

Shotcrete Placement Automation

A unique effect on rebound

by Maxime Monfort, Julien Schaeffer, Jongbeom Kim, and Marc Jolin

The shotcrete placement method has been around for over 115 years.¹ It involves spraying concrete at high velocities (around 25 to 30 m/s [82 to 98 ft/s]^{2,3}), allowing the material to consolidate onto vertical and overhead surfaces and remain in place during its hardening phase. Shotcrete placement uses either the wet- or dry-mix process. When compared, each process has advantages and disadvantages.⁴ This article primarily focuses on the dry-mix shotcrete process.

An opportunity to improve the shotcrete process is to reduce rebound, which can be a significant direct loss of material, particularly for the dry-mix shotcrete process. Rebound mainly consists of aggregates and fibers that have not adhered to the sprayed surface. It cannot be reused and is generally not recycled. This rebound can represent up to 20% of the concrete mass used in the dry-mix process, and up to 10% for the wet-mix process. However, it can vary depending on the application type, mixture design, equipment, and the shotcreter's experience. Good practice reveals that a significant percentage of these losses can be avoided with proper shotcrete placement procedures.⁵

The shotcreter's tasks are to safely achieve high-quality spraying with proper encasement of the reinforcing bars and optimal consolidation. This is realized by adequate concrete consistency and material velocity, the right distance and angle of the nozzle to the receiving surface, and the proper nozzle movement.⁵ To facilitate the shotcreter's task, partial or full automation of the placement process is of interest, which is why the Shotcrete Laboratory at the Université Laval (ULaval), Québec, QC, Canada, acquired a six-axis robotic arm in 2019. The arm can repeat predefined spraying patterns with practically flawless accuracy (Fig. 1).

This robot, combined with a data-acquisition system that measures rebound during a standardized spraying session,^{6,7} is the starting point of a large research project, "SPARO – Shotcrete Placement Automated by Robot," which mainly consists of exploratory research projects and proofs of concept. It can be challenging to obtain accurate and precise measurements in the field, making this laboratory-based

research using full-scale equipment unique.

Shotcrete Robotic Placement Investigation

The robot used in this research is the ABB IRB-4600, offering an overall reach of 2.05 m (6.7 ft) and an arm payload of 60 kg (132 lb). To look closer at what it could offer, Germain isolated the effect of the nozzle's distance and angle relative to the receiving surface, the traveling speed of the nozzle, and its motion in testing.⁶ Because precise overall trajectories and local nozzle motions can be programmed, it was possible to observe the effects of each of these parameters on rebound and placement separately.⁸

A combination of angle and motion unique to a robotic arm became of interest after Pastorelli's work on reinforcement encapsulation.⁹ Schaeffer's work focused on the reduction of rebound.⁷ Schaeffer observed spraying sessions in the laboratory during previous shotcrete research. He later devised a motion that would eliminate sharp direction changes or significant changes in nozzle velocity. Named the "planetary motion," it mimics the mobility of a small gear in an epicyclic gearbox, resulting in a circular global trajectory with a circular local movement (Fig. 2). Using the planetary motion, the placement never stops, with no variation in nozzle speed or any abrupt changes of direction, while still allowing the receiving



Fig. 1: ABB IRB-4600 Industrial Robot in the Shotcrete Laboratory at ULaval: (a) robot without its protective sleeve; and (b) robot spraying a large steel test panel (2 m wide x 1 m high [6.6 x 3.3 ft])

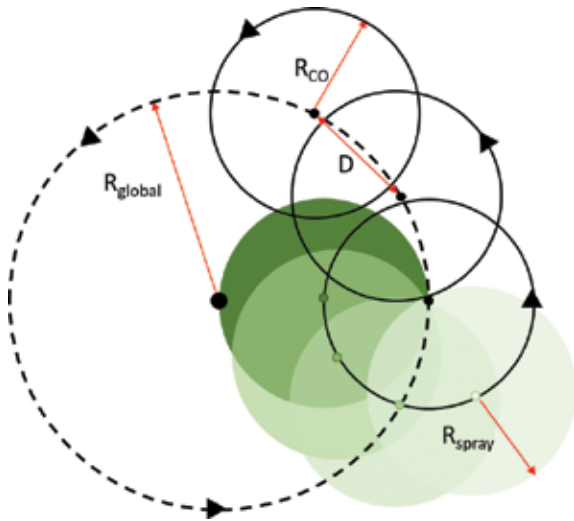


Fig. 2: Position of the center of the nozzle (solid line) and footprint of the material stream (green circle) during planetary motion spraying



Fig. 3: Photo taken during spraying of one test with the superimposed motion of the center of the nozzle (blue outline)

surface to be evenly built-up due to the natural plastic behavior of concrete during shotcrete placement. This placement approach is inspired by a shotcreter's movement of the nozzle in small concentric circles while filling a section.⁵ However, the robot's arm movement keeps a constant perpendicular angle between the nozzle axis and the receiving surface.

Schaeffer initially investigated different geometrical parameters of the planetary motion, adjusting (refer to Fig. 2) the radius of both the local movement (R_{co}) and global trajectory (R_{global}) and the distance between two consecutive local circles (D). In Fig. 2, the solid lines represent the motion of the center of the nozzle, while the green circle illustrates the footprint of the material stream (R_{spray}). The parameters that gave some of the lowest rebound losses and largely represented what is seen in practice with dry-mix shotcrete placement were as follows: $R_{co} = D = R_{spray} = 110$ mm (4.3 in.). To obtain a relatively flat surface at the end of the spraying, the global movement was set so that $R_{co} + R_{spray} = R_{global} = 220$ mm (8.7 in.). Figure 3 is a photo taken during the spraying of one test with the superimposed overall nozzle movement of the center of the nozzle as output by the robot control system.

