



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE EQUIPO PORTÁTIL DE
ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN
DEL HORMIGÓN PROYECTADO EN EDADES TEMPRANAS.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

RICARDO ELÍAS BELMAR SALDÍAS

PROFESOR GUÍA:
EDGARDO GONZÁLEZ LIZAMA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA
RODRIGO MARTÍNEZ PALOMINOS

SANTIAGO DE CHILE
2013

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Ricardo Elías Belmar Saldías
FECHA: 12/06/2013
PROF. GUÍA: SR. Edgardo González Lizama

El hormigón proyectado ha demostrado ser una excelente herramienta en la estabilización de excavaciones que requieren de sostenimiento inmediato. Tal desempeño se debe al aporte de las resistencias a compresión en edades tempranas, las que se consideran desde los primeros minutos hasta las 12 primeras horas.

Actualmente en Chile, se utilizan 2 tipos de ensayos estandarizados para medir las resistencias tempranas a compresión, conocidos como ensayo del Penetrómetro y ensayo de la Pistola Hilti. Ambos son ensayos indirectos, es decir, miden una propiedad distinta del hormigón, pero mediante curvas de calibración, dan cuenta de la resistencia efectiva a compresión. Sin embargo, éstas curvas de calibración tienen limitaciones asociadas a las condiciones bajo las cuales fueron proyectadas, las que no necesariamente son representativas para los hormigones proyectados nacionales (cemento, áridos, equipos, etc.).

En este contexto, el presente estudio busca implementar y evaluar un equipo de ensayo que permita determinar la resistencia a compresión del hormigón proyectado en edades tempranas de manera directa, para lo que se adapta un diseño basado en estudios realizados en Europa, Norteamérica y Australia, ya que no existe un equipo de ensayo estandarizado.

El nuevo método consiste en ensayar, por secciones, una viga prismática a compresión. Para la evaluación de los resultados se realiza una campaña de ensayos comparativa que junto con considerar los ensayos con el equipo en estudio, considera ensayos con Penetrómetro, Pistola Hilti y Testigos. Con ello, se busca generar una curva característica del desarrollo de la resistencia a compresión para una dosificación de hormigón proyectado en particular, a objeto de analizar cómo se relacionan las resistencias del equipo en estudio con las de los ensayos estandarizados.

El trabajo concluye que el método en estudio es adecuado para obtener estimaciones de la resistencia a compresión del hormigón proyectado en edades tempranas en un rango de resistencia entre los 10 y los 100 [kgf/cm²]. Ello implica que el nuevo método cubre por completo el rango de aplicabilidad de la Pistola Hilti, y además, que se complementa adecuadamente con la tendencia de resultados del Penetrómetro y los Testigos, cuyos rangos de aplicación, son respectivamente, inferior y superior respecto del rango de resistencia del nuevo método.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mi familia, en particular a mis padres Blanca y Alejandro y a mi hermano Cristian, por el apoyo incondicional en verdaderamente todo, siendo un soporte fundamental durante este largo proceso y mi vida en general.

A esas personas que estuvieron en los momentos difíciles, a los amigos y compañeros que apoyaron de una u otra forma este proceso, cada uno de ustedes saben quiénes son.

A los profesionales que hicieron posible este proyecto partiendo por los profesores integrantes de la comisión, Edgardo González, Don Federico Delfín y Rodrigo Martínez quien fue el precursor del estudio, a la empresa privada quien por medio de Daniel Galleguillos y David Llanos (NORMET), Daniel Parra (DPL GROUT), Rubén Galaz (MELÓN), Sr. Valderrama (Valmont) y a IDIEM, quienes hicieron posible realizar este trabajo cooperando en los distintos procesos que se llevaron a cabo.

Finalmente, familia, amigos, compañeros...

Gracias...Totales.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Descripción general.....	2
1.2.	Características del material.....	3
1.2.1.	Técnicas de proyección: vía seca y vía húmeda.....	4
1.2.2.	Usos del hormigón proyectado.....	9
1.2.3.	Aplicando el hormigón proyectado.....	10
2.	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	14
2.1.	Objetivos generales.....	14
2.2.	Objetivos específicos.....	14
3.	MARCO TEÓRICO	15
3.1.	Control en el hormigón proyectado.....	16
3.1.1.	Desarrollo de resistencia a compresión	17
4.	METODOLOGÍAS DE ENSAYO	20
4.1.	Métodos de ensayo convencionales.....	20
4.1.1.	Metodología Penetrómetro.....	21
4.1.2.	Metodología Pistola Hilti.....	22
4.1.3.	Metodología de extracción y ensayo de testigos.....	26
4.2.	Método de ensayo en estudio (Extremo de Viga).....	28
4.2.1.	Metodología ensayo Extremo de Viga.....	28
5.	MATERIALES Y EQUIPOS	32
5.1.	Hormigón	32
5.2.	Aditivo acelerante.....	33
5.3.	Elaboración de muestras.....	34
5.4.	Equipos de proyección.....	37
5.4.1.	Compresor de aire.....	37
5.4.2.	Bomba de hormigón.....	37
5.4.3.	Dosificador de aditivo.....	38
6.	EJECUCIÓN DE ENSAYOS EXPERIMENTALES	39
6.1.	Prueba en terreno.....	39

6.2. Cronograma de ensayos.	40
6.3. Resultados ensayos.	42
6.3.1. Hormigón fresco.	42
6.3.2. Hormigón endurecido.	43
6.3.2.1. Resultados Penetrómetro.	44
6.3.2.2. Resultados Pistola Hilti.	45
6.3.2.3. Resultados Extremo de Viga.	46
6.3.2.4. Resultados testigos.	47
6.4. Propuesta de análisis.	48
7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	49
7.1. Correlación entre resultados de ensayos en estudio.	54
8. CONCLUSIONES.	58
BIBLIOGRAFÍA.	60
ANEXO A.	62
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO DE ENSAYO (EXTREMO DE VIGA) ..	62
Modelo utilizado.	63
Implementación de equipo de ensayo.	63
Calibración equipo.	72
Esquema general del dispositivo.	74
ANEXO B.	75
TABLAS DE RESULTADOS DE ENSAYOS.	75
Resultados Penetrómetro.	76
Resultados Pistola Hilti.	77
Resultados Extremo de Viga.	81
Resultados Testigos.	83
ANEXO C.	85
CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE.	85

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón proyectado o "shotcrete" es una excelente herramienta en la estabilización y soporte de excavaciones y obras subterráneas, así como para otras aplicaciones donde no se requiera moldajes. El código ACI 506R-05 "Guía del shotcrete" define el shotcrete como "hormigón o mortero neumáticamente proyectado a alta velocidad sobre una superficie".

Una ventaja fundamental, respecto a las aplicaciones convencionales de hormigón es que permite efectuar un soporte rápido y efectivo de grandes áreas excavadas a consecuencia de que el hormigón proyectado puede comenzar a fraguar en pocos minutos luego de ser proyectado, desarrollando altas resistencias mecánicas en pocas horas. Esta característica se alcanza mediante el uso de aditivos acelerantes especializados, conjuntamente con una dosificación diseñada principalmente para, en primer lugar, permitir el bombeo y proyección mediante aire a presión del hormigón y, en segundo lugar, tomar en consideración que el aditivo acelerante disminuye entre un 20-50% la resistencia a compresión a los 28 días.

Este material se utiliza con mucho éxito en el mundo, en variados campos de aplicación. Gran parte de este éxito en el desarrollo del hormigón proyectado se debe al nuevo método de diseño y construcción de túneles Austriaco (NATM) que se caracteriza básicamente por el empleo del hormigón proyectado como soporte primario. Específicamente en nuestro país se emplea en la minería, en obras hidráulicas y en variados proyectos de infraestructura urbana como por ejemplo en la construcción del Metro de Santiago.

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.

A raíz de la importancia de poder implementar un soporte inicial rápido y efectivo en proyectos que involucran excavaciones superficiales o subterráneas (sostenimiento de túneles, estabilización de taludes, muros de contención, sostenimiento de rocas en labores mineras, entre otras) que requieren ser puestos en operación en corto tiempo, ha cobrado importancia en las últimas décadas la determinación de la resistencia a compresión a edades tempranas del hormigón proyectado (desde los primeros minutos

hasta antes de las 24 horas después de proyectado).

Como ya se ha indicado, cuando al hormigón proyectado se le incorpora aditivo acelerante, se puede tener una resistencia a la compresión medible después de algunos minutos de realizada la aplicación. En la actualidad existen metodologías de ensayo que permiten obtener la resistencia a compresión dentro de las primeras 24 horas, como son el Penetrómetro de aguja, que es adecuado para determinar la resistencia a compresión hasta 1,2 [MPa], y la Pistola Hilti, que tiene un rango de medición de 2,0 a 18,0 [MPa]. Ambos métodos, son indirectos, es decir, miden otra propiedad del hormigón que no es la resistencia a la compresión y mediante curvas empíricas correlacionan el parámetro medido con la resistencia a compresión, debido a que no existen métodos directos para medir esta propiedad. Estas curvas fueron elaboradas en otros países, con materias primas distintas a las utilizadas en Chile. Esto último plantea una incertidumbre sobre la exactitud de los resultados que se obtienen en nuestro país con ambas metodologías. Por esta razón resulta motivador y necesario implementar un método de ensayo de fácil ejecución, económico y portátil, que mediante pruebas en terreno permita obtener valores directos de resistencia a la compresión antes de 24 horas de proyectado el hormigón.

1.1. Descripción general.

La investigación busca implementar y evaluar un método de ensayo portátil, para determinar la resistencia a compresión del hormigón proyectado antes de 24 horas proporcionando que sea adaptable para ser usado en terreno y en laboratorio, generando a su vez un ahorro en tiempo y en costos de ensayo.

El método en estudio consiste básicamente en una prensa portátil en la cual se ensayan a compresión directa, por separado, las secciones extremas y central de una viga prismática de sección de 7,5 x 7,5 [cm] y longitud de al menos 3 veces 7,5 [cm]. Este método fue implementado en 1995 en la Universidad de Innsbruck en Austria. Posteriormente, se han realizado investigaciones en Canadá, Estados Unidos y Australia, en donde se ha demostrado la idoneidad de este método de ensayo, debido a la similitud que ha presentado con los resultados de resistencia a compresión de testigos y la poca dispersión de sus resultados.

El estudio busca evaluar el método de ensayo a compresión para una misma mezcla de hormigón proyectado, utilizando: (a) los métodos existentes para medir la resistencia a compresión a edades tempranas, (b) ensayos de testigos de 4" de diámetro y, (c) el equipo y metodología en estudio. Con esta metodología, se obtiene una curva completa hasta los 28 días del hormigón, lo que permite analizar si los resultados del método en estudio

siguen la tendencia de los resultados de los testigos (valores que se consideraran como parámetro de control para la resistencia a compresión del material), el error asociado y la dispersión del método, y evaluar su posible utilización a futuro como un método de ensayo a compresión, previo al ensayo de los testigos.

Para obtener un número suficiente de datos que permita realizar el análisis comparativo descrito anteriormente, se realizan pruebas en terreno con hormigón proyectado a escala real y se obtienen las muestras suficientes para efectuar los diversos ensayos.

1.2. Características del material.

El hormigón proyectado posee ventajas enormes en su calidad como proceso de construcción y de soporte de rocas; ello, sumado al avance logrado en materiales, equipos y conocimientos de aplicación, ha hecho de esta técnica una herramienta muy importante y necesaria para los trabajos de construcción subterránea.

En la actualidad, constituye un elemento indispensable en obras de tunelería en todo el mundo. Entre sus principales ventajas se encuentran su fácil adaptación a las necesidades de la obra, rapidez de colocación y economía.

Esta característica, se relaciona directamente con el nuevo método Austriaco de diseño y construcción de túneles (NATM) que en la práctica, se caracteriza básicamente por el empleo del hormigón proyectado como soporte primario. Es por ello que el hormigón proyectado ha tenido un desarrollo tecnológico importante, ya que cada proyecto está condicionado por un sin número de parámetros y circunstancias que inciden directamente en la investigación y desarrollo de este método.

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. Se usó por primera vez a principios del siglo pasado y desde entonces ha

sido desarrollado y mejorado permanentemente a lo largo del tiempo.

1.2.1. Técnicas de proyección: vía seca y vía húmeda.

En la actualidad existen dos procesos diferentes para la aplicación del hormigón proyectado:

- Hormigón proyectado vía seca.
- Hormigón proyectado vía húmeda.

El método por vía seca es aquel en el cual los materiales cementicios y los agregados son dosificados y mezclados en una maquina fabricada para tal efecto, donde la mezcla es presurizada mediante aire comprimido y conducida a través de mangueras hasta una boquilla de proyección. Allí, se agrega el agua para hidratarla y proyectarla continuamente sobre una superficie.

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas método vía seca.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Fácil manejo para volúmenes pequeños.• Equipos de proyección son más económicos.• En la boquilla se tiene el control del agua y de la consistencia de la mezcla.• Mantenimiento de equipos es más económica.• Transportable a mayor distancia.	<ul style="list-style-type: none">• Alta generación de polvos.• Alto rebote.• Mayor contaminación.• Pérdidas de mezcla por rebote de hasta 35%.

A diferencia del método por vía seca, el método por vía húmeda se caracteriza por dosificar y mezclar conjuntamente los materiales cementicios, los agregados y el agua. Luego, la mezcla es introducida en un equipo adecuado que la conduce a una boquilla y es neumáticamente proyectada.

Tabla 1.2. Ventajas y desventajas método vía húmeda.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Alto rendimiento hasta 30 [m³/h].• Mejor control de la dosificación principalmente la relación agua/cemento.• Menor rebote de la mezcla, se estima como máximo 10%.• Menos producción de polvo, por ende menos contaminación.• Velocidad proyección alta 60-70 [m/s].	<ul style="list-style-type: none">• Se requiere de una planta de hormigón para el preparado de mezcla con las dosificaciones de diseño.• Para el manejo de los equipos se requiere de mano de obra calificada.• No se puede aplicar en secciones menores de 3x3 [m] por las dimensiones de los equipos.

Ambas técnicas tienen sus ventajas y desventajas, y la selección de una u otra metodología dependerá de los requisitos del proyecto, de la disponibilidad del equipamiento correspondiente y del personal encargado de ejecutarla.

Hasta hace algunos años el método más utilizado era el de proyección por vía seca, pero hoy en día la tendencia ha cambiado. El método por vía húmeda ofrece un mejor ambiente de trabajo, mayor calidad, uniformidad y producción.

Teniendo en cuenta que el hormigón proyectado es un método de colocación, sus componentes básicos son los mismos que constituyen un hormigón convencional.

Adicionalmente, a fin de desarrollar las condiciones y propiedades necesarias para cumplir su función específica, se emplean diversos aditivos y adiciones.

A continuación se mencionan brevemente las características habituales de los materiales constituyentes.

1.2.1.1. Características de las mezclas proyectadas por vía seca

Cemento

Usualmente se utiliza una proporción de cemento que varía entre 350 y 450 [kg/m³] de hormigón. El contenido real de cemento en el hormigón colocado será mayor debido al rebote. El principal efecto del rebote es la pérdida del agregado de mayor tamaño, que conduce a un aumento en la proporción de cemento si se lo compara con la mezcla inicial (EFNARC, 1999).

Relación agua/cemento

Esta relación tiene una influencia fundamental en la calidad de un hormigón. El agua total utilizada en la mezcla se compone del agua añadida en la boquilla y la humedad ya presente en los agregados. En la proyección por vía seca no hay un valor definido para la relación agua/cemento debido a que el operario de la boquilla es quien controla y regula la cantidad del agua de mezcla. Valores recomendados para este factor son 0,4 a 0,5 (Malmberg, 1993).

Agregados

Pueden usarse agregados de peso específico normal y liviano, siendo los primeros los más comunes. La curva granulométrica debería encontrarse en la zona sombreada de la figura 1.1. La región más fina resulta adecuada para mezclas por vía seca, aunque una alta proporción de finos menores a 0,25 [mm] pueden presentar problemas de polvo si no se realiza un humedecimiento previo. Para mezclas por vía seca, la humedad natural de los agregados debe ser lo más constante posible y menor al 6%. A mayor tamaño máximo se obtiene mayor rebote, por lo tanto, se recomienda emplear normalmente un tamaño máximo de 10 [mm] y eventualmente de hasta 16 [mm].

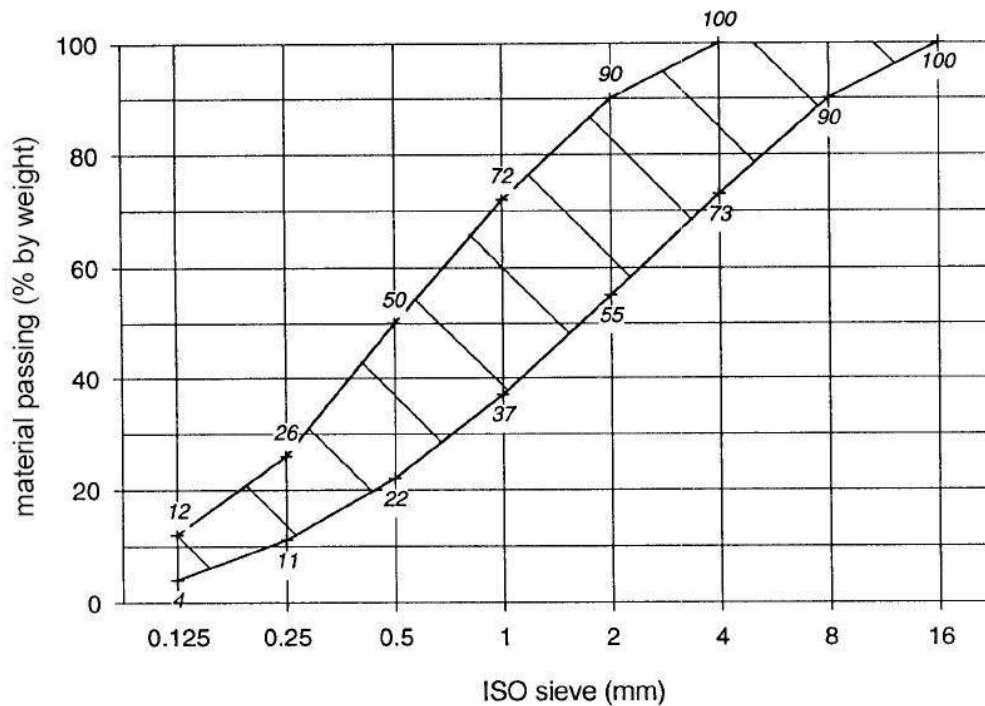


Figura 1.1. Zona de graduación de agregados recomendada por EFNARC.

Aditivos

Entre los más importantes figuran los acelerantes de fraguado; estos aditivos reducen el tiempo de fraguado y el hormigón desarrolla una resistencia inicial mayor, lo cual permite aplicar capas subsecuentes con mayor rapidez y espesor.

Además de los acelerantes, los otros aditivos utilizados en el proceso de proyección en seco son los aglomerantes de polvo, los cuales reducen la formación del mismo. Sin embargo, se emplean poco (Melbye, 1994).

Adiciones minerales

Entre las más utilizadas figuran la microsílíce (humos de sílice) y las cenizas volantes (fly ash). La microsílíce conduce a una importante mejora en la calidad del shotcrete, que se manifiesta en una mayor resistencia a compresión, mayor densidad, mejor adherencia, reducción del rebote hasta del 50% y mejor bombeabilidad (Melbye, 1994).

1.2.1.2. Características de las mezclas proyectadas por vía húmeda

Se considera válido para este caso lo mencionado para las mezclas por vía seca, con las salvedades que se indican a continuación.

Cemento

Para mezclas húmedas normalmente se utiliza un contenido de cemento que varía entre 400 y 500 [kg/m³] de hormigón (EFNARC, 1999).

Relación agua/cemento

En la proyección por vía húmeda se tiene control de la relación agua/cemento debido a que la mezcla es preparada en una planta dosificadora. Valores recomendados en la bibliografía son 0,4 a 0,5 (Malmberg, 1993).

Agregados

Para el método de colocación por vía húmeda se deben observar los siguientes criterios:

- Tamaño máximo: 8-10 [mm], debido a limitaciones del equipo de bombeo y también para evitar grandes pérdidas por rebote.
- Los materiales finos demasiado pequeños producen segregación, mala lubricación y riesgo de atascamiento. Sin embargo, para hormigones proyectados con fibras, el sobrante de material fino es importante

tanto para el bombeo como para la compactación.

- Ninguna fracción de los agregados debe constituir más del 30% del total (Melbye, 1994).

Aditivos

Los aditivos tienen como finalidad lograr propiedades específicas en el hormigón fresco y en el endurecido. Los más comúnmente utilizados en las mezclas húmedas son: estabilizantes, acelerantes, plastificantes o superplastificantes e incorporadores de aire.

Los estabilizantes resultan indispensables para mantener la trabajabilidad y extender el tiempo de abierto durante el transporte y colocación sin afectar la calidad del hormigón. Pueden mantener al material “dormido” desde algunas horas hasta tres días, según la dosis aplicada. Para reactivar la hidratación se agrega el acelerante durante la proyección.

Los beneficios brindados por los plastificantes son: reducción del agua para una dada fluidez, cohesión en estado plástico y mayor bombeabilidad.

