



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“GENERACIÓN DE UNA CURVA DE TENDENCIA DE LA PISTOLA HILTI PARA EL CONTROL DE RESISTENCIAS TEMPRANAS DE SHOTCRETE EN MINERÍA SUBTERRÁNEA”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Bach. Aricely Sanchez Gomez
Bach. Luis Orlando Tapia Vallejos

Asesor:

Ing. Vásquez Mendoza, Oscar Arturo

Cajamarca - Perú

2019

DEDICATORIA

A las tres mujeres más importantes en mi vida; las cuales amo mucho: mi madre, mi hermana y mi tía morena.

A mi negro, por el apoyo y los consejos desde que tengo uso de razón.

Sanchez Gomez, Aricely

A Guillermo y Faustina, mis padres, por el apoyo constante en toda mi formación universitaria.

A mi esposa Jessica y mi hija Emma, por la alegría y fuerza que me dan día a día.

A mis hermanos.

Tapia Vallejos, Luis Orlando

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darnos la vida y permitirnos desarrollarnos en el ámbito profesional y personal.

Al Ing. Oscar Vásquez, nuestro asesor, por su apoyo incondicional para la realización de la presente tesis.

A Marco Jáuregui, Alexander Benites y Alex Marinovic; sin ustedes esta tesis no hubiera dado frutos.

Tabla de contenidos

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	32
CAPÍTULO III. RESULTADOS	39
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	49
REFERENCIAS	52
ANEXOS	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas método vía seca	14
Tabla 2. Ventajas y desventajas método vía húmeda	18
Tabla 3. Ensayo en el panel 01	39
Tabla 4. Ensayo en el Panel 27	40
Tabla 5. Ensayo en el Panel 30	41
Tabla 6. Ensayo en el Panel 32	42
Tabla 7. Ensayo en el Panel 40	43
Tabla 8. Ensayo en el Panel 43	44
Tabla 9. Ensayo en el Panel 45	45
Tabla 10. Ensayo en el Panel 49	46
Tabla 11. Resumen de ensayos realizados	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fibras metálicas.....	12
Figura 2. Shotcrete por vía seca.....	13
Figura 3. Equipo de cámara simple y doble respectivamente.....	15
Figura 4. Máquina de alimentación continua a rotor y plato giratorio.	16
Figura 5. Shotcrete por vía húmeda	17
Figura 6. Proceso proyección vía húmeda - flujo denso.....	19
Figura 7. Robot para Shotcrete Alpha 20.	20
Figura 8. Clases de resistencias tempranas del concreto lanzado.....	23
Figura 9. Panel de prueba cuadrado.....	25
Figura 10. Línea de tiempo para cada método de resistencia temprana con su respectivo intervalo de resistencia a compresión en la que trabaja.	25
Figura 11. Curva de calibración del penetrómetro de aguja.	26
Figura 12. Ecuación para determinar la resistencia a compresión al utilizar el penetrómetro.	27
Figura 13. Penetrómetro.	27
Figura 14. Pistola Hilti DX 450.....	28
Figura 15. Distancia entre pernos (cm).	29
Figura 16. Detalle de perno incrustado en el Shotcrete	29
Figura 17. Extracción de testigos con máquina diamantina.	30
Figura 18. Pistola Hilti DX 450.....	33
Figura 19. Perno X-M6-8-95 D12	33
Figura 20. Máquina diamantina.....	34
Figura 21. Máquina de compresión	34
Figura 22. Cartucho verde.	35
Figura 23. Disparo de pernos en el panel 43.	36
Figura 24. Medición de NVS.....	36
Figura 25. Extracción de testigo.	37
Figura 26. Corte de bases de testigo.	37
Figura 27. Ensayo de compresión.....	38
Figura 28. Curva de tendencia de la Resistencia del hormigón vs Longitud de Penetración.	48
Figura 29. Ecuación logarítmica de la curva de tendencia.	48

RESUMEN

En minería, uno de los factores más importantes es la seguridad de sus colaboradores; es así que en minería subterránea la seguridad va de la mano con el sostenimiento adecuado de sus labores, el caso estudiado está basado en sostenimiento con Shotcrete. Bajo este contexto, la presente investigación tiene como objetivo principal generar una curva de tendencia de la Pistola Hilti DX 450 para el control de resistencias tempranas en el sostenimiento con Shotcrete en minería subterránea. La presente tesis estudia las mediciones de penetración del perno en el hormigón y los resultados que nos brindan los ensayos de compresión de resistencia temprana de testigos que fueron extraídos de paneles a los que se dispararon pernos con la Pistola Hilti DX 450. Como resultado de los ensayos realizados se pudo encontrar una ecuación que determina la tendencia de la Pistola Hilti, así mismo esto determino que en ensayos realizados a 12 horas de fraguado es imposible determinar la resistencia del testigo. Finalmente, se comprobó in- situ que la curva generada es capaz de excluir al extractor de pernos, por lo cual permitirá agilizar el proceso de control de resistencias tempranas.

Palabras clave: Pistola Hilti, Resistencias tempranas, Curva de tendencia, Ensayo a compresión.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El hormigón proyectado es utilizado a lo largo de todo el mundo en obras de construcción, especialmente en obras de tonelería, esto se debe a su capacidad de soporte y a las altas resistencias que puede obtener en poco tiempo. Estas propiedades se deben al rápido fraguado que presenta, producto de los aditivos acelerantes incorporados, y de la dosificación correspondiente. (Linares, 2018)

(Bardales, 2015), Sostiene que: “la metodología más confiable para realizar el seguimiento a edades tempranas del concreto lanzado son los métodos expuestos, el uso de la aguja de penetración digital Mecmesin y la pistola HILTI DX 450” (pág. 30).

(Belmar, 2013), asevera que: El análisis de la resistencia a compresión en los hormigones proyectados a edades tempranas es altamente importante debido a la función que desempeña en el marco de la obra civil. El sostenimiento de obras subterráneas necesita de un endurecimiento del hormigón rápido que se consigue mediante la adición de acelerantes. Por este hecho es importante el ensayo de la resistencia a compresión del hormigón proyectado a edades tempranas.

1.2. Bases teóricas

Según el (American Concrete Institute, 2005), el Shotcrete es “mortero u hormigón proyectado neumáticamente a alta velocidad sobre una superficie” (pág. 5).

El objetivo principal del uso del Shotcrete es soportar la roca, de manera rápida y efectiva, para continuar con la siguiente fase del ciclo de minado con seguridad para el personal y equipos, previniendo colapsos en el área ya excavada. (Anabalón, 2017)

El hormigón proyectado es un método de construcción rápido, flexible y económico, pero requiere un alto grado de mecanización y son esenciales operadores especializados. Se constituye de varios componentes que lo precisan como una tecnología completa.

El material.

El proceso de proyección.

El sistema de proyección (equipos).

Estos componentes definen toda una tecnología que tiene una larga tradición, enorme potencial innovador y gran futuro. Este material se utiliza mediante un diseño de mezcla de hormigón que está determinado por los requerimientos de aplicación y los parámetros especificados para cada obra. (Belmar, 2013, pág. 3)

1.2.1. Diseño del Shotcrete

El diseño del Shotcrete se refiere básicamente a todos los materiales que se utilizan para su fabricación, indistintamente del sistema de proyección.

Áridos

Los áridos a emplear en el hormigón proyectado se obtendrán por la selección y clasificación de materiales naturales o de machaqueo, o por una mezcla de ambos. Las arenas más finas favorecen la retracción mientras que las más gruesas incrementan el porcentaje de rebote. Los áridos estarán compuestos de partículas limpias, duras, resistentes, con una calidad uniforme. El empleo de áridos finos o gruesos, o una mezcla de ambos, se hará de acuerdo con el espesor a aplicar en el hormigón proyectado. En general, no se utilizan áridos con tamaños > 15 mm.

Se define como árido fino, el material compuesto por partículas duras y resistentes, del que pasa por el tamiz n° 4 ASTM un mínimo del 95 % en peso. Este árido fino estará exento de cualquier sustancia que pueda reaccionar perjudicialmente con los álcalis del cemento.

Se define como árido grueso, la fracción de árido mineral de la que queda retenida en el tamiz n° 4 ASTM un mínimo del 70% en peso. Los áridos gruesos podrán ser rodados o de machaqueo. (Rey, 2006, pág. 5)

Cementos

El cemento utilizado en la elaboración del Shotcrete generalmente varía entre 300 y 450 [kg/m³].