Using this constant and reproducible spraying motion, Schaeffer sprayed the same dry-mix prebagged concrete mixture design (ACI Grading No. 2² with microsilica and cement) with one variation only: the water flow at the nozzle increased over a range of consistencies. The fresh in-place concrete consistency was measured using a static penetrometer.¹⁰ These spraying sessions took place in the Shotcrete Laboratory at ULaval using life-size equipment. A dry-mix shotcrete spraying machine dry fed material with a 37.5 mm (1.5 in.) diameter flexible hose connected to a Hydromix nozzle assembly where the water ring was placed 2 m (6.6 ft) before a spirolet-type nozzle tip (a similar setup is detailed in Reference 11). For each test, the amount of rebound was precisely measured using a system where the weight of the dry-mix machine, the water flow at the nozzle, and the weight of the test panel were monitored throughout the spraying session.¹¹

The results for rebound, consistencies, and water flow at the nozzle are presented in Fig. 4 and 5. There was a strong correlation between the consistency and water flow at the nozzle. The rebound values observed for this dry-mix placement were significantly less than those experienced in previous research or in practice. Years of experience with this dry-mix shotcrete mixture design in the Shotcrete Laboratory at ULaval has yielded rebound amounting between 18 and 25% for the hand-operated nozzle when spraying in a vertical steel panel, such as the one used. Here, the amount of rebound was drastically reduced using the robotic arm and the planetary motion, resulting in as low as 8% for the wettest consistencies. The shape of the relationships proposed in Fig. 5 suggests that a minimum value was obtained as the curves flatten out with increased water content. The good correlations obtained experimentally are the results of a shotcreting setup that allows for rigorous real-time control of spraying parameters (air flow, water flow, mass delivered, and mass accumulated in the panel).

It should be noted that typical consistency values encountered in practice with dry-mix shotcrete placement for structural concrete repairs would be around 0.8 to 1.2 MPa (115 to 175 psi) and around 1.5 to 2.5 MPa (220 to 365 psi) in a mining application. The very "dry" consistency of ≈ 4.1 MPa (595 psi) reported would not be acceptable in practice, however, was kept here to serve as an illustration of the overall trend. A more advanced discussion on the notion of consistency and especially the wettest stable consistency for dry-mix placement can be found in Reference 10.

An "Intrinsic" Rebound Value?

The rebound values obtained in this project using the robotic arm and its dedicated nozzle motion are so low that they are similar to what can be seen in wet-mix placement. The shape of the relationships proposed in Fig. 5 suggests that a minimum value was obtained as the curves flatten out with the increase of water content. Even if this planetary motion may still be perfected, the accuracy and repeatability provided

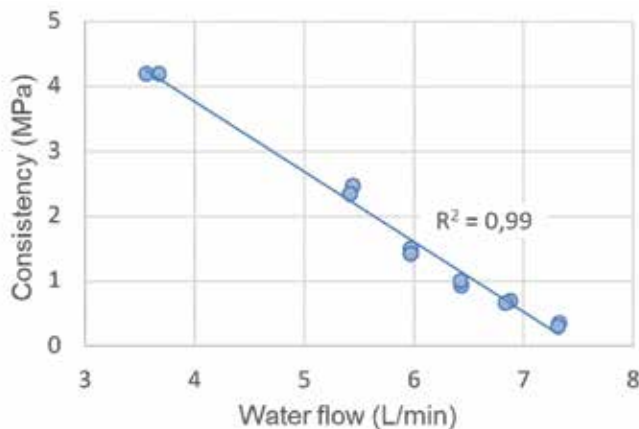


Fig. 4: Experimental relationship obtained between the consistency of the fresh dry-mix shotcrete and the water flow measured at the nozzle (Note: 1 MPa = 145 psi; 1 L = 0.3 gal.)

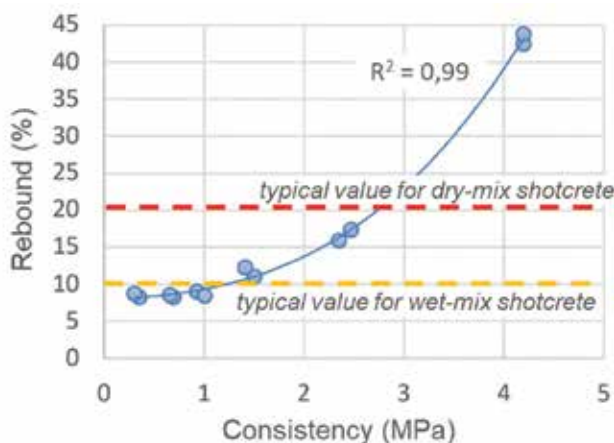


Fig. 5: Experimental relationship obtained between rebound losses and the consistency of the fresh dry-mix shotcrete (Note: 1 MPa = 145 psi)

by the robotic arm is a great ally in formulating the hypothesis that a “fundamental” or “intrinsic” rebound value has been reached for this particular dry-mix shotcrete mixture design. As seen in Fig. 2 and 3, the shotcrete placement uses a very regular and steady deposition pattern: constant nozzle velocity, constant perpendicular angle between the nozzle and the substrate, no sharp direction changes, and no panel corners or sides. It is the author’s opinion that this remaining rebound from shotcrete placement, or intrinsic rebound, is solely characterized by the mixture design itself. Furthermore, it can be proposed that every mixture design can be tested for this intrinsic rebound, opening a new approach for concrete material suppliers to improve their formulations.

