

Safety in Shotcrete Application in Underground Construction

By Raul Bracamontes

Because of its durability, strength, and flexibility in application, shotcrete is often used for the construction and stabilization of tunnels and other underground structures. The fact that tunneling involves general construction risks as well as tunnel specific environmental risks, makes this type of application potentially quite dangerous, and must be treated with caution. Risks cannot be eliminated, but we can implement measures to lower the risk.

The first step is planning. An occupational health and safety strategy for the project should be drawn up and all the precautionary measures must be identified by competent staff. The plan should contain details of emergency procedures as well as the appropriate training for workers related to the construction methods to be used. The goal is to maximize the safety of underground construction workers. Occupational safety and health regulations require employees to receive extensive training in:

- Air monitoring and ventilation
- Illumination
- Communication
- Flood control
- Shotcrete application
- Personal protection tools
- Emergency procedures, including evacuation plans
- Check-in/check-out procedures
- Explosives
- Prevention and protection against fire
- Mechanical tools

UNDERGROUND SHOTCRETE PLACEMENT - IMPORTANT MEASURES TO ACHIEVE SUCCESSFUL SHOTCRETE PLACEMENT

Shotcrete application: After each stage of the excavation sequence has been mucked out, concrete is shotcreted onto the exposed ground surface. The lining is often built up in several layers with mesh reinforcement inserted between the layers. Alternatively, short fibers can be added to the mix to provide some tensile capacity. Once the section of lining is complete, the next stage is excavated, and the process repeats until a continuous tunnel lining is formed. Often, the shotcreted lining does not form part of the permanent work and another permanent lining is installed at a later date, (Alun Tomas, 2020).

For the tunneling cycle to resume safely after shotcrete placement, the shotcrete must first reach a self-supporting state or strength before workers and machinery can return to work under the newly placed material.

Unfortunately, rock falls from recently exposed ground continues to be one of the most serious causes of injury. Underground mine collapse accidents in the United States cause 8 to 10 deaths and more than 800 injuries each year. This represents approximately 30% of fatal accidents and 15% of injuries that occur in underground mines each year.

Weak ground is not self-supporting after excavation and consequently, the support system must be installed concurrently with the active tunnel cycle. In the ground control system, shotcrete is used to provide temporary local surface stability before the primary support is installed. Because the shotcrete must become self-supporting before workers and equipment can work safely underneath, the strength gain characteristics of the shotcrete are critical to the speed of the cycle.

Shotcrete has proved its value to aid rock support on many underground jobs. Shotcrete application is skilled work, and as noted previously, only competent nozzleman should be used. It is of critical importance that personnel are properly trained in the operations they perform.



Fig. 1. Rock fall on jumbo equipment

Seguridad en la aplicación de concreto lanzado en la construcción subterránea

Por Raul Bracamontes

Debido a su durabilidad, resistencia y flexibilidad de aplicación, el concreto lanzado se utiliza a menudo para la construcción y estabilización de túneles y otras estructuras subterráneas. El hecho de que la construcción de túneles implica riesgos generales de construcción, así como riesgos ambientales específicos, hace que este tipo de aplicación sea potencialmente bastante peligrosa y debe tratarse con precaución. Los riesgos no se pueden eliminar, pero podemos implementar medidas para reducir la probabilidad de accidentes.

El primer paso es la planificación. Se debe elaborar una estrategia de seguridad y salud ocupacional para el proyecto y todas las medidas de precaución deben ser identificadas por personal competente. El plan debe contener detalles de los procedimientos de emergencia, así como la capacitación adecuada para los trabajadores relacionada con los métodos de construcción que se utilizarán. El objetivo es maximizar la seguridad de los trabajadores de la construcción subterránea. Las normas de salud y seguridad ocupacional exigen que los empleados reciban una amplia formación en:

- Monitoreo del aire y ventilación
- Iluminación
- Comunicación
- Control de inundaciones
- Aplicación del concreto lanzado
- Equipo de protección personal
- Procedimientos de emergencia, incluidos planes de evacuación
- Procedimientos de ingreso/salida
- Explosivos
- Prevención y protección contra incendios
- Herramientas mecánicas.