Respecto a los incorporadores de aire, otorgan resistencia a ciclos de congelamiento y deshielo, cohesión y mayor fluidez al hormigón fresco (Melbye, 1994).

Adiciones minerales

El empleo de microsilíce proporciona las siguientes propiedades:

- Mejor capacidad de bombeo: lubrica, previene la exudación y la segregación.
- Menor desgaste del equipo y de las mangueras de bombeo.
- Mayor cohesión en estado fresco, por lo tanto, menor consumo de acelerante.
- Resistencias mecánicas superiores.
- Mayor durabilidad.
- Menor rebote.

Debido a la fineza de la microsilíce, al agregarla al hormigón se precisan dosis elevadas de un plastificante para dispersarla (Melbye, 1994).

1.2.2. Usos del hormigón proyectado.

La construcción utilizando hormigón proyectado es usada en diversos tipos de proyectos. La flexibilidad y economía de este material sobresale en edificaciones superficiales, túneles y en construcciones subterráneas especiales, de hecho en toda la industria de la construcción. Los siguientes usos son los más difundidos:

- Estabilización de excavaciones en tunelería y construcción subterránea.
- Revestimiento de túneles y cámaras subterráneas.
- Estabilización en la construcción de minas y galerías.
- Reparación de hormigón (reemplazo de hormigón y reforzamiento).
- Restauración de edificios históricos (estructuras de piedra).
- Trabajos de sello de filtraciones.
- Estabilización de zanjas.
- Estabilización de taludes.
- Capas de desgaste.
- Aplicaciones artísticas.

Tabla 2.3. Usos y requerimientos del hormigón proyectado.

Uso	Requerimientos Típicos	
Soporte temporal en túneles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta resistencia inicial. ▪ Buena adherencia. ▪ Alto rendimiento. ▪ Bajo rebote. 	
Soporte permanente túneles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta resistencia inicial. ▪ Alta resistencia final. ▪ Baja permeabilidad. ▪ Alta durabilidad. 	
Minería	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta resistencia inicial. ▪ Sello de superficies de excavación. ▪ Baja a media resistencia final. 	

Resistencia al fuego	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Carga protectora (sin función de carga). ▪ Alta adherencia. ▪ Resistencia a temperatura de hasta 1200° C. 	
Estabilización de taludes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rápido desarrollo de resistencias. ▪ Uso flexible de colocación. ▪ Volúmenes bajos de hormigón. 	
Reparación de túneles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Resistencia a largo plazo. ▪ Buena adherencia. ▪ Resistencia química. 	
Reparación de muelles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta resistencia mecánica. ▪ Alta resistencia a ataques químicos. 	
Reparación de puentes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hormigón joven no susceptible a vibración por el tráfico. 	

1.2.3. Aplicando el hormigón proyectado

1.2.3.1. Adherencia al sustrato

La adherencia es una característica fundamental para que el hormigón proyectado cumpla su función de soporte de suelo o roca. La misma dependerá de las condiciones locales del sustrato y, por lo tanto, será una característica local.

El alto contenido de cemento y la velocidad de impacto de proyección hace que el hormigón proyectado tenga las condiciones apropiadas para una adecuada colocación (compactación y una alta adherencia), por consiguiente, la otra cara de contacto, es decir el sustrato, generalmente es el factor clave en la unión.

Cuando el hormigón hace las veces de sustrato debe tener una superficie rugosa. La superficie debe estar, además, libre de partículas con baja adhesión, esta debe remojarse para prevenir que el hormigón pierda agua debido al efecto de absorción del sustrato. Lo mismo aplica en principio para las superficies recientemente excavadas, la fuerza de la operación de limpieza depende de la cohesión interna del sustrato y el requerimiento de agua para evitar la pérdida por absorción se basa en la humedad inherente en la superficie de adhesión. El sustrato debe estar siempre libre de polvo.

Para optimizar las operaciones, la superficie puede limpiarse con un compresor de aire desde el equipo de proyección, luego enjuagarse y remojarse con agua corriente. Esta tarea debe hacerse inmediatamente antes de la proyección para prevenir que se forme una capa aislante de polvo inmediatamente después. Lo mismo aplica si el hormigón proyectado se pone capa por capa.

1.2.3.2. Proyección

El hormigón proyectado se aplica en capas, bien sea en la misma operación mediante una proyección repetitiva sobre la misma área o en una operación subsecuente. Después de una larga pausa debe limpiarse y remojarse nuevamente la superficie. Las cantidades que deben aplicarse en cada operación dependen de varios factores:

- Adherencia de la mezcla de hormigón proyectado.
- Naturaleza del sustrato o de la capa de la base.
- Proceso de proyección (vía seca o vía húmeda).
- Volumen de proyección.
- Dirección de proyección (vertical/horizontal).
- Condiciones de la zona a proyectar (refuerzo/agua).

Se requiere un enfoque diferente para las diversas direcciones de proyección.

Al proyectar hacia abajo, se pueden aplicar capas de cualquier grosor. Hay que asegurarse de que el rebote sea desechado para que no quede sobre la superficie.

Al proyectar horizontalmente se puede ir alcanzando el grosor gradualmente en capas delgadas o el grosor completo puede aplicarse desde abajo hacia arriba en dirección perpendicular. Aquí nuevamente debe retirarse el

material que rebota en el fondo antes de aplicar la siguiente capa.



Figura 1.2. Proyección manual.



Figura 1.3. Proyección robotizada.

Al proyectar hacia arriba, el peso del material y la adherencia del hormigón proyectado se anulan entre sí de manera que deben hacerse capas más delgadas. Como regla general un volumen menor de proyección y capas más delgadas generan menos rebote lo que a la final da un mejor resultado. El rebote no constituye problema en este caso.

El hormigón proyectado debe aplicarse en ángulos rectos con respecto al sustrato o el hormigón colocado. Esto maximiza la adherencia y la compactación y minimiza el rebote. El hormigón proyectado se aplica de manera mecánica o manual en movimientos circulares uniformes sobre la superficie.

La distancia óptima para proyectar es de 1,2 a 1,5 [m] pero a menudo se hace dentro del rango de 1 a 2 [m]. A distancias mayores aumenta el rebote, la generación de polvo y afecta la compactación con lo que se reduce la eficiencia de la aplicación.

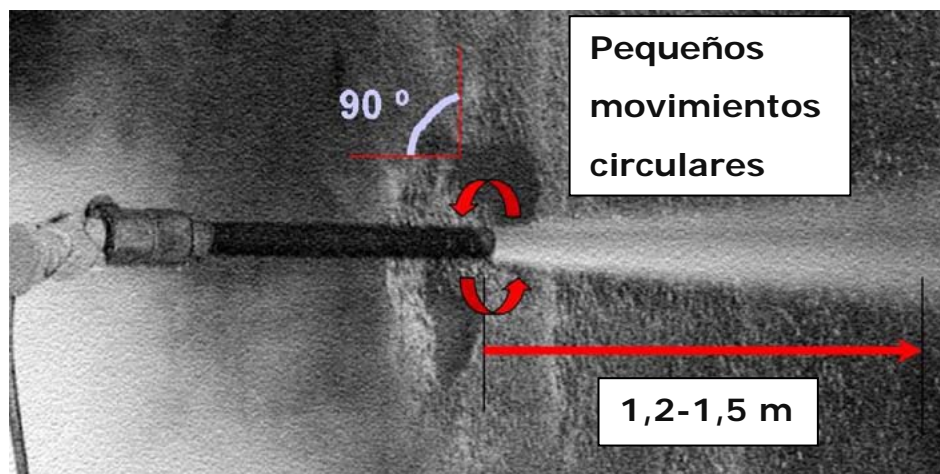


Figura 1.4. Manejo de la boquilla para regularizar la superficie proyectada.

1.2.3.3. Rebote

Uno de los desafíos más complejos en la proyección es reducir la cantidad de material de rebote. Son tantos los factores que influyen en ello que es extremadamente difícil efectuar un control sistemático. Desde luego que el factor primordial, es el operador de la boquilla. La cantidad de material que rebota depende enormemente de la habilidad y experiencia del operador.

Los factores que influyen en la cantidad de rebote son:

- La experiencia y pericia del operador de la boquilla.
- Dirección de proyección (hacia abajo, hacia arriba u horizontalmente).
- Distancia de proyección.
- Velocidad de proyección.
- Unidad de proyección (presión del aire, boquilla).
- Proceso de proyección (en seco/en húmedo).
- Diseño del hormigón proyectado (agregado, acelerante, fibra, cementante, dosificación).
- Hormigón proyectado (resistencia muy temprana, adherencia, espesor de las capas).
- Condición del substrato (uniformidad, adherencia).

El rebote cambia durante el proceso de proyección. En los primeros minutos lo que rebota principalmente es el agregado debido a que es preciso hacer una capa de adherencia sobre el substrato, luego, todo los componentes de la mezcla rebotan durante la proyección. Se puede controlar la cantidad de material rebotado efectivamente con la adherencia del hormigón proyectado.

1.2.3.4. Oquedades generadas por una proyección deficiente

Los vacíos en el material aplicado, tales como los que se encuentran detrás del refuerzo constituyen un problema importante y se han convertido también en un desafío en la construcción con este material. Un operador bien experimentado podría llegar a reducir las sombras de la proyección escogiendo una secuencia apropiada. Es pues esencial tener como criterio principal para una alta calidad del hormigón proyectado, la experiencia y pericia del operario.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El presente estudio tiene un objetivo general, referido al método de ensayo a implementar y objetivos específicos que hacen referencia principalmente a los análisis a realizar.

2.1. Objetivos generales.

Implementar un equipo portátil de ensayo a compresión y evaluar su aptitud para determinar la resistencia a compresión en edades tempranas del hormigón proyectado.

2.2. Objetivos específicos.

- Construir equipo de ensayo utilizando como modelo el equipo desarrollado por la Universidad de Innsbruck, Austria y usando como referencia experiencias desarrolladas en el extranjero con esa metodología.
- Generar una curva característica de resistencia a compresión de un hormigón proyectado típico, utilizando métodos convencionales para evaluar la resistencia temprana y ensayos de testigos para establecer la curva hasta los 28 días.
- Determinar curvas de tendencia con resultados de los diferentes equipos de ensayo y de esta manera obtener factores de correlación que permitan comparar sus resultados.
- Efectuar un análisis comparativo de las ventajas y desventajas del método.

3. MARCO TEÓRICO

La resistencia a compresión del hormigón proyectado en edades tempranas es un factor importante en el control de este material. Debido a esto, muchas especificaciones internacionales como la Guía Austriaca de Shotcrete, tienen requisitos mínimos para el desarrollo de la resistencia en función de la edad luego de la proyección. Esto se basa en la evidencia de terreno, la resistencia a la compresión está relacionada con la capacidad del revestimiento a adherirse al sustrato, apoyarse a sí mismo, y en última instancia, estabilizar y soportar cargas impuestas. La seguridad de los operarios luego de la proyección es fuertemente dependiente de la capacidad de un revestimiento fresco para soportarse a sí mismo y a pequeñas zonas del sustrato. No está claro que fuerza mínima del hormigón es necesaria para garantizar el reingreso al frente de trabajo de modo seguro luego de la proyección. Existen muchos métodos para estimar la resistencia a la compresión de forma directa o indirecta para este material, sin embargo, no hay un conocimiento acabado de si las estimaciones realizadas por estos métodos corresponden a la resistencia real del hormigón, debido a las diferencias que presentan sus resultados entre sí para una misma edad, además de la utilización de curvas de calibración creadas bajo ciertas condiciones, las que no son representativas en la totalidad de los casos en donde se quiera utilizar.

Dentro de la revisión bibliográfica se encuentra una publicación hecha por Stefan Bernard, "Early-Age Test Methods for Fiber-Reinforced Shotcrete", en donde se evidencia de que los métodos para determinar la resistencia a compresión del hormigón proyectado en edades tempranas a menudo dan lugar a estimaciones contradictorias. Las estimaciones de la resistencia a la compresión normalmente difieren si se mide con un Penetrómetro de aguja, una Pistola Hilti o testigos de hormigón convencionales. Estas discrepancias han causado a veces confusión entre los usuarios y prescriptores de este material, por lo que desde hace tiempo existe la necesidad de un sistema fiable y fácil de utilizar para determinar el desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón proyectado en edades tempranas. El presente estudio se inició en respuesta a este desafío con la idea de implementar un método utilizado en el extranjero (Extremo de Viga) a las condiciones nacionales (cementos, áridos, equipos, etc.), el que tenga las características necesarias para evaluar el desarrollo de la resistencia a compresión a edades tempranas.

Estudios recientes han demostrado que existe un método simple y directo para determinar el desarrollo de la resistencia a compresión en edades tempranas del hormigón proyectado. Éste consiste en ensayar a compresión

secciones de vigas prismáticas, mediante una adaptación de la norma ASTM C116-90 "Test Method for Compressive Strength of Concrete Using Portions of Beams Broken in Flexure", que determina la resistencia a compresión del hormigón utilizando porciones de vigas ensayadas a flexión. Es así como mediante una prueba en terreno se busca reproducir lo realizado en el extranjero, implementado y evaluando un nuevo método de ensayo a compresión para determinar la resistencia a compresión del hormigón proyectado en edades tempranas.

3.1. Control en el hormigón proyectado

Dada la importancia que el hormigón proyectado tiene como elemento de sostenimiento de la excavación, es sumamente importante la realización de ensayos previos a fin de garantizar tanto el producto final como la puesta en obra del mismo.

Las exigencias y requerimientos (cada vez mayores) que se están solicitando, tanto mecánicos como de durabilidad y la multitud de variables que se pueden presentar a lo largo de la obra, hacen preciso tener bien caracterizados y estudiados cada uno de los elementos que están implicados en la fabricación y colocación del hormigón proyectado.

Ninguna obra es exactamente igual a otra y en muchos casos, las soluciones o sistemas empleados no son extrapolables. Los estudios previos, deben desarrollarse en laboratorio y principalmente en terreno. Se deberá incidir especialmente en las características del árido, cemento, aditivo, y su compatibilidad y efectividad en conjunto. De esta forma se establece un criterio de cara a tener capacidad de respuesta ante posibles incidencias que surjan en la obra.

Una vez ejecutados los ensayos previos, es recomendable realizar estudios de caracterización, con el fin de fijar un patrón de referencia ante posibles modificaciones posteriores en cuanto a componentes, dosificación o ejecución. El valor de la caracterización inicial tiene gran interés a la hora de contrastar cualquier variable. Valores por encima del patrón suponen dar validez a las modificaciones realizadas; valores inferiores traen como consecuencia la no aceptación de los cambios.

Por último, se deberá hacer un seguimiento continuado mediante ensayos de control cuando la obra se encuentra en producción. Con estos ensayos se pretende verificar el cumplimiento de las prestaciones especificadas, incidiendo lo menos posible en el proceso productivo.

En estos ensayos de control será preciso poner especial atención al hormigón tanto en estado fresco (manejabilidad) como en estado endurecido (resistencias a compresión). Debido a esto en el presente estudio se busca implementar un equipo portátil de ensayo a compresión y evaluar su aptitud

para determinar la resistencia a compresión en edades tempranas del hormigón proyectado.

3.1.1. Desarrollo de resistencia a compresión

3.1.1.1. Desarrollo de resistencia temprana.

A diferencia de los hormigones tradicionales, la exitosa colocación del hormigón proyectado y la obtención de las características de resistencia, compactación, homogeneidad y durabilidad requeridas dependen en gran medida del logro de altas resistencias tempranas.

Los requisitos de seguridad exigen un conocimiento suficientemente preciso de la resistencia real del hormigón. Distintos requisitos sobre el desarrollo de la resistencia temprana han sido incorporados en las especificaciones del hormigón proyectado para distintas aplicaciones. El control de la resistencia desarrollada tiene que ser sistemáticamente efectuado durante la construcción. Se han establecido tres categorías basadas en la normativa Europea para clasificar las resistencias de hormigón proyectado recién aplicado. Esto a partir de la Guía Austriaca de Shotcrete y según norma EN 14487-1 son: J1, J2 y J3 (Figura 3.1). Cabe señalar que estas categorías no aplican al resto del mundo, ya que son normativas sólo Europeas.

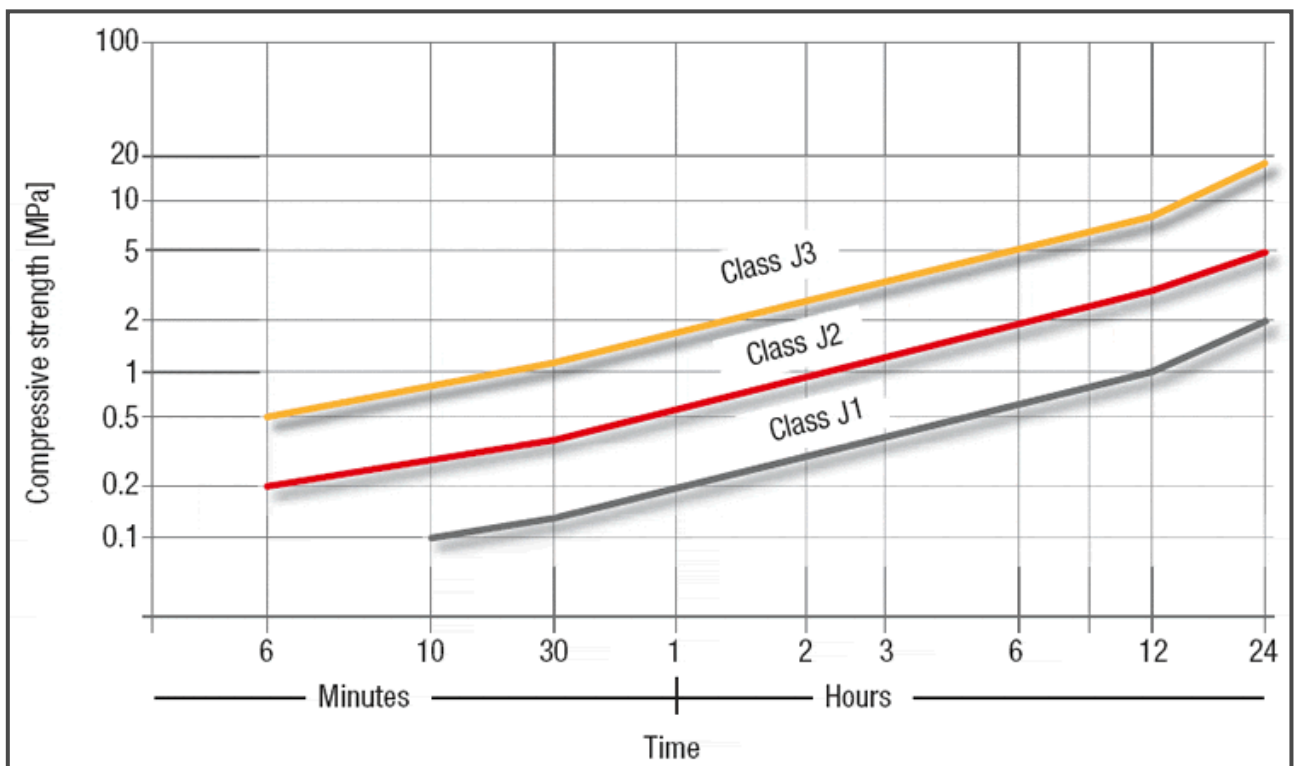


Figura 3.1. Gráfico clases de hormigón proyectado en base a la resistencia temprana. (EN 14487-1)

A continuación se definen cada una de estas clases de hormigón proyectado:

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.

Se debe tener en cuenta las variables que inciden en el desarrollo de la resistencia temprana, dependiendo del requerimiento del hormigón o mortero proyectado, debe hacerse una distinción entre:

- Desarrollo de resistencia muy temprana, en el rango desde unos pocos minutos hasta una hora.
- Desarrollo de resistencia temprana, en el rango desde una hora hasta máximo un día.

Se debe verificar además que la resistencia a edades mayores, sea comparable con las que fijan para el hormigón estructural. El desarrollo de la resistencia está influenciado por los siguientes factores:

- Contenido y tipo de cemento.
- Relación A/C + adiciones minerales, cementicias o puzolánicas.
- Temperaturas del hormigón y del ambiente (sustrato).
- Grosor de la capa (calor de hidratación).
- En el hormigón proyectado está, además, la fuerte influencia del aditivo acelerante, que asegura una rápida estabilidad del revestimiento.

El desarrollo de resistencia muy temprana y temprana es especificado para aplicaciones sobre sustratos de roca y suelo sobre cabeza.

Desarrollo de resistencia muy temprana.

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.

Desarrollo de 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.

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.

3.1.1.2. 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.

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.

4. METODOLOGÍAS DE ENSAYO

En este capítulo se presentan en detalle las metodologías de ensayos convencionales utilizadas actualmente en Chile y del nuevo método en estudio para determinar la resistencia a compresión del hormigón proyectado en edades tempranas.

4.1. Métodos de ensayo convencionales.

El presente estudio contempla el uso de diferentes métodos de ensayo utilizados actualmente: Penetrómetro, Pistola Hilti, máquina de ensayo a compresión (testigos).

Tabla 4.1. Métodos de ensayo.