Normalmente los cementos a utilizar en los morteros u hormigones proyectados serán del tipo I, categorías 35 y 45. En los casos en que la gunita vaya a ser expuestas a la acción de suelos o aguas subterráneas con una alta concentración de sulfatos, debe emplearse un cemento resistente a los sulfatos. (Laboratorio Oficial J.M. Madariaga, 2015, pág. 114)

Agua

El agua de mezclado debe ser clara y aparentemente limpia. Si contiene sustancias que decoloren o le den sabores u olores raros, indeseables o que causen sospecha, no debe usarse, a menos que los registros de servicio del hormigón preparado con ella u otra información indiquen que no afecta la calidad del hormigón. (ASTM C94, 2003)

Aditivos

Los aditivos se pueden utilizar en la construcción de hormigón para mejorar algunas propiedades físico-químicas, teniendo en cuenta la aplicación que se le dará y las condiciones de colocación. Los aditivos del Shotcrete deben probarse antes de ser usados a gran escala para determinar si en realidad se obtendrán las ventajas esperadas. (...) Los aditivos de hormigón proyectado generalmente están separados en cuatro categorías, los cuales son aceleradores, incorporadores de aire, reductores de agua y retardadores. (ACI 506R-05, 2005)

Los aditivos plastificantes y superplastificantes, conocidos comúnmente como reductores de agua, son materiales químicos que permiten aumentar la docilidad para un contenido fijo de agua o, análogamente, permite reducir el contenido agua para una docilidad determinada. La diferencia entre los reductores de agua radica en la capacidad fluidificante que se puede obtener bajo su acción en la mezcla, o su facultad para disminuir el agua libre para una docilidad dada. (Tenorio, 2016, pág. 24)

Fibra

La adición de fibras a los hormigones mejora sus características notablemente. Aunque hay fibras de distintas naturalezas (nylon, fibras de vidrio, polipropileno, polietileno, acero, etc.) (...) La presencia de fibras metálicas en los hormigones proyectados hace que mejoren sus propiedades mecánicas haciendo que disminuya su fragilidad y aumenta su ductilidad después de la fisuración; aumenta la resistencia a la rotura y la capacidad de absorción de energía; disminuye la tendencia a las roturas por retracción; aumenta la resistencia a la aparición y propagación de grietas; aumenta la resistencia a la tracción, al impacto y a la cizalladura; mejora el comportamiento a la flexotracción y aumenta la durabilidad. (Vargas, 2016, pág. 37)



Figura 1. Fibras metálicas.

Fuente: (Laboratorio Oficial J.M. Madariaga, 2015)

1.2.2. Técnicas de proyección del Shotcrete

Proyección por vía seca

Técnica en la que el cemento y agregados se procesan por lotes y se mezclan mecánicamente. El material es transportado neumáticamente a través de mangueras o tuberías a una boquilla donde se introduce agua para humedecer la mezcla antes de que sea proyectada. Este hormigón proyectado también puede incluir aditivos o fibras o una combinación de ambos. (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015, pág. 13)



Figura 2. Shotcrete por vía seca.

Fuente: (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015)

Este sistema presenta una serie de ventajas frente a la vía húmeda en algunas aplicaciones concretas. Por un lado, permite alcanzar elevadas resistencias a edades tempranas en sellados y estabilización de terrenos. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, 2016)

Asimismo, el hecho de que no se incorpore el agua a la mezcla (áridos + cemento), supone que ésta se puede acopiar en seco en silos para protegerla de la humedad, eliminando así las pérdidas de material debido a colas o sobrantes. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, 2016)

En este método, el operador de la boquilla es quien controla y ajusta la cantidad del agua de mezcla, lo que se traduce en una desventaja por el hecho de que el operario debe disponer de experiencia necesaria para lograr regular el contenido de agua y, de este modo, proyectar el hormigón con la razón agua-cemento especificada ya que, si la cantidad de agua es alta, las resistencias del hormigón proyectado disminuyen notoriamente. Por lo general, la razón A/C debería fluctuar entre 0,3 y 0,50. (Tenorio, 2016, pág. 13)

Tabla 1. *Ventajas y desventajas método vía seca*

Ventajas	Desventajas
Fácil manejo para volúmenes pequeños	Alta generación de polvos
Equipos de proyección son más económicos	Alto rebote
En la boquilla se tiene el control del agua y de la consistencia de la mezcla	Mayor contaminación
Mantenimiento de equipos es más económica	Pérdidas de mezcla por rebote de hasta el 35%
Transporte a mayor distancia	

Fuente: (Belmar, 2013)

Equipos de proyección para mezcla seca:

Máquinas de cámara simple o doble: La diferencia entre la máquina de simple y doble cámara radica en que en la primera cuando se efectúa el llenado de la cámara esta se tapa e impide el aprovisionamiento continuo, en cambio, la de doble cámara facilita un trabajo más eficiente gracias al uso de la cámara como compuerta de aire mientras se suministra material. (Tenorio, 2016, pág. 41)

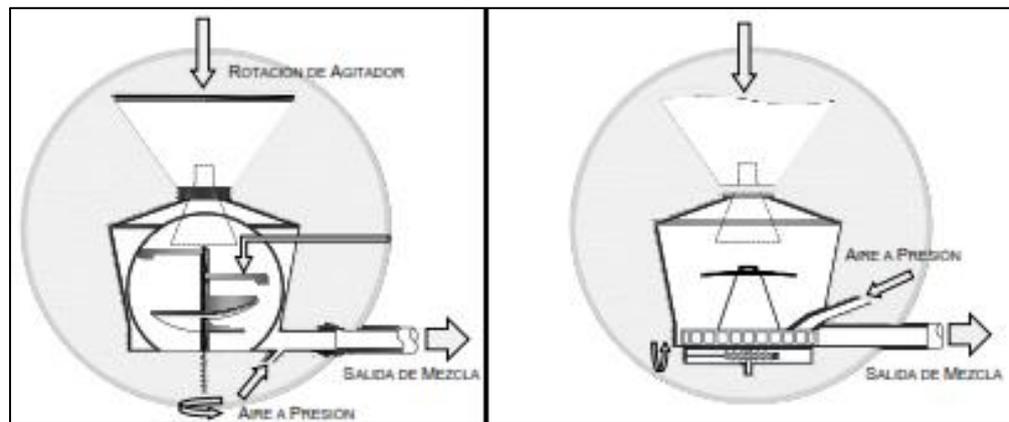


Figura 3. Equipo de cámara simple y doble respectivamente.

Fuente: (Tenorio, 2016)

Máquinas de alimentación continua: Respecto a las máquinas de alimentación continua, estas se subdividen en dos tipos, la máquina rotatoria de rotor y la máquina de plato rotatorio que, básicamente, ambas se alimentan a través de la tolva en donde, por acción de la fuerza de gravedad, el material descende a las cavidades del rotor, este, revuelve la mezcla y luego se agrega aire a presión por arriba la cual expulsa la mezcla. (Tenorio, 2016, pág. 42)

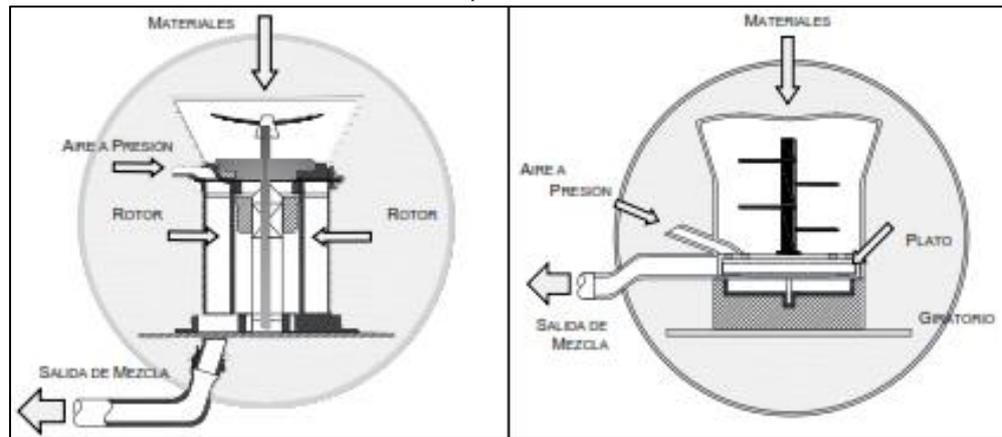


Figura 4. Máquina de alimentación continua a rotor y plato giratorio.