This intrinsic rebound is not the only observation made in the laboratory. Owing to the planetary motion, what appears to be a “softer” area immediately under the shotcreted spray was easily observed in the laboratory during spraying. This soft area behaves differently to the rest of the substrate when

aggregates impact it, leading to it being called the fluid zone or the rebound-friendly zone. It has led others to investigate the area located directly under the spray of material during shotcreting.¹²⁻¹⁴ In more scientific terms, the rheological properties of a certain thickness of the freshly applied shotcreted concrete facing the nozzle, found immediately under the stream of incoming material, are modified in a similar manner to the effect of vibration in concrete. In this fluid zone, incoming aggregates are more easily embedded in the freshly shot concrete, leading to an area where rebound is reduced.

It is believed that the planetary motion of the nozzle facilitates the creation of this softer area of substrate during placement, causing the low rebound values obtained during testing. This discussion must be taken in context of the specific spraying equipment used along with the airflow, dry material output selected, and the mixture design tested. Proper choices and correct adjustments of material and spraying parameters must still be carried out by an experienced shotcreter.

What’s Next?

These two concepts brought forward, the fluid zone and intrinsic rebound, are key to understanding the mechanisms involved in shotcrete placement. Moreover, the apparent relationship between the nozzle motion and the notion of this fluid zone, and the resulting effect on rebound losses, needs to be further explored. Effort must be put into better characterizing and defining nozzle motion and overall trajectory. A computer-based simulation environment could be an interesting first step to explore and identify the most significant variables before moving on to full-scale validation. It is important to investigate the properties of this fluid zone and identify means to facilitate its presence during shotcrete placement to further reduce and maintain low rebound values. Work on evaluating the properties of this fluid zone in dry-mix placement is under way in the Shotcrete Laboratory at ULaval. An approach involving energy balance and static and dynamic contact stresses, along with experimentally measuring the changes in this fluid zone during placement, has already provided results to further the understanding of this placement method.¹⁵

Summary

This research program demonstrates that it is possible to further improve and optimize the shotcrete placement process. The use of a fully programmable robotic arm produced unique and optimal test conditions that led to exceptionally low rebound values in dry-mix shotcreting, while allowing for observation of the fluid zone. The industry impact is a reduction in rebound based on improved nozzle motion and trajectories to favor this fluid zone. In parallel, it offers new paths for the optimization of mixture design and delivery equipment, particularly in the field of nozzle geometry³ and for automation of nozzle motions.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Université Laval Research Centre on Concrete Infrastructure (CRIB) for providing the facilities and equipment required to carry out this project. They also acknowledge the financial support offered by the American Shotcrete Association (ASA), Dome Technologies, and Kajima Corporation.

References

1. Morgan, D.R., and Jolin, M., *Shotcrete: Materials, Performance and Use*, first edition, CRC Press, United Kingdom, 2022, 510 pp.
2. Ginouse, N.; Jolin, M.; and Bissonnette, B., "Effect of Equipment on Spray Velocity Distribution in Shotcrete Applications," *Construction and Building Materials*, V. 70, Nov. 2014, pp. 362-369. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.07.116
3. Siccardi, P.; Laradh, A.; Bérubé, S.; and Jolin, M., "The Influence of the Nozzle Tip on Shotcrete Spray Performance," *Shotcrete*, Spring 2020, pp. 16-19.
4. ACI Committee 506, "Shotcrete—Guide (ACI PRC-506-22)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2022, 52 pp.
5. CP-60(15), "Craftsman Workbook for ACI Certification of Shotcrete Nozzlemen," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015, 92 pp.
6. Germain, T., "Automatisation et optimisation des techniques de mise en place du béton projeté," MS thesis, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2021, 107 pp.
7. Schaeffer, J., "Automatisation du procédé de béton projeté: Contrôle du rebond et vision numérique," MS thesis, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2022, 112 pp.
8. Monfort, M.; Kim, J.; Schaeffer, J.; Pastorelli, F.; Germain, T.; and Jolin, M., "Sprayed Concrete Automation: A Unique and Complete Digital Fabrication Method," *Digital Concrete 2024 - Supplementary Proceedings*, D. Lowke, N. Freund, D. Böhler, and F. Herding, eds., 9 pp.
9. Pastorelli, F., "Automatisation du procédé de béton projeté: Robotisation et optimisation," MS thesis, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2021, 112 pp.
10. Jolin, M.; Beaupré, D.; and Mindess, S., "Test to Characterise Properties of Fresh Dry-Mix Shotcrete," *Cement and Concrete Research*, V. 29, No. 5, May 1999, pp. 753-760. doi:10.1016/S0008-8846(99)00071-X.
11. Lemay, J.-D.; Jolin, M.; and Gagné, R., "Ultra Rapid Strength Development in Dry-Mix Shotcrete for Ultra Rapid Support in Challenging Mining Conditions," *Shotcrete*, V. 16, No. 4, Fall 2014, pp. 14-19.
12. Laradh, A., "Mise en place, énergie et rebond dans le béton projeté," MS thesis, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2020, 106 pp.
13. Paquet, S., "Caractérisation du béton projeté par voie sèche: Une approche rhéologique et énergétique," MS thesis, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2021, 109 pp.
14. Dionne-Jacques, S.-I., "Le rebond en béton projeté par voie sèche: Influence de la rhéologie et de l'énergie sur le comportement de la surface réceptrice," MS thesis, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2024, 190 pp.
15. Kim, J.B.; Monfort, M.; and Jolin, M., "Shotcrete Placement – Report on Recent Research from Rheology to Robotics," Shotcrete Convention & Technology Conference, Austin, TX, March 3, 2024.