1. Penetrómetro	
2. Pistola Hilti	
3. Prensa de ensayo de alta resolución	

4.1.1. Metodología Penetrómetro.

El Penetrómetro consta de una aguja de acero de 3 [mm] de diámetro en el extremo de un resorte que es forzado contra la superficie del hormigón proyectado (Sprayed Concrete Guidline, August 2006).

La fuerza necesaria para alcanzar una profundidad de 15 [mm] se utiliza como índice para estimar la resistencia a compresión aproximada con la ayuda de una curva de calibración (Figura 4.1). Este método es adecuado para estimar la resistencia a la compresión en el intervalo de resistencia 0,1 [MPa] hasta 1,2 [MPa].

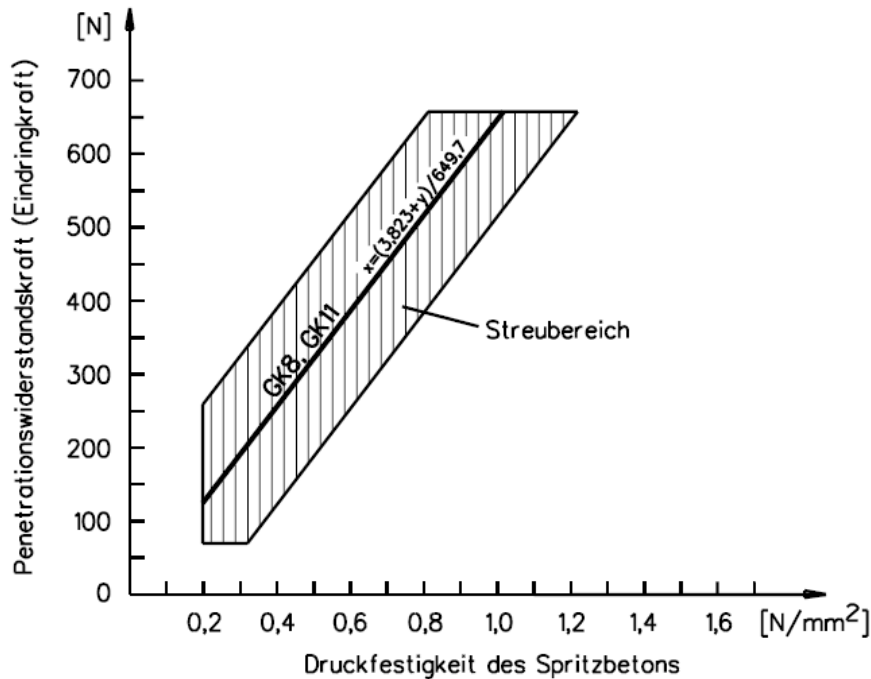


Figura 4.1. Curva de calibración.

De esta curva se obtiene la siguiente ecuación:

$$x = \frac{(y + 3,823)}{649,7}$$



En donde "y" es la resistencia a la penetración en [N] y "x" la resistencia a compresión en [MPa].

El Penetrómetro de aguja no debe ser confundido con Penetrómetros aguja Vicat u otros tipos de equipos que se utilizan ampliamente para evaluar el tiempo de fraguado para el hormigón convencional.

Al finalizar la proyección, debido a la inmediata necesidad de registrar

parámetros (minutos) para el ensayo, se debe estar preparado. Una vez cumplido el tiempo se procede a efectuar el ensayo para lo cual se realizan 10 registros por edad.

Tabla 4.2. Metodología Penetrómetro.

Metodología	
<p>1° Penetrar aguja hasta alcanzar profundidad de 15 [mm].</p>	
<p>2° Registrar la resistencia a la penetración que entrega el equipo (tensión en el resorte).</p>	

Las ventajas del Penetrómetro son que es un dispositivo portátil que es rápido y fácil de usar.

La desventaja es que los resultados están influenciados por la presencia de fibras y partículas de agregado en el camino de la aguja. Además, el requisito para hincar la aguja firmemente en la superficie del hormigón proyectado es a menudo difícil de lograr. El uso de una curva de calibración elaborada con materiales diferentes a los nacionales puede representar un error en los resultados de la estimación de resistencia a compresión obtenida mediante este método.

Cuando se utiliza cualquiera de los métodos descritos anteriormente, es importante reconocer que todos ellos sufren una variabilidad relativamente alta, por lo tanto, es necesario llevar a cabo muchas pruebas en cada tiempo de muestreo antes de calcular la media.

4.1.2. Metodología Pistola Hilti.

El método de la Pistola Hilti consiste en disparar un clavo de acero (Figura 4.2) contra la superficie del hormigón proyectado, en donde se mide la profundidad de penetración (Figura 4.3) (Sprayed Concrete Guidline, August 2006).

La dimensión de los clavos 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].



Figura 4.2. Clavo de acero.

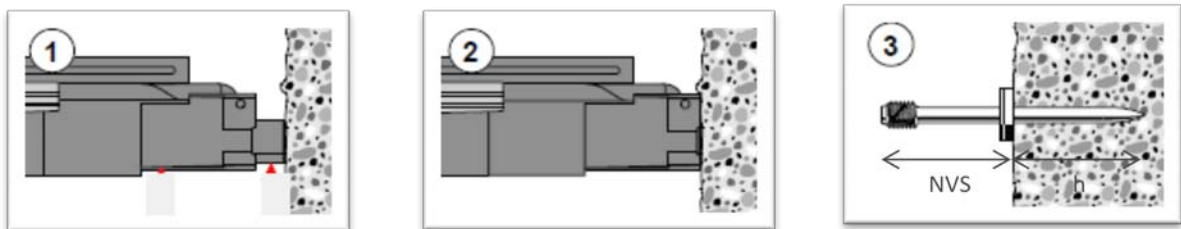


Figura 4.3. Esquema del procedimiento.

A continuación, se instala un perno en la cabeza del clavo en donde se utiliza el hilo que este tiene para asegurarlo. Luego de esto, con otro dispositivo se extrae el clavo, registrando la carga de arranque que se obtiene mediante un manómetro que esta acoplado a éste. Se realizan 10 registros por edad.

Tabla 4.3. Metodología Pistola Hilti.

Metodología	
1° Disparar clavo contra superficie del panel.	
2° Medir profundidad de penetración en base a largo de clavo.	
3° Instalar perno en cabeza de clavo.	
4° Extraer clavo, registrando la fuerza de arranque.	

La fuerza requerida para extraer el clavo se combina con la profundidad de penetración, utilizando una curva de calibración, para estimar la resistencia a compresión del hormigón proyectado (Figura 4.4).

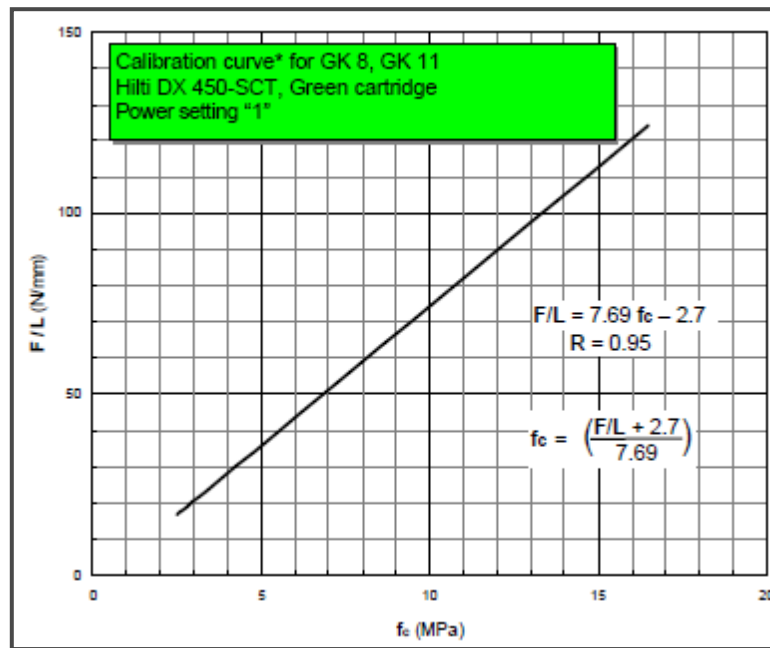


Figura 4.4. Curva de calibración.

Cabe destacar que esta no es la única curva, ya que depende de ciertas características e implementos que se utilicen para el ensayo, en este caso la curva es para un potencia determinada de la pistola ("power setting=1") y cartuchos explosivo verde ("Green cartridge"). De esta manera se presenta sólo la curva utilizada para este estudio.



Figura 4.5. Ajuste potencia de Pistola Hilti.

Otro punto importante, es que sólo una pistola DX450 Hilti se puede utilizar para este propósito y el dispositivo de arranque debe ser también un elemento de propiedad Hilti, a no ser que se calibre otro equipo.

La ventaja de este método es que permite cubrir un rango amplio de resistencias a compresión de 2 a 18 [MPa].

Las desventajas son el alto costo del equipo y los clavos, el hecho de utilizar cartuchos explosivos y el tiempo necesario para realizar las mediciones debido a que se deben disparar 10 clavos para estimar la resistencia por edad. Otra desventaja es que ésta curva fue hecha con materiales distintos a los nacionales, lo que puede representar un error en los resultados de la estimación de resistencia a compresión determinada por este método.

4.1.3. Metodología de 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.

Previo a realizar el ensayo se registra el peso y las dimensiones de cada testigo (diámetro y altura). El ensayo se realiza mediante una prensa de compresión, en la tabla 4.4 se presentan los resultados de calibración de la prensa. Una vez finalizado el ensayo se obtiene la carga máxima y la resistencia nominal. Luego, en base a las dimensiones del testigo se calcula la resistencia real a compresión.

Tabla 4.4. Resultados de calibración prensa.

Lectura Máquina [kN]	Lectura Patrón [kN]	Error [kN]	Incertidumbre Expandida, k=2 [%]
30	30,09	-0,09	1,92
60	59,65	0,35	0,98
90	89,64	0,36	0,65
120	119,66	0,34	0,49
150	149,70	0,30	0,40
180	179,77	0,23	0,35
210	209,82	0,18	0,35
240	239,86	0,14	0,35
270	270,00	0,00	0,35

Tabla 4.5. Metodología de extracción y ensayo de testigos.

Metodología	
1° Fijar equipo y extraer el testigo mediante broca diamantada.	
2° Cortar bases de testigo.	
3° Refrentar testigo.	
4° Ensayar testigo en prensa de compresión.	

4.2. Método de ensayo en estudio (Extremo de Viga).

En este caso el equipo tiene un proceso de fabricación que contempla las siguientes etapas:

- Modelo: se elige el modelo a utilizar basado en las experiencias observadas en el extranjero, en particular, la descrita en la publicación "HEERE, Roland y Morgan, Dudley. Determination of Early-Age Compressive Strength of Shotcrete. Shotcrete, V.4, No. 2, Spring 2002, pp. 28-31".
- Diseño conceptual: se establecen los componentes necesarios para el funcionamiento del equipo, verificando la viabilidad de éste integrando piezas y partes existentes en el mercado. Estas componentes son: bomba hidráulica manual, manómetro, cilindro hidráulico, marco de reacción y moldes de vigas prismáticas.
- Diseño de marco de reacción: se hace el diseño del equipo basado en las experiencias en el extranjero, en particular del marco de reacción y de los moldes de vigas, que se desarrollan en acero especial, con la precisión requerida.
- Calibración: se realizan ensayos de calibración para determinar el error del equipo.

El detalle de estas etapas se presenta en el Anexo A.

4.2.1. Metodología ensayo Extremo de Viga.

Éste es el único método de ensayo a edad temprana que involucra el ensayo directo a compresión de muestras de hormigón proyectado.



Figura 4.6. Equipo de ensayo.

Las muestras son vigas que miden 7,5 x 7,5 x 35,0 [cm], se obtienen de un molde con capacidad para 3 vigas, el que es abierto en sus extremos (Figuras 4.7 y 4.8).



Figura 4.7. Moldes de vigas.



Figura 4.8. Moldes hormigón proyectado.

La ausencia de los extremos en el molde ayuda a evitar que el rebote quede atrapado en el interior de éste. Después de la proyección, las vigas se enrasan y en base al tiempo de fraguado, el que se verifica dependiendo de los resultados del Penetrómetro (entre los 7 y 10 [kgf/cm²]) se procede a desmoldar las vigas, tomando en cuenta que no se tengan fisuras o desmoronamiento de éstas.

Luego de lo anterior, se coloca el extremo de una viga en el equipo de ensayo, teniendo especial cuidado con la posición, ya que deben quedar dentro de las placas del equipo de compresión.

La placa de carga es de 7,5 [cm] x 8,0 [cm], aunque el lado mayor afecta a la viga de modo perpendicular, de tal suerte que al ensayar el extremo de la viga, el ensayo carga directamente una sección de 7,5 [cm] de longitud. Si se considera que la sección de la viga es de 7,5 [cm] x 7,5 [cm], el ensayo simula la resistencia a compresión de un cubo de arista 7,5 [cm].

De esta manera se ejecuta el ensayo cargando esta sección mediante el gato y cilindro hidráulico, para lo que se debe tener un ritmo pausado y constante con una velocidad aproximada de 100 a 200 [kgf/s], debido a que es un equipo manual.

Lo anterior se repite luego para el otro extremo de la viga y posteriormente, para la sección central.

El equipo registra la presión ejercida sobre la sección ensayada de la viga mediante un manómetro adosado al gato hidráulico. De esta presión se obtiene la carga entregada por el equipo, la que se divide por el área de la

sección ensayada (7,5 [cm] x 7,5 [cm]), para así obtener la resistencia a compresión de la sección de viga ensayada (Presión/Área).

Es importante señalar, que una de las placas del equipo de compresión debe estar libre para girar, de modo que la carga se aplique de manera uniforme, ya que las vigas pueden tener secciones que no son lo suficientemente paralelas y la aplicación de la carga excéntrica en gran medida puede disminuir la resistencia del hormigón. Para esto se diseña una placa especial, la cual funciona como rótula y permite que se cumpla con las condiciones anteriormente indicadas (Figura 4.9).

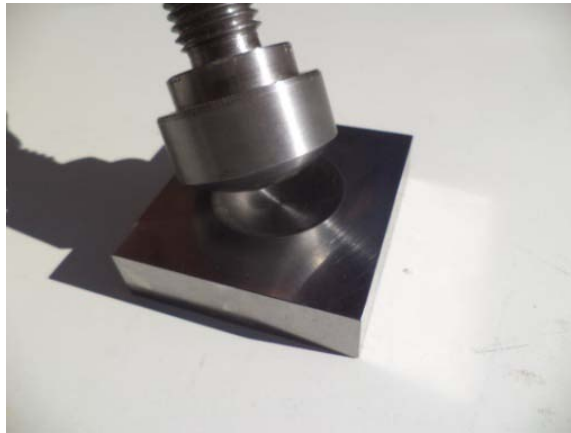


Figura 4.9. Rótula y placa de carga.

Las vigas son analizadas en sus lados que están en contacto con los moldes de modo que estos lados entren en contacto con las placas de carga. Aproximadamente de 10 a 20 [mm] de la viga debe sobresalir de cada extremo de las placas de carga durante la prueba, ya que asegura una adecuada cantidad de hormigón proyectado existente para resistir la carga e impide el desarrollo de tensiones significativas de confinamiento.

Tabla 4.6. Metodología Extremo de Viga.

Metodología	
1° Desmoldar vigas.	
2° Ubicar viga en equipo de ensayo.	
3° Operar gato hidráulico, cargando viga de ensayo a una velocidad aproximada de 100 a 200 [kgf/s], hasta provocar la falla.	

Este método tiene la ventaja de que el equipo es robusto, simple, de bajo costo, y fácilmente adaptable para su uso en el entorno subterráneo, así como en el laboratorio. Otra de las ventajas sobre los otros dispositivos de ensayos de hormigón proyectado en edades tempranas tales como el Penetrómetro y la Pistola Hilti, es que mide de forma directa la resistencia a la compresión, sin necesidad de utilizar una curva de ajuste para obtener resultados. La principal desventaja es que el rebote puede quedar atrapado en el molde e incorporarse en la viga si no se realiza la proyección cuidadosamente.

5. MATERIALES Y EQUIPOS

En este capítulo se presentan los materiales y equipos utilizados para realizar la proyección del hormigón en la prueba en terreno.

5.1. Hormigón

En base a la información proporcionada por Melón, proveedor de hormigón, se adopta la especificación estipulada por EFNARC, guía europea para hormigón proyectado, para determinar la dosificación de hormigón que se utilizará en el presenta trabajo como se detalla a continuación.

En la tabla 5.1, se describe el cálculo de la mezcla de áridos que se utilizará para el hormigón a proyectar, cuya dosificación se detalla en tabla 5.2.

Tabla 5.1. Granulometría.

Tamices		EFNARC 1996		San Bernardo	Río Maipo	Árido combinado
ASTM	NCh	Inferior	Superior	80%	20%	100%
1½"	40					
1	25					
¾"	20					
⅜"	10	93%	100%	100%	100%	100%
# 4	4,75	77%	100%	88%	94%	90%
# 8	2,38	59%	92%	62%	86%	69%
# 16	1,25	41%	76%	44%	78%	54%
# 30	0,63	26%	56%	30%	66%	41%
# 50	0,32	14%	32%	17%	45%	25%
# 100	0,16	6%	16%	8%	21%	12%

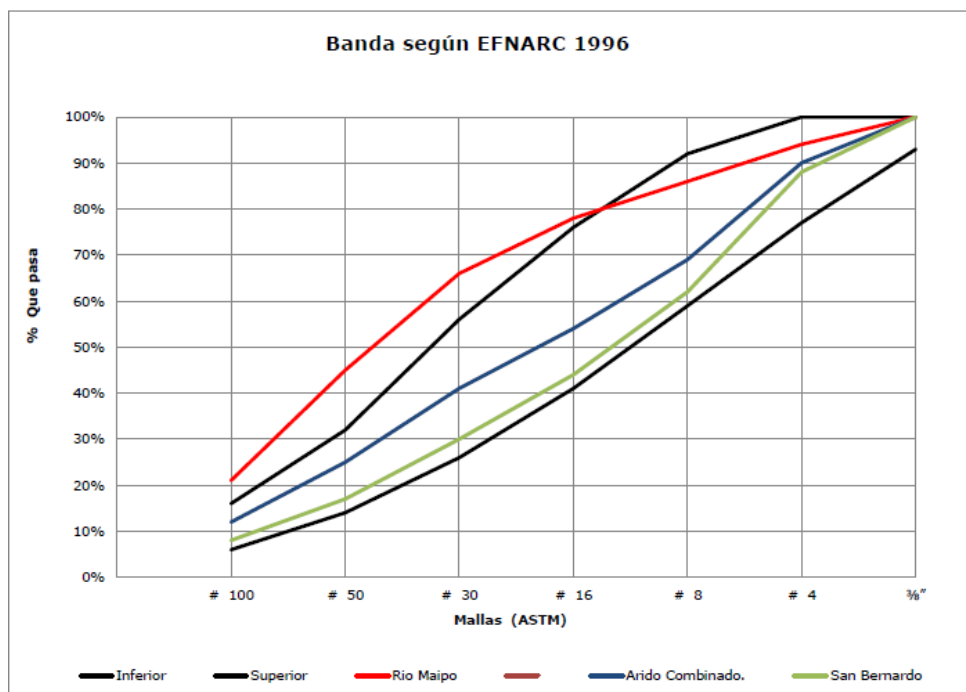


Tabla 5.2. Dosificación Hormigón Projectado.

Material (para 1 m³)	Cantidad	Unidad
Cemento	450	[kg]
Arena 1, Pozo San Bernardo	1125	[kg]
Arena 2, Río Maipo J. Catalán	477	[kg]
Agua Libre	203	[lt]
Aditivo reductor de agua	2,48	[kg]
Aditivo superplastificante	3,72	[kg]
Aire Incorporado	30	[lt]
Acelerante	8	[%]

5.2. Aditivo acelerante.

Se utilizó un acelerante líquido libre de álcalis para hormigón proyectado TamShot 90 AFC, NORMET. Se utilizó un 8% de aditivo en la prueba en terreno.



Figura 5.1. Aditivo acelerante.

Para conseguir este 8% de aditivo acelerante, primero se saca el rendimiento de la bomba de hormigón en [m³/hr] utilizando un tambor de 200 [lt] como referencia de volumen y registrando el tiempo de llenado, luego en base a la cantidad de cemento utilizado en la dosificación, se obtiene el “flujo requerido” para ese porcentaje de aditivo de la siguiente manera:

$$\text{Flujo requerido} = \text{Rendimiento} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \right] \times \text{Cemento} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \times \% \text{ Aditivo requerido}$$

Luego, se saca la curva del caudal de aditivo con respecto a los indicadores del dosificador de aditivo:

$$\text{Indicador dosificador aditivo} = A \times X \left[\frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right] + B$$

En donde “A” y “B” son constantes y “X” es el flujo requerido para un porcentaje de aditivo específico.

De esta manera, se obtiene el indicador del dosificador de aditivo, para proporcionar el porcentaje de aditivo requerido para esta prueba con los equipos que se tienen en terreno.

