

2016

CARACTERIZACION DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON FIBRAS SINTETICAS MODIFICADOS CON POLIMEROS

LARA ALFARO, ANDRÉS VALENTINO

<http://hdl.handle.net/11673/23571>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD FEDERICO SANTA MARIA DEPARTAMENTO DE
OBRAS CIVILES
VALPARAISO - CHILE

CARACTERIZACION DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON FIBRAS SINTETICAS
MODIFICADOS CON POLIMEROS

ANDRES VALENTINO LARA ALFARO

Memoria para optar al Título de
Constructor Civil

Profesor Guía
Sergio Carmona Malatesta

Septiembre de 2016

No hay palabras que puedan describir
profundo agradecimiento hacia mis
Padres, quienes durante todos estos años
confiaron en mí.

Resumen

En los últimos años, la irrupción en el mercado nacional de las fibras sintéticas estructurales para el refuerzo del hormigón ha provocado cambios significativos en las faenas de construcción de túneles, especialmente en la minería, donde se han reemplazado los shotcrete reforzados con mallas de acero por shotcrete reforzados con estas fibras. Este reemplazo obliga al uso de mortones de alta fluidez y con mayores contenidos de finos, para compensar la presencia de las fibras, las que se consideran como un agregado con un bajo coeficiente volumétrico. Esto se logra con la incorporación de polímeros que mejoran la trabajabilidad, reducen las pérdidas por rebote, incrementan la resistencia a la compresión y disminuyen la permeabilidad, logrando una mayor durabilidad del sostenimientos de túneles.

Considerando lo anterior, el objetivo de esta memoria es determinar el efecto que produce el aditivo polimérico ETONIS 850 en las propiedades de mezclas diseñadas para ser utilizadas como shotcrete reforzados con fibras sintéticas.

Para lograr el objetivo propuesto, se elaboraran tres dosificaciones de iguales características, reforzadas con 6 kg/m³ de fibras sintéticas estructurales tipo Barchip 54, las que serán modificadas con diferentes cantidades del aditivo polimérico en estudio.

El efecto del aditivo se evaluará a través de la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la capacidad de absorción de energía de los hormigones reforzados con fibras estudiados, las que serán contrastadas con los resultados obtenidos con una mezcla patrón sin aditivo.

Abstract

In recent years the outbreak of the recent crisis of international reinforcement synthetic fibers has made significant changes for the tunnel construction work, especially in the mines where it, has been replaced the shotcrete reinforce with steel meshes for shotcrete with synthetic fibers. This replacement forces us to use the concrete with very high fluidity levels and with higher contents of fine soils to compensate the presence of fibers, which are considered as an adjunct with low volumetric coefficient. This is done by incorporating polymers to improve workability, decrease the rebound effect, increase compressive strength resistance and decrease the permeability, to improve durability tunnel roof supports.

With that said, the objective of this report is to determine the effect produced by the polymeric additive Etonis 850 in the properties of mixtures designed to be used as shotcrete reinforced with synthetic fibers.

In order to achieve the objectives, three dosages of the same characteristics are developed and reinforced with 6 kg/m³ of synthetic fibers structural type Barchip 54, which are modified with different amounts of polymer additive.

The polymer effect is been evaluated by the compressive strength resistance, elastic modulus and its capacity to absorb the energy from concrete reinforced with synthetic fibers, to finally be compared with the results obtained with a standard mixture without additive.

Glosario.

EFNARC: European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete. Expertos en Construcción Especializada y Sistemas de Hormigón.

Shotcrete: Hormigón proyectado en inglés.

ASTM: American Society for Testing and Materials, Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.

ACI: American concrete institute.

Refrentar: Preparar una superficie de carga de una probeta destinada a corregir defectos de planeidad, con el fin de obtener una mejor distribución uniforme de tensiones durante la aplicación de carga.

PMC: Polymer-Modified concrete, hormigón con polímero modificado.

CEN: Comité Europeo de Normalización.

LVDT: Transductores de desplazamiento lineal variable.

LEMCO: Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras.

HRF: Hormigón Reforzado con Fibras.

Aditivo: Químicos incorporados a la mezcla base de hormigón tales como acelerantes de fraguado, aditivos reductores de agua, fluidificantes, retardadores de fraguado, etc.

Rebote: Corresponde al hormigón proyectado que sale de la boquilla y no se adhiere a la superficie de aplicación sino que rebota y cae al piso. Este hormigón proyectado no es recuperable.

Índice General.

Dedicatoria.....	i
Resumen.....	ii
Abstract.....	iii
Glosario.....	iv
Índice General.....	v
Índice de Anexos.....	vii
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Gráficos.....	viii
Índice de Tablas.....	viii
Índice de Fotos.....	ix
Capítulo 1: Introducción y Objetivos.....	1
1.1 Antecedentes preliminares.....	1
1.2 Objetivos Generales.....	2
1.3 Objetivos Específicos.....	2
Capítulo 2: Marco Teórico.....	3
2.1 Definiciones de Hormigón Proyectado.....	3
2.2 Hormigones Proyectados como revestimiento.....	3
2.3 Hormigones Reforzados.....	4
2.3.1 Hormigones Reforzados con Fibras Sintéticas.....	4
2.3.2 Hormigones Reforzados con Aditivos Polímeros.....	6
2.4 Comportamiento de Módulo de Elasticidad.....	12
2.4.1 Ensayo Norma ASTM 469.....	12
2.5 Ensayo panel cuadrado EFNARC, Absorción de energía y tenacidad.....	15

Capítulo 3: Materiales estudiados.....	19
3.1 Agregados Pétreos.....	19
3.2 Cemento.....	22
3.3 Aditivos.....	23
3.4 Fibras Sintéticas.....	25
3.5 Dosificación.....	26
3.6 Procedimiento en laboratorio.....	27
3.6.1 Registro de Probetas Cilíndricas.....	27
3.6.2 Registro de Paneles Cuadrados EFNARC.....	28
3.6.3 Confecón de las Probetas.....	28
3.6.4 Curado de las Probetas.....	31
3.6.5 Refrentado de Probetas Cilíndricas.....	32
Capítulo 4: Ensayos y Resultados.....	33
4.1 Propiedades en Estado Fresco.....	33
4.2 Propiedades en Estado Endurecido.....	35
4.2.1 Resistencia a la Compresión.....	35
4.2.2 Módulo de Elasticidad.....	39
4.2.3 Ensayo de Panel Cuadrado EFNARC.....	45
4.2.3.1 Modo de falla.....	50
Capítulo 4: Ensayos y Resultados.....	33
REFERENCIAS.....	53
NORMAS.....	53
PUBLICACIONES.....	55
ANEXOS.....	56

Índice de Anexos

Anexo N° 1: Resultado y Gráficos Panel 2 D5B1.....	56
Anexo N° 2: Resultado y Gráficos Panel 3 D4B2.....	57
Anexo N° 3: Resultado y Gráficos Panel 3 D4B2.....	57
Anexo N° 4: Resultado y Gráficos Panel 5 D4B2.....	58
Anexo N° 5: Resultado y Gráficos Panel 6 D1B.....	58
Anexo N° 6: Resultado y Gráficos Panel 7 D1B2.....	59
Anexo N° 7: Resultado y Gráficos Panel 8 D1B1.....	59
Anexo N° 8: Resultado y Gráficos Panel 9 D1B1.....	60
Anexo N° 9: Resultado y Gráficos Panel 10 D2B1.....	60
Anexo N° 10: Resultado y Gráficos Panel 11 D3B2.....	61
Anexo N° 11: Resultado y Gráficos Panel 12 D5B2.....	61