Selected for reader interest by the editors after independent expert evaluation and recommendation.



ACI student member **Maxime Monfort** is a graduate of the French engineering school École nationale supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) Paris, Paris, France. He received his MS in civil engineering from Université Laval, Québec, QC, Canada, and is pursuing his PhD. His research interests include using technologies to measure the thickness of a local area wall being sprayed, and shotcrete process automation. He has served as President of the ACI Université Laval Student Chapter for the past 2 years. He is a member of ACI Subcommittee 238-A, Student Workability.



Julien Schaeffer is a graduate of the French engineering school ENSAM Paris. He received his MS in civil engineering at Université Laval in 2023, where he studied shotcrete automation and rebound optimization. Following a position at WSP Canada, he currently works for the EGIS group in Marseille, France, as a structural engineer involved in the design of major building projects in steel, concrete, and timber.



ACI student member **Jongbeom Kim** is a PhD Candidate in civil and water engineering at Université Laval. His doctoral research, "Dry-mix Shotcrete Placement: Tests, Models and Process Simulation to Minimize Rebound," explores optimized mixture designs and placement dynamics to minimize rebound. By combining automation, computational modeling, and full-scale trials, he pursues sustainable, high-performance shotcrete for infrastructure rehabilitation. Kim received his BSc and MSc from Kangwon National University, Gangwon, South Korea, investigating air-void systems and freezing-and-thawing durability of fiber-reinforced concrete using the wet-mix shotcrete process.



Marc Jolin, FACI, is a Full Professor in the Department of Civil and Water Engineering at Université Laval. He received his PhD from the University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, in 1999. An active member of the Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), his research focuses on shotcrete and fresh concrete. A recognized researcher and educator, Jolin is Chair of ACI Committee C661, Shotcrete Inspector Certification, as well as a member of other ACI committees and the American Shotcrete Association (ASA).

Automatización de la colocación del concreto lanzado

Un efecto de rebote único

Por Maxime Monfort, Julien Schaeffer, Jongbeom Kim y Marc Jolin

El método de colocación del concreto lanzado existe desde hace más de 115 años¹. Consiste en proyectar concreto a altas velocidades (alrededor de 25 a 30 m/s [82 a 98 pies/s]^{2,3}), lo que permite que el material se consolide en superficies verticales y elevadas y permanezca en su lugar durante su fase de endurecimiento. La colocación del concreto lanzado utiliza el proceso de mezcla húmeda o seca. Cuando se comparan, cada proceso tiene ventajas y desventajas⁴. Este artículo se centra en el proceso de concreto lanzado de mezcla seca.

Una oportunidad para mejorar el proceso de concreto lanzado es reducir el rebote, que puede ser una pérdida directa significativa de material, en particular para el proceso de concreto lanzado de mezcla seca. El rebote consiste principalmente de agregados y fibras que no se han adherido a la superficie pulverizada. No puede reutilizarse y, por lo general, no se recicla. Este rebote puede representar hasta el 20% de la masa de concreto utilizada en el proceso de mezcla seca, y hasta el 10% en el proceso de mezcla húmeda. Sin embargo, puede variar en función del tipo de aplicación, el diseño de la mezcla, el equipo y la experiencia del lanzador de concreto. Las buenas prácticas revelan que un porcentaje significativo de estas pérdidas puede evitarse con procedimientos adecuados de colocación del concreto lanzado⁵.

Las tareas del lanzador de concreto consisten en lograr con seguridad una proyección de alta calidad con un encajonamiento adecuado de las varillas de refuerzo y una óptima consolidación. Esto se consigue mediante una consistencia adecuada del concreto y la velocidad del material, la distancia y el ángulo correctos de la boquilla con respecto a la superficie receptora, y el movimiento adecuado de la boquilla⁵. Para facilitar la tarea del lanzador

de concreto, resulta interesante la automatización parcial o total del proceso de colocación, razón por la cual el Laboratorio de Concreto Lanzado de la Université Laval (ULaval), Québec, QC, Canadá, adquirió un brazo robótico de seis ejes en 2019. El brazo puede repetir patrones de pulverizado predefinidos con una precisión prácticamente impecable (Fig. 1).

Este robot, combinado con un sistema de adquisición de datos que mide el rebote durante una sesión de pulverizado estandarizada^{6,7}, es el punto de partida de un gran proyecto de investigación, “SPARO - Shotcrete Placement Automated by Robot”, que consiste principalmente en proyectos de investigación exploratoria y pruebas de concepto. Obtener mediciones exactas y precisas en campo puede resultar difícil, por lo que esta investigación de laboratorio con equipos a escala real es única.

Investigación sobre la colocación robotizada de concreto lanzado

El robot utilizado en esta investigación es el ABB IRB-4600, que ofrece un alcance total de 2.05 m (6.7 pies) y una carga útil del brazo de 60 kg (132 lb). Para ver más de cerca lo que podía ofrecer, Germain aisló el efecto de la distancia y el ángulo de la boquilla con respecto a la superficie receptora, la velocidad de desplazamiento de la boquilla y su movimiento en el ensayo⁶. Dado que se pueden programar con precisión las trayectorias globales y los movimientos locales de las boquillas, fue posible observar los efectos de cada uno de estos parámetros en el rebote y la colocación por separado⁸.