Fuente: (Tenorio, 2016)

Proyección por vía húmeda

Técnica en la que el cemento, áridos y el agua se procesan por lotes y se mezclan juntos en una planta de hormigón o equipo móvil de mezclado, para luego transportarlos y finalmente vaciarlos en una bomba. Desde este punto la mezcla se transporta a través de una manguera a una boquilla en donde se proyecta neumáticamente sobre el sustrato. El aire comprimido se introduce en el flujo de material en la boquilla con el fin de proyectar el material hacia el sustrato. A este hormigón proyectado se incorporan aditivos acelerantes antes de ingresar a la boquilla y también se le puede incluir fibras durante el mezclado. (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015, pág. 13)



Figura 5. Shotcrete por vía húmeda.

Fuente: (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015)

El sistema de proyección por vía húmeda se puede emplear tanto con flujo diluido como con flujo denso. En comparación con el sistema de proyección de la vía seca, la vía húmeda permite conocer en todo momento la cantidad de agua añadida a la mezcla, ya que el aporte de ésta se realiza de forma controlada en la planta durante el proceso de fabricación y no en la boquilla, mejorando la calidad y durabilidad del concreto colocado. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, 2016, pág. 135)

Se cuidará especialmente que la posición de la boquilla de proyección se mantenga lo más perpendicular posible a la superficie de proyección con objeto de disminuir el rebote. El máximo rebote se obtiene proyectando a 45°, y disminuye progresivamente hasta 90°, donde se minimiza. La distancia se regulará de modo que no exceda de 1,5 m. Simultáneamente, se recomienda proyectar a distancias no inferiores a 0.5 m, por razones de rebote. (The Chemical Company, 2009, pág. 10)

Tabla 2. *Ventajas y desventajas método vía húmeda*

Ventajas	Desventajas
Alto rendimiento hasta 30 [m ³ /h]	Se requiere de una planta de hormigón para el preparado de mezcla con las dosificaciones de diseño
Mejor control de la dosificación principalmente la relación agua/cemento	Para el manejo de los equipos se requiere de mano de obra calificada
Menor rebote de la mezcla, se estima como máximo 10%	No se puede aplicar en secciones menores de 3x3 m por las dimensiones de los equipos
Menos producción de polvo, por ende, menos contaminación	
Velocidad de proyección alta 60-70 [m/s]	

Fuente: (Belmar, 2013)

El proyectado con flujo denso es el método de suministro más común. Éste se hace con bomba dúplex. Las cuales proporcionan un bombeo a alta velocidad a través de mangueras especiales hasta una boquilla provista de un chorro de aire comprimido (boquilla de proyección), obteniéndose así un mortero u hormigón con una compactación suficiente. Se carga el material en la bomba a través de una tolva alimentadora y se pasa por mangueras y tubos. La diferencia principal con respecto al hormigón bombeado tradicionalmente radica en que el requerimiento de la pulsación debe ser lo más baja posible a fin de conseguir un lanzado constante en la boquilla. (Mateo, 2013, pág. 10)

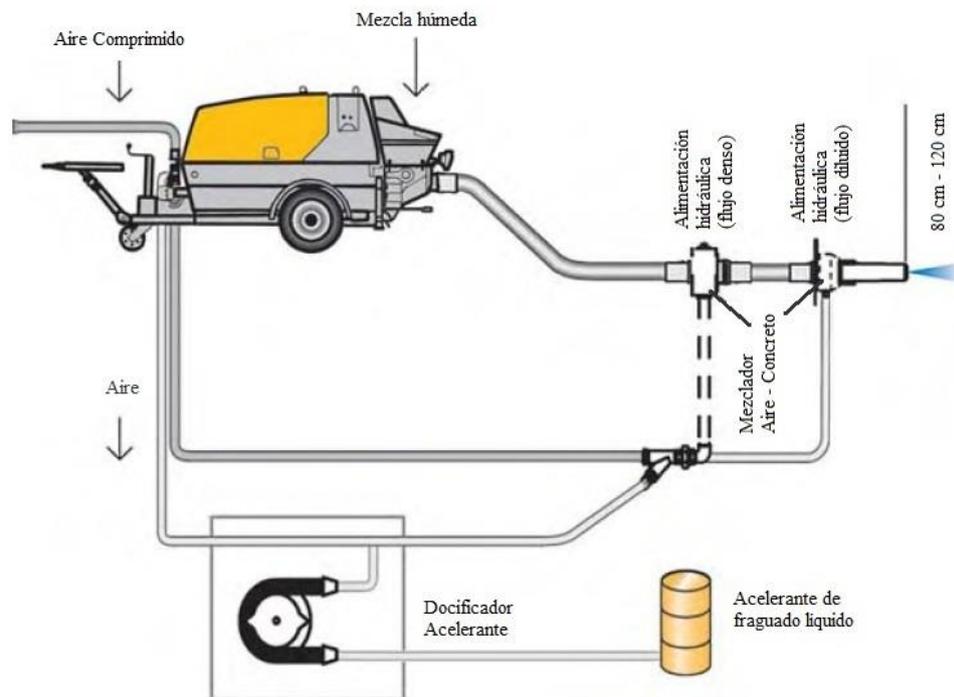


Figura 6. Proceso proyección vía húmeda - flujo denso.

Fuente: (Mateo, 2013)

Equipos de control remoto:

Los equipos de proyección de hormigón con mando a distancia se utilizan para mejorar la seguridad y la productividad de los operadores, debido a que:

Mantienen al operador alejado de suelo sin soporte.

Reducen al mínimo la exposición al rebote y el polvo.

Permiten el acceso a zonas difíciles.

Son menos exigentes físicamente que la proyección manual.

Aumentan de la productividad mediante un mayor rendimiento volumétrico.

El equipo generalmente consiste en un brazo giratorio telescópico con la boquilla montada en este y la bomba de hormigón montado en un vehículo móvil, mientras que el operador controla los movimientos de la bomba y del brazo con un control remoto. (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015)



Figura 7. Robot para Shotcrete Alpha 20.

Fuente: (Huachaca, 2018)

Proyección vía semi-húmeda

Este sistema idéntico en sus primeras fases al de la mezcla seca, únicamente difiere de él en que, a una distancia aproximadamente de 5 m de la boquilla, se efectúa la adición de agua, y se puede, y debe, humedecer los áridos, hasta un 10 %, por lo que se mejoran las propiedades de la mezcla al llegar a la boquilla, de la que saldrá el mortero u hormigón proyectado. (Rey, 2006)

1.2.3. Resistencias a Compresión

“La resistencia a la compresión es la resistencia de un material a una fuerza de aplastamiento aplicado axialmente” (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015).

La resistencia a la compresión del hormigón es altamente dependiente de la relación agua/cemento. La relación agua/cemento para hormigón proyectado por vía húmeda normalmente oscila entre 0.4 para la aplicación civil y subterránea, hasta un 0.65 para piscinas. Valores en el orden de 0.35 se pueden conseguir fácilmente mediante el uso de reductores de agua de alto rango. La relación de contenido de agua/cemento está dentro del rango de 0.3 a 0.5 para hormigón proyectado en seco, pero puede variar ampliamente debido a la incertidumbre en el control del agua por parte del pitonero. (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015)

Marín, como se citó en (Cedeño, 2015) sostiene que la caracterización de la resistencia a compresión es una propiedad de control y diseño de las mezclas cementicias proyectadas, especificados en los pliegos de condiciones de la obra. Debido a los avances técnicos y al desarrollo de la industria de la construcción, se han logrado alcanzar resistencias superiores a los 70 MPa a 28 días en el Túnel del Canal de la Mancha, e incluso resistencias superiores a 86 MPa en el Proyecto de Galería vertical en Johannesburgo. Sin embargo, los valores promedios utilizados oscilan entre 25-45 MPa.