COLOCACIÓN DE CONCRETO LANZADO SUBTERRÁNEO: MEDIDAS IMPORTANTES PARA LOGRAR UNA COLOCACIÓN EXITOSA DEL CONCRETO LANZADO

Aplicación de concreto lanzado: Después de que se haya retirado el material de excavación según la secuencia de excavación, se aplica el concreto lanzado sobre la superficie expuesta del terreno. El revestimiento a menudo se construye en varias capas con un refuerzo de malla insertado entre las capas. Alternativamente, se pueden agregar fibras cortas a la mezcla para proporcionar cierta capacidad de tenacidad. Una vez que se completa la sección de revestimiento, se excava la

siguiente etapa y el proceso se repite hasta que se concluye con el revestimiento de túnel. A menudo, el revestimiento de concreto lanzado no forma parte de la obra permanente y se instala otro revestimiento permanente en una fecha posterior (Alun Tomas 2020).

Para reanudar de forma segura el ciclo de desarrollo del túnel después de la colocación del concreto lanzado, el concreto lanzado debe alcanzar primero un estado o resistencia auto soportante antes de que los trabajadores y la maquinaria puedan ingresar a una zona recién lanzada.

Desafortunadamente, los caídos de rocas en terrenos recién excavados continúan siendo una de las causas más graves de lesiones. Los accidentes por derrumbes en minas subterráneas en los Estados Unidos causan de 8 a 10 muertes y más de 800 lesiones cada año. Esto representa aproximadamente el 30% de los accidentes fatales y el 15% de las lesiones que ocurren en las minas subterráneas cada año.

El terreno intemperizado tiende a ser inestable después de la excavación y, en consecuencia, el sistema de soporte debe instalarse al mismo tiempo que el ciclo activo del túnel. En el sistema de control del terreno, el concreto lanzado se utiliza para proporcionar estabilidad superficial temporal antes de que se instale el soporte primario. Debido a que el concreto lanzado debe tener la resistencia adecuada antes de que los trabajadores y el equipo puedan trabajar de manera segura debajo del concreto recién aplicado, el desarrollo de resistencia a tempranas edades del concreto lanzado es crítico para la velocidad del desarrollo del ciclo de excavación.

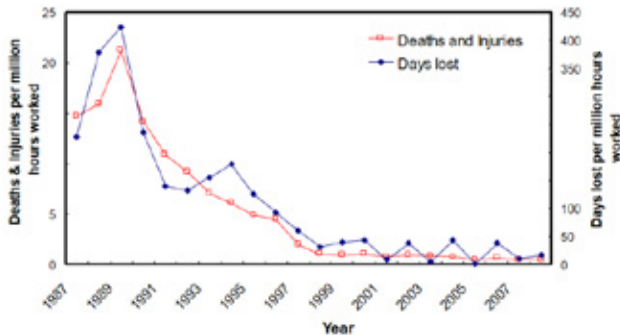
El concreto lanzado ha demostrado su importancia en el soporte de rocas en muchos trabajos subterráneos. La aplicación de concreto lanzado es un trabajo especializado y, como se señaló anteriormente, solo se debe utilizar un lanzador



Fig. 1. Rock fall on jumbo equipment

The nozzleman needs to have knowledge of the equipment used, especially if new technologies are used, as well as knowledge of the dangers and safety measures related to each stage of construction.

Here is a chart showing how the use of shotcrete in underground construction helped to reduce rock fall accidents in Australian mines between 1987 and 2008.



On the chart you can see death and injuries due to rock falls were substantially reduced when shotcrete was introduced between 1989-1999 in Australian mines.

When shotcrete is used as part of a multi-element ground support system, it is necessary to know when the material has developed a compressive strength of approximately 1.0 MPa (145 psi), the early threshold for safe re-entry of workers and machinery into a shotcreted area. Tunnel staff must have a means of quantifying the shotcrete strength after application to keep their tunnel safe for workers and equipment.

Success in shotcrete application depends on four main things, which are: the quality of shotcrete equipment, the quality of the concrete mixture, the quality of the crew, and good surface preparation. Shotcrete testing is used at the tunnel site to assist workers in determining if the shotcrete used in the ground control support system meets the specified shotcrete performance requirements. These tests measure early compressive strength related to re-entry time (amount of time that elapses before workers can safely re-enter an area of the tunnel), flexural load capacity, toughness, installed quality, and bond strength.