La combinación de ángulo y movimiento propia de un brazo robótico cobró interés tras los trabajos de Pastorelli sobre la encapsulación de refuerzos⁹. El trabajo de Schaeffer se centró en la reducción del rebote⁷. Schaeffer observó sesiones de pulverizado en el laboratorio durante anteriores investigaciones sobre concreto lanzado. Más tarde ideó un movimiento que eliminaría los cambios bruscos de dirección o los cambios significativos en la velocidad de la boquilla. Denominado “movimiento planetario”, imita la movilidad de un pequeño engranaje en una caja de cambios epicicloidial, lo que da lugar a una trayectoria global circular con un movimiento local circular (Fig. 2). Utilizando el movimiento planetario, la colocación nunca se detiene, sin variación en la velocidad de la boquilla ni cambios bruscos de

dirección, al tiempo que permite que la superficie receptora se construya uniformemente debido al comportamiento plástico natural del concreto durante la colocación del concreto lanzado. Este enfoque de colocación se inspira en el movimiento de la boquilla de un lanzador de concreto en pequeños círculos concéntricos mientras rellena una sección⁵. Sin embargo, el movimiento del brazo del robot mantiene un ángulo perpendicular constante entre el eje de la boquilla y la superficie receptora.

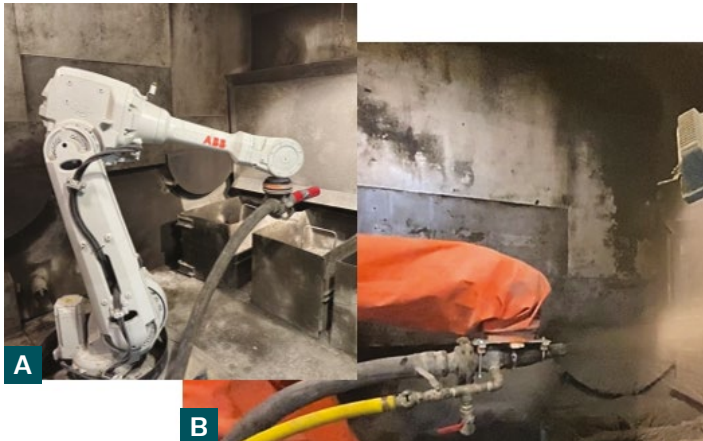


Fig. 1: Robot industrial ABB IRB-4600 en el laboratorio de concreto lanzado de la ULaval: (a) robot sin su funda protectora; y (b) robot pulverizando un gran panel de prueba de acero (2 m de ancho x 1 m de alto [6.6 x 3.3 pies]).

Schaeffer investigó inicialmente distintos parámetros geométricos del movimiento planetario, ajustando (véase la Fig. 2) el radio tanto del movimiento local (R_{co}) como de la trayectoria global (R_{global}) y la distancia entre dos círculos locales consecutivos (D). En la Fig. 2, las líneas continuas representan el movimiento del centro de la boquilla, mientras que el círculo verde ilustra la huella del chorro de material (R_{spray}). Los parámetros que dieron algunas de las pérdidas de rebote más bajas y que representaban en gran medida lo que se ve en la práctica con la colocación de concreto lanzado de mezcla seca fueron los siguientes: $R_{co} = D = R_{spray} = 110$ mm (4.3 pulg.). Para obtener una superficie relativamente plana al final de la pulverización, el movimiento global se ajustó de modo que $R_{co} + R_{spray} = R_{global} = 220$ mm (8.7 pulg.). La Fig. 3 es una foto tomada durante la pulverización de una prueba con el movimiento global superpuesto del centro de la boquilla, tal y como lo indica el sistema de control del robot.

Usando este movimiento de pulverización constante y reproducible, Schaeffer pulverizó el mismo diseño de mezcla de concreto seco preenvasado (ACI Grading n.º 2² con microsílíce y cemento) con una única variación: el caudal de agua en la boquilla aumentó en un rango de consistencias.

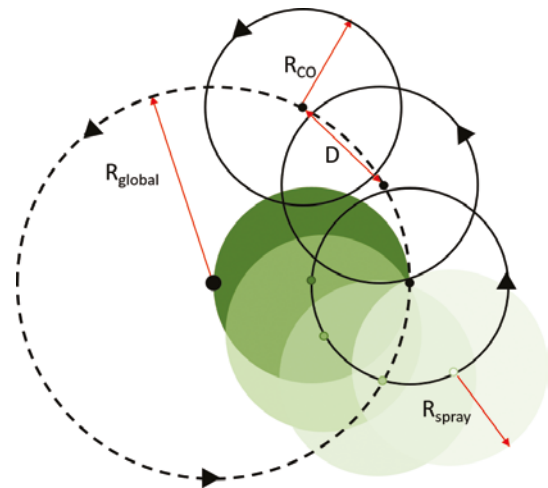


Fig. 2: Posición del centro de la boquilla (línea continua) y huella del chorro de material (círculo verde) durante el pulverizado con movimiento planetario

La consistencia del concreto fresco en sitio se midió utilizando un penetrómetro estático¹⁰. Estas sesiones de pulverizado tuvieron lugar en el Laboratorio de Concreto Lanzado de la ULaval utilizando equipos de tamaño real. Una máquina de pulverizado de concreto lanzado de mezcla seca alimentaba el material en seco con una manguera flexible de 37.5 mm (1.5 pulg.) de diámetro conectada a un conjunto de boquillas Hydromix en el que el anillo de agua se colocaba 2 m (6.6 pies) antes de una punta de boquilla tipo espiroleta (en la Referencia 11 se detalla una configuración similar). Para cada ensayo, la cantidad de rebote se midió con precisión utilizando un sistema en el que el peso de la máquina de mezcla seca, el caudal de agua en la boquilla y el peso del panel de ensayo se controlaron durante toda la sesión de pulverización¹¹.