Resistencia muy temprana

El desarrollo de la resistencia del hormigón proyectado puede ser descrito como un efecto de dos procesos químicos principales, uno de ellos, se da en la mezcla entre el hormigón fresco y el aditivo acelerante en la boquilla, por donde se proyecta. Esta reacción se denomina resistencia inicial, que puede durar aproximadamente de 0 a 60 minutos. (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015)

En los primeros minutos después de la aplicación del hormigón proyectado, la adherencia es decisiva y determina el grosor de la aplicación, sin embargo, nunca es posible aplicar más hormigón proyectado del que el sustrato es capaz de soportar (adherencia). El desarrollo de resistencia muy temprana define la velocidad de colocación y por lo tanto el desempeño del contratista. (Belmar, 2013)

Resistencia temprana

Una resistencia a la compresión medible se obtiene después de aproximadamente una hora cuando se usa acelerante en dosis de entre 6 a 10% (en casos especiales o en estabilización inmediata después de tan sólo unos pocos minutos). Este desarrollo de resistencia determina cuando se puede continuar perforando, es decir, determina el avance del túnel, la seguridad del personal y de la maquinaria al momento de re-ingresar al frente de excavación para su continuidad, que es el hito de mayor preocupación en obra. (Linares, 2018)

En base a esto toma gran importancia conocer el desarrollo de la resistencia a compresión en edades tempranas, para poder asegurar el avance seguro de la excavación en obra, que finalmente define dependiendo de las características el tiempo, costo y finalización del proyecto. (Linares, 2018)

Curvas J

“Si el hormigón fresco tiene que cumplir ciertos requisitos en términos de desarrollo de la resistencia, estos se especifican de acuerdo a clases de resistencia temprana denominadas J1, J2, J3” (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015)

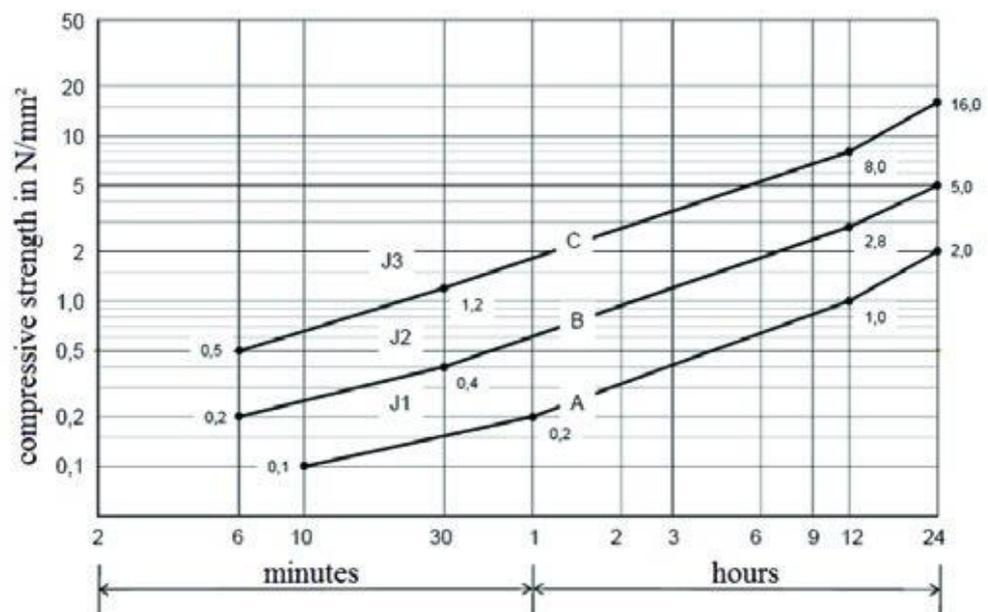


Figura 8. Clases de resistencias tempranas del concreto lanzado

Fuente: (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015), obtenido de *Guía Austriaca*

Guía Austriaca, citada en (Belmar, 2013):

Clase J1: Hormigón diseñado para ser proyectado para aplicaciones en capas delgadas sobre un sustrato seco. No hay requisitos estructurales en las primeras horas después de su aplicación.

Clase J2: Hormigón diseñado para ser proyectado en aplicaciones en las que se requiere que las capas más gruesas deban lograrse en poco tiempo. Puede aplicarse sobre cabeza y es adecuado incluso en circunstancias difíciles, como por ejemplo en el caso de flujo de agua ligera y avance inmediato de trabajo, como perforaciones y tronaduras.

Clase J3: Hormigón diseñado para ser proyectado en caso de roca muy frágil o flujo de agua fuerte. Debido que es de fraguado rápido, durante la aplicación se tiene más polvo y se produce mayor rebote y, por tanto, la clase J3 se utiliza solamente en casos especiales. (pág. 18)

Resistencia final

Junto con las resistencias muy temprana y temprana requeridas específicamente en el hormigón proyectado, hay requerimientos mecánicos para el hormigón proyectado endurecido, así como los hay para el hormigón convencional, generalmente a los 28 días. El nivel de resistencia se basa en los requerimientos de diseño. La resistencia a la compresión del hormigón proyectado se mide sobre testigos tomados de la estructura o de paneles proyectados. Muestras en cubos de hormigón fresco se utilizan para controles de resistencia a compresión, pero éstas no representan el hormigón proyectado aplicado ya que las características pueden cambiar considerablemente debido al proceso de proyección y el acelerante. Los acelerantes de fraguado empleados y la habilidad del operador de la boquilla tienen una enorme influencia en la resistencia final obtenida. (Belmar, 2013)

Las propiedades del hormigón proyectado se evalúan en muestras extraídas directamente de la estructura o de paneles de prueba tomados paralelamente durante la aplicación bajo las mismas condiciones de obra y luego llevadas a laboratorio para ser ensayadas. (Belmar, 2013)



Figura 9. Panel de prueba cuadrado.

Fuente: Elaboración propia.

1.2.4. Métodos de medición de resistencias a compresión

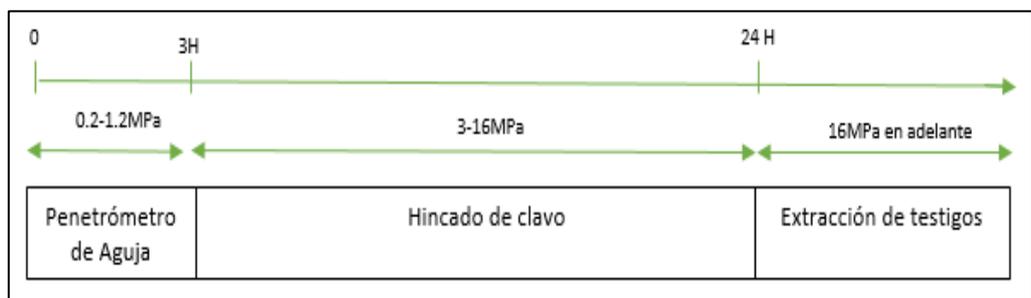


Figura 10. Línea de tiempo para cada método de resistencia temprana con su respectivo intervalo de resistencia a compresión en la que trabaja.

Fuente: (Linares, 2018)

Penetración de aguja - Penetrómetro

Este método se utiliza para medir la fuerza requerida para empujar una aguja de dimensiones específicas para que penetre en el hormigón proyectado hasta una profundidad de $15 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. El penetrómetro indica la fuerza realizada, por compresión de un “resorte” calibrado, de la cual puede deducirse la resistencia a compresión estimada a partir de una curva de conversión, la que es suministrada por el fabricante del equipo de ensayo. (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015)

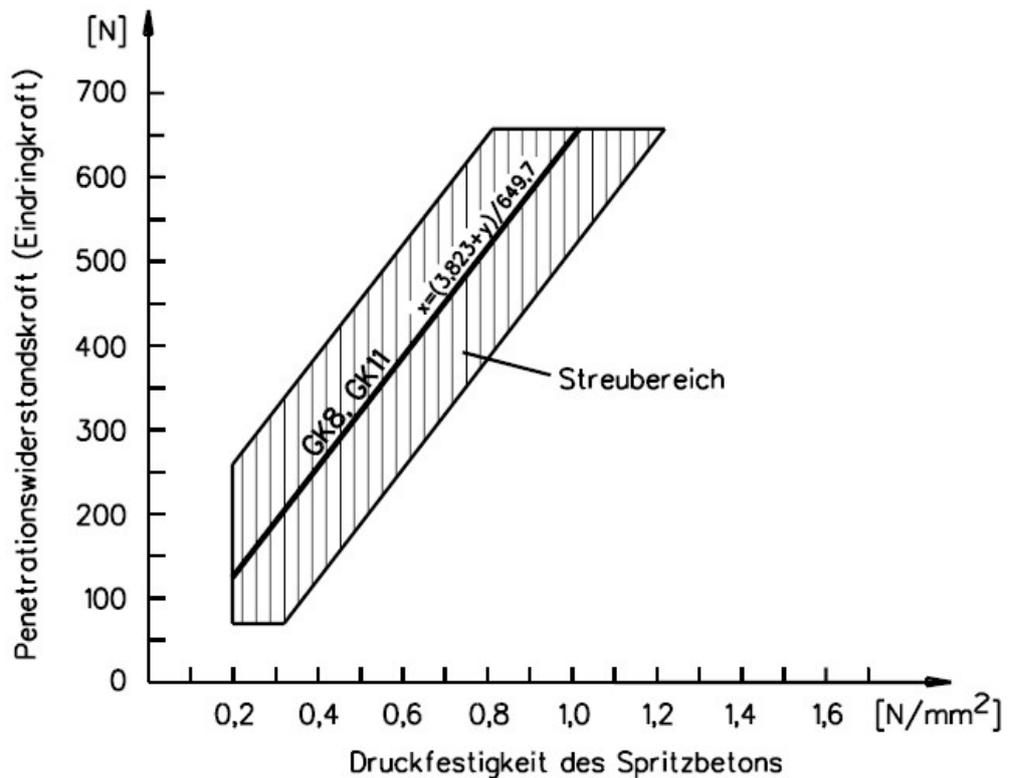


Figura 11. Curva de calibración del penetrómetro de aguja.