Índice de Figuras

Figura N° 1: Curva tipo carga-flecha para hormigón con y sin fibra.....	5
Figura N° 2: Clasificación de Mezcla a base de Polímeros.....	7
Figura N° 3: Proceso de modificación del polímero.....	9
Figura N° 4: Gráfico Esfuerzo vs Deformación de los componentes del hormigón.....	12
Figura N° 5: Gráfico Esfuerzo vs Deformación de un hormigón.....	13
Figura N° 6: Modelo a escala Ensayo de Panel Cuadrado EFNARC.....	15
Figura N° 7: Panel Ensayo de Panel Cuadrado EFNARC.....	16
Figura N° 8: Gráfico tipo, Carga vs Desplazamiento.....	16
Figura N° 9: Gráfico tipo, Energía vs Desplazamiento.....	17
Figura N° 10: Esquema Montaje Sistema Anillos y LVDT.....	40

Índice de Gráficos

Gráfico N, 1: Curva Granulometría promedio, arena 3/8,,	2.1.
Gráfico N° 2: Cono de Abrams vs % de Aditivo polimérico Etonis.	3.4.
Gráfico N° 3: Resistencia a la compresión a los 28 días.	3.8.
Gráfico N° 4: Módulo de Elasticidad de las Probetas estudiadas como de carga.	4.3.
Gráfico N° 5: Módulo de Elasticidad% de ETONIS 850.	4.4.
Gráfico N° 6: Resumen Carga-Desplazamiento Paneles estudiados.	4.7.
Gráfico N° 7: Resumen Energía-Desplazamiento Paneles estudiados.	4.8.

Índice de Tablas

Tabla N° 1: Clasificación de tenacidad, EFNARC.	18
Tabla N° 2: Propiedad de los Agregados Pétreos.	20
Tabla N° 3: Análisis de cribado, arena 3/8,, en peso que pasa.	20
Tabla N, 4: Granulometría Arena 3/8,,.	21
Tabla N° 5: Características Técnicas y Mecánicas Cemento Melón Extra.	22
Tabla N° 6: Información técnica aditivo CM (Industrias ULMEN S.A.).	23
Tabla N° 7: Información técnica aditivo ETONIS 850 (Wacker Chemie A.G).	24
Tabla N° 8: Propiedades fibras sintéticas Barchip.54.	25
Tabla N° 9: Dosificaciones de hormigón a estudiar.	26
Tabla N° 10: Registro de Probetas Cilíndricas.	27
Tabla N° 11: Registro de Probetas Cuadradas ERICA.	28
Tabla N° 12: Resultados de Ensayos de Asentamiento de Cono de Abrams.	33
Tabla N° 13: Resultados de los ensayos de compresión a los 28 días.	37
Tabla N° 14: Resultados de Módulo de Elasticidad a los 28 días.	41
Tabla N° 15: Resultados Ensayos absorción de energía con desplazamiento a 25mm.	47

Índice de Fotos

Foto N° 1: Incorporación aditivo polimérico ETONIS 850.....	29
Foto N° 2: Método de asentamiento cono de Abrams.....	30
Foto N° 3: Mezla homogénea lista para verter.....	30
Foto N° 4: Vaciado hormigón en moldajes cuadrados.....	30
Foto N° 5: Probetas cilíndricas refrigeradas con Sikadur 31 HMG.....	32
Foto N° 6: Prensa hidráulica marca Toni Technik.....	35
Foto N° 7: Ubicación probeta en platos de la prensa.....	36
Foto N, 8: ...Pantalla de comandos Controls MCC8,,.....	36
Foto N° 9: Probeta y Sistema de anillos.....	40
Foto N° 10: Sistema lector de datos.....	40
Foto N° 11: Prensa hidráulica, MCC8 para ensayo de Modulo de Elasticidad.....	41
Foto N° 12: Imágenes comparativa post Ensayo Panel Cuadrado EFNARC.....	50

Capítulo 1: Introducción y Objetivos.

1.1 Antecedentes preliminares

Se presenta la investigación realizada para caracterizar el uso del polimérico ETONIS 850 en la confección de hormigones proyectados sometiendo a ensayos de compresión, Módulo de elasticidad bajo la norma ASTM-C69, y midiendo la absorción de energía en probetas cuadradas bajo la norma UNEN 144885:2007.

El hormigón proyectado es una mezcla de cemento, áridos y agua que se aplica neumáticamente desde una boquilla al lugar de colocación para producir una mezcla homogénea y densa. Con el paso del tiempo y, nuevas investigaciones, al hormigón proyectado se le han adicionado nuevos elementos tales como las fibras que le han brindado mayor resistencia, reemplazando la malla de acero que en conjunto simulan el hormigón armado. Debido a la incorporación de estos elementos aumentan los costos y pérdidas en la aplicación del hormigón proyectado, diversas investigaciones han llegado a la conclusión que la adición de aditivos polímeros en la confección de hormigones proyectados han logrado obtener mejoras en sus propiedades; además de reducción de las pérdidas en la aplicación de material mediante los sistemas convencionales de proyección.

La Empresa Wacker Chemie A.S. confirma los beneficios y ventajas de utilizar el producto polimérico ETONIS 850 en la confección de hormigones proyectados.

En esta investigación se analizarán las propiedades mecánicas en los hormigones proyectados el cual se usó el producto ETONIS 850 sometiendo a ensayos de compresión, módulo de elasticidad y medición de la absorción de energía.

1.2 Objetivos Generales

- La finalidad de este estudio es conocer el comportamiento del aditivo polimérico ETONIS 850, en la confección de hormigones proyectados sometidos a ensayo de Compresión, Módulo de Elasticidad bajo la norma ASTM C669 y Ensayo de Absorción de Energía bajo la norma UNE EN-14485:2007.
- Analizar los efectos que producen distintas dosis del producto ETONIS 850, sobre la resistencia del hormigón
- Comparar los resultados obtenidos de los ensayos de Compresión, Módulo de Elasticidad y Absorción de energía con los de una muestra patrón (sin polímero).

1.3 Objetivos Específicos

- Confeccionar Probetas Cilíndricas de 150 [mm] de diámetro y 300 [mm] de alto, Paneles Cuadrados de 600 [mm] y 100 [mm] de alto con igual dosificación de cemento, áridos y fibras sintéticas, pero con dosis de 3,5% y 7% de polímero ETONIS 850. Estos porcentajes son relativos al peso del cemento.
- Verificar si la adición de distintas dosis del producto ETONIS 850 influye en los resultados de la Compresión, Módulo elasticidad y Absorción de energía de los hormigones en estudio.

Capítulo 2 Marco Teórico

2.1 Definiciones de Hormigón Proyectado

El hormigón proyectado está definido por el código ACI 506R-05 «Guía del shotcrete» como Hormigón o mortero transportado a través de manguera y proyectado neumáticamente a alta velocidad sobre una superficie.

Según la publicación de la «European Specification for Sprayed Concrete» (1996) de EFNARC, el hormigón proyectado es una mezcla de cemento, áridos y agua que se proyecta neumáticamente desde una boquilla a su lugar de aplicación, para producir una masa homogénea y densa, el cual puede incluir aditivos y fibras para mejorar sus propiedades.

2.2 Hormigones Proyectados como revestimiento

Dentro de los principales usos que tiene el hormigón proyectado destaca el de revestimiento y de refuerzo en las paredes de túneles en la minería. Por la característica de baja resistencia a la tracción, es que este hormigón proyectado o «shotcrete» tiende a generar fisuras debido a las solicitaciones provenientes de las capas superiores.

Investigaciones recientes han dado como resultado que la incorporación de fibras sintéticas al hormigón proyectado influye en gran medida al aumento de la tenacidad y por ende a reducir la fragilidad, modificando el comportamiento del hormigón a producir fisuras.

Otros estudios han revelado que la incorporación de aditivos poliméricos en la producción de hormigones proyectados, mejoran sus propiedades mecánicas, disminuyen el rebote y consistencia y trabajabilidad al hormigón, resistente a agentes externos, tales como ciclos de congelamiento y descongelamiento y, mejores características de impermeabilidad.