Fig. 2. Shotcrete placement with a remotely operated nozzle

The concrete mixture should be designed to meet the specifications for both workability and strength. It should also be designed to minimize dust emissions.

Ventilation: Good ventilation and lighting of the workplace is essential during shotcrete application. It should be noted that ventilation is the most effective system for controlling airborne dust.

In all underground workings, fresh and clean air circulation needs to be maintained in sufficient quantity and quality according to the number of people and the total power of equipment with internal combustion engines. A minimum of 19.5% and a maximum of 22.5% oxygen in the work environment needs to be maintained. When the mines are up to 1,500 m (4900 ft) above sea level, the minimum amount of air needed per man should be 6 m³/min (210 ft³/min) with a minimum of 2.83 m³/min (100 ft³/min) recommended for each horsepower of the internal combustion powered equipment (Komarov, 2010).

The following are the maximum permissible limits in the underground environment:

- Inhalable powder: 10 mg/m³
- Breathable powder: 3 mg/m³
- Oxygen (O₂): minimum 19.5% and max. 22.5%
- Carbon dioxide (CO₂): max. 9,000 mg/m³ or 5,000 ppm. 30,000 mg/m³ for a span of 15 min
- Carbon monoxide (CO): max. 29 mg/m³ or 25 ppm
- Methane (NH₄): max. 5,000 ppm
- Sulfurized hydrogen: max. 14 mg/m³ or 10 ppm
- Nitrous gases (NO₂): max. 7 mg/m³ or 3 ppm to 5 ppm
- Nitrous gases (NO): 25 ppm
- Sulphurous anhydride: 2 ppm minimum to 5 ppm max
- Aldehydes: max. 5 ppm
- Ozone: max. 0.1 ppm

Adhesion to the rock: Shotcrete support is dependent on adequate bond to the rock. Surfaces contaminated with oil, dust or mud shall be fully cleaned before shotcrete placement.

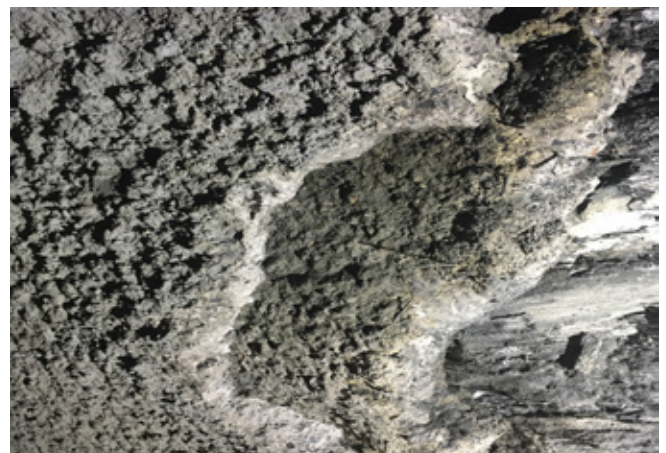
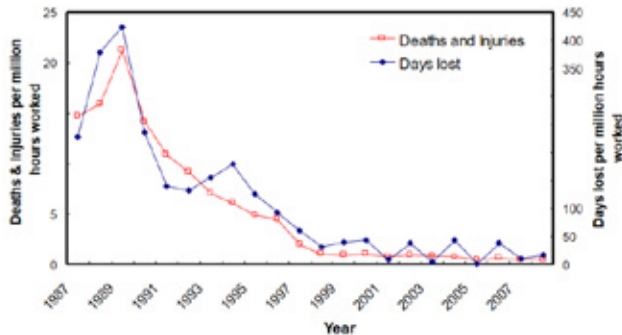


Fig. 3. Lack of surface preparation prevented adhesion between concrete layers and concrete and rock.

competente. Es de vital importancia que el personal esté debidamente capacitado en las operaciones que realiza.

El lanzador debe tener conocimiento del equipo con que trabaja, especialmente si se utilizan nuevas tecnologías, así como conocimiento de los peligros y las medidas de seguridad relacionadas con cada etapa de la construcción.

A continuación, se muestra un ejemplo de cómo el uso del concreto lanzado en la construcción subterránea ayudó a reducir los accidentes de caída de rocas en las minas australianas entre 1987 y 2008.



Las muertes y lesiones debidas a caídas de rocas se redujeron sustancialmente cuando se introdujo el concreto lanzado durante el período 1989-1999 en las minas australianas.

