. Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; and Wasle, E., GNSS – Global Navigation Satellite Systems, SpringerWienNewYork, 2008, 516 pp.
8. ANSI/NCSL Z540.3:2006 (R2013), "Requirements for the Calibration of Measuring and Test Equipment," National Conference of Standards Laboratories, Glen Ellyn, IL, 2013, 21 pp.
9. "USIBD Level of Accuracy (LOA) Specification Guide," U.S. Institute of Building Documentation, 2016, 30 pp.
10. Joint ACI-ASCC Committee 117, "Guide for Tolerance Compatibility in Concrete Construction (ACI PCR-117.1-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 47 pp.

**Leo (Lingfeng) Zhang**, miembro del ACI, es Gerente de Construcción Virtual en The Conco Companies, Concord, CA, EE. UU. Es miembro del Comité 131 del ACI, Modelado de Información de Construcción de Estructuras de Concreto, y del Comité Conjunto ACI-ASCC 117, Tolerancias. Es Presidente del Subcomité 117-L del ACI, Escaneo Láser. Zhang obtuvo su licenciatura en física de materiales en la Universidad de Tecnología de Dalian, Dalian, China, y su maestría en gestión de la construcción en la Universidad de Florida, Gainesville, FL, EE. UU.



**Mack Kowalski** se dedica a explorar técnicas de captura de realidad. Es miembro del Subcomité 117-L del ACI. Anteriormente, dirigió el departamento de topografía de una importante empresa de construcción. Su interés en la tecnología LiDAR creció con el tiempo, lo que lo llevó a unirse a un importante distribuidor de Leica en 2022. Co-fundó LiDAholics Consulting L.L.C. y K&K Laser Scanning, donde continúa contribuyendo al avance de la industria. También comparte su experiencia a través de artículos en la revista xyHt y colaboraciones en LiDAR News.



**Ezra Che** es Profesor Asistente de Investigación en Geomática en la Universidad Estatal de Oregón, Corvallis, OR, EE. UU. Su investigación se centra en el procesamiento eficiente de nubes de puntos 3D y sus aplicaciones, así como en el modelado de errores en datos geoespaciales. También es Director Técnico (CTO) y cofundador de EZDataMD, una empresa de transferencia tecnológica que ofrece soluciones técnicas en el procesamiento y las aplicaciones de datos de nubes de puntos 3D mediante el desarrollo de software personalizado, pruebas de aplicaciones, levantamientos topográficos y consultoría tecnológica. Che se desempeña como Líder de Análisis de Datos para la Infraestructura de Investigación en Riesgos Naturales RAPID de la NSF, Editor Asociado del IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, y miembro del Consejo Editorial de Photogrammetric Record.



**Mike Hernandez**, Miembro Honorario del ACI, es el Director Técnico de la ASCC. Hernández tiene más de 25 años de experiencia en operaciones de construcción y es un ingeniero profesional con licencia en Colorado y Florida. Es miembro del Comité 131 del ACI y del Comité Conjunto ACI-ASCC 117, así como de varios otros comités del ACI. También se desempeña como Co- Presidente de los Comités Técnico, de Acabados y de Sostenibilidad de la ASCC.



**James Dare** es Consultor de Pisos que trabaja para el grupo de empresas CoGri Group. Cuenta con más de 15 años de experiencia en la industria de pisos de concreto industrial y ha participado en el diseño, levantamiento topográfico, pruebas, construcción y rectificación de pisos de alta tolerancia para la industria de la logística. Ha estado involucrado en numerosos estudios para investigar métodos y equipos de levantamiento que permitan alcanzar las altas precisiones requeridas para medir la regularidad de la superficie de los pisos en los sistemas de almacenes automatizados actuales y futuros. Está ubicado en el Reino Unido, pero trabaja a nivel mundial brindando soporte a clientes y oficinas globales del CoGri Group.



Título original en inglés:  
Interlaboratory Study on  
Precision Statement of Using a  
Terrestrial Laser Scanner to Verify  
Concrete Tolerance

**La traducción de este artículo  
correspondió al Capítulo  
México Noroeste**



*Traductora:*  
**Jesús Omar  
Montaña Montaña**  
*Estudiante Ing. Civil  
Universidad de Sonora*



*Revisor Técnico:*  
**Ing. Oscar Ramírez  
Arvizu**