2.3 Hormigones Reforzados

2.3.1 Hormigones Reforzados con fibras sintéticas

La idea de reforzar hormigones con fibras se remonta muchos años atrás; en el antiguo Egipto se introducía paja a una masa arcillosa con la cual confeccionaban ladrillos para conferirle una mayor resistencia y mejores características resistentes después de secar al sol.

También se utilizaban revoques reforzados con crin de caballo, paja de trigo en las construcciones más modestas para evitar fisuras antiestéticas, también en la confección de molduras de yeso se utilizaban esteras de caña.

Desde la década de los 50's, datan los primeros estudios sobre la utilización de fibras de acero y de vidrio en el hormigón; en los años 60's con cambio aparecen los primeros estudios sobre hormigones reforzados con fibras sintéticas dando cabida a la investigación de hormigones reforzados con fibras. Tales investigaciones siguen en la actualidad.

La adición de fibras en el hormigón reduce la fisión por retracción superficial en el mortero y sustituye a la armadura destinada a absorber las tensiones que se producen durante el fraguado y endurecimiento del hormigón.

La Figura N°1 ilustra cualitativamente las posibles respuestas, que se pueden obtener en los ensayos, sobre los elementos de hormigón reforzados con fibras, representando un gráfico de Cargas vs desplazamiento.

La curva I representa el comportamiento de un hormigón normal sin refuerzos. Las curvas II, III y IV representan el comportamiento de hormigones reforzados con fibras.

Figura N°1: Curva tipo carga-flecha para hormigón con y sin fibra.

La materialidad y tipo de fibras determinan la efectividad de estas como refuerzo y eficacia en la transmisión de esfuerzos. Existen diversos tipos de fibras, tales como de vidrio, acero y sintéticas.

2.3.2 Hormigones Reforzados con Aditivos Polímeros

El concepto de polímeros modificados en hormigones no es un tema nuevo. En la antigua Babilonia 4.000 a.c. y en el Valle de Indo 3000 a.c. aparecieron ladrillos de arcilla que fueron confeccionados con el uso de polímeros naturales tales como albumina de arroz.

En la década de los 20's, se empieza a introducir el uso de polímeros modificados en las mezclas de hormigón. En 1923 se publica la primera patente de un sistema de polímeros cementicio utilizada en pavimentación con materiales naturales látex de caucho. En 1924 Lefebure fue el primero en producir hormigones con polímeros modificados utilizando látex de caucho natural en base al contenido de cemento, en contraste con lo que hizo Cresson que basó su mezcla sobre el contenido de polímero.

En 1932 Bond desarrolla el uso del látex de caucho sintético y en 1939 Rodwell con el uso de látex de resina, incluyendo el látex de acetato de polivinilo, para producir sistemas de polímeros modificados.

En la década de los 40 se publican patentes sobre sistemas modificados con polímeros látex sintéticos, tales como caucho de policloropreno látex (neopreno) (Cooke 1941) y este poliacrílico látex (Jaenicke et al. 1943), también se publican polivinil acetato de mortero y concreto modificado. A finales de la década de los 40 los polímeros modificados se utilizaron en diversas aplicaciones tales como revestimientos de cubiertas de buques y puentes, pavimentos, suelos, anticorrosivos y adhesivos.

Durante la década de los 50 Gesit, Amagna y Mellor (1953) realizaron estudios detallados acerca del uso de acetato de polivinilo modificado en morteros y concreto, información valiosa para investigaciones posteriores en el desarrollo de los sistemas de polímeros modificados, y además se implementó el uso de polvos de polímeros modificados en morteros y hormigones.

La ACI 548.3R define Hormigón Modificado (LMC) como cemento Portland y agregado que se combinan en el momento de la mezcla con polímeros orgánicos que se redispersan en agua, resultando en una mezcla de cemento hidratado y una película de polímero en todo el hormigón.

La adición de polímeros modificados en hormigones mejora la adherencia, permeabilidad, durabilidad y algunas propiedades mecánicas del hormigón. Se clasifican en:

Figura N°2: Clasificación de Mezcla a base de Polímeros.

Una amplia variedad de tipo de polímeros modificados en hormigones, cuales se pueden nombrados siguientes:

- Copolímero de estireno-butadieno (S).
- Homopolímero de esteres acrílicos (PAE) y copolímeros, particularmente con estireno (S).
- Copolímero de acetato de vinilo (VAC).
- Copolímero de acetato de vinilo-etileno (EVA).
- Homopolímeros de acetato de vinilo (PVAC).

La selección de un polímero en particular para un hormigón modificado con polímeros depende de las propiedades específicas necesarias para su aplicación. Para aplicaciones donde es requerida solidez de color, resistencia a permeabilidad y resistencia de uso, se puede utilizar polímeros PAE, látex o copolímeros de acetato de vinilo. Cuando se requiere fuerza, pero el producto no es expuesto a la humedad, puede utilizar un homopolímero de acetato de vinilo. Es importante tener en cuenta que la exposición al agua de hormigones modificados con polímeros debe ser cuidadosamente examinado antes de seleccionar un polímero apropiado a utilizar.

Los polímeros en polvo redispersables son ostensiblemente más caros que su equivalente látex, debido a que los polímeros en polvo tienen otro proceso de fabricación mediante secado por pulverización del látex. Por consiguiente, los polímeros en polvo se utilizan cuando la partida de costos no es crítica y los tiempos son más críticos, dentro de las aplicaciones se encuentra los hormigones proyectados o "shotcrete".

Actualmente, el único polímero disponible como polímeros en polvo redispersables son los clasificados como PAE, SA-EVA, VA-VEOVA y PVA. Otra razón para utilizar polímeros en polvo redispersables es que en el proceso de dosificación de la mezcla tiene mayor control, dado que las dosificaciones se llevan controladas desde la planta y no en el lugar de trabajo como ocurre cuando se utilizan látex.

Principio de polímeros modificados

La mezcla entre polímeros y el cemento hidráulico se rige bajo dos procesos: la hidratación del cemento y la fusión del polímero.

En general, la hidratación del cemento se produce primero. A medida que las partículas del cemento comienzan a hidratarse, las partículas de polímero se concentran en los espacios vacíos.

La Figura N°3 indica el proceso que se produce durante la modificación del polímero. Durante el proceso con la eliminación continua de agua debido a la hidratación del cemento, evaporación, o ambos, las partículas de polímero se unen en una película de polímero que se entrelaza con las partículas del cemento hidratado, resultando en una mezcla que cubre las partículas del agregado y las áreas de huecos intersticiales.

Figura N°3: Proceso de modificación del polímero.

El grado óptimo de modificación de polímero es generalmente entre 5% y 20% de sólidos secos en masa de polímero de cemento en la mezcla, algunos fabricantes difieren de esta cantidad porcentual dado el uso que tendrá el hormigón modificado con polímeros.

El contenido óptimo de polímero está relacionado a mejorar la estanqueidad, durabilidad, agrietamiento, fractura, y también con las propiedades mecánicas y trabajabilidad del hormigón. El uso excesivo de polímero no es económico, puede causar un aumento de aire incorporado en la mezcla. Así también, según el polímero modificado, la porosidad tiende a disminuir con el aumento de interacción entre polímero y cemento, esto puede contribuir a mejorar la impermeabilidad, resistencia a la carbonatación, y resistencia a la congelación y descongelación.

La preparación de la mezcla de polímeros modificados en hormigones es similar a la preparación de una mezcla standard de hormigón, pero se recomienda asegurar el contenido de aires en la mezcla para tener una mayor adherencia de los polímeros, se debe realizar una inmediata limpieza a los equipos de mezcla.