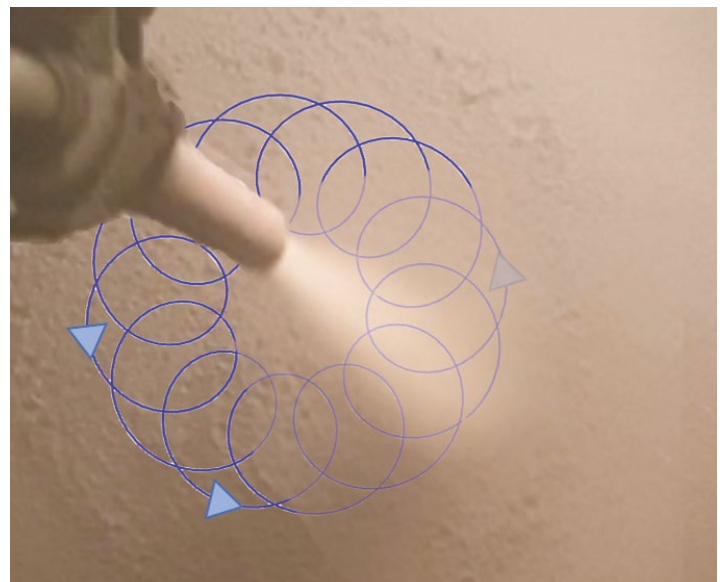


Fig. 3: Foto tomada durante el pulverizado de una prueba con el movimiento superpuesto del centro de la boquilla (contorno azul).

Los resultados del rebote, la consistencia y el caudal de agua en la boquilla se presentan en las Fig. 4 y 5. Se observó una fuerte correlación entre la consistencia y el flujo de agua en la boquilla. Los valores de rebote observados para esta colocación de mezcla seca fueron significativamente inferiores a los experimentados en investigaciones anteriores o en la práctica. Años de experiencia con este diseño de mezcla de concreto lanzado en seco en el Laboratorio de Concreto Lanzado de la ULaval han dado como resultado un rebote de entre el 18 y el 25% para la boquilla manual cuando se proyecta en un panel de acero vertical, como el que se utilizó. Aquí, la cantidad de rebote se redujo drásticamente utilizando el brazo robótico y el movimiento planetario, resultando tan bajo como el 8% para las consistencias más húmedas. La forma de las relaciones propuestas en la Fig. 5 sugiere que se obtuvo un valor mínimo, ya que las curvas se aplanan al aumentar el contenido de agua. Las buenas correlaciones obtenidas experimentalmente son el resultado de una instalación de lanzado que permite un control riguroso en tiempo real de los parámetros de pulverización (flujo de aire, flujo de agua, masa suministrada y masa acumulada en el panel).

Debe tenerse en cuenta que los valores típicos de consistencia encontrados en la práctica con la colocación de concreto lanzado de mezcla seca para reparaciones estructurales de concreto serían alrededor de 0.8 a 1.2 MPa (115 a 175 psi) y alrededor de 1.5 a 2.5 MPa (220 a 365 psi) para una aplicación en minería. La consistencia muy “seca” de ≈ 4.1 MPa (595 psi) reportada no sería aceptable en la práctica, sin embargo, se mantuvo aquí para servir como ilustración de la tendencia general. Una discusión más avanzada sobre la noción de consistencia y especialmente la consistencia estable más húmeda para la colocación de mezcla seca se puede encontrar en la Referencia 10.

¿Un valor “intrínseco” de rebote?

Los valores de rebote obtenidos en este proyecto utilizando el brazo robótico y su movimiento de boquilla específico son tan bajos que se asemejan a lo que puede verse en la colocación de mezcla húmeda. La forma de las relaciones propuestas en la Fig. 5 sugiere que se obtuvo un valor mínimo, ya que las curvas se aplanan con el aumento del contenido de agua. Incluso si este movimiento planetario aún

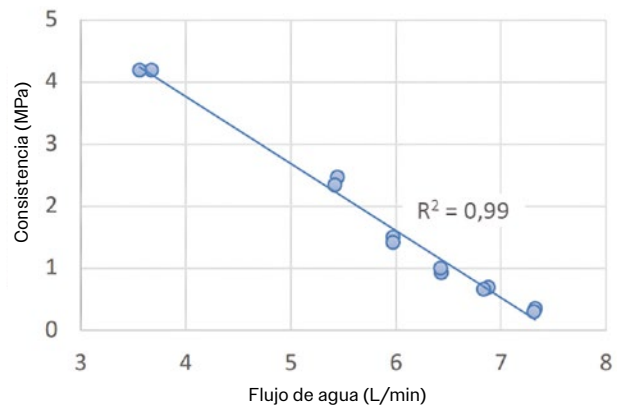


Fig. 4: Relación experimental obtenida entre la consistencia del concreto lanzado fresco de mezcla seca y el flujo de agua medido en la boquilla (Nota: 1 MPa = 145 psi; 1 L = 0.3 gal.)