Cuando el concreto lanzado es parte de un sistema de soporte del terreno de múltiples elementos, es necesario saber cuándo el material ha desarrollado una resistencia a la compresión de aproximadamente 1.0 MPa (145 psi), este es la resistencia mínima para el reingreso seguro de trabajadores y maquinaria un área donde se aplicó concreto lanzado. El personal del túnel debe tener un medio para cuantificar el desarrollo de la resistencia del concreto después de su aplicación para garantizar la seguridad de los trabajadores y del equipo.

El éxito en la aplicación del concreto lanzado depende de cuatro cosas principales, que son: la calidad del equipo de lanzado, la calidad de la mezcla, la calidad de la mano de obra y una buena preparación de la superficie. Las pruebas al concreto lanzado se realizan en el sitio para ayudar a los trabajadores a determinar si el concreto lanzado colocado como sistema de soporte cumple con los requisitos específicos. Estas pruebas miden la resistencia a la compresión a tempranas edades relacionada con el tiempo de reingreso (cantidad de tiempo que transcurre antes de que los trabajadores puedan reingresar con seguridad a un área del túnel), la capacidad de carga de flexión, la tenacidad, la calidad instalada y la adherencia.



Fig. 2. Aplicación robótica de concreto lanzado

La mezcla de concreto debe diseñarse para cumplir con las especificaciones tanto de trabajabilidad como de resistencia. También debe diseñarse para minimizar las emisiones de polvo.

Ventilación: Una buena ventilación e iluminación del lugar de trabajo es esencial durante la aplicación del concreto lanzado. Cabe señalar que la ventilación es el sistema más eficaz para controlar el polvo en el aire.

En todas las obras subterráneas, la circulación de aire fresco y limpio debe mantenerse en cantidad y calidad suficiente de acuerdo con el número de personas y la potencia total de los equipos con motores de combustión interna. Es necesario mantener un mínimo de 19,5% y un máximo de 22,5% de oxígeno en el entorno de trabajo. Cuando las minas están hasta 1.500 m (4900 pies) sobre el nivel del mar, la cantidad mínima de aire necesaria por hombre debe ser 6 m³/min (210 pies³/min) con un mínimo de 2,83 m³/min (100 pies³/min) recomendado para cada caballo de fuerza del equipo de combustión interna (Komarov, 2010).

Los siguientes son los límites máximos permitidos en el entorno subterráneo:

- Polvo inhalable: 10 mg/m³
- Polvo transpirable: 3 mg/m³
- Oxígeno (O₂): mínimo 19,5% y máx. 22,5%
- Dióxido de carbono (CO₂): máx. 9.000 mg/m³ o 5.000 ppm. 30.000 mg/m³ durante un lapso de 15 min
- Monóxido de carbono (CO): máx. 29 mg/m³ o 25 ppm
- Metano (NH₄): máx. 5000 ppm
- Hidrógeno sulfurado: máx. 14 mg/m³ o 10 ppm
- Gases nitrosos (NO₂): máx. 7 mg/m³ de 3 ppm o 5 ppm
- Gases nitrosos (NO): 25 ppm
- Anhídrido sulfuroso: mínimo de 2 ppm a máximo de 5 ppm
- Aldehídos: máx. 5 ppm
- Ozono: máx. 0,1 ppm

Adherencia a la roca: El soporte del concreto lanzado depende de una adecuada unión a la roca. Las superficies contaminadas con aceite, polvo o lodo deben limpiarse completamente antes de la colocación del concreto lanzado.

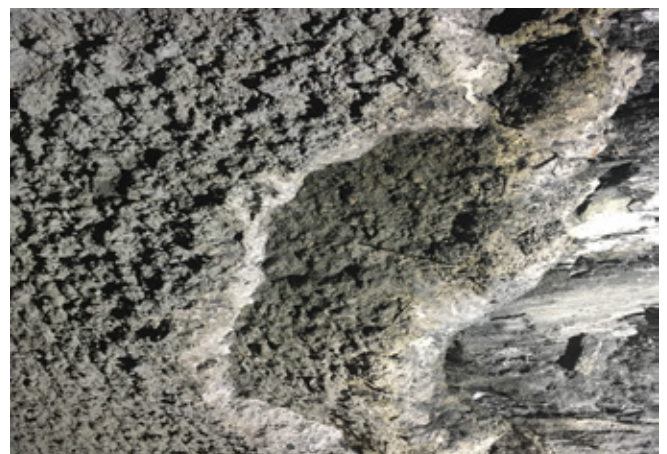


Fig. 3. La mala preparación de la superficie impidió la adhesión entre las capas de concreto lanzado y el concreto con la roca



Fig. 4. Good bonding between shotcrete layers

Proper application of shotcrete in layers does not create a cold joint, as long as you achieve good bond between the layers. Shotcrete will not bond to excessively wet rock surfaces and in these cases, remedial measures are necessary.