5.3. Elaboración de muestras.

Para cada tanda de proyección se utilizaron bateas de madera, estos se moldearon de acuerdo a lo requerido por la normativa europea EFNARC, considerando las dimensiones de las bateas y la forma de proyección. Se utilizaron dos tipos de bateas, una para la extracción de testigos (Figura 5.2) y la otra para ensayos de penetración (Figura 5.3), con las siguientes características:

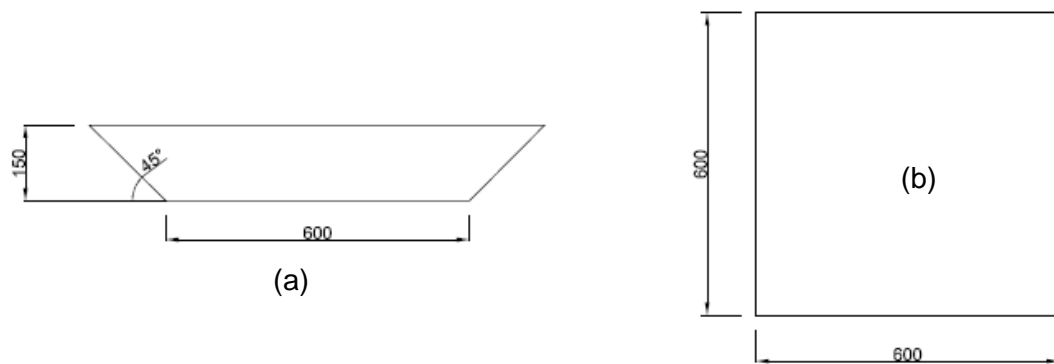


Figura 5.2. Batea de dimensiones 60x60x15(interior) [cm]. (a) Vista lateral de la batea. (b) Vista en planta de la batea.

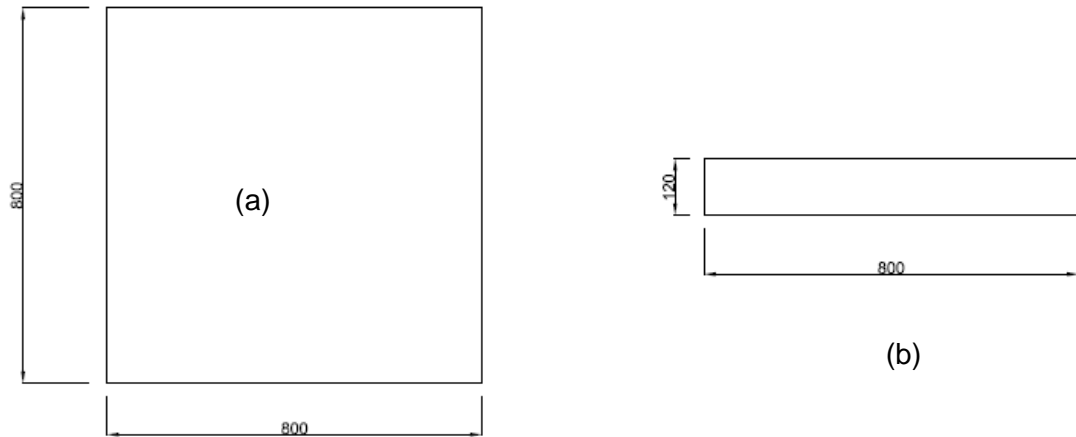


Figura 5.3. Batea de dimensiones 80x80x12(interior) [cm]. (a) Vista basal de la batea. (b) Vista en planta de la batea.

Previo a la proyección, las bateas se ubican sobre soportes inclinadas idealmente a 45°. Estas bateas se utilizan para los ensayos de Penetrómetro, Pistola Hilti y para la extracción de testigos.



Figura 5.4: Distribución de bateas, prueba en terreno.

Además se ubicaron los moldes de las vigas de la misma manera a un costado de las bateas. Previo a la proyección se aplicó desmoldante a las superficies interiores de los moldes de viga a fin de evitar que la muestra se adhiera al molde y se provoquen daños a la misma durante el desmolde.



Figura 5.5. Distribución de moldes de vigas, prueba en terreno.

Una vez concluida la proyección sobre los moldes de vigas, se les dio rápidamente un acabado superficial, enrasando las muestras, antes que el endurecimiento del hormigón lo impida.



Figura 5.6. Acabado superficial de muestras.

5.4. Equipos de proyección.

5.4.1. Compresor de aire.

Se utilizó un compresor de aire portátil marca Sullair, modelo 260.



Figura 5.7. Compresor de aire.

5.4.2. Bomba de hormigón.

Se utilizó una bomba de hormigón marca PUTZMEISTER, modelo TK-40. La bomba tuvo 22 emboladas por minuto en la prueba en terreno.



Figura 5.8. Bomba de hormigón.



Figura 5.9. Equipos en terreno.

5.4.3. Dosificador de aditivo.

Se utilizó un dosificador de aditivo modelo DSR15MBG11A.



Figura 5.10. Dosificador de aditivo.

6. EJECUCIÓN DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

Definidos los ensayos a realizar se procedió a la ejecución de los mismos, observando los procedimientos descritos por las normas aplicables a cada uno.

Debido a la naturaleza variable del material y de los procedimientos empleados para la elaboración de las muestras, se previó obtener resultados fuera de rango, sin embargo, éstos obedecen a las condiciones reales del trabajo en terreno y por tanto fueron igualmente analizados. Propiedades de la mezcla de shotcrete, variaciones del equipo entre ensayos, colocación, distribución de los esfuerzos internos durante el ensayo, colocación de los paneles o vigas entre ensayos, etc., son factores que si bien son considerados dentro de las condiciones de borde propias de toda prueba experimental o en terreno, se pueden generar resultados imprevistos o contradictorios a lo establecido. Esto se controla utilizando el mismo procedimiento y personal para cada etapa, buscando una homogeneidad en los procesos de cada ensayo.

6.1. Prueba en terreno.

Se realiza una prueba en terreno, consistente en proyectar una mezcla de hormigón en dos etapas, mediante dos colados (mixers) de una misma dosificación de hormigón proyectado con una diferencia de cuatro horas cada uno, para obtener como mínimo, la siguiente cantidad de muestras y testigos por etapa:

- 2 paneles para ensayo con Penetrómetro a edades: 2, 5, 10, 30, 60 y 90 minutos.
- 2 paneles para ensayo con Pistola Hilti a edades: 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360 minutos.
- 5 paneles para extracción y ensayo de testigos a 12 horas, 24 horas, 3 días, 7 días y 28 días (4 testigos por edad)
- 8 vigas proyectadas para ensayos con el método en estudio a 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 horas.

Las pruebas en terreno se realizan en las instalaciones de la empresa DPL GROUT ubicadas en la comuna de Padre Hurtado, mientras que los testigos se ensayan en las instalaciones del Laboratorio IDIEM en Plaza Ercilla 883.

Una vez realizada la proyección, se procede a ejecutar los ensayos comprobando que se ejecuten correctamente, basándose en normativas y especificaciones vigentes en los casos que corresponda, cumpliendo con las

edades de ensayo establecidas.

6.2. Cronograma de ensayos.

La elaboración de muestras y la ejecución de los ensayos se programan considerando edades de ensayo desde los 2 minutos hasta los 28 días, dependiendo de cada tipo de ensayo, para generar de esta manera la curva de desarrollo de resistencia.

Se programaron dos camiones mixers con el mismo hormigón y con una diferencia de 4 horas y por ende se realizaron 2 tandas de proyección. En cada tanda se toman la misma cantidad de muestras, para obtener una cantidad de datos representativos.

Las muestras se tomaron de la siguiente manera:

Para los ensayos dentro de las primeras 24 horas (edades tempranas) no se realizó ningún tipo de curado debido a la pronta ejecución de estos.

La extracción de testigos (NCh1171/1) se realiza en 3 etapas:

- 1° Extracción a las 8 horas para ensayos a 12 y 24 horas.
- 2° Extracción a las 48 horas para ensayos a 3 y 7 días.
- 3° Extracción a los 5 días para ensayos a 28 días.

Una vez extraídos los testigos se introdujeron en piscinas de curado en un ambiente saturado con cal (NCh170). Cumplida la edad de ensayo, se retiran de la piscina de curado y se secan exponiéndolos a la intemperie por 24 horas, al cabo de las cuales se procedió al ensayo respectivo.

Se presenta a continuación el cronograma de ensayo por tanda de proyección que se realizó para la prueba en terreno:

CRONOGRAMA DE ENSAYOS																				
Tiempo de Ensayo	2 min	5 min	10 min	30 min	1,0 hr	1,5 hr	2,0 hr	3,0 hr	4,0 hr	5,0 hr	6,0 hr	7,0 hr	8,0 hr	9,0 hr	10 hr	12 hr	24 hr	3 días	7 días	28 días
Ensayo																				
Penetrómetro																				
Pistola Hilti																				
Extremo de Viga																				
Testigos																				

6.3. Resultados ensayos.

6.3.1. Hormigón fresco.

Se realizaron controles de temperatura y asentamiento de cono (NCh1019) para cada camión, como se detalla a continuación:

Tabla 6.1. Asentamiento de cono.

	Inicial, previo a la proyección [cm]	Final, después de la proyección [cm]
Camión 1	26	20
Camión 2	23	19



Figura 6.1. Asentamiento de cono.

Tabla 6.2. Temperatura hormigón.

	Inicial, previo a la proyección [°C]	Final, después de la proyección [°C]
Camión 1	30,3	30,5
Camión 2	33,3	33,7



Figura 6.2. Temperatura hormigón.

Además, se controló la temperatura ambiente:

Tabla 6.3. Temperatura ambiente.

	Inicial, previo a proyección [°C]	Final, después de la proyección [°C]
Camión 1	24,6	24,9
Camión 2	30,2	30,4

Los horarios de inicio y fin de proyección de presentan a continuación:

Tabla 6.4. Horario proyección.

	Inicio proyección [hrs]	Fin proyección [hrs]
Tanda N° 1	12:22	12:32
Tanda N° 2	16:43	16:55

6.3.2. Hormigón endurecido.

Conforme a los ensayos realizados al hormigón endurecido, se obtienen las gráficas de resistencia a compresión en el tiempo por ensayo y tanda de proyección. Cabe destacar que se presenta a continuación el resumen de resultados, debido a que por cada punto se tienen muchos resultados entregando sólo el promedio de estos.

En el Anexo B se presentan los resultados de cada ensayo.

6.3.2.1. Resultados Penetrómetro.

- Tanda N°1

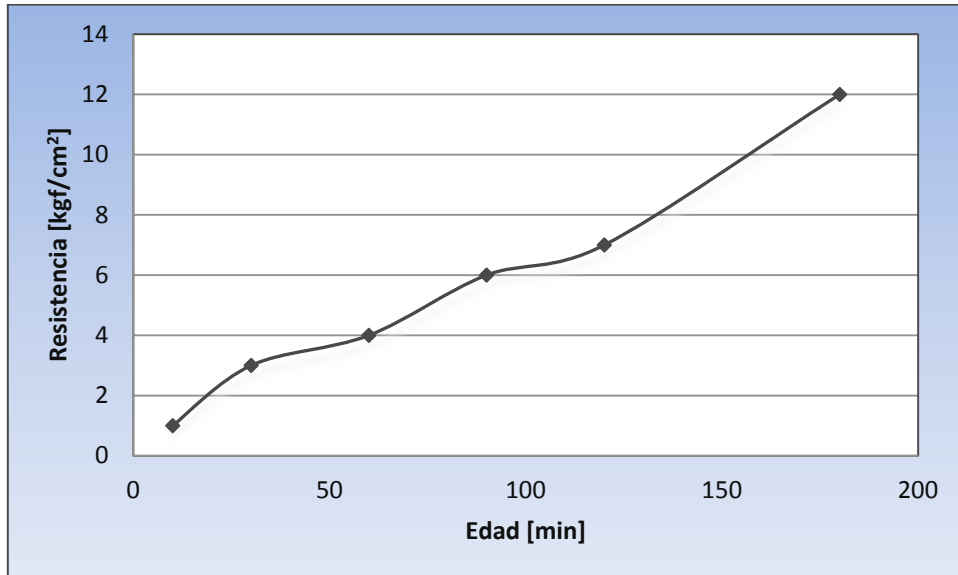


Gráfico 6.1. Curva desarrollo de resistencia a compresión medida por el Penetrómetro.

- Tanda N°2

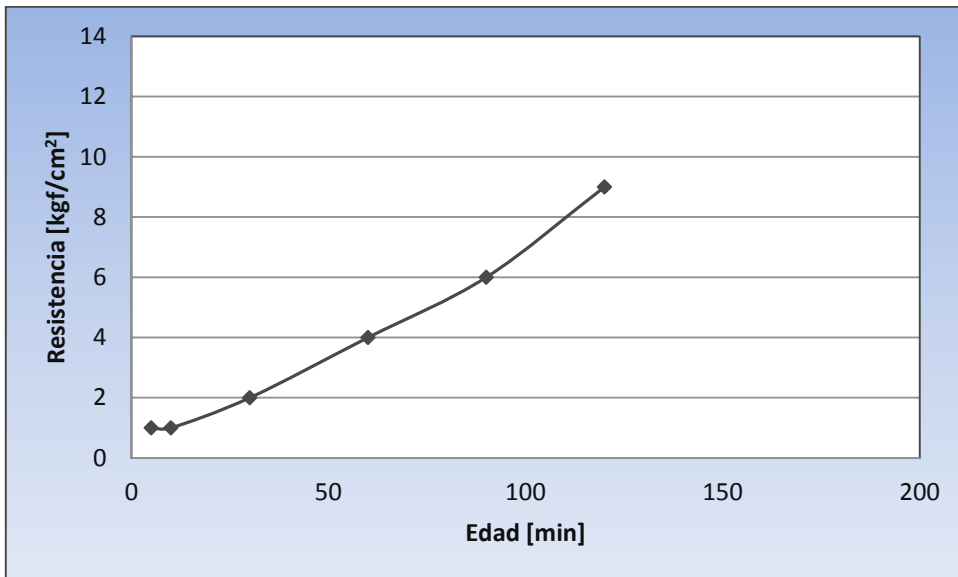


Gráfico 6.2. Curva desarrollo de resistencia a compresión medida por el Penetrómetro.

6.3.2.2. Resultados Pistola Hilti.

- Tanda N° 1

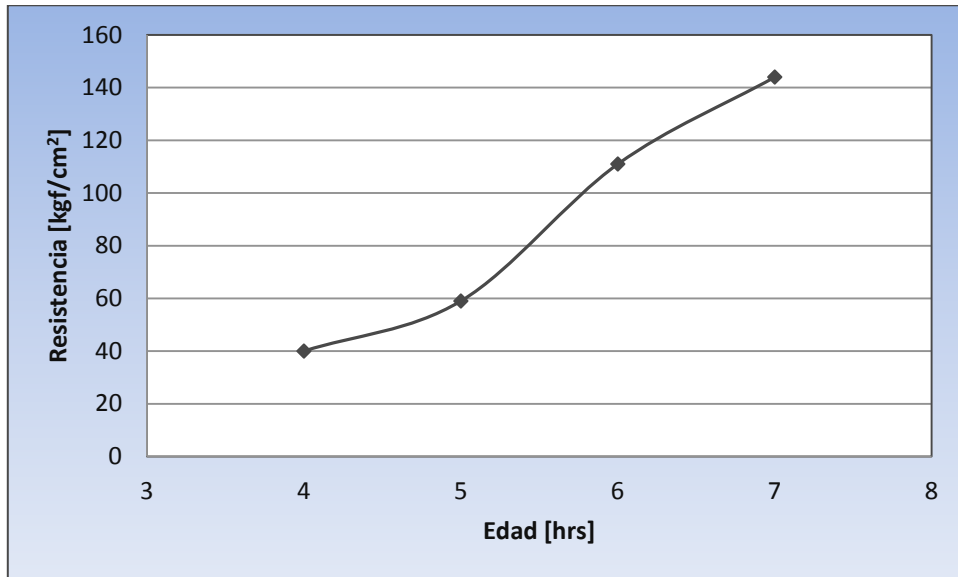


Gráfico 6.3. Curva desarrollo de resistencia a compresión Pistola Hilti.

- Tanda N° 2

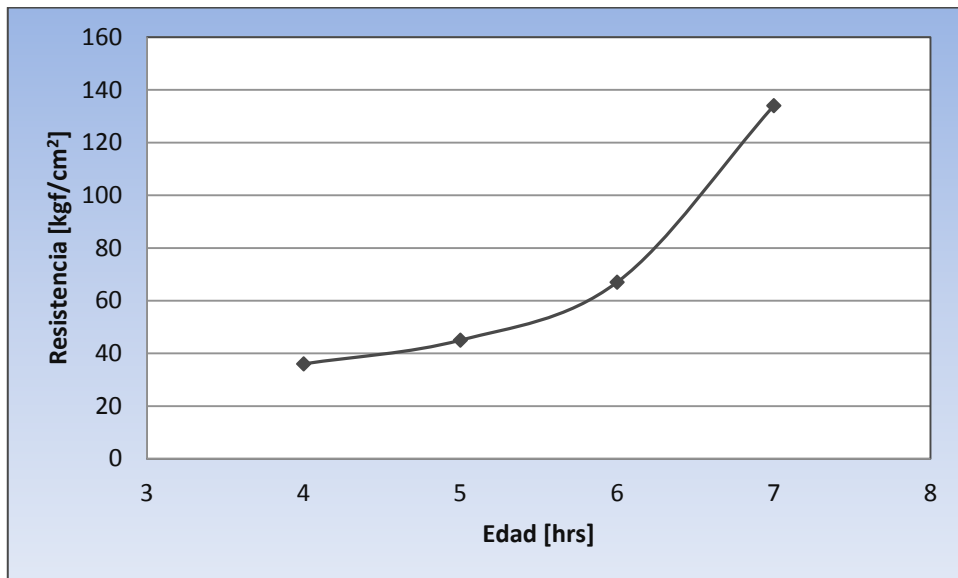


Gráfico 6.4. Curva desarrollo de resistencia a compresión Pistola Hilti.

6.3.2.3. Resultados Extremo de Viga.

- Tanda N° 1

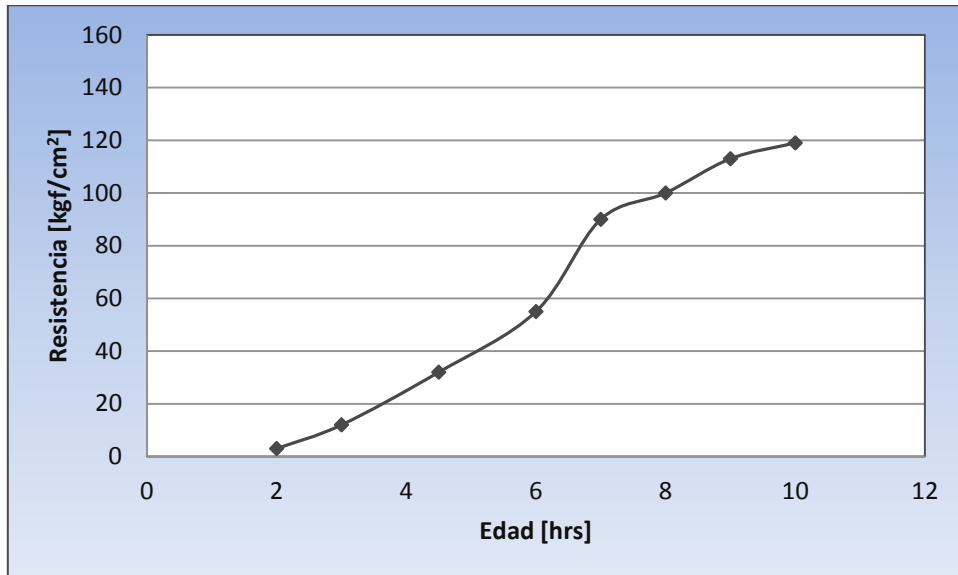


Gráfico 6.5. Curva desarrollo de resistencia a compresión Extremo de Viga.

- Tanda N° 2

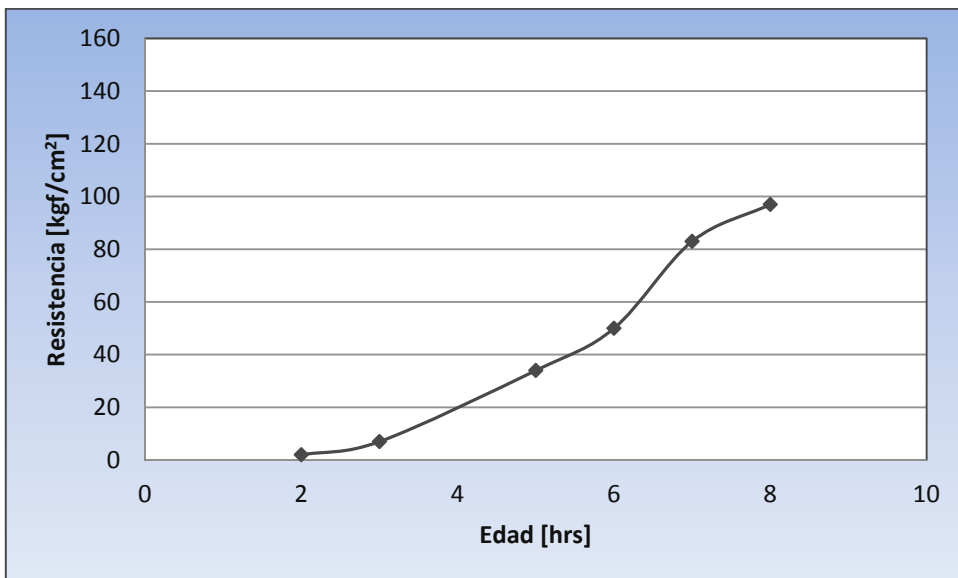


Gráfico 6.6. Curva desarrollo de resistencia a compresión Extremo de Viga.