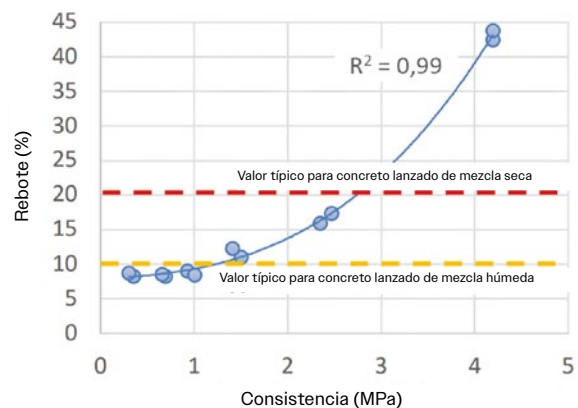


Fig. 5: Relación experimental obtenida entre las pérdidas por rebote y la consistencia del shotcrete de mezcla seca en estado fresco (Nota: 1 MPa = 145 psi)

puede perfeccionarse, la precisión y repetibilidad que proporciona el brazo robótico es un gran aliado para formular la hipótesis de que se ha alcanzado un valor de rebote “fundamental” o “intrínseco” para este particular diseño de mezcla seca de concreto lanzado. Como se observa en las Fig. 2 y 3, la colocación del concreto lanzado utiliza un patrón de deposición muy regular y constante: velocidad constante de la boquilla, ángulo perpendicular constante entre la boquilla y el sustrato, sin cambios bruscos de dirección y sin esquinas ni laterales del panel. En opinión del autor, este rebote remanente de la colocación del concreto lanzado, o rebote intrínseco, se caracteriza únicamente por el propio diseño de la mezcla. Además, se puede proponer que cada diseño de mezcla pueda ser probado para este rebote intrínseco, abriendo un nuevo enfoque para que los proveedores de materiales de concreto mejoren sus formulaciones.

Este rebote intrínseco no es la única observación realizada en el laboratorio. Debido al movimiento planetario, en el laboratorio durante la pulverización, se observó fácilmente lo que parece ser una zona “más blanda” inmediatamente debajo del chorro

pulverizado. Esa zona blanda se comporta de forma diferente al resto del sustrato cuando los agregados impactan contra ella, lo que ha dado lugar a que se la denomine zona fluida o zona favorable al rebote. Esto ha llevado a otros a investigar la zona situada directamente bajo el pulverizado de material durante el lanzado de concreto¹²⁻¹⁴. En términos más científicos, las propiedades reológicas de un determinado espesor del concreto lanzado recién aplicado frente a la boquilla, que se encuentra inmediatamente debajo de la corriente de material entrante, se modifican de forma similar al efecto de la vibración en el concreto. En esta zona fluida, los agregados entrantes se incrustan más fácilmente en el concreto recién lanzado, dando lugar a una zona en la que se reduce el rebote.

Se cree que el movimiento planetario de la boquilla facilita la creación de esta zona más blanda de sustrato durante la colocación, causando los bajos valores de rebote obtenidos durante los ensayos. Este análisis debe realizarse en el contexto del equipo de pulverización específico utilizado, junto con el flujo de aire, la salida de material seco seleccionada y el diseño de la mezcla analizada. La elección adecuada y los ajustes correctos del material y de los parámetros de pulverización deben seguir siendo realizados por un experto lanzador de concreto.

¿Qué sigue?

Estos dos conceptos expuestos, la zona fluida y el rebote intrínseco, son clave para comprender los mecanismos implicados en la colocación del concreto lanzado. Por otra parte, es necesario seguir estudiando la relación aparente entre el movimiento de la boquilla y la noción de esta zona fluida, así como el efecto resultante en las pérdidas por rebote. Es necesario esforzarse por caracterizar y definir mejor el movimiento de la boquilla y la trayectoria general. Un entorno de simulación por computadora podría ser un primer paso interesante para explorar e identificar las variables más significativas antes de pasar a la validación a escala real. Es importante investigar las propiedades de esta zona fluida e identificar medios que faciliten su presencia durante la colocación del concreto lanzado para reducir aún más y mantener bajos los valores de rebote. En el Laboratorio de Concreto Lanzado de la ULaval se está trabajando en la evaluación de las propiedades de esta zona fluida en la colocación

de mezcla seca. Un enfoque que incluye el balance de energía y los esfuerzos de contacto estáticos y dinámicos, junto con la medición experimental de los cambios en esta zona fluida durante la colocación, ya ha proporcionado resultados para avanzar en la comprensión de este método de colocación¹⁵.

Resumen

Este programa de investigación demuestra que es posible seguir mejorando y optimizando el proceso de colocación del concreto proyectado. El uso de un brazo robótico totalmente programable produjo unas condiciones de ensayo únicas y óptimas que condujeron a unos valores de rebote excepcionalmente bajos en el lanzado de concreto de mezcla seca, permitiendo al mismo tiempo la observación de la zona de fluido. El impacto en la industria es una reducción del rebote basada en la mejora del movimiento y los trazados de las boquillas para favorecer esta zona de fluido. Paralelamente, ofrece nuevas vías para la optimización del diseño de las mezclas y de los equipos de suministro, especialmente en el campo de la geometría de las boquillas³ y para la automatización de los movimientos de éstas.

Agradecimientos

Los autores desean dar las gracias al Centro de Investigación sobre Infraestructuras de Concreto (CRIB, por sus siglas en inglés) de la Universidad Laval por facilitar las instalaciones y el equipo necesarios para llevar a cabo este proyecto. También agradecen el apoyo financiero ofrecido por la Asociación Americana de Concreto Lanzado (ASA, por sus siglas en inglés), a Dome Technologies y a Kajima Corporation.