Especificaciones y métodos de prueba para Hormigones modificados con polímeros.

En 1999, la ASTM publica la norma ASTM c1438, que corresponde a una especificación para el uso de látex y polímeros en polvos modificados en mezclas de hormigón. Al mismo tiempo, el método de ensayos ASTM c1439 para hormigones con polímeros modificados. En esta última, las probetas de hormigones modificados con polímeros se curan al ser cubierto con láminas de polietileno durante 24 horas seguido por curado al aire a 23 (°C) y 50% con respecto a la humedad relativa hasta el momento de los ensayos. Estas normas no deben aplicarse en hormigones modificados con polímeros epóxicos.

Aditivo Polimérico ETONIS 850.

La empresa WACKER Chemie A.S de descendencia alemana creó en el año 2008 un producto denominado ETONIS 850, correspondiente a un aditivo polimérico utilizado en hormigones proyectado en la construcción de túneles en la minería, carreteras y otras aplicaciones especiales de ingeniería civil.

ETONIS 850 es un polvo redispersable en agua que pertenece en la clasificación de polímeros modificados a un copolímero de vinil acetato/etileno (EVA), el cual hace un polímero suave y elástico. Está compuesto por un filler mineral fino como agente antiadherente, libre de solventes, plastificantes y agentes formadores de película. Dentro de sus características es un polvo de muy baja emisión, con baja temperatura de transmisión vítrea (TG) que permanece flexible a bajas temperaturas ante el congelamiento.

El producto ETONIS 850 hace fácil la manipulación del hormigón en estado fresco y el bombeo debido a que reduce las fuerzas de fricción entre el cemento y los agregados. Este reduce significativamente el rebote durante la proyección del “shotcrete”, mientras que también mejora la adherencia a todos los sustratos. El hormigón modificado con polímero ETONIS 850 incrementa la estabilidad de sedimentación del concreto y especialmente en morteros, reduciendo la exudación y la segregación.

En su estado fresco ETONIS 850 también tiene un efecto plastificante y reduce la relación agua/cemento sin comprometer la trabajabilidad del hormigón. En el hormigón en estado endurecido, ETONIS 850 mejora la adherencia, la resistencia a la flexión, reduce el módulo de elasticidad e incrementa la resistencia a la abrasión.

El hormigón modificado con ETONIS 850 sella los poros capilares haciéndolo más impermeable, mejora la resistencia a la carbonatación y previene el ingreso de agente agresivos dentro de la matriz.

La forma de uso del polímero modificado ETONIS 850 en el hormigón puede ser incorporado en forma de polvo a cualquier mezcla de hormigón seco o diluido en mezclas de hormigón húmedo, el mezclado genera una rápida dispersión del polímero con el agua del hormigón seco. También puede ser mezclado en el agua de amalgamo o ser agregado a la mezcla.

El fabricante especifica utilizar cantidades del polímero ETONIS 850 de un 2,5 a 10% con respecto al peso del cemento. La cantidad usada en aplicaciones especiales como morteros y revestimientos cementicios puede ser considerablemente alta. La cantidad exacta dependerá de los requerimientos específicos.

En cuanto al costo beneficio, ETONIS al no contener agua, los costos de transporte son menores que los métodos convencionales, disminuye los costos del proyecto por la reducción de consumo producido por el efecto rebote de la proyección del hormigón, también disminuye los tiempos de ejecución y además los costos de energía y emisiones de CO₂ son reducidos.

2.4 Comportamiento de Módulo de Elasticidad.

2.4.1 Ensayo Norma ASTM C-469.

El módulo de elasticidad del hormigón se determina a través del ensayo de compresión definida en la Norma ASTM C469, y describe la rigidez relativa de un material.

La resistencia y comportamiento de los elementos que conforman el hormigón bajo cargas depende de sus módulos de elasticidad definido, siendo el árido el que posee mayor rigidez en comparación al hormigón, y la pasta de cemento posee un menor módulo de elasticidad en comparación al hormigón. En la Figura N°4 se puede apreciar un gráfico con los distintos módulos de elasticidad de cada elemento.

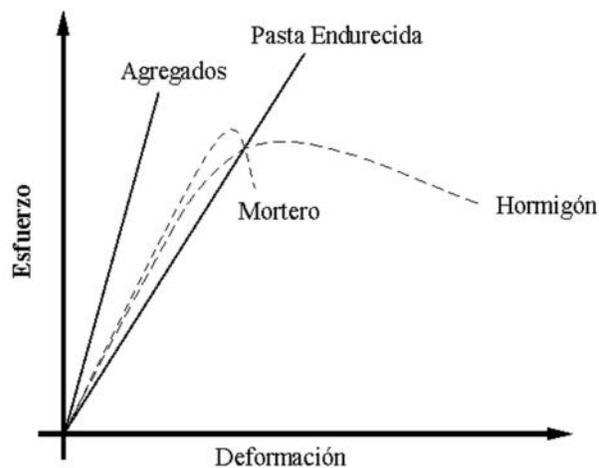


Figura N° 4: Gráfico Esfuerzo – Deformación de los componentes del hormigón.

La curva de Esfuerzo-Deformación del hormigón no es lineal afectando el módulo de elasticidad, debido a las microfisuras que se generan entre la pasta cemento y los áridos.

El módulo de elasticidad del hormigón se puede ver afectado por diversos motivos. Uno de ellos es los áridos, porque ha mayor cantidad mayor es su módulo de elasticidad, aumenta la rigidez del hormigón, también su forma y textura superficial influirá en la rigidez ya que inciden en la formación de microfisuras. También la edad del hormigón, ya que aumenta su rigidez con la edad del material.

Otros factores que pueden afectar el módulo de elasticidad de los hormigones, es el uso de fibras y aditivos en la mezcla.

El hormigón respecto a su módulo de elasticidad presenta distintas fases, tanto en su rango elástico como en su rango inelástico, y depende de las consideraciones que se tomen al momento de calcularlo. A continuación en la Figura N° 5 se presenta el comportamiento del hormigón en una curva Esfuerzo – Deformación y sus distintos valores para el módulo de elasticidad.

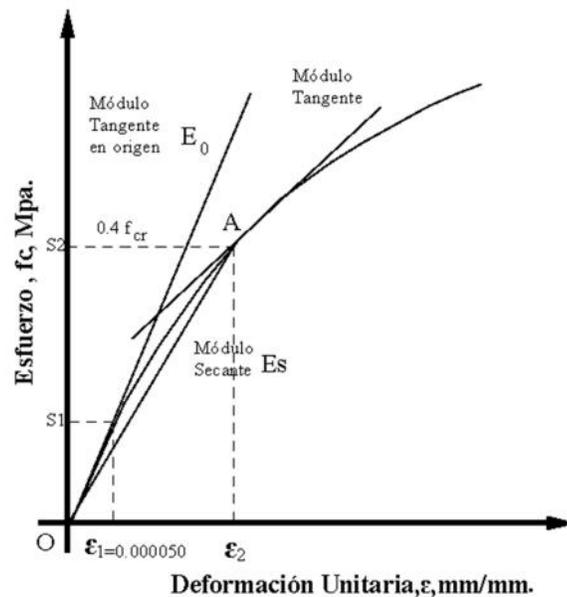


Figura N° 5: Gráfico Esfuerzo – Deformación de un hormigón.

En el gráfico se observa un módulo tangente en el origen denominado E₀, un módulo tangente que es la pendiente del diagrama esfuerzo-deformación en cualquier punto donde se encuentra el esfuerzo f_c y un módulo secante E_S que se determina por una reta desde el origen hasta el punto correspondiente al esfuerzo máximo, generalmente del 40%, o hasta el 100%.

El módulo de elasticidad se calcula

Ecuación 1: Módulo de Elasticidad (Norma ASTM C469/C469M).