Terrain	Strength
I	1 Mpa (145 lb/in ²)
II	0.8 Mpa (116 lb/in ²)
III	0.5 Mpa (72 lb/in ²)
IV	0.42 Mpa (61 lb/in ²)
V	0.31 Mpa (45 lb/in ²)

Fig. 5. Minimum adherence of shotcrete according to type of terrain

Note that the adhesion of shotcrete to the rock could be reduced if using shotcrete rapid-set accelerators. However, an overdose of accelerator will reduce the final strength. The quality of the shotcrete placement shall be verified by routine inspection and testing. During shotcrete placement no other operations should be carried out in the vicinity.

Air compressor for shotcrete application: For robotic shotcrete application, we need to have 10 – 12 m³/min (375 to 425 ft³/min) air flow at the nozzle with 6-8 bars (100 lb/in²). The use of compressed air involves hazards. Proper maintenance of air compressors is vital to their continued safe operation. When using compressed air underground there can be a discharge of oil which means that the air in the tunnel could become contaminated and consequently the concrete as well. Thus, it is necessary to have the supply of air free of oil for shotcrete application.

Compressed air should be taken seriously with careful attention to all precautionary measures. It should not be used to blow down dust from clothes as one single blast of air can burst an eardrum or permanently destroy an eye.

Generally, wet-mix shotcrete produces less dust and rebound than the normal dry-mix process. Accelerators should be used in correct proportions as per “manufacturer’s instructions.” Non-caustic accelerators are preferred.

PPE: Protective clothing, respirators, hard hat, steel toe boots, ear plugs, and safety glasses should always be used. Dust masks or respirators may be required by crew members when dust emissions cannot be adequately controlled in their work areas.

CONCLUSIONS:

The use of shotcrete in preventing rock fall has been used very successfully and has many benefits. However, even when using shotcrete, underground construction has risks that must be taken seriously. It is very important to have training in shotcrete applications, awareness of the underground risks and appropriate safety procedures, in addition to nozzleman certification. All of these are required for the success and safe application of shotcrete during underground construction. Think safety first!

References

1. NIOSH [2014]. Shotcrete design and installation compliance testing: early strength, load capacity, toughness, adhesion strength, and applied quality, Martin LA, Clark CC, Seymour JB, and Stepan MA, Spokane WA: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 2015-107, RI 9697.
2. “Guidelines for good occupational and safety practice in tunnel construction,” ITA working group health and safety in works, ITA report no. 001/November 2008.
3. Roof and rib fall incident trends: a 10-year profile, D.M. Pappas and C. Mark Civil engineer and mining engineer, respectively, National Institute for Occupational Safety and Health, Pittsburgh, PA.
4. Early strength performance of modern weak rock mass shotcrete mixes, C.C. Clark, M.A. Stepan, J.B. Seymour and L.A. Martin.



Raúl Armando Bracamontes Jiménez, Ing., graduated from ITESO University (Instituto de Estudios Superiores de Occidente) in 1994 with a degree in civil engineering and has been working in the concrete industry ever since. Currently the owner of ADRA Ingeniería S.A. de C.V. since 2005, he is fluent in Spanish and English with multiple publica-

tions and courses given on shotcrete on his résumé. He is an ACI Certified Wet-Mix Nozzleman and Approved Examiner. Bracamontes is a member of Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Colegio de Ingenieros Civiles de León (CICL), and the American Shotcrete Association.



Fig. 4. Buna adherencia entre capas de concreto lanzado

La aplicación adecuada de concreto lanzado en capas no genera una junta fría, siempre que logre una buena unión entre las capas. El concreto lanzado no se adherirá a superficies rocosas excesivamente húmedas y, en estos casos, es necesario tomar medidas correctivas.