6.3.2.4. Resultados testigos.

Los resultados que se presentan a continuación, corresponden a los resultados de resistencia corregida por esbeltez, expresada en cilindro normal de diámetro 15 [cm] y altura 30 [cm].

- Tanda N°1

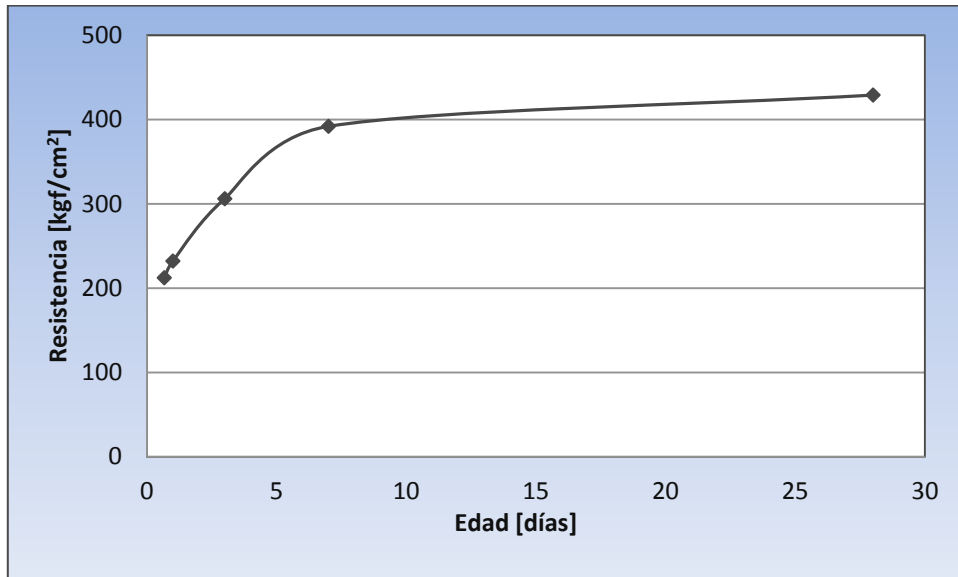


Gráfico 6.7. Curva desarrollo de resistencia a compresión testigos.

- Tanda N°2

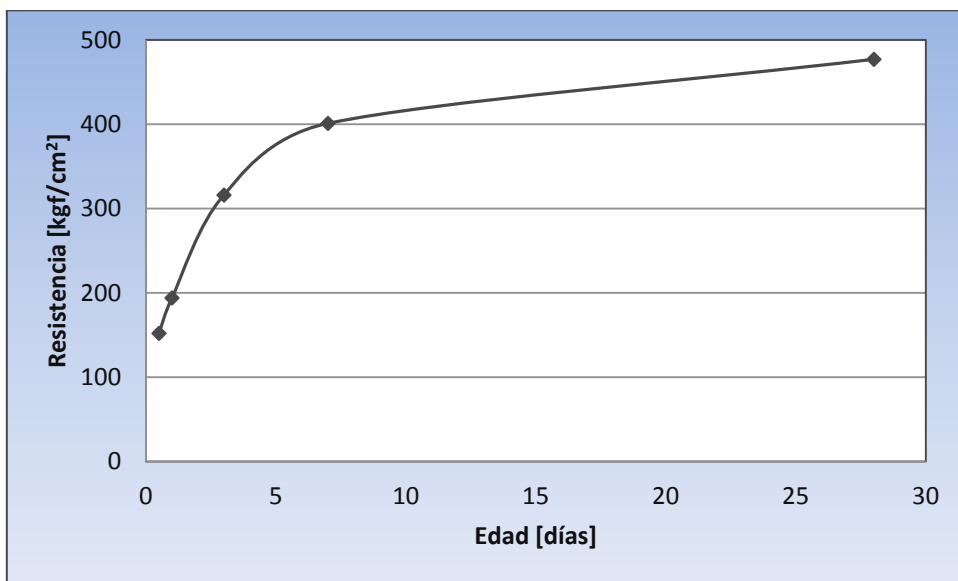


Gráfico 6.8. Curva desarrollo de resistencia a compresión testigos.

6.4. Propuesta de análisis.

Finalmente una vez que se ejecutan los ensayos, en base a los resultados obtenidos, se realizan los análisis pertinentes para el desarrollo del estudio considerando gráficos resistencia vs. tiempo, en donde se observa la tendencia de los resultados que permite ver la relación entre cada método de ensayo. Se evalúan las correlaciones con respecto a la curva de resistencia de los testigos que es utilizada como patrón, para así conseguir la información necesaria para la correcta finalización del estudio.

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de los ensayos mostrados en el capítulo 6, en busca de dar respuesta a los objetivos planteados.

Primero se aclara el resultado de algunas lecturas inconsistentes, debido a que sus valores disminuyen a edades de ensayo mayores. Esto se da en lecturas puntuales en el Penetrómetro. Cabe destacar que estas lecturas son parte de un valor, ya que para obtener la resistencia para el caso del Penetrómetro son 10 lecturas que se promedian. Esto confirma la necesidad de realizar cierta cantidad de mediciones dependiendo de cada método para luego promediar, de esta manera, se asumen estos resultados imprevistos que pueden tener su origen en distintos factores como el material, el proceso de ensayo, los equipos, el factor humano entre otros.

Con respecto a la incertidumbre que presenta el equipo en estudio de $\pm 1,3$ [kgf/cm²] (ver Anexo C), si bien es considerable y se podría contar con un equipamiento que se ajuste más a los rangos de medición, en este caso principalmente con un gato hidráulico de menor tonelaje y un manómetro de mayor precisión, se observa en base a los resultados que para los análisis no presenta un problema.

Los resultados de cada tanda de proyección se presentan en gráficos con escala logarítmica resistencia versus el tiempo (Gráficos 7.1 y 7.2), el que permite observar el desarrollo de la resistencia, utilizando la totalidad de los métodos implementados para este estudio, desde el Penetrómetro (minutos-horas), hasta los ensayos de testigos (horas-28 días) y las resistencias van en el rango de 1 [kgf/cm²] a 480 [kgf/cm²].

Se presenta en los gráficos 7.1 y 7.2 el desarrollo de resistencia a compresión para cada tanda de proyección. El análisis demuestra que los resultados del ensayo Extremo de Viga, menores a 10 [kgf/cm²] se alejan de la tendencia general que define la integración de todos los métodos de ensayo. Debido a que el valor de 10 [kgf/cm²] se obtiene en torno a las 3 horas, se puede señalar que el ensayo del Extremo de Viga ofrece resultados representativos a partir de esa edad para este estudio.

En el gráfico 7.3 se enseñan los resultados combinados, en los rangos de resistencia que tienen cada uno de los métodos de ensayos presentados para este estudio. El Penetrómetro se desplaza de 0,9 a 12 [kgf/cm²], la Pistola Hilti (40 a 140 [kgf/cm²]), el Extremo de Viga (3 a 120 [kgf/cm²]) y los testigos (150 a 480 [kgf/cm²]).

Se observa que los resultados de resistencia del ensayo Extremo de Viga desde (10 a 100 [kgf/cm²]), correspondientes aproximadamente a edades de entre (3 a 9 horas), se enmarcan dentro de la tendencia general que presentan los métodos del Penetrómetro y de los Testigos.

La Pistola Hilti registra valores del mismo orden que el de los testigos a 12 horas. Lo anterior permite señalar que para el presente estudio este método sobrestima la resistencia a compresión, debido a que los resultados obtenidos con respecto a los testigos son superiores.

Los ensayos de testigos son el medio más común y tradicional de determinar la resistencia a compresión del hormigón proyectado. Este método es conocido y probado, existen numerosas normas tanto para la extracción como para el ensayo de los testigos (en este caso se utilizó NCh 1171/1), sin embargo, estos no se pueden extraer antes de que la resistencia a compresión alcance al menos los 100 [kgf/cm²]. En relación a lo anterior su utilidad en el desarrollo de resistencias tempranas se limita a proporcionar un control en contra de los resultados obtenidos con los otros métodos en edades relativamente tardías (varias horas después de la proyección).

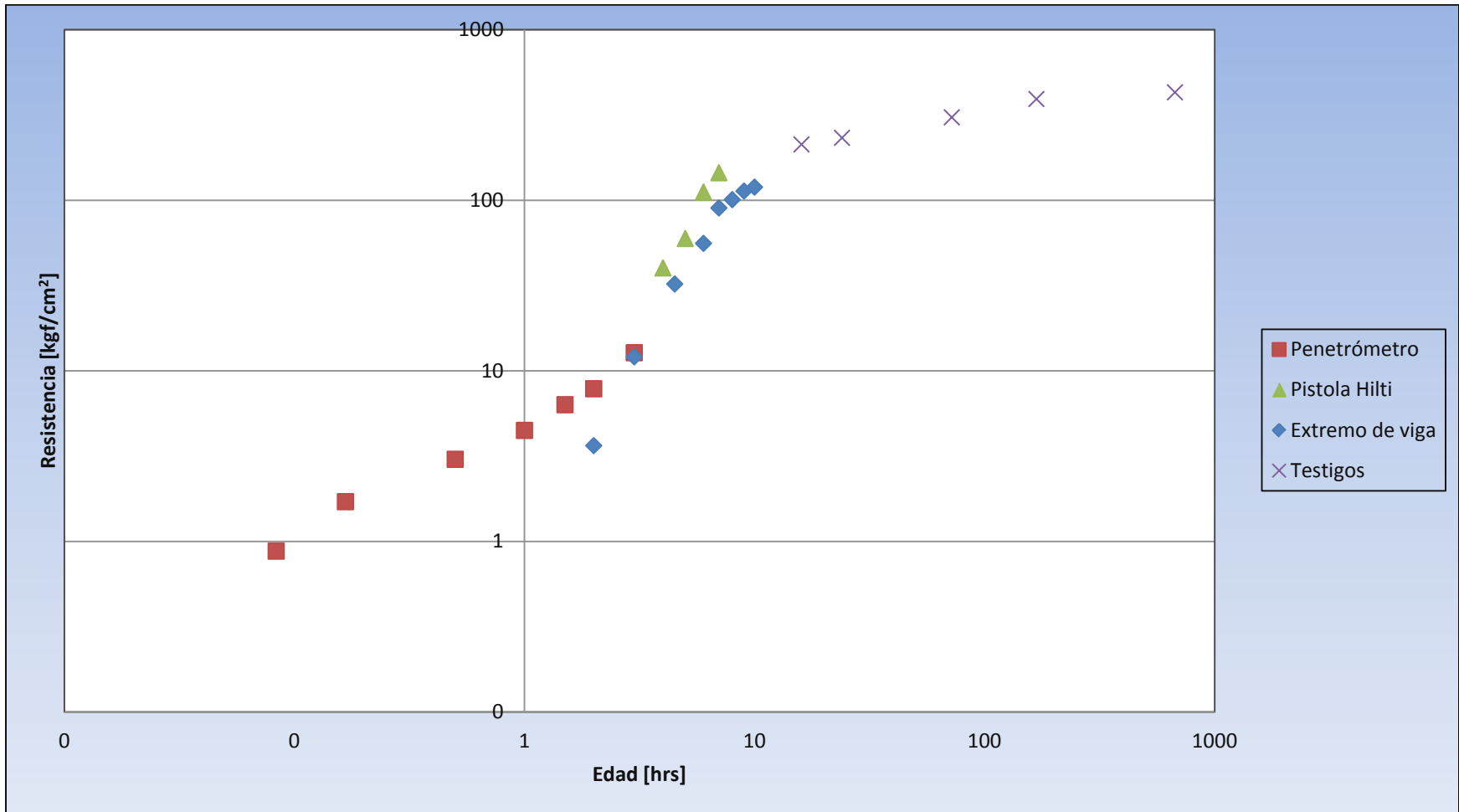


Gráfico 7.1. Desarrollo de resistencia a compresión tanda N° 1.

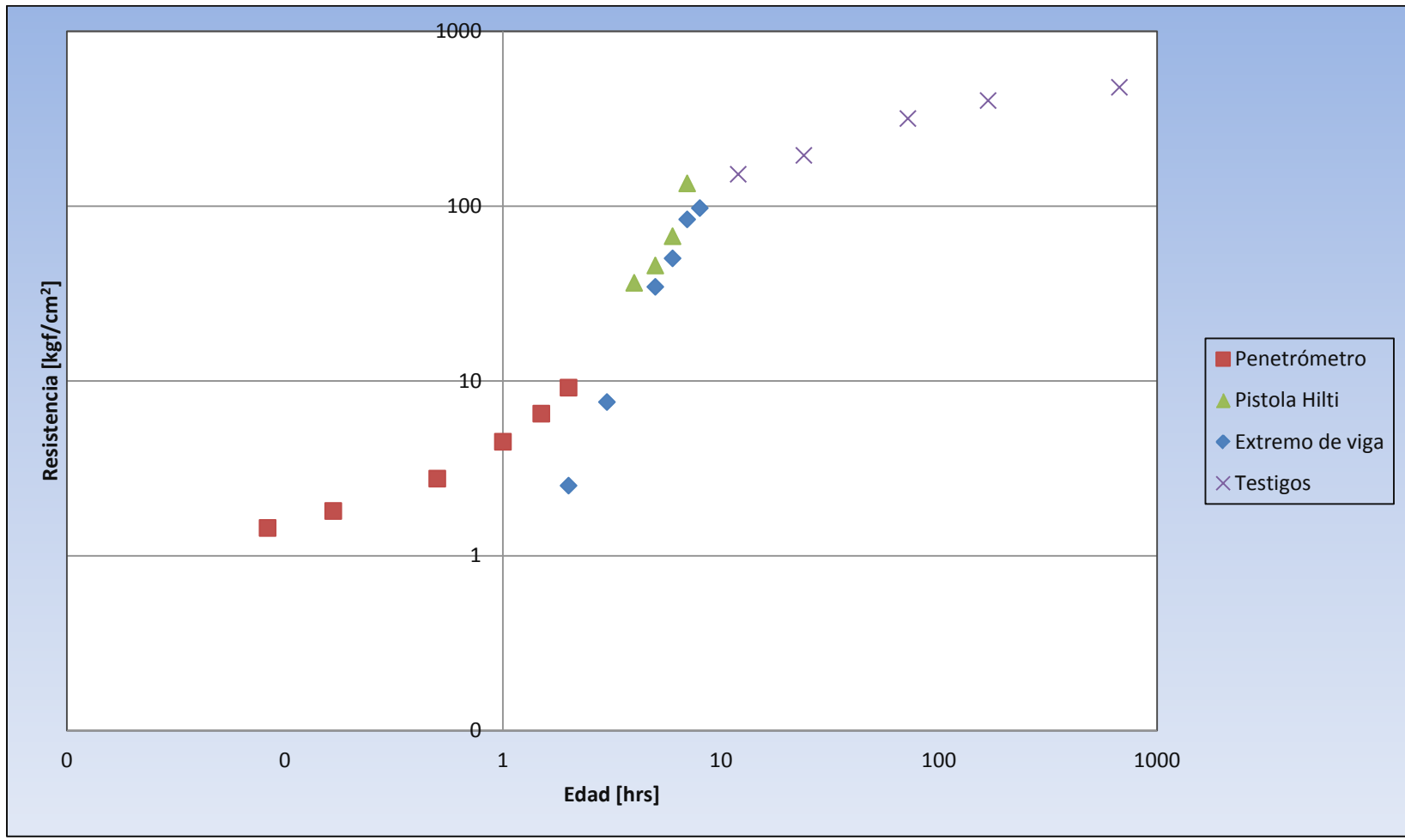


Gráfico 7.2. Desarrollo de resistencia a compresión tanda N° 2.

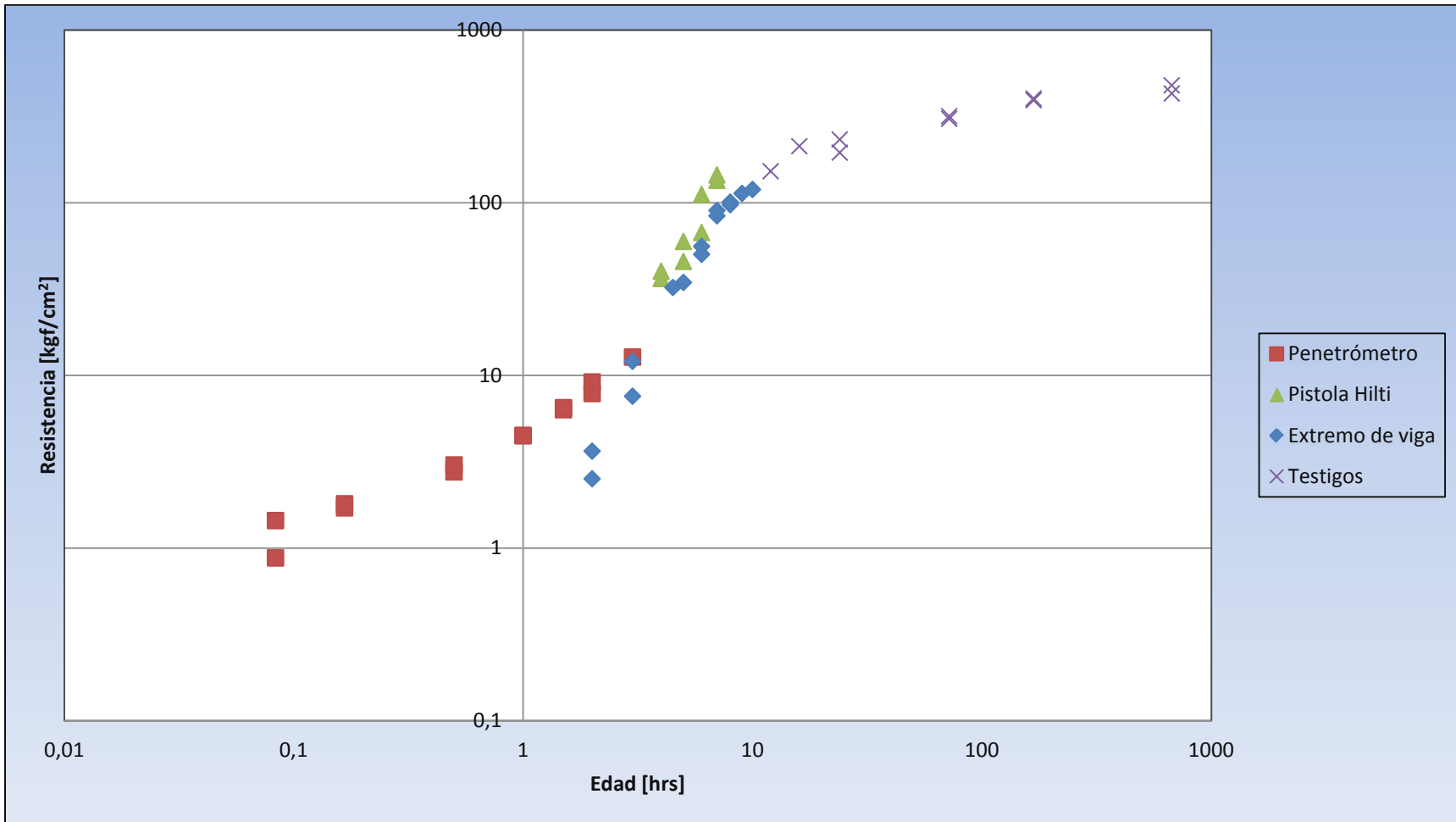


Gráfico 7.3. Desarrollo de resistencia a compresión tnda N° 1 y N° 2 combinadas.

7.1. Correlación entre resultados de ensayos en estudio.

La ejecución de las diferentes alternativas para los ensayos de resistencia a compresión ocupando la misma muestra de hormigón y las mismas edades, indican que los diversos métodos utilizados en este estudio no producen la misma estimación de resistencia. Para ayudar a identificar las correlaciones en los resultados obtenidos para los distintos instrumentos, se realizaron alrededor de 170 pruebas individuales por cada tanda de proyección. Los resultados se presentan en las siguientes correlaciones.

Tomando los valores de resistencia obtenidos mediante los 4 métodos estudiados hasta las 24 horas, se observa en el gráfico 7.4 la tendencia de resultados en donde el eje "Y" entrega la resistencia en escala logarítmica. De esto se desprende que existe una correlación entre estos métodos en los diferentes rangos de resistencia, con un factor $R^2=0,9282$. Se nota una dispersión entre las 5 y 10 horas, esto debido a la presencia de los resultados en paralelo obtenidos con la Pistola Hilti como con el Extremo de Viga, ya que presentan diferencias en las estimaciones de resistencias para una misma edad.