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

- E = módulo de elasticidad, [MPa].
- S₂ = esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última [MPa].
- S₁ = esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal, „1, de 50 millonésimas, en [MPa].
- „2 = deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S₂, en millonésimas: [.m].

2.5 Ensayo panel cuadrado EFNARC, Absorción de energía y tenacidad.

El ensayo de panel cuadrado fue propuesto en el año 1996 en la publicación *European Specification for Sprayed Concrete* de EFNARC. Plantea un procedimiento para determinar la energía de absorción utilizando paneles, ofreciendo mejores resultados que las vigas prismáticas.

Las pruebas de punzonamiento y flexión sobre una losa simula con mucha efectividad el comportamiento de túnel bajo la presión de la roca alrededor del anclaje de un perno. En la Figura N° 6 se observa el modo de actuar la presión de la roca en un punto de carga.

Este ensayo ha sido normalizado por el CEN en la norma EN 14488-5:2007.

Figura N°6: Modelo a escala Ensayo de Panel Cuadrado EFNARC.

El ensayo descrito supone que el revestimiento de HRF se comporta como una losa. La losa de prueba se sostiene por los cuatro lados y se aplica una carga puntual al centro a través de una superficie de contacto de 100x100 [mm]. Se registra la curva Carga-Desplazamiento y la prueba continua hasta alcanzar el desplazamiento de 25 [mm] en el centro de la losa. Ver Figura N° 7.

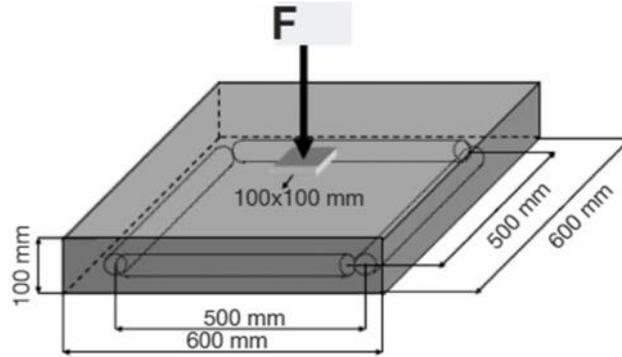


Figura N° 7: Panel Ensayo de Panel Cuadrado EFNARC.

Para medir el desempeño del hormigón proyectado reforzado con fibras se han propuestos diferentes ensayos, en los cuales el parámetro utilizado para calcular la absorción de energía es la tenacidad. La tenacidad es la capacidad del material de absorber energía y es comúnmente cuantificada como el área bajo la curva de la curva carga-flecha, Ver Figura N° 8.

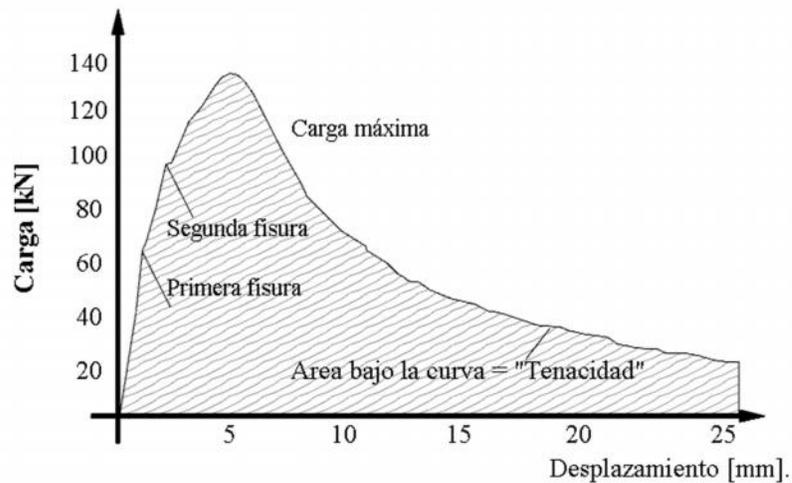


Figura N° 8: Gráfico tipo, Carga-Desplazamiento.

La curva de Carga-Desplazamiento indica durante la prueba se han desarrollado numerosas fisuras. Una vez que se alcanza la carga máxima y se produce el efecto de redistribución de la carga máxima, las fibras comienzan a deformarse. Esta curva puede ser obtenida de varios tipos de ensayo y va a depender principalmente de las dimensiones de las probetas (ancho, alto y longitud), tipo de carga, velocidad de carga y del criterio de control del ensayo (control de desplazamiento, control de carga, apertura de grieta). En el ensayo de panel se mide la tenacidad a los 25 [mm] de desplazamiento. El valor de la tenacidad dependerá principalmente de la composición del hormigón.

De la curva de carga/deflexión, se dibuja una segunda curva resultando la curva absorción de energía/deflexión de la probeta prismática, ver Figura N° 9. Este método intenta simular el comportamiento real del revestimiento, en este caso de un revestimiento de hormigón proyectado o “shotcrete”.

En lugar de determinar la característica del material, lo que se requiere es un modelo propio de diseño para calcular la carga permisible de una estructura.

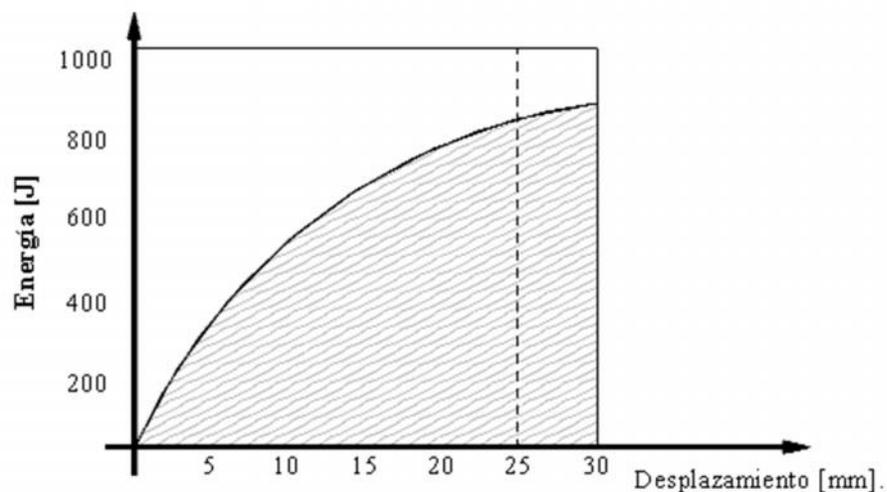


Figura N° 9: Gráfico tipo, Energía-Desplazamiento.

El ensayo utilizado en paneles cuadrados EFNARC permite comprobar la conveniencia de utilizar cierto material bajo condiciones y circunstancias dadas y controlar su comportamiento en el estado último. Es también una manera muy eficaz de comparar diferentes tipos de fibras y dosificaciones relacionadas con el propósito deseado. Otras investigaciones han revelado que el uso de aditivos polímeros en hormigones también afecta la absorción de energía y tenacidad de la mezcla.

Los ensayos para medir tenacidad, se dividen en dos niveles, los que son usados para medir la calidad de los materiales y otro a nivel de diseño estructural. Para evaluar los materiales utilizados en el hormigón proyectado, existen los ensayos de viga a flexión y el ensayo de doble punzonamiento (Ensayo Barcelona). A nivel estructural es utilizado el ensayo de panel, ya que con el método de Barton-Q se relaciona el nivel de absorción de energía obtenida en este ensayo con el tipo de calidad de roca.

La tenacidad según el código EFNARC, se distinguen tres clases, según la energía absorbida para un desplazamiento de 25 [mm] en el centro de la probeta plana. La energía absorbida se mide en Joules. La Tabla N° 1 muestra la clasificación de Tenacidad con respecto a la energía de absorción obtenida del ensayo de Panel cuadrado EFNARC.