Fuente: (Belmar, 2013)

De esta curva se obtiene la siguiente ecuación:

$$x = \frac{(y + 3.823)}{649.7}$$

Figura 12. Ecuación para determinar la resistencia a compresión al utilizar el penetrómetro.

Fuente: (Belmar, 2013)

En donde “y” es la resistencia a la penetración en [N] y “x” la resistencia a compresión en [Mpa]. (Belmar, 2013)

La aguja debe tener un diámetro de $3 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ y una punta con ángulo de $(60 \pm 5^\circ)$. No se requiere una probeta especial para ensayo, sin embargo, se requiere una capa de hormigón de no menos de 100 mm de espesor. (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015)



Figura 13. Penetrómetro.

Fuente: (Belmar, 2013)

Este método generalmente se utiliza en los primeros 60 minutos, para estimar resistencias hasta los 1.2 Mpa.

Hincado de clavo - Pistola Hilti DX 450

Se hincan clavos dentro del hormigón proyectado y se determina la profundidad de penetración. A continuación, se extrae y se mide la fuerza de extracción. La relación entre la fuerza de extracción y la profundidad de penetración se utiliza para obtener una estimación de la resistencia a compresión a partir de la curva de conversión, la que es suministrada por el fabricante del equipo de ensayo. La profundidad de penetración del perno debe ser al menos de 20 mm. (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015)

Según el (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015) “El equipo debe disponer de un elemento para la extracción, capaz de aplicar una fuerza de tracción al perno transmitiendo la reacción a la superficie del hormigón a través de un anillo de sujeción”.



Figura 14. Pistola Hilti DX 450.

Fuente: Elaboración propia

Se debe colocar 10 pernos, con una distancia mínima entre sí de 8 cm.

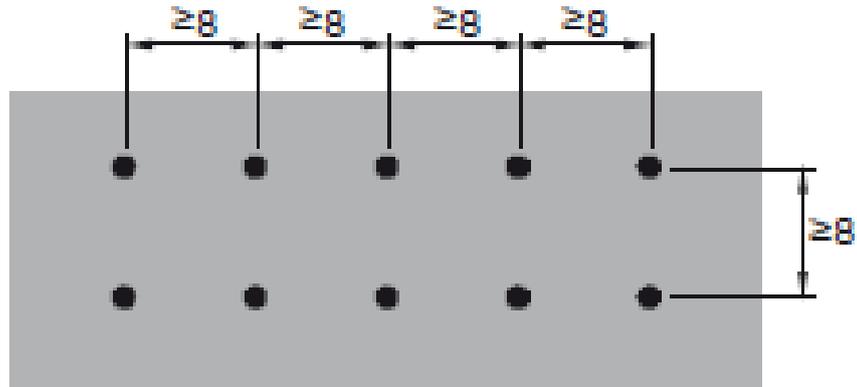


Figura 15. Distancia entre pernos (cm).

Fuente: (Hilti, 2001)

La dimensión de los pernos a utilizar depende de la edad del hormigón, existen tres tipos diferentes 103, 80 y 60 [mm], dependiendo del tiempo de fraguado se utiliza del más largo al más corto, considerando siempre que la superficie expuesta no sea menor a 8 [mm] y mayor a 30 [mm]. (Belmar, 2013)

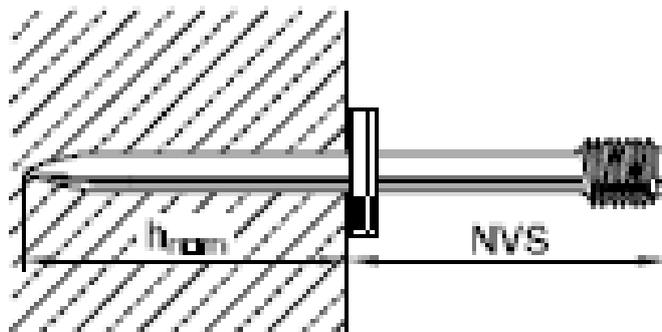


Figura 16. Detalle de perno incrustado en el Shotcrete

Fuente: (Hilti, 2001)

Donde:

NVS: longitud saliente del perno

hnom: Penetración en el hormigón

Extracción y ensayo de testigos

La extracción de testigos se realiza mediante una broca de 10,2 [cm] diamantada que es lubricada con agua para generar la perforación y extracción de las muestras, desde las bateas proyectadas. Para esto el equipo se ancla al hormigón y se procede a realizar la extracción. Una vez obtenida la muestra se lleva al laboratorio en donde se corta y se procede a preparar la superficie de ensayo mediante el refrentado, que corresponde a una solución de 60% de azufre y 40% de pomacita, lo que genera una superficie lisa y que las caras del testigo queden paralelas para no generar esfuerzos no deseados al momento de ensayar la muestra. (Belmar, 2013)



Figura 17. Extracción de testigos con máquina diamantina.

Fuente: Elaboración propia

1.3. Formulación del problema

¿La generación de una curva de tendencia de la Pistola Hilti permitirá controlar las resistencias tempranas de shotcrete en minería subterránea?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Generar una curva de tendencia de la Pistola Hilti para controlar de resistencias tempranas en el sostenimiento con shotcrete en minería subterránea.

1.4.2. Objetivos específicos

Controlar las resistencias tempranas del Shotcrete con el uso de la pistola Hilti DX 450.

Excluir del método propuesto el extractor de pernos.

Realizar ensayos con la máquina diamantina.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

Con la generación de una curva de tendencia de la Pistola Hilti se logrará controlar las resistencias tempranas en el sostenimiento con Shotcrete en minería subterránea.

1.5.2. Hipótesis específicas

Se logrará controlar las resistencias tempranas del shotcrete con el uso de la pistola Hilti DX 450.

Se realizarán los ensayos de penetración con la Pistola Hilti excluyendo del proceso el extractor de pernos

Se logrará realizar los ensayos con la máquina diamantina

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

Es una investigación aplicada - experimental, ya que “tiene como objetivo crear una nueva tecnología a partir de conocimientos adquiridos a través de la investigación estratégica para determinar si éstos pueden ser últimamente aplicados con o sin mayor refinamiento para los propósitos definidos” (Tam, Vera, & Oliveros, 2008).

2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

Población

Todas las mediciones de resistencias tempranas realizadas

Muestra

Las 45 mediciones realizadas tras disparar con la Pistola Hilti y los 14 ensayos de resistencia realizada con la máquina de compresión simple a los testigos extraídos de cada panel.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Técnicas utilizadas en la recolección de datos:

Observación directa

Análisis de laboratorio de concreto.

Los instrumentos utilizados para el estudio son:

Pistola Hilti DX 450, se utilizó para el disparo de pernos en el hormigón proyectado; los pernos roscados utilizados son del modelo X-M6-8-95 D12, el cuál cuenta con una longitud de 103 mm



Figura 18. Pistola Hilti DX 450

Fuente: (Hilti, 2001)



Figura 19. Perno X-M6-8-95 D12

Fuente: (Hilti, 2001)

Máquina diamantina, para extraer testigos de concreto de cada uno de los paneles que fueron ensayados.



Figura 20. Máquina diamantina

Fuente: Elaboración propia

Máquina de compresión simple, para determinar la resistencia a compresión en Mpa de los testigos que fueron ensayados al realizar el proyecto.



Figura 21. Máquina de compresión

Fuente: Elaboración propia

Análisis de datos

El análisis de los datos recolectados a través de los ensayos fue realizado en una laptop, específicamente con la ayuda de Excel

2.4. Procedimiento

- a. Cargar la Pistola Hilti DX 450 con los pernos roscados X-M6-8-95 D12 de una longitud total de 103 mm más el cartucho de color verde.



Figura 22. Cartucho verde.

Fuente: Elaboración propia.

- b. Se procede disparando 6 pernos dispersos en el panel cuadrado, el cual tiene un tiempo de secado determinado (ver en resultados).



Figura 23. Disparo de pernos en el panel 43.

Fuente: Elaboración propia

- c. Como tercer paso, se realiza la medición de las longitudes sobresalientes (NVS) de los pernos incrustados en el Shotcrete, para ser anotada en un formato.