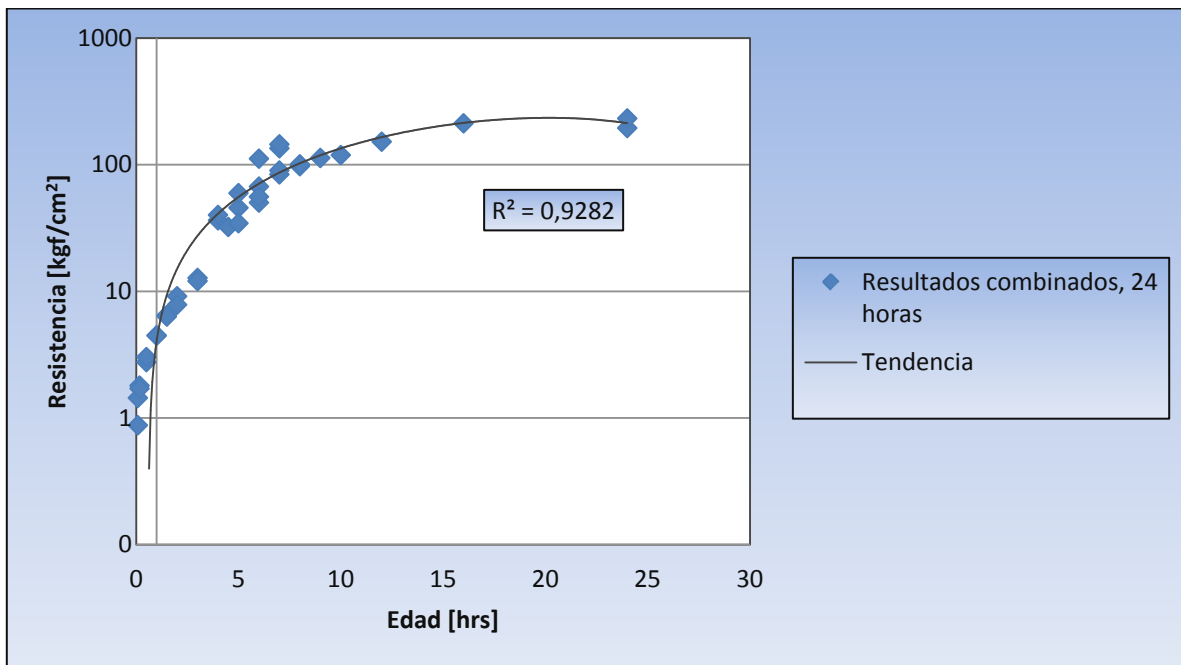


Gráfico 7.4. Tendencia de resultados combinados.

En el gráfico 7.5 se presenta la tendencia de resultados, pero sin la presencia de los valores de la Pistola Hilti. De acá se desprende en base al factor de correlación $R^2=0,9879$, que la tendencia de todos los resultados se correlaciona mejor dejando fuera este método.

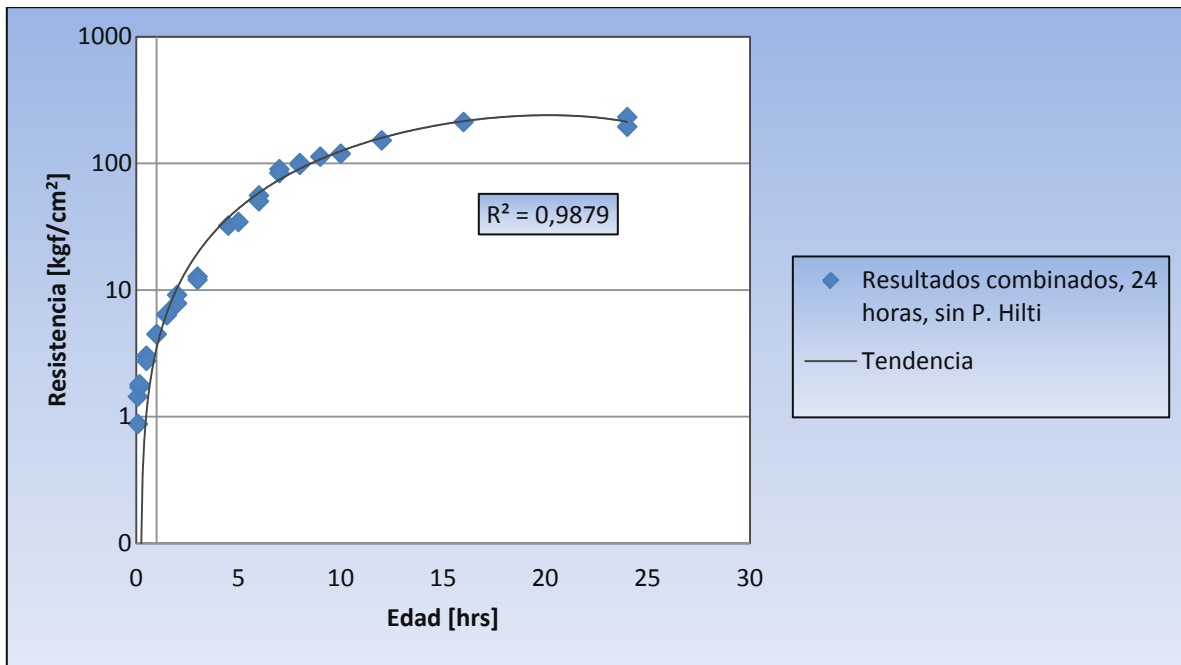


Gráfico 7.5. Tendencia de resultados combinados, sin Pistola Hilti.

Considerando la tendencia de los resultados del Extremo de Viga con respecto a los testigos dentro de las primeras 24 horas (Gráfico 7.6), que en este caso representan la resistencia real a la compresión expresada en cilindro normal de diámetro 15 [cm] y altura de 30 [cm], se observa que en comparación con la tendencia entre la Pistola Hilti y los testigos (Gráfico 7.7), la tendencia del Extremo de Viga se relaciona mejor con los testigos, prueba de esto es el coeficiente de correlación $R^2=0,9793$ para el caso del Extremo de Viga y $R^2=0,9162$ para la Pistola Hilti, lo que indica que los resultados obtenidos mediante el Extremo de Viga representarían aproximadamente el comportamiento del hormigón en ese periodo de mejor manera. Debido a esto se podrían tomar las lecturas del Extremo de Viga como una mejor opción para representar la fuerza a compresión, y de esta manera evaluar los resultados obtenidos con el Penetrómetro, corroborando lo visto anteriormente con la tendencia de resultados combinados.

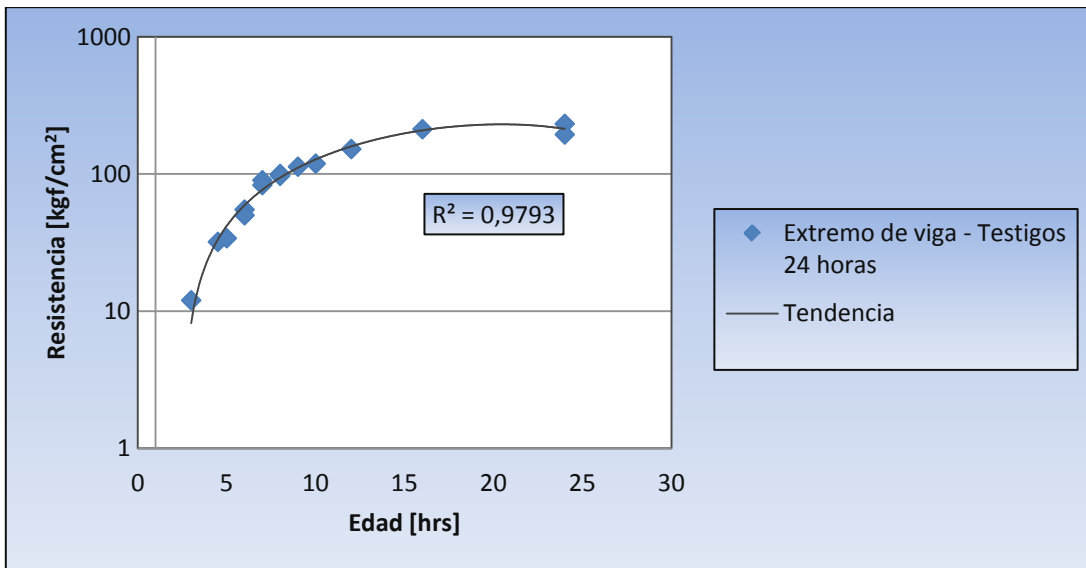


Gráfico 7.6. Tendencia resultados Extremo de Viga-Testigos 24 horas.

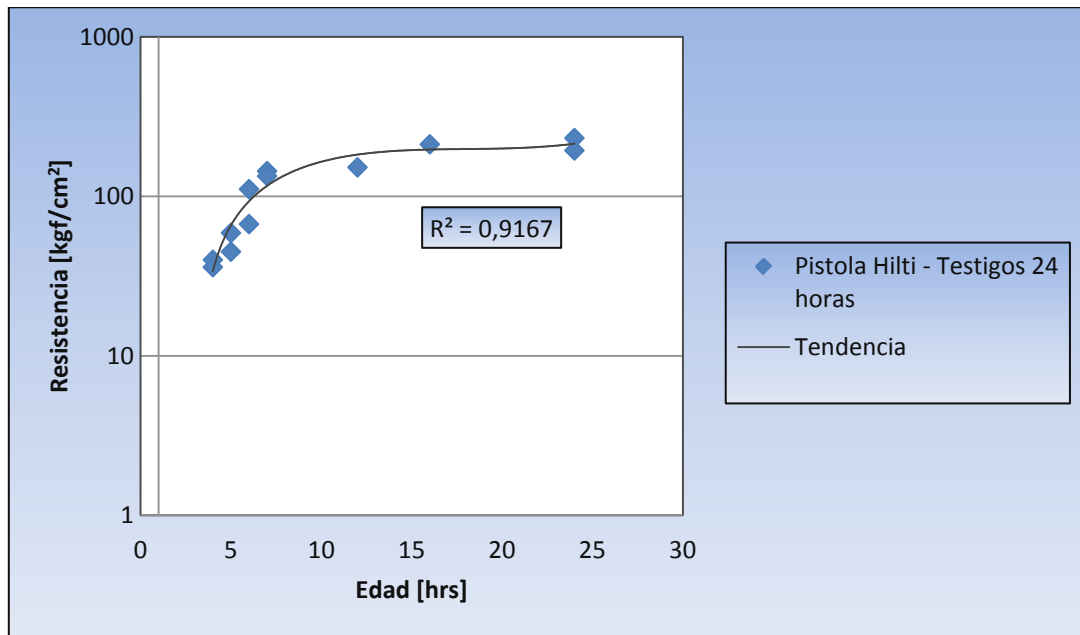


Gráfico 7.7. Tendencia resultados Pistola Hilti-Testigos 24 horas.

La tendencia de los resultados de resistencia a compresión de acuerdo con el Penetrómetro se ha representado gráficamente con los valores obtenidos usando el Extremo de Viga en el gráfico 7.8. Se observa que el factor de correlación entre ambos métodos es $R^2=0,9871$, lo que indica que los resultados obtenidos mediante el Penetrómetro presentan una correcta estimación para este estudio.

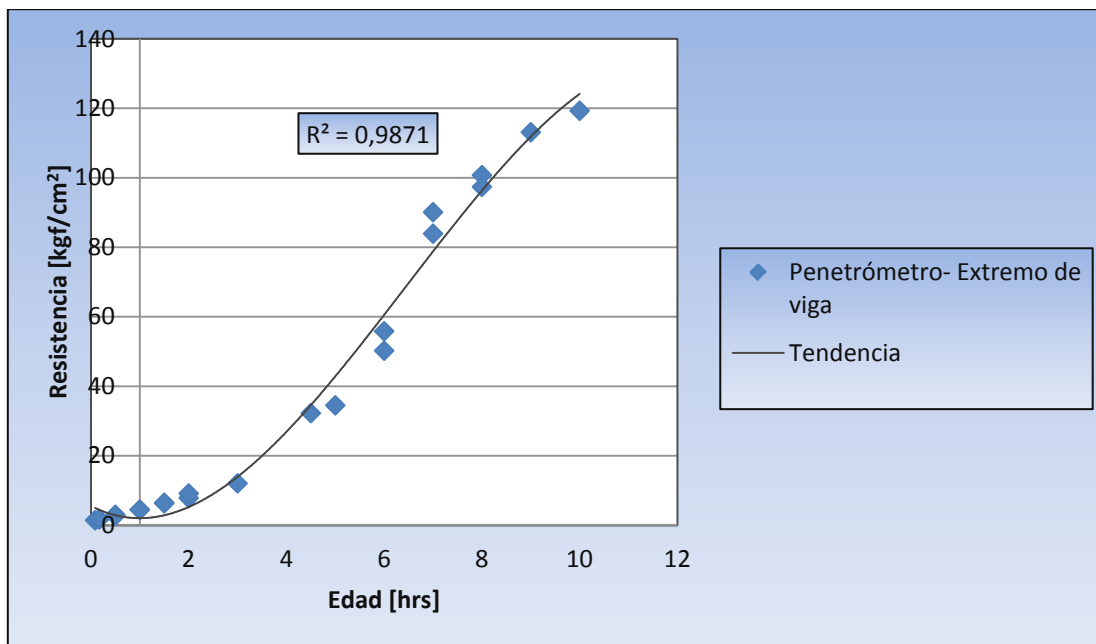


Gráfico 7.8. Tendencia resultados Penetrómetro-Extremo de Viga.

De lo anterior se desprende que en la curva del desarrollo de la resistencia a compresión tiene una gran compatibilidad entre los resultados del Penetrómetro, el Extremo de Viga y los testigos, debido a la tendencia de los resultados de resistencia entre estos métodos de ensayos. Esto hace referencia dependiendo de cada tramo de resistencia, partiendo por el Penetrómetro entre 1 y 12 [kgf/cm²], luego el Extremo de Viga entre los 10 y 120 [kgf/cm²], para finalmente terminar con los resultados presentados por los testigos.

Con respecto a la Pistola Hilti se observa una sobreestimación en los resultados con respecto a la tendencia de los testigos, lo que se podría ajustar por algún factor, aunque esto no se puede afirmar de modo categórico, ya que se necesitarían realizar un programa de ensayos en diferentes condiciones para ajustar la curva especificada por la norma Europea a la condición nacional (materiales, condiciones ambientales, etc.).

De acuerdo con los registros de las lecturas realizadas mediante el método del Extremo de Viga, se observa una baja dispersión entre lecturas lo que indica la baja variación de las medidas obtenidas por el equipo cumpliendo con la condición de repetitividad y de esta manera confirma su factibilidad para la comparación.

Es así como se puede decir que el método del Extremo de Viga presenta una buena estimación de resultados de los testigos por lo se debe continuar estudiando mediante la realización de más pruebas a gran escala para tener una gama de resultados para diferentes condiciones que validen su utilidad.

8. CONCLUSIONES

De acuerdo a lo desarrollado en los capítulos anteriores y en base a los objetivos planteados al inicio del estudio se presentan las siguientes conclusiones.

- El diseño, construcción y calibración del equipo de ensayo ocupado para el presente estudio, se realizó empleando materiales de fácil acceso (placas de acero) y equipos hidráulicos relativamente simples y de bajo costo, lo cual pone al alcance de cualquier laboratorio la fabricación de este dispositivo.

Este equipo permite evaluar las muestras de hormigón bajo los conceptos y con la coherencia de los resultados que se exigen. Tal como se ha demostrado en los capítulos anteriores, los resultados reflejan lo esperado en base a otras experiencias (ROLAND and DUDLEY, 2002 y BERNAND, 2005), las cuales se basan en la norma ASTM C 116, que hace referencia al método de ensayo para determinar la resistencia a compresión del hormigón, utilizando porciones de vigas ensayadas a flexión.

- Los datos obtenidos por el método de ensayo en estudio permiten graficar la resistencia a compresión en el tiempo y es aplicable para una amplia gama de resistencias del hormigón, es el único dispositivo que presenta la capacidad de medir la resistencia para un rango entre los 10 y los 100 [kgf/cm²], lo que en edad de ensayo dependerá de cada dosificación y principalmente del tipo y porcentaje de acelerante utilizado. De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos del Extremo de Viga, se concluye que permite obtener la resistencia a compresión en edades tempranas, corroborado con la estrecha relación que tiene la tendencia de sus resultados con los obtenidos mediante ensayos de testigos.
- En general, el hormigón proyectado con resistencia a la compresión superior a los 100 [kgf/cm²] puede ser medido con la extracción de testigos de hormigón, por lo tanto, el método de ensayo del Extremo de Viga se podría utilizar para medir resistencias más bajas, o en su defecto para cuando el acceso de los equipos de extracción de testigos no sea factible y un equipo de compresión universal no esté a disposición, que es uno de los grandes problemas que se tienen hoy en día al momento de llevar el control de calidad en las obras subterráneas o de difícil acceso, lo que permitiría grandes simplificaciones en disponibilidad de equipos y personal, lo que se

traduce en ahorro de tiempo y por ende de costos para el proyecto en el que se implemente.

- En base a la experiencia realizada en terreno y a los distintos factores que afectan en la realización del ensayo mediante este nuevo dispositivo, se concluye que es perfectamente ejecutable en cualquier condición de terreno, sin embargo, se debe tener especial cuidado en la ejecución, debido a la gran influencia que esto puede tener en los resultados, desde el momento en que se enrasa la muestra hasta la posición en la que se ubica en el dispositivo ya que una acción errónea puede ser perjudicial para los resultados que se obtendrán.
- Finalmente se concluye que el método del Extremo de Viga es adecuado para obtener estimaciones de la resistencia a compresión del hormigón proyectado en edades tempranas en un rango de resistencia entre los 10 y los 100 [kgf/cm²]. Ello implica que el nuevo método cubre por completo el rango de aplicabilidad de la Pistola Hilti, y además, que se complementa adecuadamente con la tendencia de resultados del Penetrómetro y los Testigos, cuyos rangos de aplicación, son respectivamente, inferior y superior respecto del rango de resistencia del nuevo método.

BIBLIOGRAFÍA

- BERNARD, Stefan. Early-Age Test of Fiber-Reinforced Shotcrete. Shotcrete, V. 7, No. 2, Spring 2005, pp. 16-20.
- HEERE, Roland y Morgan, Dudley. Determination of Early-Age Compressive Strength of Shotcrete, Shotcrete, V. 4, No. 2, Spring 2002, pp. 28-31.
- BERNARD, Stefan y Geltinger Christian. Determination of Early-Age Compressive Strength for FRS. Shotcrete, V. 9, No. 4, Fall 2007, pp. 22-27.
- Melbye, T. "Shotcrete para soporte de rocas". MBT International Underground Construction Group, 1994.
- Malmberg, B. "Shotcrete for rock support: a summary report on the state of the art in 15 countries", Tunnelling and Underground Space Technology, 8 (4) (1993): 441-470.
- Alberto Rey. Hormigón Proyectado, Dosificación, Fabricación y Puesta en Obra. Madrid, 2006.
- NCh1171/1.Of2001, Hormigón - Testigos de hormigón endurecido - Parte 1: Extracción y Ensayo. Chile, 2001. 15 p.
- NCh1171/2.Of2001, Hormigón - Testigos de hormigón endurecido - Parte 2: Evaluación de resultados de resistencia mecánica. Chile, 2001. 9 p.
- NCh170.Of1985, Hormigón – Requisitos generales. Chile, 1985.
- NCh1019.EOf74, Construcción – Hormigón – Determinación de la docilidad – Método del asentamiento de cono de Abrams. Chile, 1974.
- ACI. ACI 506.1R-08, Guide to Fiber-Reinforced Shotcrete, 2008.
- ACI. ACI 506R-05, Guide to shotcrete.
- ASTM C116-90 Test Method for Compressive Strength of Concrete Using Portions of Beams Broken in Flexure, 1990.
- ASTM C403/403M-08 Standard Test Method for Time of Setting of

Concrete Mixtures by Penetration Resistance, 2008.

- Norwegian Concrete Association Publication no. 7-1999 – Sprayed concrete for rock support – Technical Specification, Guidelines and Test Methods, 1999.
- CEN TC 104/wg10 t 86 test methods for sprayed concrete-part 2: Determination of compressive strength of young sprayed concrete.
- EN 14487-1 - Sprayed concrete - Part 1: Definitions, specifications and conformity, 2005.
- EFNARC, European Specification for Sprayed Concrete, 1996.
- EFNARC, European Specification for Sprayed Concrete. Guidelines for specifiers and contractors, 1999.
- Guía Austriaca de Shotcrete “Sprayed Concrete Guidline”, August 2006.

ANEXO A

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO DE ENSAYO (EXTREMO DE VIGA)

Modelo utilizado.

En base a las experiencias observadas en el extranjero se optó por utilizar el modelo que por diseño fuera más práctico de construir, para lo cual se tienen dos opciones, en la que su principal diferencia es la dirección de aplicación de la carga, en otras palabras, si se opta por cargar desde abajo o desde arriba, como se observa a continuación:



Figura A. 1. Modelo cargando de abajo. **Figura A. 2.** Modelo cargando de arriba.

De esta manera se escogió la opción de cargar desde arriba como se indica en la figura A.2, ya que facilita el trabajo de construcción del equipo por las características de los componentes que se deben fabricar.