Clasificación Tenacidad	Energía absorbida en Joules para una deflexión de 25 [mm].
a - E500	500
b - E700	700
c - E1000	1000

Tabla N° 1: Clasificación de tenacidad, EFNARC.

Capítulo 3 Materiales estudiados

3.1 Agregados Pétreos.

Para todos los hormigones se usará un solo tipo de árido con el mismo origen y composición granulométrica, que corresponde a Arena 3/8, proveniente del río Cachapoal y suministrado solo por el proveedor MEGARIDOS CACHAPOAL Ltda.

Los áridos tendrán las siguientes características

- Arena 3/8 (10mm)

Se trata de un agregado pétreo compuesto de partículas duras de tamaños que fluctúan entre 10 y 0,08 mm, originadas por la fragmentación natural y artificial de la piedra en un 50% respectivamente.

Se obtiene a partir de la selección y chancado integral natural o materia prima, la cual pasa por un proceso de chancado básico compuesto de chancador primario y secundario que reduce y fragmenta la piedra. El material reducido de tamaño entre 50 [mm]. Pasa a un tercer proceso de chancado de impacto que mejora la cubicidad y calidad de la partícula. Finalmente la mezcla entra en el proceso de tamizado requerido, pasando a un tamiz fino o lavador de arena que reduce el exceso de finos e impurezas orgánicas.

Para el análisis del árido se realizaron los ensayos correspondientes según las normas chilenas NCh 163 Of.1979, Áridos para morteros y hormigones Requisitos Generales.

Se obtuvieron los siguientes resultados

Propiedad	Arena
Modulo Finura	3,24
Finos < 0.08mm [%]	1,79
Dens.Ap.Suelta Seca [Kg/dm ³]	1,81
Dens.Ap.Comp.Seca [Kg/dm ³]	1,94
Dens.Real Seca [Kg/dm ³]	2,81
Absorción [%]	1,69
Materia Orgánica	No Tiene

Tabla N°2: Propiedad de los Agregados Pétreos.

- Granulometrías y características físicas promedio

La granulometría del agregado, se realizó según la norma chilena NCh 165 Of.1977 y fueron comparadas con las bases granulométricas que exige la norma ASTM.

TAMIZ ASTM	% Retenido	% Retenido Acumulado	% que pasa	Rango aceptado
3/8"	0	0	100	100
N°4	13	13	87	95-100
N°8	25	37	63	80-100
N°16	18	55	45	50-85
N°30	10	65	35	25-60
N°50	16	81	19	10-30
N°100	14	94	6	2-10
	6	100	0	-

Tabla N°3: Análisis del cribado, arena 3/8", en peso que pasa.

TAMIZ	Banda Granulométrica	
	[Lim. Inf.]	[Lim. Sup.]
3/8"	100	100
4	83	90
8	58	68
16	42	52
30	28	38
50	13	19
100	4	8

Tabla N°4: Granulometría Arena 3/8,,.

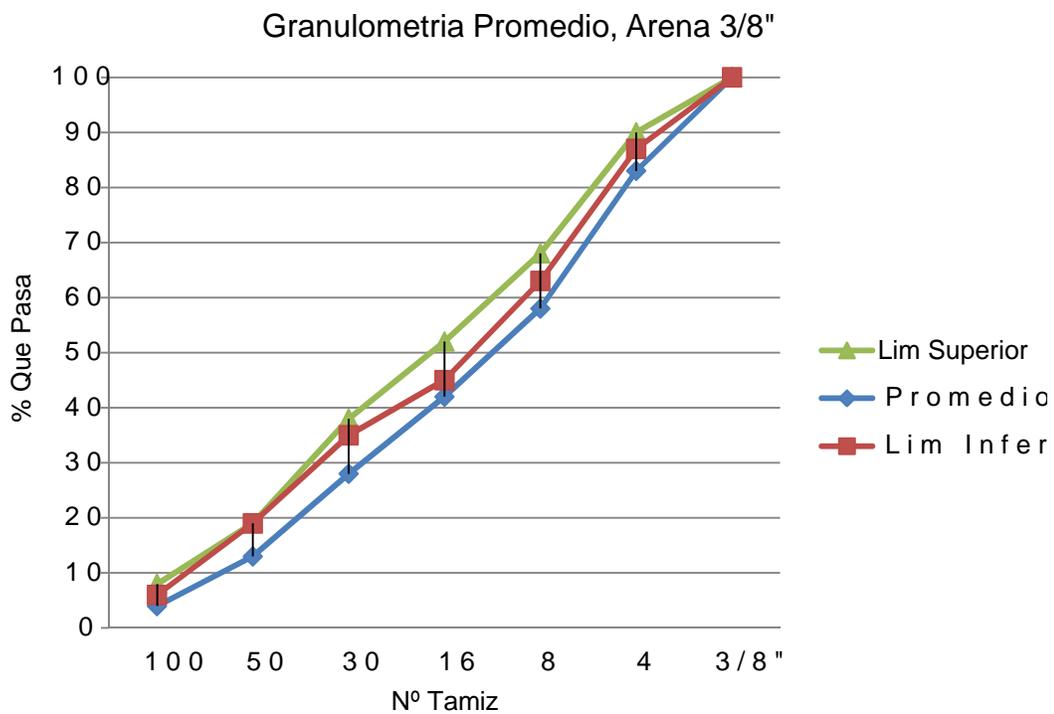


Gráfico N°1: Curva Granulometría promedio, arena 3/8,,.

3.2 Cemento.

Se estima realizar mezclas de hormigones, con el uso del cemento Melón Extra, que es un cemento Portland Puzolánico, clasificado como un tipo “Alta Resistencia” según Nch 148 Of. 68. Según norma ASTM C595 Tipo IP (Cemento Portland-Puzolánico). Según norma ASTM C1157 Tipo HS (Alta resistencia a los sulfatos). Los cementos Portland Puzolánicos poseen una composición puzolanas en una proporción no mayor al 30% del peso del producto terminado.

Las características técnicas y mecánicas según el fabricante son las siguientes:

<i>Variable de control</i>	<i>Melón Extra</i>	<i>Requerimiento Nch148.Of68</i>
<i>Fraguado Inicial (min)</i>	100	>45
<i>Fraguado Final (min)</i>	150	<600
<i>Superficie específica Blaine [cm²/gr]</i>	5000	-
<i>Peso Específico [gr/dm³]</i>	2.95	-
<i>Resistencia a compresión [kg/cm²]</i>		
<i>7 días</i>	440	>250
<i>28 días</i>	540	>350
<i>Resistencia a flexotracción</i>		
<i>7 días</i>	65	>45
<i>28 días</i>	75	>350
<i>Perdida por calcinación (%)</i>	2	<4.0
<i>Residuo insoluble (%)</i>	12	<30
<i>Contenido de SO3 (%)</i>	3.5	<4.0

Tabla N° 5: Características Técnicas y Mecánicas Cemento Melón Extra.

3.3 Aditivos.

Aditivo SuperPlastificante

Para la confección de los hormigones reforzados con fibras se utilizan principalmente aditivos reductores de agua conocidos como súper fluidificantes y aireantes.

Al agregar fibras al hormigón en altas proporciones, este sufre una reducción de su docilidad y con el fin de no adicionar más agua de la ya calculada en la dosificación, ni afectar la resistencia y durabilidad esperada, se agrega este tipo de aditivos.

En la confección del hormigón se utilizó el aditivo CV-91 de la industria ULMEN S.A., el cual es un aditivo líquido, libre de cloruros y que actúa como plastificante reductor de agua de alto rango. Este permite un aumento de la docilidad de la mezcla para una cantidad de agua constante o bien una reducción importante de cantidad de agua de amasado para una docilidad dada, conduciendo a mayores resistencias mecánicas a edades iniciales y finalmente a la cantidad de cemento. En la Tabla N°6 se presenta la información técnica de interés con respecto al aditivo utilizado en esta investigación.