Figura 24. Medición de NVS.

Fuente: Elaboración propia.

- d. Fijar el equipo para extraer el testigo del panel, mediante una broca diamantada; para luego ser etiquetada según corresponda.

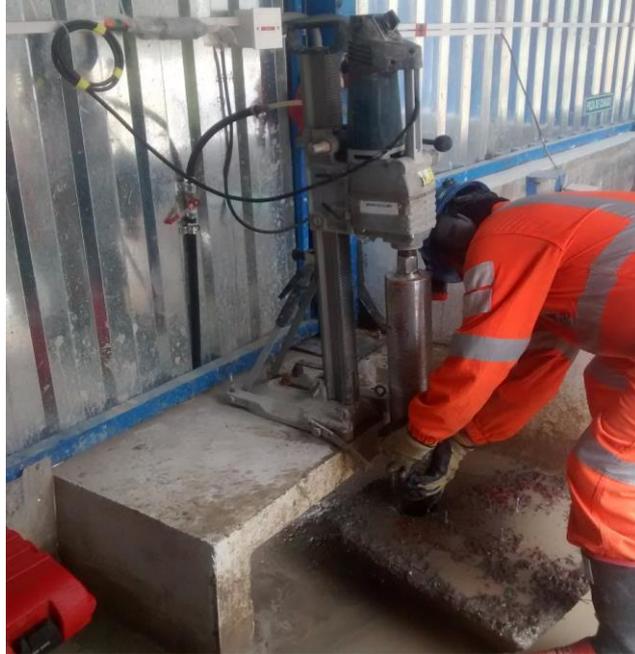


Figura 25. Extracción de testigo.

Fuente: Elaboración propia.

- e. Cortar las bases del testigo para obtener una altura aproximada de 140 mm y un diámetro de 95 mm.



Figura 26. Corte de bases de testigo.

Fuente: Elaboración propia.

- f. Se realiza el ensayo en la prensa de compresión, anotando todos los datos que nos proporciona esta máquina.



Figura 27. Ensayo de compresión.

Fuente: Elaboración propia.

- g. De acuerdo al manual que envía HILTI (Método para determinar la resistencia de hormigón proyectado) el cual nos ha servido de guía y a través de una serie de ensayos, se desarrolla una tabla, la cual a su vez nos permite elaborar la curva de tendencia de la longitud de penetración vs resistencia del Shotcrete.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

En el siguiente estudio se realizaron un total de 08 ensayos con Pistola Hilti DX 450; los cuales, a su vez cuentan con 6 disparos por ensayo en cada panel, estos disparos sirven para determinar la medición saliente del perno (NVS). Además, los paneles sirvieron para la extracción de testigos (en algunos casos se llegó a extraer hasta 3 testigos por panel) y así obtener la resistencia a la compresión de la misma.

Tabla 3. *Ensayo en el panel 01*

VERIFICACIÓN DE ENSAYO CON PISTOLA HILTI DX 450								
PANEL 1								
FECHA Y HORA FINAL DE LANZADO (t 0) =				22/01/2018	11:50:00 p. m.			
FECHA DE ENSAYO	Hora (h : min.)	Tiempo tras completarse el gunitado t1 - t0 (h : min.)	Tipo de perno	Longitud total Ltot (mm)	Saliente NVS (mm)	Penetración hnom = Ltot - NVS (mm)	Promedio hnom	Resistencia del hormigón fc ensayo a Compresión (Mpa)
	t1		Todas las mediciones y cálculos están en el mismo orden de colocación de pernos					
					24.00	79.00	81.00	-
					20.00	83.00		
23/01/2018	11:20:00 a. m.	11:30:00	X-M6-8-95 D12	103	27.00	76.00	76.00	-
					27.00	76.00		
					32.00	71.00	70.00	-
					34.00	69.00		
PROMEDIO							75.67	-

Fuente: Elaboración propia

En este primer ensayo fue imposible extraer el testigo ya que éste se disgregó al realizar el corte con la máquina diamantina. Ensayo realizado 11 horas después del lanzado.

Tabla 4. Ensayo en el Panel 27

VERIFICACIÓN DE ENSAYO CON PISTOLA HILTI DX 450								
PANEL 27								
FECHA Y HORA FINAL DE LANZADO (t 0)=			22/02/2018	12:30:00 p. m.				
FECHA DE ENSAYO	Hora (h : min.)	Tiempo tras completarse el gunitado t1 - t0 (h : min.)	Tipo de perno	Longitud total Ltot (mm)	Saliente NVS (mm)	Penetración = hnom Ltot - NVS (mm)	Promedio hnom	Resistencia del hormigón fc ensayo a Compresión (Mpa)
	t1	Todas las mediciones y cálculos están en el mismo orden de colocación de pernos						
					41.00	62.00	58.50	5.20
					48.00	55.00		
23/02/2018	12:10:00 p. m.	23:40:00	X-M6-8-95 D12	103	53.00	50.00	54.00	3.93
					45.00	58.00		
					57.00	46.00	48.50	4.86
					52.00	51.00		
PROMEDIO							53.67	4.70

Fuente: Elaboración Propia.

En el ensayo realizado en el panel 27 se extrajeron 3 testigos, los cuales presentaron pequeños desgastes por la fuerza del corte. Este ensayo se realizó a 1 día aproximadamente después del lanzado.

Tabla 5. Ensayo en el Panel 30

VERIFICACIÓN DE ENSAYO CON PISTOLA HILTI DX 450								
PANEL 30								
FECHA Y HORA FINAL DE LANZADO (t 0)=			24/02/2018	12:40:00 a. m.				
FECHA DE ENSAYO	Hora (h : min.)	Tiempo tras completarse el gunitado t1 - t0 (h : min.)	Tipo de perno	Longitud total Ltot (mm)	Saliente NVS (mm)	Penetración = hnom Ltot - NVS (mm)	Promedio hnom	Resistencia del hormigón fc ensayo a Compresión (Mpa)
	t1	Todas las mediciones y cálculos están en el mismo orden de colocación de pernos						
					74.00	29.00	37.50	10.43
					57.00	46.00		
25/02/2018	10:45:00 a. m.	34:05:00	X-M6-8-95 D12	103	72.00	31.00	32.00	10.05
					70.00	33.00		
					72.00	31.00	30.50	10.98
					73.00	30.00		
PROMEDIO							33.33	10.50

Fuente: Elaboración Propia.

Al realizar este ensayo no se apreció ningún inconveniente al momento de obtener los 3 testigos. El ensayo se realizó a 1.5 días aproximadamente después del lanzado.

Tabla 6. Ensayo en el Panel 32

VERIFICACIÓN DE ENSAYO CON PISTOLA HILTI DX 450								
PANEL 32								
FECHA Y HORA FINAL DE LANZADO (t 0)=			24/01/2018		11:50:00 p. m.			
FECHA DE ENSAYO	Hora (h : min.)	Tiempo tras completarse el gunitado t1 - t0 (h : min.)	Tipo de perno	Longitud total Ltot (mm)	Saliente NVS (mm)	Penetración = hnom Ltot - NVS (mm)	Promedio hnom	Resistencia del hormigón fc ensayo a Compresión (Mpa)
	t1		Todas las mediciones y cálculos están en el mismo orden de colocación de pernos					
					78.00	25.00	31.00	16.43
					70.00	33.00		
27/01/2018	12:37:00 p. m.	60:47:00	X-M6-8-95 D12	103	68.00	35.00		
					79.00	24.00	29.67	18.07
					67.00	36.00		
					74.00	29.00		
PROMEDIO							30.33	17.30

Fuente: Elaboración Propia.

En el panel número 32 se extrajeron 2 testigos para realizar las pruebas a compresión, este ensayo se realizó a 2.5 días después del lanzado.

Tabla 7. Ensayo en el Panel 40

VERIFICACIÓN DE ENSAYO CON PISTOLA HILTI DX 450								
PANEL 40								
FECHA Y HORA FINAL DE LANZADO (t 0)=			03/03/2018		12:40:00 p. m.			
FECHA DE ENSAYO	Hora (h : min.)	Tiempo tras completarse el gunitado t1 - t0 (h : min.)	Tipo de perno	Longitud total Ltot (mm)	Saliente NVS (mm)	Penetración = hnom Ltot - NVS (mm)	Promedio hnom	Resistencia del hormigón fc ensayo a Compresión (Mpa)
	t1	Todas las mediciones y cálculos están en el mismo orden de colocación de pernos						
					83.00	20.00	20.00	16.15
					83.00	20.00		
06/03/2018	12:45:00 p. m.	72:05:00	X-M6-8-95 D12	103	83.00	20.00	22.00	17.37
					79.00	24.00		
					78.00	25.00	23.50	17.52
					78.00	22.00		
PROMEDIO							21.83	17.00

Fuente: Elaboración Propia.