Implementación de equipo de ensayo.

La ejecución de los ensayos del Extremo de Viga requiere un equipo especial que reúna ciertos requisitos de tamaño, resistencia de material, funcionalidad entre otros. El equipo está compuesto por 4 elementos principales, cilindro y bomba hidráulica, manómetro y marco de reacción, los que requieren una correcta implementación para el desarrollo de los ensayos. También se debe considerar la creación de los moldes, principal herramienta para poder ejecutar los ensayos.

Equipo hidráulico.

A continuación se presenta una descripción de cada elemento, destacando sus características y capacidades.

Cilindro hidráulico.

Existen varios tipos o clases de cilindros hidráulicos, entre los cuales se encuentran estos dos:

1. Cilindros hidráulicos de simple efecto: El movimiento de retorno del mismo se efectúa por un resorte, o en ocasiones por gravedad.
2. Cilindros hidráulicos de doble efecto: A través de la presión hidráulica se produce el movimiento en ambos sentidos.

En esta ocasión se utiliza un cilindro de simple efecto, el que mediante una bomba manual mueve el líquido hidráulico por medio de una manguera hidráulica, llevándolo hacia el cilindro o émbolo que se mueve para llevar a cabo distintas funciones. Estos ejercen presión en una sola dirección, liberando dicha presión cuando accionamos algún tipo de mecanismo, ya sea una palanca, llave o pulsador. Sólo disponen de una cámara, por lo general se utilizan para montar en vertical, porque el retorno se hace por la fuerza de la gravedad. En este caso, su función es generar la carga para ensayar vigas prismáticas a compresión.

En la figura A.3 se ilustra el cilindro que consta con una capacidad máxima de 10 toneladas.



Figura A. 3. Cilindro hidráulico.

Bomba hidráulica manual.

Se utiliza para accionar el cilindro hidráulico, encargándose de suministrar la presión hidráulica necesaria para que ésta herramienta funcione. Consta de dos partes:

1. Un depósito de aceite con capacidad mínima para el llenado de todo el circuito.
2. Una cámara de compresión mediante un émbolo desplazable por una fuerza manual.

Esta al ser de efecto simple tiene solo una salida y libera la presión mediante una válvula de alivio.

En la figura A.4 se muestra la bomba que consta con una capacidad máxima de 700 bares.



Figura A. 4. Gato hidráulico.

Manómetro.

El manómetro es un instrumento utilizado para la medición de la presión en los fluidos, generalmente determinando la diferencia de la presión entre el fluido y la presión local.

En la figura A.5 se observa el manómetro que tiene una capacidad de lectura máxima de 10.000 ± 100 [psi].

Básicamente registra la presión al momento en que se produce la falla de elemento en estudio.



Figura A. 5. Manómetro.

Manguera hidráulica.

La manguera es de alta presión y su misión es conducir el aceite en su ida y retorno desde la bomba al cilindro.



Figura A. 6. Manguera hidráulica.

Equipo conectado.

El cilindro, las mangueras, los acoples y la bomba deben estar correctamente conectados. Un sistema que está incorrectamente acoplado puede ocasionar que falle y probablemente también provoque daños serios. En la figura A.7 se observa el equipo completo.



Figura A. 7. Equipo hidráulico.

8.1.1.1. Configuración de sistema.

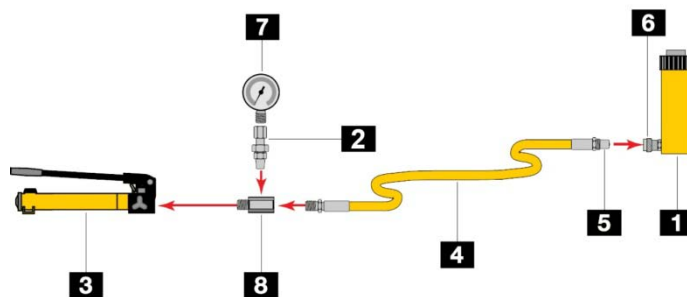


Figura A. 8. Esquema sistema hidráulico.

Descripción:

1. Cilindro, aplica fuerza hidráulica.
2. Adaptador de unión giratorio, permite el alineamiento adecuado de la

- válvulas o los manómetros.
3. Bomba, proporciona caudal hidráulico.
 4. Manguera, transporta fluido hidráulico.
 5. Conector macho, para conexión rápida de la manguera al cilindro.
 6. Conector hembra, para conexión rápida del cilindro a la manguera.
 7. Manómetro, para vigilar la presión en el circuito hidráulico.
 8. Adaptador de manómetro, para conectarlo al sistema.

Equipo mecánico.

El equipo mecánico consta principalmente de tres elementos, a los que se hace referencia a continuación, destacando sus principales características.

Marco de reacción.

Con la necesidad de crear un marco de reacción rígido se utilizó un acero calidad A36, en planchas de 2,5 [cm] de espesor, para asegurar su resistencia al momento de realizar el ensayo, el cual puede llegar a generar cargas de 9 [ton]. En la figura 4.9 se ve la estructura completa, donde se destacan principalmente sus dimensiones generales de 14,0 x 32,0 x 9,0 [cm] y con un peso de 25,3 [kg] hacen que esta estructura sea portable, una de sus características más importantes. Además se puede distinguir una variedad de zonas de ensamble para el resto del equipo que va adosado al marco.

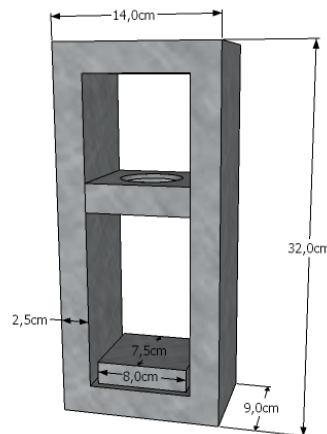


Figura A. 9. Marco de reacción.

Placa de carga y rótula.

Una característica importante que se requiere es hacer que la placa que aplica la carga al hormigón se adapte a la superficie, para que en el caso de que las caras de la viga no estén exactamente paralelas, la placa se acomode

a la superficie para lograr que la carga se aplique perpendicular a la superficie. Para esto se necesitan 2 elementos con características especiales para poder hacer ese efecto rótula que se precisa. De esta manera se optó por una placa de acero de 7,5 x 8,0 x 2,0 [cm] (Figura A.10), la cual consta con una cavidad para el acople con una cabeza semiesférica (Figura A.11), lo que provoca el efecto de rótula que es necesario (Figura A.12).

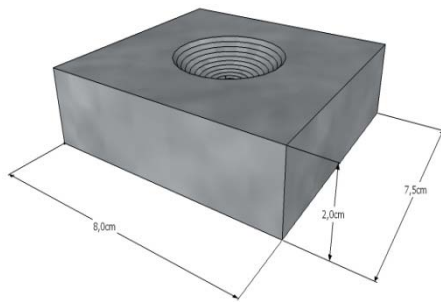


Figura A. 10. Placa de carga.

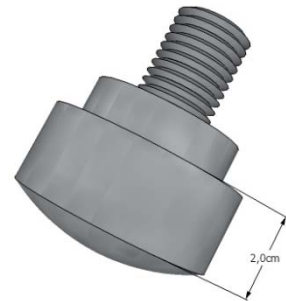


Figura A. 11. Cabeza semiesférica.

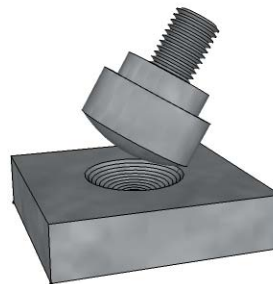


Figura A. 12. Rótula.

Soporte viga.

Otra característica del equipo es el soporte que se conecta al marco de reacción (Figuras A.13), con la función de no generar esfuerzos extras en la viga, ya que al ser una viga prismática que sólo se ensaya en una sección, provoca que el resto de la viga quede suspendida induciendo esfuerzos no deseados y para evitar esto se utiliza un soporte que sostiene la viga.

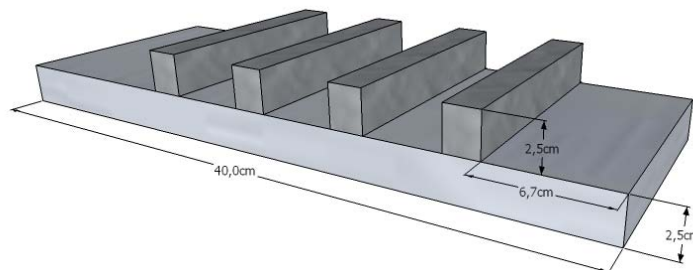


Figura A. 13. Soporte.

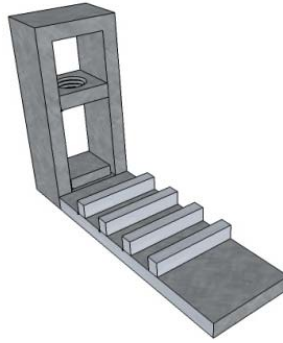


Figura A. 14. Soporte conectado a marco de reacción.

Además el soporte tiene ciertas características ya que no es continuo, siguiendo una distribución como la indicada en la figura A.15.

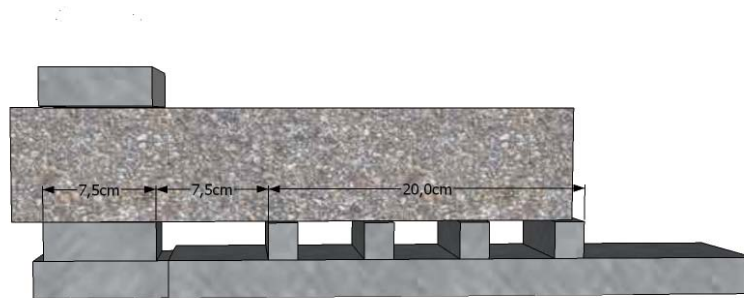


Figura A. 15. Vista en corte, esquema viga de ensayo.

En la figura A.15 se observa la viga de ensayo en donde los primeros 7,5 [cm] es la zona de ensayo, entre la placa de la base y la placa superior que pivotea, luego un espacio libre de 7,5 [cm] y finalmente un soporte de 20,0 [cm] para contener la viga completamente, la que mide 35,0 [cm] de largo. Este espacio libre tiene como función delimitar el área de ensayo, tomando sólo una sección cubica de 7,5 x 7,5 x 7,5 [cm] de la viga en cuestión.

Cabe destacar, que el soporte en si tiene un espacio libre de sólo 6,7 [cm] (Figura A.13), ya que al conectarse con el marco de reacción se completan los 7,5 [cm] de espacio libre requeridos para el equipo. Luego de este espacio se tienen 4 planchas, las cuales por un tema de diseño y economía se utilizaron para soportar el resto de la viga y no así un elemento continuo (Figura A.16).

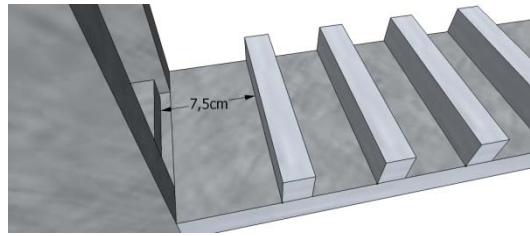


Figura A. 16. Espacio vacío entre soporte y marco.

Conexiones equipo mecánico e hidráulico.

Se tienen 2 conexiones principales:

La primera se encuentra en la parte superior del marco de reacción entre éste y el cilindro hidráulico, el cual cuenta con un hilo exterior (Figura A.17) por medio del cual se conecta al marco mediante una placa (Figura A.18), la que a su vez va adosada al marco.

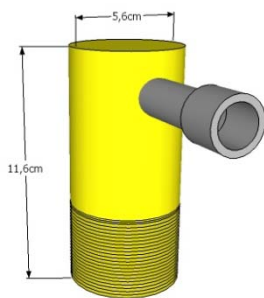


Figura A. 17. Cilindro hidráulico.

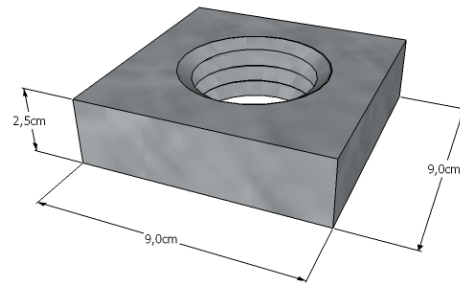


Figura A. 18. Placa de conexión.

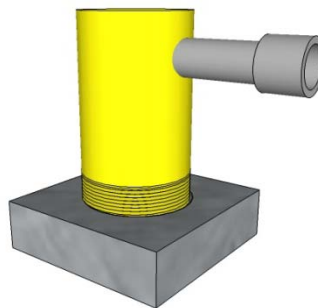


Figura A. 19. Conexión cilindro-placa.

Esta conexión es de vital importancia para el equipo ya que por medio de esta se hace la transferencia de fuerza que entrega el cilindro, por ende se debe tener especial cuidado en los puntos de transferencia de fuerzas, que en este caso se diseñó de manera tal que el hilo de conexión no recibiera la

carga, si no que fuera en la base del cilindro para mayor seguridad. La segunda conexión es entre el cilindro hidráulico y la cabeza semiesférica, por medio de un hilo interior que tiene el cilindro en donde se conecta la cabeza semiesférica como se puede ver en las figuras A.20 y A.21.



Figura A. 20. Conexión cilindro-cabeza semiesférica.

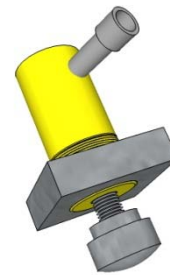


Figura A. 21. Conexión cilindro-placa-cabeza semiesférica.

A continuación se observa la distribución completa de las conexiones antes mencionadas.



Figura A. 22. Distribución de conexiones.

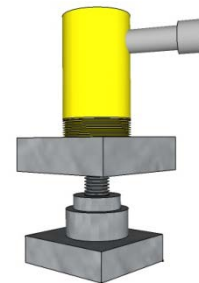


Figura A. 23. Conexión completa.

Moldes.

Para la producción de las muestras de vigas, se hacen un conjunto de tres moldes de acero montados sobre una placa de base común. Las dimensiones internas de cada molde individual son de 7,5 x 7,5 x 35,0 [cm]. Se pueden utilizar otras dimensiones si se quiere, pero por las características del método principalmente robusto, son las medidas más adecuadas. Este molde es abierto, esta ausencia de los extremos ayuda a evitar que el rebote quede atrapado en el interior del molde. A continuación se puede observar un molde tipo, hecho para el estudio.

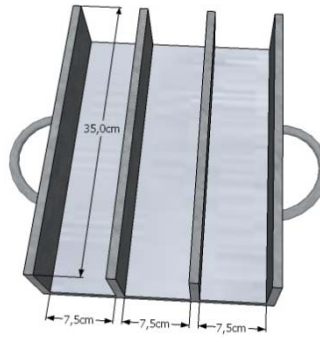


Figura A. 24. Molde viga.

Calibración equipo.

La calibración del equipo se llevó a cabo en el laboratorio de estructuras de IDIEM, utilizando una celda de carga que consiste en un transductor que es utilizado para convertir una fuerza en una señal eléctrica. Esta conversión es indirecta y se realiza en dos etapas. Mediante un dispositivo mecánico, la fuerza que se desea medir deforma una galga extensiométrica (strain gage) y esta convierte el desplazamiento o deformación en señales eléctricas. De esta manera, se realizaron las mediciones en base a la lectura del manómetro del gato hidráulico con lo cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla A. 1. Resultados calibración.

Lectura Manómetro [psi]	Carga [kgf]
1.000	1.033
2.000	2.029
3.000	3.007
4.000	3.999
5.000	5.015
6.000	5.977
7.000	6.962
8.000	7.976

Así se graficó la carga entregada por la celda que consistió en tres lecturas de la cual se tomó el promedio vs. la lectura del manómetro, como se puede ver a continuación:

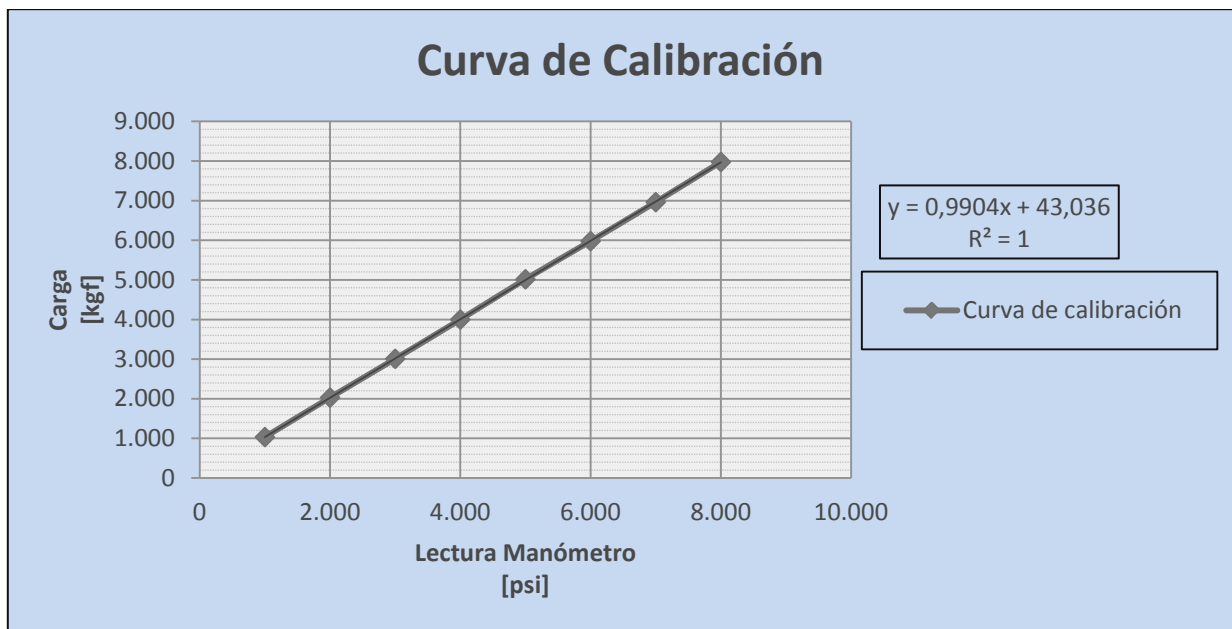


Gráfico A. 1. Curva de calibración.

De la curva se definieron las lecturas del manómetro expresadas en la carga real que se está ejecutando, en base a la siguiente ecuación:

$$y = 0,9904x + 43,036$$

En donde "x" es la lectura del manómetro en [psi] e "y" la carga real de compresión que entrega el equipo en [kgf].

A continuación se presentan los resultados del error e incertidumbre de cada lectura realizada en la calibración del manómetro:

Tabla A. 2. Error e incertidumbre

Lectura Manómetro [psi]	Lectura Patrón [kN]	Lectura Ajustada [kN]	Error Ajuste [%]	Incertidumbre Expandida, k=2 [%]
1.000	10,1	10,1	-0,06	0,72
2.000	19,9	19,8	0,24	0,72
3.000	29,5	29,6	-0,22	0,72
4.000	39,2	39,3	-0,13	0,72
5.000	49,2	49,0	0,40	0,72
6.000	58,6	58,7	-0,14	0,72
7.000	68,3	68,4	-0,19	0,72
8.000	78,2	78,1	0,12	0,72

En base a lo anterior, se calculó la incertidumbre asociada a la medición de la resistencia a compresión, la cual caracteriza la dispersión de los valores obtenidos. El cálculo se detalla en el Anexo C. En la tabla a continuación se muestra un resumen:

Tabla A. 3. Resumen calculo incertidumbre.

Lectura Manómetro [psi]	Carga [kgf]	Resistencia Rc [kgf/cm ²]	Incertidumbre [kgf/cm ²]	Rango de resistencia [kgf/cm ²]	
1.000	1.033	18,4	1,296362366	17,1	19,7
2.000	2.029	36,1	1,296361985	34,8	37,4
3.000	3.007	53,5	1,296407032	52,2	54,8
4.000	3.999	71,1	1,296445653	69,8	72,4
5.000	5.015	89,2	1,296494015	87,9	90,5
6.000	5.977	106,3	1,296555781	105,0	107,6
7.000	6.962	123,8	1,296627059	122,5	125,1
8.000	7.976	141,8	1,296708664	140,5	143,1

La incertidumbre está presente en todos los aspectos de la metrología. Esto, por las circunstancias o condiciones que rodean a la medición. En este caso debido a la resolución de los instrumentos utilizados, el error asociado, la incertidumbre expandida y el proceso de medición se tiene que el intervalo o rango de valores posibles en la medición de la resistencia a compresión mediante el equipo en estudio es de aproximadamente $\pm 1,3$ [kgf/cm²].

Esquema general del dispositivo.

En la figura a continuación se observa un esquema del equipo completo, construido para el estudio.