CV-91	
Forma	Líquido
Densidad	20°C: $1,1 \pm 0,02$ [g/cm ³].
Envase	Tambor de 200kg], Granel 5 kg].
Duración	1 año en envase original cerrado en lugar fresco y seco

Tabla N°6: Información técnica aditivo CV-91 (Industrias ULMEN S.A.).

Aditivo Polimérico ETONIS 850.

En la confección del hormigón se utilizó el aditivo polimérico ETONIS 850 de la empresa Wacker Chemie A.S, el cual corresponde a un aditivo en forma de polvo redispersable en agua.

ETONIS 850 no debe ser sometido a presión o altas temperaturas durante su almacenaje porque existe riesgo de aglomeración del mismo.

En la Tabla N° 7 entrega la información técnica de interés del aditivo polímero utilizado en esta investigación



ETONIS 850.		
Forma.		Polvo.
Densidad ap.	<i>DIN EN ISO 60</i>	400-550 [kg/m ³].
Envase.	<i>Bolsa .</i>	25 [kg].
Duración.		6 meses.
Cont. sólidos.	<i>DIN EN ISO 3251.</i>	98-100%.
Cont. cenizas.	<i>WACKER method.</i>	8-12%.
Apariencia.	<i>Visual.</i>	Polvo Blanco.

Tabla N° 7: Información técnica aditivo ETONIS 850 (Wacker Chemie A.G).

3.4 Fibras Sintéticas

Las fibras sintéticas utilizadas son Barchip 54 de proveedor ElasticS.A, utilizadas para estructuras de hormigón con resistencia a la compresión mayor a 3000 kg/cm^2 . En la Tabla N°8 se muestran las propiedades de las fibras sintéticas

Barchip 54	
Resina	Olefina modificada
Largo [mm].	54
Resistencia a la tracción $[\text{kg/cm}^2]$.	6400
Superficie	Relieve continuo
Cantidad de fibra [fibras/kg].	37000
Densidad relativa	0,90-0,92
Módulo de elasticidad [Gpa]	10
Punto de fusión (C°).	159-179
Punto de Ignición (C°).	>450

Tabla N°8: Propiedades fibras sintéticas Barchip 54.

3.5 Dosificación.

En la presente investigación realizada, los hormigones se dosificaron según las recomendaciones de método de dosificación de hormigón EFNARC y de Nch 170 Of. 85 Hormigón Requisitos Generales. El hormigón de estudio es un hormigón el cual se conoce la resistencia esperada.

Dicha dosificación fue entregada por el profesor guía de esta memoria, en conjunto a la entidad representante de Elastoplast S.A Chile.

Se observa una disminución en la cantidad de arena, ya que al incorporar el aditivo polímero ETONIS 850 este ocupa un volumen que finalmente disminuye la cantidad de arena, para así completar el volumen tal correspondiente a 1 metro cúbico.

En la tabla N°9 se presentan las dosificaciones a estudiar.

Fecha	Código	Cemento [kg]	Arena [kg]	Agua [Lt]	Fibra [kg]	Relación [a/c]	Hyperplast [cc]	ETONIS (%)
23/12/2014	D1-1B	420	1748,00	212,89	6	0,51	3611,11	0
23/12/2014	D1-2B	420	1748,00	194,44	6	0,46	3277,78	0
09/01/2015	D4-1B	420	1681,56	197,44	6	0,47	2555,56	3
09/01/2015	D4-2B	420	1681,56	194,89	6	0,46	2555,56	3
09/01/2015	D5-2B	420	1641,11	194,89	6	0,46	1888,89	5
09/01/2015	D5-1B	420	1641,11	194,89	6	0,46	1888,89	5
23/12/2014	D3-2B	420	1607,78	194,44	6	0,46	2555,56	7
23/12/2014	D2-1B	420	1607,78	194,44	6	0,46	2555,56	7

Tabla N°9: Dosificaciones de hormigón a estudiar.

3.6 Procedimiento en laboratorio.

Para la ejecución de los ensayos se confeccionaron 36 probetas cilíndricas y 2 paneles cuadrados EFNARC

3.6.1 Registro de Probetas Cilíndricas

Se fabricaron 36 probetas cilíndricas con las respectivas dosificaciones que están en Tabla N° 10. Estas probetas tienen un diámetro de 150 mm] y altura 300 mm], las cuales fueron sometidos a ensayos de Compresión y Modulo de Elasticidad.

Código	Cantidad
D1-1B	2
D1-2B	1
D2-1B	2
D3-2B	1
D4-2B	2
D5-1B	2
D5-2B	2

Tabla N°10: Registro de Probetas Cilíndricas.

3.6.2 Registro de Paneles cuadrados EFNARC

Se fabricaron 12 paneles cuadrados EFNARC, cuyas dimensiones internacionales son 600 [mm] x 600 [mm] x 100 [mm]. Los moldajes fueron confeccionados a partir de placas de metal de 15 [mm] de espesor, y unidas mediante perforaciones y tornillos €soberbios• de 2•.

Estos paneles fueron utilizados para el ensayo de absorción de agua bajo la normativa europea UNE EN 14485:2007.

Código	Cantidad
D1-1B	2
D1-2B	1
D2-1B	2
D3-2B	1
D4-2B	2
D5-1B	2
D5-2B	2

Tabla N°11: Registro de Probetas Cuadradas EFNARC.

3.6.3 Confección de las probetas

La confección de las 36 probetas cilíndricas y 12 paneles cuadrados fueron confeccionados en las fechas 23/12/2014 y 09/01/2014, correspondientes a 4 amasados respectivamente. El hormigón fue confeccionado utilizando la betonera de eje vertical Matesh capacidad nominal de 130 [lt], bajo los parámetros de medición y procedimientos establecidos según la Norma 170 Of 85 €Hormigón f Requisitos Generales• y la Norma 1018 of 77 €Hormigón f Preparación de mezclas de prueba en laboratorio•.

El procedimiento utilizado fue el siguiente:

1. Se agrega el 50% de los agregados pétreos.
2. Se agrega el 50% del agua.
3. Se agrega el 50% del cemento.
4. Se agrega el porcentaje restante de agregados pétreos.
5. Se agrega el porcentaje restante de cemento.
6. Se mezcla el agua con el polvo de aditivo polímero **ETONIS** se incorpora a la mezcla dejando para rectificar la trabajabilidad del hormigón.
7. Se agrega la totalidad de la fibra.
8. Se agrega el aditivo plastificante junto con lo restante de agua para rectificar la trabajabilidad del hormigón.

Foto N°1: Incorporación aditivo polimérico ETONIS 850.

Se debe mezclar todos los componentes durante 3 minutos, hasta alcanzar la trabajabilidad necesaria. Posteriormente se procede al vaciado del hormigón en una carretilla y se realiza el ensayo de asentamiento bajo la norma chilena Nch1019 (Determinación de la docilidad - Método de asentamiento del Cono de Abrams).

Foto N°3: Mezcla homogénea lista para verter.

Foto N°2: Método de asentamiento Cono de Abrams.

Posteriormente realizado el método de asentamiento del Cono de Abrams se procede al vaciado del hormigón en los moldajes correspondientes, luego se vibra el hormigón con una sonda vibratoria de inmersión de 38 [mm] y se enrasa para la terminación a la superficie.

Foto N°4: Vaciado hormigón en moldajes cuadrados.

3.6.4 Curado de las probetas

El curado del hormigón es uno de los procedimientos más importantes que, es la que tiene mayor significancia para obtener las resistencias esperadas. Para ello es importante proteger las probetas de hormigón con láminas de polietileno u otro elemento que impida que las probetas pierdan humedad. El curado de las probetas debe realizarse en cámara de curado hasta que se realice los ensayos, pero el laboratorio no contaba con el espacio suficiente para poder almacenar las probetas confeccionadas, por lo que se dejaron a la intemperie, cubiertas con láminas de polietileno protegidas.