Terreno	Resistencia
I	1 Mpa (145 lb/in ²)
II	0.8 Mpa (116 lb/in ²)
III	0.5 Mpa (72 lb/in ²)
IV	0.42 Mpa (61 lb/in ²)
V	0.31 Mpa (45 lb/in ²)

Fig. 5. Adherencia mínima del concreto lanzado según tipo de terreno

Recuerde que la adhesión del concreto lanzado a la roca podría reducirse si se utilizan acelerantes de fraguado rápido. Además, una sobredosis de acelerante reducirá la resistencia final. La calidad de la colocación del concreto lanzado debe verificarse mediante inspecciones y pruebas de rutina. Durante la colocación del concreto lanzado, no se deben realizar otras operaciones en las proximidades.

Compresor de aire para aplicación de concreto lanzado: Para la aplicación robótica de necesitamos tener un flujo de aire de 10-12 m³ / min (375 a 425 ft³ / min) en la boquilla con 6-8 bares (100 lb / in²). El uso de aire comprimido conlleva peligros. El mantenimiento adecuado de los compresores de aire es vital para su funcionamiento seguro continuo. Cuando se utiliza aire comprimido bajo tierra, puede haber una descarga de aceite, lo que significa que el aire en el túnel podría contaminarse y, en consecuencia, también el concreto. Por lo tanto, es necesario tener el suministro de aire libre de aceite para la aplicación del concreto lanzado

El aire comprimido debe tomarse en serio, prestando especial atención a todas las medidas de precaución. No debe usarse para quitar el polvo de la ropa, ya que una sola ráfaga de aire puede reventar un tímpano o destruir un ojo de forma permanente.

Generalmente, el concreto lanzado vía húmeda genera menos polvo y rebote que el proceso de vía seca. Los acelerantes deben usarse en proporciones correctas según las “instrucciones del fabricante.” Se prefieren los acelerantes no cáusticos o libre de álcalis.

PPE: Siempre se debe usar ropa protectora, respiradores, casco, botas con punta de acero, tapones para los oídos y lentes de seguridad. Otros miembros de la cuadrilla pueden requerir máscaras anti polvo o respiradores cuando las emisiones de polvo no pueden controlarse adecuadamente en sus áreas de trabajo.

CONCLUSIONS:

El uso de concreto lanzado para prevenir la caída de rocas se ha utilizado con mucho éxito y tiene muchos beneficios. Sin embargo, incluso cuando se usa concreto lanzado, la construcción subterránea tiene riesgos que deben tomarse en serio. Es muy importante tener formación en aplicaciones de concreto lanzado, conocimiento de los riesgos subterráneos y procedimientos de seguridad adecuados, además de la certificación de lanzador. Todos estos son necesarios para el éxito y la aplicación segura del concreto lanzado durante la construcción subterránea. ¡Piense en la seguridad primero!

References

1. NIOSH [2014]. Shotcrete design and installation compliance testing: early strength, load capacity, toughness, adhesion strength, and applied quality, Martin LA, Clark CC, Seymour JB, and Stepan MA, Spokane WA: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 2015-107, RI 9697.
2. “Guidelines for good occupational and safety practice in tunnel construction,” ITA working group health and safety in works, ITA report no. 001/November 2008.
3. Roof and rib fall incident trends: a 10-year profile, D.M. Pappas and C. Mark Civil engineer and mining engineer, respectively, National Institute for Occupational Safety and Health, Pittsburgh, PA.
4. Early strength performance of modern weak rock mass shotcrete mixes, C.C. Clark, M.A. Stepan, J.B. Seymour and L.A. Martin.



Raúl Armando Bracamontes Jiménez, Ing., Se graduó de la Universidad ITESO (Instituto de Estudios Superiores de Occidente) en 1994 con un título en ingeniería civil y desde entonces trabaja en la industria del concreto. Actualmente propietario de ADRA Ingeniería S.A. de C.V. desde 2005, habla español e inglés con fluidez con múltiples publicaciones y cursos impartidos sobre concreto lanzado en su currículum. Es un lanzador de mezcla húmeda certificado por ACI y examinador aprobado. Bracamontes es miembro del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), del Colegio de Ingenieros Civiles de León (CICL) y de la American Shotcrete Association.