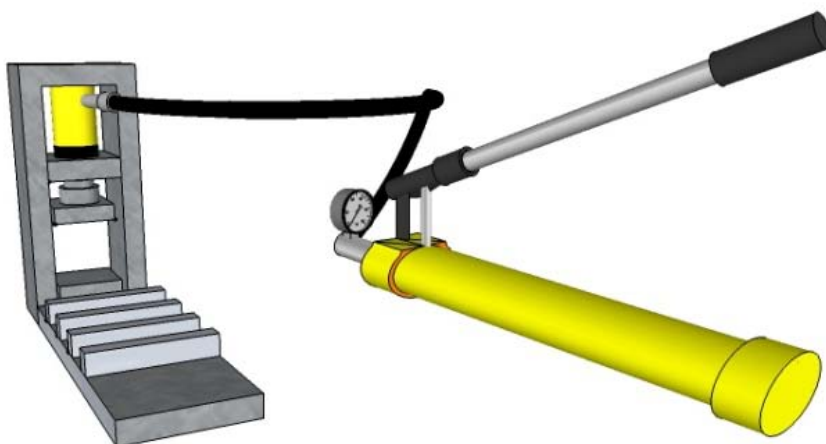


Figura 4.1. Esquema dispositivo.

ANEXO B

TABLAS DE RESULTADOS DE ENSAYOS

Resultados Penetrómetro

Tabla B. 1. Resultado Penetrómetro, tanda N° 1.

Tiempo [min]	5	10	30	60	90	120	180
Lectura N°	Resistencia a la Penetración [dN]						
1	7	11	12	24	43	55	87
2	5	6	13	32	39	53	88
3	9	8	21	40	51	56	81
4	5	8	22	35	38	46	88
5	2	8	20	31	42	45	63
6	3	10	17	27	32	46	90
7	7	10	16	22	34	43	92
8	6	15	17	19	34	57	71
9	3	14	24	17	37	50	65
10	5	15	27	34	49	45	84
Promedio	5,2	10,5	18,9	28,1	39,9	49,6	80,9
Resistencia a compresión [kgf/cm ²]	0,88	1,71	3,03	4,47	6,32	7,85	12,76

Tabla B. 2. Resultado Penetrómetro, tanda N° 2.

Tiempo [min]	5	10	30	60	90	120
Lectura N°	Resistencia a la Penetración [dN]					
1	9	14	16	29	33	63
2	9	9	16	29	33	62
3	11	8	14	24	43	49
4	6	12	11	25	45	55
5	7	7	14	22	42	58
6	7	12	18	26	39	62
7	9	14	20	30	45	57
8	9	14	17	36	42	61
9	8	10	21	33	44	55
10	13	11	25	28	44	57
Promedio	8,8	11,1	17,2	28,2	41	57,9
Resistencia a compresión [kgf/cm ²]	1,44	1,80	2,76	4,49	6,50	9,15

Resultados Pistola Hilti

- Tanda N° 1

Tabla B. 3. Resultados Pistola Hilti 4 horas.

Edad	4	[horas]	Longitud clavo		103	[mm]
Lectura	Distancia Libre	Penetración	Carga	Nu/h _{nom}	Resistencia	Resistencia a
	NVS		h _{nom}		Arranque	a la
	[mm]	[mm]	Nuc	[N/mm]	Compresión	Compresión
			[N]		[N/mm ²]	[kgf/cm ²]
1	10	93	2600	27,957	3,987	40,663
2	12	91	2400	26,374	3,781	38,563
3	17	86	2000	23,256	3,375	34,428
4	17	86	2400	27,907	3,980	40,597
5	15	88	2300	26,136	3,750	38,248
6	21	82	2500	30,488	4,316	44,020
7	19	84	2200	26,190	3,757	38,320
8	22	81	2300	28,395	4,044	41,244
9	18	85	2700	31,765	4,482	45,714
10	14	89	2400	26,966	3,858	39,349
Promedio						40,115

Tabla B. 4. Resultados Pistola Hilti 5 horas.

Edad	5	[horas]	Longitud clavo		60	[mm]
Lectura	Distancia Libre	Penetración	Carga	Nu/h _{nom}	Resistencia	Resistencia a
	NVS		h _{nom}		Arranque	a la
	[mm]	[mm]	Nuc	[N/mm]	Compresión	Compresión
			[N]		[N/mm ²]	[kgf/cm ²]
1	9	51	1900	37,255	5,196	52,996
2	8	52	2100	40,385	5,603	57,147
3	8	52	1800	34,615	4,852	49,495
4	10	50	1600	32,000	4,512	46,026
5	13	47	2000	42,553	5,885	60,024
6	15	45	1900	42,222	5,842	59,585
7	15	45	1300	28,889	4,108	41,899
8	16	44	2200	50,000	6,853	69,901
9	13	47	2600	55,319	7,545	76,956
10	18	42	2500	59,524	8,092	82,534
Promedio						59,656

Tabla B. 5. Resultados Pistola Hilti 6 horas.

Edad	6	[horas]	Longitud clavo		60	[mm]
Lectura	Distancia Libre	Penetración	Carga	Nu/h _{nom}	Resistencia a la Compresión	Resistencia a la Compresión
	NVS		Arranque			
	[mm]	h _{nom}	[N]	[N/mm]	[N/mm ²]	[kgf/cm ²]
1	20	40	2800	70,000	9,454	96,429
2	22	38	3000	78,947	10,617	108,297
3	24	36	3400	94,444	12,633	128,852
4	23	37	3500	94,595	12,652	129,051
5	22	38	2900	76,316	10,275	104,806
6	25	35	3400	97,143	12,983	132,431
7	22	38	3600	94,737	12,671	129,240
8	21	39	2300	58,974	8,020	81,805
9	22	38	3000	78,947	10,617	108,297
10	19	41	2900	70,732	9,549	97,400
Promedio						111,661

Tabla B. 6. Resultados Pistola Hilti 7 horas.

Edad	7	[horas]	Longitud clavo		60	[mm]
Lectura	Distancia Libre	Penetración	Carga	Nu/h _{nom}	Resistencia a la Compresión	Resistencia a la Compresión
	NVS		Arranque			
	[mm]	h _{nom}	[N]	[N/mm]	[N/mm ²]	[kgf/cm ²]
1	22	38	3000	78,947	10,617	108,297
2	25	35	2800	80,000	10,754	109,693
3	28	32	3000	93,750	12,542	127,931
4	29	31	3000	96,774	12,936	131,942
5	28	32	3200	100,000	13,355	136,221
6	29	31	4000	129,032	17,130	174,729
7	26	34	3400	100,000	13,355	136,221
8	27	33	4200	127,273	16,902	172,396
9	29	31	3600	116,129	15,452	157,615
10	28	32	4600	143,750	19,044	194,251
Promedio						144,930

- Tanda N° 2

Tabla B. 7. Resultados Pistola Hilti 4 horas.

Edad	4	[horas]	Longitud clavo		103	[mm]
Lectura	Distancia Libre NVS [mm]	Penetración h_{nom} [mm]	Carga Arranque Nuc [N]	Nu/h_{nom} [N/mm]	Resistencia a la Compresión [N/mm ²]	Resistencia a la Compresión [kgf/cm ²]
1	16	87	2300	26,437	3,789	38,647
2	15	88	2000	22,727	3,307	33,727
3	19	84	2200	26,190	3,757	38,320
4	17	86	2100	24,419	3,526	35,970
5	15	88	2100	23,864	3,454	35,234
6	18	85	2200	25,882	3,717	37,912
7	21	82	2000	24,390	3,523	35,932
8	18	85	1800	21,176	3,105	31,670
9	18	85	2400	28,235	4,023	41,033
10	16	87	2100	24,138	3,490	35,598
Promedio						36,404

Tabla B. 8. Resultados Pistola Hilti 5 horas.

Edad	5	[horas]	Longitud clavo		80	[mm]
Lectura	Distancia Libre NVS [mm]	Penetración h_{nom} [mm]	Carga Arranque Nuc [N]	Nu/h_{nom} [N/mm]	Resistencia a la Compresión [N/mm ²]	Resistencia a la Compresión [kgf/cm ²]
1	18	62	1800	29,032	4,126	42,090
2	25	55	2200	40,000	5,553	56,637
3	22	58	2100	36,207	5,059	51,606
4	24	56	1800	32,143	4,531	46,215
5	17	63	1600	25,397	3,654	37,268
6	28	52	1700	32,692	4,602	46,944
7	25	55	1500	27,273	3,898	39,756
8	23	57	1800	31,579	4,458	45,468
9	19	61	1900	31,148	4,402	44,895
10	18	62	2000	32,258	4,546	46,368
Promedio						45,725

Tabla B. 9. Resultados Pistola Hilti 6 horas.

Edad	6	[horas]	Longitud clavo		80	[mm]
Lectura	Distancia Libre	Penetración	Carga	Nu/h _{nom}	Resistencia a la Compresión	Resistencia a la Compresión
	NVS		h _{nom}			
	[mm]	[mm]	[N]	[N/mm]	[N/mm ²]	[kgf/cm ²]
1	25	55	2600	47,273	6,498	66,284
2	29	51	2800	54,902	7,491	76,403
3	28	52	2500	48,077	6,603	67,350
4	29	51	2200	43,137	5,961	60,798
5	26	54	2400	44,444	6,131	62,532
6	29	51	2200	43,137	5,961	60,798
7	27	53	2600	49,057	6,730	68,650
8	27	53	2800	52,830	7,221	73,655
9	28	52	2400	46,154	6,353	64,800
10	25	55	2800	50,909	6,971	71,107
Promedio						67,238

Tabla B. 10. Resultados Pistola Hilti 7 horas.

Edad	7	[horas]	Longitud clavo		60	[mm]
Lectura	Distancia Libre	Penetración	Carga	Nu/h _{nom}	Resistencia a la Compresión	Resistencia a la Compresión
	NVS		h _{nom}			
	[mm]	[mm]	[N]	[N/mm]	[N/mm ²]	[kgf/cm ²]
1	23	37	3400	91,892	12,301	125,466
2	26	34	2900	85,294	11,443	116,715
3	22	38	3800	100,000	13,355	136,221
4	29	31	3200	103,226	13,774	140,500
5	27	33	3600	109,091	14,537	148,279
6	26	34	2800	82,353	11,060	112,814
7	28	32	3400	106,250	14,168	144,511
8	27	33	3900	118,182	15,719	160,337
9	28	32	2800	87,500	11,730	119,641
10	26	34	3600	105,882	14,120	144,023
Promedio						134,851

Resultados Extremo de Viga

Tabla B. 11. Resultados Extremo de Viga, tanda N° 1.

Viga	Sector	Manómetro [psi]	Carga [kgf]	Resistencia [kgf/cm ²]	Promedio [kgf/cm ²]	Edad [hr]
1	1	140	173	3	4	2
	2	236	268	5		
	3	140	173	3		
2	1	717	742	13	12	3
	2	524	552	10		
	3	717	742	13		
3	1	1485	1499	27	32	4,5
	2	2061	2068	37		
	3	1869	1878	33		
4	1	3214	3205	57	56	6
	2	3022	3015	54		
	3	3214	3205	57		
5	1	5135	5099	91	90	7
	2	4943	4910	87		
	3	5231	5194	92		
6	1	5904	5857	104	101	8
	2	5520	5478	97		
	3	5712	5668	101		
7	1	6480	6426	114	113	9
	2	6288	6236	111		
	3	6480	6426	114		
8	1	6864	6805	121	119	10
	2	6768	6710	119		
	3	6672	6615	118		

Tabla B. 12. Resultados Extremo de Viga, tanda N° 2.

Viga	Sector	Manómetro [psi]	Carga [kgf]	Resistencia [kgf/cm ²]	Promedio [kgf/cm ²]	Edad [hr]
1	1	140	173	3	3	2
	2	44	78	1		
	3	140	173	3		
2	1	428	457	8	8	3
	2	236	268	5		
	3	524	552	10		
3	1	1773	1784	32	35	5
	2	2157	2163	38		
	3	1869	1878	33		
4	1	2830	2826	50	50	6
	2	3022	3015	54		
	3	2638	2636	47		
5	1	4655	4626	82	84	7
	2	5039	5005	89		
	3	4559	4531	81		
6	1	5520	5478	97	97	8
	2	5327	5289	94		
	3	5712	5668	101		

Resultados Testigos

Tabla B. 13. Resultados Testigos, tanda N° 1.

Testigos	Edad [hr]	DIÁMETRO	ALTURA	ESBELTEZ	CARGA	RESISTENCIA A COMPRESIÓN		
		TESTIGO (cm)	ENSAYO (cm)		MÁXIMA (kgf)	(a) (kgf/cm ²)	(b) (kgf/cm ²)	(c) (kgf/cm ²)
1	16	10,4	10,7	1,03	20.078	236	208	258
2		10,4	10,7	1,03	20.945	247	217	267
3	24	10,4	10,9	1,05	21.455	253	224	274
4		10,4	10,9	1,05	21.904	258	228	278
5		10,4	10,9	1,05	23.484	276	245	295
6	72	10,3	11,2	1,09	29.001	348	312	362
7		10,3	11,2	1,09	29.623	356	319	369
8		10,3	11,3	1,10	28.491	342	307	357
9		10,3	10,8	1,05	26.971	324	287	337
10	168	10,3	11,4	1,11	37.729	453	408	458
11		10,3	11,9	1,16	37.628	452	412	462
12		10,3	12,0	1,17	33.243	399	365	415
13		10,3	11,8	1,15	35.078	421	383	433
14	672	10,4	10,6	1,02	41.197	485	425	475
15		10,4	10,4	1,00	42.012	495	430	480
16		10,4	10,5	1,01	44.460	523	457	507
17		10,4	10,6	1,02	39.157	461	404	454

Tabla B. 14. Resultados Testigos, tanda N° 2.

Testigos	Edad [hr]	DIÁMETRO	ALTURA	ESBELTEZ	CARGA	RESISTENCIA A COMPRESIÓN		
		TESTIGO (cm)	ENSAYO (cm)		MÁXIMA (kgf)	(a) (kgf/cm ²)	(b) (kgf/cm ²)	(c) (kgf/cm ²)
1	12	10,4	10,7	1,03	14.337	169	148	186
2		10,4	10,7	1,03	14.225	167	147	184
3		10,4	10,7	1,03	15.510	183	161	201
4	24	10,4	10,7	1,03	19.436	229	201	251
5		10,4	11,0	1,06	18.447	217	193	241
6		10,4	11,0	1,06	18.273	215	191	239
7	72	10,3	11,1	1,08	31.122	374	334	384
8		10,3	11,4	1,11	30.734	369	332	382
9		10,3	11,4	1,11	26.931	323	291	341
10		10,3	11,2	1,09	28.807	346	310	360
11	168	10,3	11,6	1,13	41.808	502	454	504
12		10,2	11,7	1,15	34.262	419	382	432
13		10,3	11,1	1,08	34.059	409	365	415
14		10,3	11,9	1,16	36.914	443	404	454
15	672	10,4	10,4	1,00	48.131	567	493	543
16		10,4	10,8	1,04	47.723	562	496	546
17		10,4	10,4	1,00	48.029	565	492	542
18		10,4	10,4	1,00	42.114	496	431	481

(a) Resistencia de la probeta a la edad de ensayo, expresada como tensión de rotura

(b) Resistencia corregida por esbeltez, expresada en cilindro normal de diámetro 15 cm y altura 30 cm.

(c) Resistencia transformada a cubo normal de arista 20 cm.

ANEXO C

CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE

Incertidumbre

La incertidumbre de medida es un parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente atribuirse a la magnitud sujeta a medición que en este caso es la resistencia a compresión (kgf/cm²).

La expresión de la resistencia a la compresión es:

$$R_c = \frac{P}{S}$$

En donde:

R_c: Resistencia a la compresión, kgf/cm².

P: Carga máxima de la probeta, kgf.

S: Sección de ensayo, cm².

Para esto, de acuerdo a los certificados de calibración se tiene la siguiente información tanto del manómetro con el que se obtiene la carga como del pie de metro con el que se entregan las dimensiones para obtener la sección:

Tabla C. 1. Error e incertidumbre manómetro.

Lectura Manómetro [psi]	Lectura Patrón [kN]	Lectura Ajustada [kN]	Error Ajuste [%]	Incertidumbre Expandida, k=2 [%]
1.000	10,1	10,1	-0,06	0,72
2.000	19,9	19,8	0,24	0,72
3.000	29,5	29,6	-0,22	0,72
4.000	39,2	39,3	-0,13	0,72
5.000	49,2	49,0	0,40	0,72
6.000	58,6	58,7	-0,14	0,72
7.000	68,3	68,4	-0,19	0,72
8.000	78,2	78,1	0,12	0,72

Tabla C. 2. Error e incertidumbre pie de metro.

Valor Nominal [mm]	Valor Patrón [mm]	Valor Calibrado [mm]	Error Ajuste [mm]	Incertidumbre Expandida, k=2 [mm]
75	75,00	0,00	0,00	0,01

Desarrollo calculo incertidumbre:

$$R_c = \frac{P}{S}$$

$$S = A \times L$$

Donde:

A: Ancho de la probeta.

L: Largo de la probeta.

En este caso las dimensiones de la probeta, indican que: $A=L$

$$S = A^2 \rightarrow R_c = \frac{P}{A^2}$$

Factor de sensibilidad incertidumbre manómetro:

$$C_P = \frac{d_{Rc}}{d_p} = \frac{1}{S} = \frac{1}{A^2} = \frac{1}{(75 - 0)^2} = 0,000178 [mm^2]^{-1}$$

Incertidumbre combinada manómetro:

$$u_{analogo} = \frac{resolución}{\sqrt{3}} = \frac{0,1[kN]}{\sqrt{3}} = 0,05773503[kN]$$

$$u_{instrumento} = \frac{Incertidumbre}{2} = 0,36[kN]$$

$$u_P = \sqrt{u_{analogo}^2 + u_{instrumento}^2} = 0,36460024[kN]$$

Factor de sensibilidad incertidumbre pie de metro:

$$C_S = \frac{d_{Rc}}{d_S} = -\frac{P}{S^2} = -\frac{(10,1 + 0,06)}{((75 - 0,0)^2)^2} = -3,21106 \times 10^{-7} \left[\frac{kN}{mm^4}\right]$$

Incertidumbre combinada pie de metro:

Como, $S = A \times L$

$$C_A = \frac{d_S}{d_A} = L \quad y \quad C_L = \frac{d_S}{d_L} = A$$

Para este caso $A = L \rightarrow C_A = C_L = 75 - 0,0 = 75[mm]$

$$u_{\text{digital}} = \frac{0,5 \times dms}{\sqrt{3}} = \frac{0,5 \times 0,01}{\sqrt{3}} = 0,00289[\text{mm}]$$

Donde dms es el dígito menos significativo.

$$u_{\text{instrumento}} = \frac{\text{Incertidumbre}}{2} = \frac{0,01}{2} = 0,005[\text{mm}]$$

$$u_A = u_L = \sqrt{u_{\text{digital}}^2 + u_{\text{instrumento}}^2} = 0,005774[\text{mm}]$$

$$u_S = \sqrt{(u_A \times C_A)^2 + (u_L \times C_L)^2} = \pm 0,612372[\text{mm}]$$

Incertidumbres combinadas:

$$u = \pm \sqrt{(u_P \times C_P)^2 + (u_S \times C_S)^2} = \pm 6,4818 \times 10^{-5} \left[\frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \right]$$

Incertidumbre expandida:

$$U = \pm (k \times u) = 2 \times \pm 6,4818 \times 10^{-5} = \pm 0,0012964 \left[\frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \right]$$

Los resultados de la resistencia a compresión se entregan con aproximación a 1 kgf/cm², así que, el valor de la incertidumbre se debe transformar a la unidad correspondiente, así obtendremos:

$$\begin{aligned} 1 \text{ kN} &= 100 \text{ kgf} \\ 1 \text{ cm}^2 &= 100 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$U = \pm 0,0012964 \left[\frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \right] \times \frac{100[\text{kgf}]}{1[\text{kN}]} \times \frac{100[\text{mm}^2]}{1[\text{cm}^2]} = \pm 1,29636237 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$0,06 \text{ kN} \rightarrow 6 \text{ kgf} \quad ; \quad 0 \text{ mm} \rightarrow 0 \text{ cm}$$

El valor de la resistencia a compresión de la probeta está dado por la siguiente expresión:

$$R_C = \frac{P}{S}$$

$$R_C = \frac{1033 + 6}{(7,5 - 0)^2} = 18,471111 \pm 1,29636237 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$\therefore 17,1 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right] \leq R_C \leq 19,7 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right] \text{ para lectura del manómetro de } 1000 \text{ [psi].}$$

De esta manera, se calcula la incertidumbre de la resistencia a compresión para el resto de de las lecturas del manómetro. A continuación se muestran los resultados:

Tabla C. 3. Resumen calculo incertidumbre.

Lectura Manómetro	Carga	Resistencia Rc	Incertidumbre expandida, k=2	Rango de resistencia	
[psi]	[kgf]	[kgf/cm²]	[kgf/cm²]	[kgf/cm²]	
1.000	1.033	18,4	1,296362366	17,1	19,7
2.000	2.029	36,1	1,296361985	34,8	37,4
3.000	3.007	53,5	1,296407032	52,2	54,8
4.000	3.999	71,1	1,296445653	69,8	72,4
5.000	5.015	89,2	1,296494015	87,9	90,5
6.000	5.977	106,3	1,296555781	105,0	107,6
7.000	6.962	123,8	1,296627059	122,5	125,1
8.000	7.976	141,8	1,296708664	140,5	143,1