Del siguiente panel se extrajeron 3 testigos, todos ellos sin ninguna disgregación al obtener el núcleo. El ensayo se realizó 3 días aproximadamente después del lanzamiento de Shotcrete, obteniendo como promedio de resistencia a la compresión de 17 Mpa.

Tabla 8. Ensayo en el Panel 43

VERIFICACIÓN DE ENSAYO CON PISTOLA HILTI DX 450								
PANEL 43								
FECHA Y HORA FINAL DE LANZADO (t 0)=			07/03/2018		01:00:00 p. m.			
FECHA DE ENSAYO	Hora (h : min.)	Tiempo tras completarse el gunitado t1 - t0 (h : min.)	Tipo de perno	Longitud total Ltot (mm)	Saliente NVS (mm)	Penetración = hnom Ltot - NVS (mm)	Promedio hnom	Resistencia del hormigón fc ensayo a Compresión (Mpa)
t1			Todas las mediciones y cálculos están en el mismo orden de colocación de pernos					
					70.55	32.45	31.63	15.67
					72.20	30.80		
09/03/2018	04:26:22 p. m.	51:26:22	X-M6-8-95 D12	103	64.90	38.10	34.85	
					71.40	31.60		
					73.15	29.85	29.85	
PROMEDIO							32.11	15.67

Fuente: Elaboración Propia.

En el panel 43 se realizaron solo 5 disparos, del cual se extrajo un testigo que a través del ensayo a compresión se determinó su resistencia de 15.67 Mpa. Este ensayo se realizó a 2 días aproximadamente después del lanzado.

Tabla 9. Ensayo en el Panel 45

VERIFICACIÓN DE ENSAYO CON PISTOLA HILTI DX 450								
PANEL 45								
FECHA Y HORA FINAL DE LANZADO (t 0)=			10/03/2018	11:30:00 p. m.				
FECHA DE ENSAYO	Hora (h : min.)	Tiempo tras completarse el gunitado t1 - t0 (h : min.)	Tipo de perno	Longitud total Ltot (mm)	Saliente NVS (mm)	Penetración = hnom Ltot - NVS (mm)	Promedio hnom	Resistencia del hormigón fc ensayo a Compresión (Mpa)
	t1	Todas las mediciones y cálculos están en el mismo orden de colocación de pernos						
					70.75	32.25	35.10	12.32
					65.05	37.95		
12/03/2018	04:31:25 p. m.	41:01:25	X-M6-8-95 D12	103	71.05	31.95	33.60	
					67.75	35.25		
					68.80	34.20	34.20	
PROMEDIO							34.30	12.32

Fuente: Elaboración Propia.

El ensayo realizado en el panel 45 constó de 5 disparos, y se obtuvo un testigo, el cual tuvo una resistencia a la compresión de 12.32 Mpa. Este ensayo se realizó a 2 días aproximadamente después del lanzado.

Tabla 10. *Ensayo en el Panel 49*

VERIFICACIÓN DE ENSAYO CON PISTOLA HILTI DX 450								
PANEL 49								
FECHA Y HORA FINAL DE LANZADO (t 0)=			14/03/2018	11:00:00 p. m.				
FECHA DE ENSAYO	Hora (h : min.)	Tiempo tras completarse el gunitado t1 - t0 (h : min.)	Tipo de perno	Longitud total Ltot (mm)	Saliente NVS (mm)	Penetración = hnom Ltot - NVS (mm)	Promedio hnom	Resistencia del hormigón fc ensayo a Compresión (Mpa)
t1			Todas las mediciones y cálculos están en el mismo orden de colocación de pernos					
					43.85	59.15	63.13	2.52
					35.90	67.10		
15/03/2018	04:24:02 p. m.	17:24:02	X-M6-8-95 D12	103	27.00	76.00	72.85	
					33.30	69.70		
					30.45	72.55	72.55	
PROMEDIO							69.51	2.52

Fuente: Elaboración Propia.

En este ensayo no se apreció ningún problema al extraer el testigo, el cual obtuvo una resistencia a la compresión de 2.52 Mpa. El ensayo se realizó 1 día aproximadamente después del lanzado.

Tabla 11. *Resumen de ensayos realizados*

Testigo	Panel	Tiempo tras completarse el gunitado t1 - t0 (h : min.)	Penetración hnom = Ltot - NVS (mm)	Resistencia del hormigón fc ensayo a Compresión (Mpa)
1	1	11:30:00	75.67	0.00
2		23:40:00	58.50	5.20
3	27	23:40:00	54.00	3.93
4		23:40:00	48.50	4.86
5		34:05:00	37.50	10.43
6	30	34:05:00	32.00	10.05
7		34:05:00	30.50	10.98
8		60:47:00	31.00	16.43
9	32	60:47:00	29.67	18.07
10		72:05:00	20.00	16.15
11	40	72:05:00	22.00	17.37
12		72:05:00	23.50	17.52
13	43	51:26:22	32.11	15.67
14	45	41:01:25	34.30	12.32
15	49	17:24:02	69.51	2.52

Fuente: Elaboración Propia.

El siguiente cuadro detalla el resumen de todos los ensayos realizados para poder elaborar la curva de tendencia, teniendo en cuenta la penetración del perno y la resistencia a compresión de cada testigo, los cuales nos permitieron recolectar los datos necesarios para la investigación.

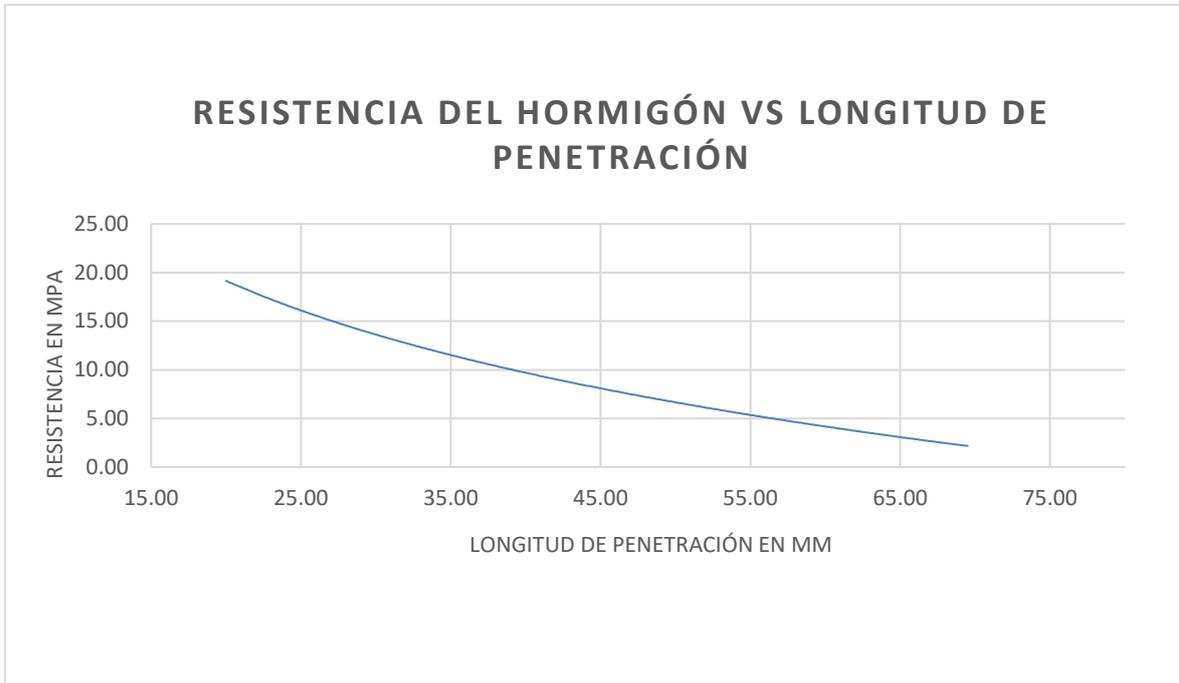


Figura 28. Curva de tendencia de la Resistencia del hormigón vs Longitud de Penetración.

Fuente: Elaboración Propia.

La curva de tendencia realizada gracias a la investigación nos permite encontrar una ecuación logarítmica, para predecir la resistencia del Shotcrete a edades tempranas en un rango de 2.24 Mpa a 19.16 Mpa.

$$y = -13.63 \ln(x) + 59.974$$

$$R^2 = 0.8285$$

Figura 29. Ecuación logarítmica de la curva de tendencia.

Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

De acuerdo al análisis de la tabla 3, los ensayos tomados antes de las 12 horas de fragua no tienen un sustento de resistencia a la compresión; ya que al realizar el corte con diamantina este se disgrega. Por lo tanto, se descarta muestras tomados en ese rango de tiempo; pero a partir de las 17 horas se muestra una resistencia de 2.52 Mpa; como se muestra en la tabla 10.

En la tabla 4 tomado a las 23:40 horas después de haber sido lanzado el Shotcrete, arroja una resistencia a la compresión para ser tomado en cuenta en el análisis de edades tempranas como es recomendado. (Belmar, 2013)

Respecto a la tabla 5 y de acuerdo al objetivo principal del Shotcrete, se realiza pruebas comprobando 10.50Mpa en 34:05 horas y al llegar a las 41 horas se muestra una resistencia de 12.32Mpa. (Anabalón, 2017)

Observando la tabla 6 y teniendo en cuenta que el hormigón proyectado por vía húmeda es muy dependiente de agua/cemento; se tiene un ensayo a 60:47 horas de secado con una resistencia de 17.30 Mpa, pudiendo ser base de estudio el de inyectar más agua o cemento a la mezcla; según, si el caso lo requiera. (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015)

La resistencia a la fuerza de compresión al estar alcanzando el tercer día debe oscilar en un promedio de 15Mpa - 17Mpa, como se puede apreciar en la tabla 7 y 8.

4.2. Conclusiones

Se logró realizar el control de resistencias tempranas con el uso de la Pistola Hilti en minería subterránea.

Se comprobó in-situ que la curva de tendencia es fiable para medir resistencias tempranas del Shotcrete; por lo que, es capaz de excluir al extractor de pernos. (Ver Anexo 10)

Para comprobar que las resistencias a compresión representativas de cada panel son confiables, se realizó ensayos con la máquina diamantina.

Se recomienda implementar en otras operaciones mineras subterráneas el método de control de resistencias tempranas propuesto, junto a la curva de tendencia generada.

Realizar más investigaciones, profundizando el tema de sostenimiento, ya que es esencial para cualquier mina subterránea.

REFERENCIAS

- ACI 506R-05. (2005). *Guide to Shotcrete*.
- American Concrete Institute. (2005). *Guide to Shotcrete*. Detroit.
- Anabalón, I. (2017). *Shotcrete: Optimización de costos*. Normet.
- ASTM C94. (2003). *Especificaciones normalizadas para el hormigón premezclado*. Estados Unidos.
- Bardales, J. (2015). *Tecnología aplicada para la reducción de fragua del concreto lanzado en mina Chungar*. Compañía Minera Volcan SAA.
- Belmar, R. (2013). *Implementación y evaluación de equipo portátil de ensayo para determinar la resistencia a compresión del hormigón proyectado en edades tempranas*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Cedeño, S. (2015). *Estudio de la evolución de las propiedades mecánicas de pastas y morteros proyectados empleando ultrasonidos*. (Tesis de Maestría). Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña.
- Hilti. (2001). *Método para determinar la resistencia del hormigón proyectado*.
- Huachaca, A. (2018). *Programa de funcionamiento del robot Shotcrete Alpha 20 para mejorar su operatividad en la empresa Robocon Servicios Sac UM San Cristobal*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. (2015). *Guía Chilena del Hormigón Proyectado - Shotcrete*. Santiago de Chile.
- Laboratorio Oficial J.M. Madariaga. (2015). *Guía sobre control geotécnico en minería subterránea*. Madrid.

- Linares, C. (2018). *Determinación de resistencia temprana de hormigón proyectado: Correlación entre método normado UNE-EN 14488-2 y método alternativo*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Mateo, R. (2013). *Caracterización a Cortante de Hormigón Proyectado*. (Tesis de Maestría). Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú. (2016). *Manual de Carreteras: Túneles, Muros y Obras Complementarias*. Lima, Perú.
- Rey, A. (2006). *Hormigón Proyectado: Dosificación, fabricación y puesta en obra*. Madrid.
- Tam, J., Vera, G., & Oliveros, R. (2008). *Tipos, métodos y estrategias de investigación científica*. 147.
- Tenorio, J. (2016). *Propuesta de criterios de aceptación o rechazo de testigos de hormigón proyectado utilizado en fortificación de túneles mineros y civiles*. (Tesis de Pregrado). Universidad Andrés Bello, Santiago de Chile.
- The Chemical Company. (2009). *Hormigón proyectado por vía húmeda*.
- Vargas, E. (2016). *Optimización del sostenimiento con shotcrete usando desmote zarandeado como agregado, en la construcción de la rampa principal - Marsa*. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.

ANEXO 1. Pistola y accesorios Hilti DX 450



Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 2. Máquina Diamantina de Extracción de Testigos



Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 3. Máquina Pinzuar



Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 4. Ensayo a Compresión del Panel 45



Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 5. Resultados de Ensayo a compresión del Testigo 15



Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 6. Disparo de Pernos en Panel 45



Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 7. Pernos incrustados en el panel 43



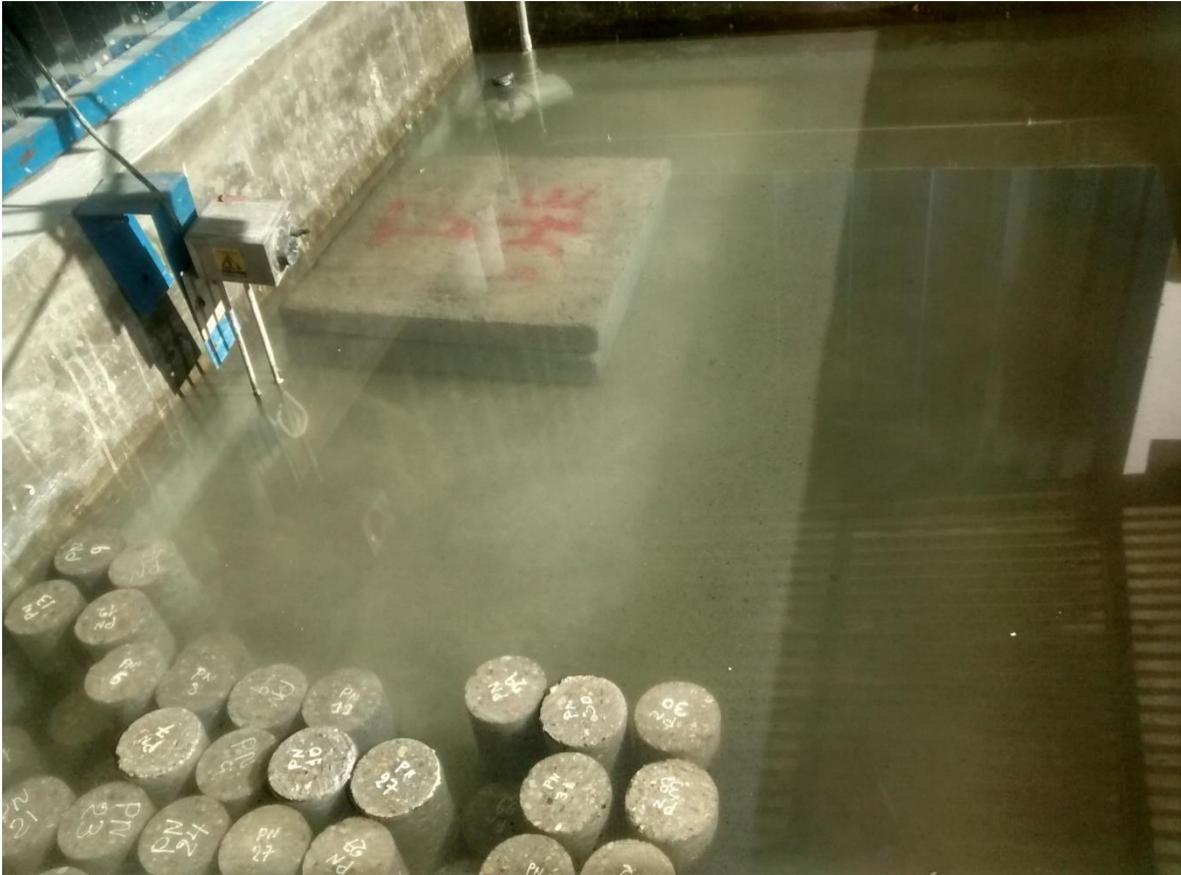
Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 8. Medición de NVS en panel 43



Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 9. Testigos representativos



Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 10. Representación in-situ



Fuente: Elaboración Propia.