Referencias

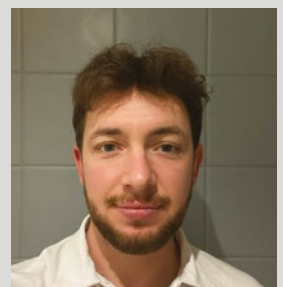
1. Morgan, D.R., and Jolin, M., Shotcrete: Materials, Performance and Use, first edition, CRC Press, United Kingdom, 2022, 510 pp.
2. Ginouse, N.; Jolin, M.; and Bissonnette, B., "Effect of Equipment on Spray Velocity Distribution in Shotcrete Applications," *Construction and Building Materials*, V. 70, Nov. 2014, pp. 362-369. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.07.116

3. Siccardi, P.; Laradh, A.; Bérubé, S.; and Jolin, M., "The Influence of the Nozzle Tip on Shotcrete Spray Performance," Shotcrete, Spring 2020, pp. 16-19.
4. ACI Committee 506, "Shotcrete—Guide (ACI PRC-506-22)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2022, 52 pp.
5. CP-60(15), "Craftsman Workbook for ACI Certification of Shotcrete Nozzlemen," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015, 92 pp.
6. Germain, T., "Automatisation et optimisation des techniques de mise en place du béton projeté," MS thesis, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2021, 107 pp.
7. Schaeffer, J., "Automatisation du procédé de béton projeté: Contrôle du rebond et vision numérique," MS thesis, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2022, 112 pp.
8. Monfort, M.; Kim, J.; Schaeffer, J.; Pastorelli, F.; Germain, T.; and Jolin, M., "Sprayed Concrete Automation: A Unique and Complete Digital Fabrication Method," Digital Concrete 2024 – Supplementary Proceedings, D. Lowke, N. Freund, D. Böhler, and F. Herding, eds., 9 pp.
9. Pastorelli, F., "Automatisation du procédé de béton projeté: Robotisation et optimisation," MS thesis, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2021, 112 pp.
10. Jolin, M.; Beaupré, D.; and Mindess, S., "Test to Characterise Properties of Fresh Dry-Mix Shotcrete," Cement and Concrete Research, V. 29, No. 5, May 1999, pp. 753-760. doi:10.1016/S0008-8846(99)00071-X.
11. Lemay, J.-D.; Jolin, M.; and Gagné, R., "Ultra Rapid Strength Development in Dry-Mix Shotcrete for Ultra Rapid Support in Challenging Mining Conditions," Shotcrete, V. 16, No. 4, Fall 2014, pp. 14-19.
12. Laradh, A., "Mise en place, énergie et rebond dans le béton projeté," MS thesis, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2020, 106 pp.
13. Paquet, S., "Caractérisation du béton projeté par voie sèche: Une approche rhéologique et énergétique," MS thesis, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2021, 109 pp.
14. Dionne-Jacques, S.-I., "Le rebond en béton projeté par voie sèche: Influence de la rhéologie et de l'énergie sur le comportement de la surface réceptrice," MS thesis, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2024, 190 pp.
15. Kim, J.B.; Monfort, M.; and Jolin, M., "Shotcrete Placement – Report on Recent Research from Rheology to Robotics," Shotcrete Convention & Technology Conference, Austin, TX, March 3, 2024.

Maxime Monfort, estudiante miembro de ACI, es licenciado por la École nationale supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM, por sus siglas en inglés) de París, Francia. Obtuvo un máster en ingeniería civil en la Université Laval, Québec, QC, Canadá, y está cursando un doctorado. Sus intereses de investigación incluyen el uso de tecnologías para medir el espesor de un muro de un área local que se está pulverizando, y la automatización del proceso de lanzamiento de concreto. Ha sido presidente de la Sección de Estudiantes del ACI Université Laval durante los dos últimos años. Es miembro del Subcomité 238-A del ACI, Student Workability.



Julien Schaeffer es licenciado por la escuela francesa de ingeniería ENSAM de París. Obtuvo su máster en ingeniería civil en la Université Laval en 2023, donde estudió la automatización del concreto lanzado y la optimización del rebote. Tras un puesto en WSP Canadá, actualmente trabaja para el grupo EGIS en Marsella, Francia, como ingeniero estructural involucrado en el diseño de grandes proyectos de construcción en acero, concreto y madera.



Jongbeom Kim, estudiante miembro de ACI, es candidato a doctor en ingeniería civil e hidráulica por la Universidad Laval. Su investigación doctoral, " Colocación de Concreto Lanzado de Mezcla Seca: Pruebas, modelos y simulación de procesos para minimizar el rebote", explora diseños de mezcla optimizados y dinámicas de colocación para minimizar el rebote. Mediante la combinación de automatización, modelización computacional y ensayos a escala real, busca un concreto lanzado sostenible y de alto comportamiento para la rehabilitación de infraestructuras. Kim obtuvo su licenciatura y maestría en la Universidad Nacional de Kangwon, en Gangwon (Corea del Sur), donde investigó los sistemas de vacíos de aire y la durabilidad al congelamiento y deshielo del concreto reforzado con fibras mediante el proceso de lanzado de concreto de mezcla húmeda.



Marc Jolin, FACI, es Catedrático del Departamento de Ingeniería Civil e Hidráulica de la Universidad Laval. Se doctoró en la Universidad de Columbia Británica, Vancouver, BC, Canadá, en 1999. Miembro activo del Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), sus investigaciones se centran en el concreto lanzado y el concreto fresco. Reconocido investigador y docente, Jolin es presidente del Comité C661 del ACI, del Comité de Certificación de Inspectores de Concreto Lanzado, así como miembro de otros comités del ACI y de la Asociación Americana de Concreto Lanzado (ASA).



Título original en inglés:
Shotcrete Placement Automation
A unique effect on rebound

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



Traductora:
**Lic. Iliana Margarita
Garza Gutierrez**



Revisora Técnica:
**Ing. Elissa Narro
Aguirre**