Para el curado de hormigón, la idea es mantener este saturado de agua al 100% o en un porcentaje cercano al máximo, para evitar la pérdida de humedad en la superficie por intermedio de la evaporación debido a las altas temperaturas. Se recomienda mantener a 20(°C) de manera constante para mantener la hidratación y no bajar de ninguna forma.

Las probetas fueron desmoldadas a los 3 días de haberlas confeccionados, se realiza el desmolde de las probetas y luego se van colocando la cantidad de desmoldante necesaria para posteriormente repetir el proceso.

3.6.5 Refrentado de Probeta Cilíndricas.

El procedimiento de refrentado se especifica en la norma Nch 1172 Of.70 Formigón f Refrentado de probetas, el cual establece que se debe realizar con una mezcla de pasta de azufre o en su defecto, una pasta de yeso.

En este caso se especificó utilizar un producto de la empresa SIKA llamado Sikadur 31 HMG, el cual es un adhesivo tixotrópico de dos componentes a base de epoxi, que asegura una adherencia óptima.

Foto N°5: Probetas cilíndricas refrentadas con Sikadur 31 HMG.

Capítulo 4 Ensayos Y Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos luego de elaborar y preparar las probetas de hormigón.

5.1 Propiedades en Estado Fresco

La docilidad del hormigón corresponde a la trabajabilidad de las mezclas de cemento y agua, la cual es una propiedad importante en estado fresco. Esta propiedad se mide mediante el ensayo de Asentamiento del Cono de Abrams, acuerdo a los procedimientos estipulado en la norma chilena Nch 1019 E Of. 74, el cual se realizó en cada amasada.

Los valores obtenidos para cada hormigón se muestran en la Tabla

ETONIS 850 %	Asentamiento del Cono [cm]
0	6
3	22
5	22
7	20

Tabla N°12: Resultados de Ensayos de Asentamiento de Cono de Abrams.

En el gráfico N° 2 se muestra la curva de Asentamiento del Cono de Abrams en función al % de aditivo polimérico ETONIS 850 incorporado al hormigón, para visualizar su efecto en estado fresco.

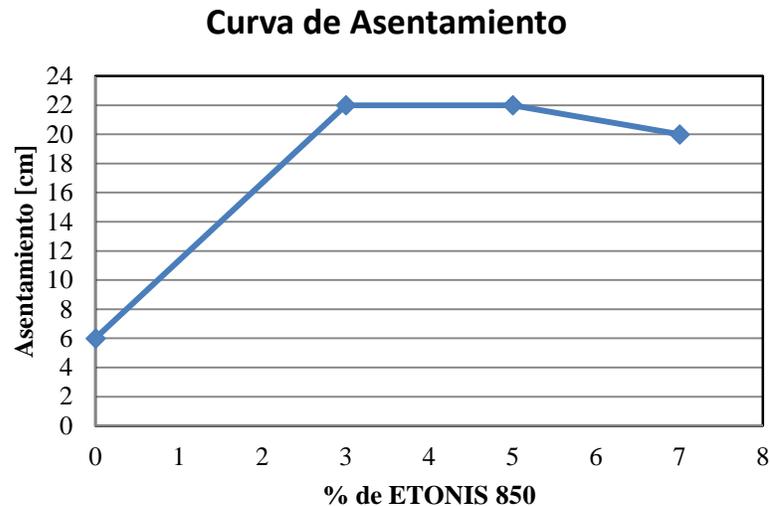


Gráfico N° 2: Cono de Abrams - de Aditivo polimérico ETONIS 850.

En el gráfico anterior, se puede apreciar el efecto que produce el aditivo polímero ETONIS 850 en la trabajabilidad del hormigón. Se observa que a medida que se incorpora mayor porcentaje del aditivo aumentan la docilidad del hormigón, pasando de un cono 6 [cm] a 20 [cm].

A raíz de que ETONIS 850 en sus componentes tiene agentes plastificantes, el aditivo super plastificante CV-90 se disminuyó gradualmente para cada amasada.

Se observó en el vaciado de mezclas en los moldes, para la compactación no resulto necesario la aplicación de vibración, para los hormigones que tenían incorporado el aditivo polimérico ETONIS 850.

4.2 Propiedades en Estado Endurecido.

4.2.1 Resistencia a la Compresión

Para realizar este ensayo y obtener la resistencia de hormigones a compresión, se elaboraron 12 probetas cilíndricas de 150[mm] de diámetro y de 300[mm] de altura, las cuales fueron curadas durante 28 días para luego ser ensayadas. Previo al ensayo, las probetas se refrentaron con un mortero epoxico Sikadur 31 HMG por la cara de llenado de la probeta.

Para el ensayo de compresión se utilizó prensa hidráulica marca Toni Technik (ver Foto N° 6), la cual posee una capacidad máxima de carga de 8000 con una precisión de 0[kN]. Esta prensa posee un sistema de control automático marca Controls MCC8, diseñada para realizar los ensayos a compresión y

Foto N°6: Prensa hidráulica marca Toni Technik.

Para la preparación de la probeta a ensayar se hace necesario el refrentado de pasacaras luego poder posicionar de forma correcta en los platos de la máquina. Ver foto N° 7.

Foto N°7: Ubicación probeta en platos de la prensa.

Esta máquina cuenta con dispositivos de seguridad los cuales se atendieron en el momento de ensaye

Se debe configurar los parámetros de ensaye a Compón en la pantalla de comandos Controls MCC8. La carga aplicada corresponde a lo indicado en Nch 1037 Of. 77a cual no debe superar los $3,5 [N/m^2/s]$, hasta que se produzca la rotura de la probeta, registre de la pantalla el valor de la carga máxima aplicada, tal como se indica en Foto N° 8.

Foto N°8: ...Pantalla de comandos Controls MCC8,.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla N°13.

Probeta Número	Código	Etonis (%)	Resistencia Compresión	Resistencia Compresión Promedi [MPa]		
1	D 1 - 1 B	0	65	68 ± 0,07		
2	D 1 - 1 B		70			
3	D 1 - 2 B		74			
13	D 1 - 2 B		66			
14	D 1 - 2 B		67			
15	D 1 - 2 B		73			
27	D 1 - 2 B		60			
29	D 1 - 2 B		64			
30	D 1 - 2 B		73			
8	D 4 - 1 B		3		42	46 ± 0,06
9	D 4 - 2 B	47				
10	D 4 - 2 B	47				
19	D 4 - 2 B	48				
20	D 4 - 2 B	46				
26	D 4 - 2 B	42				
28	D 4 - 2 B	48				
11	D 5 - 2 B	5	45	45 ± 0,133		
12	D 5 - 2 B		55			
21	D 5 - 1 B		40			
22	D 5 - 1 B		40			
23	D 5 - 1 B		39			
24	D 5 - 2 B		47			
25	D 5 - 2 B		49			
31	D 5 - 2 B		55			
32	D 5 - 2 B		40			
33	D 5 - 2 B		44			
16	D 3 - 2 B		7		46	47 ± 0,111
17	D 3 - 2 B				36	
18	D 3 - 2 B	46				
34	D 3 - 2 B	47				
35	D 3 - 2 B	49				
36	D 3 - 2 B	45				
7	D 3 - 2 B	55				
4	D 2 - 1 B	52				
5	D 2 - 1 B	53				
6	D 2 - 1 B	46				

Tabla N°13: Resultados de los ensayos de compresión a 28 días.

En la Gráfico N° 3, se muestran las curvas de resistencia a compresión a los 28 días en función del contenido de Aditivo Polimérico ETONIS 850, donde se observan las resistencias promedios.

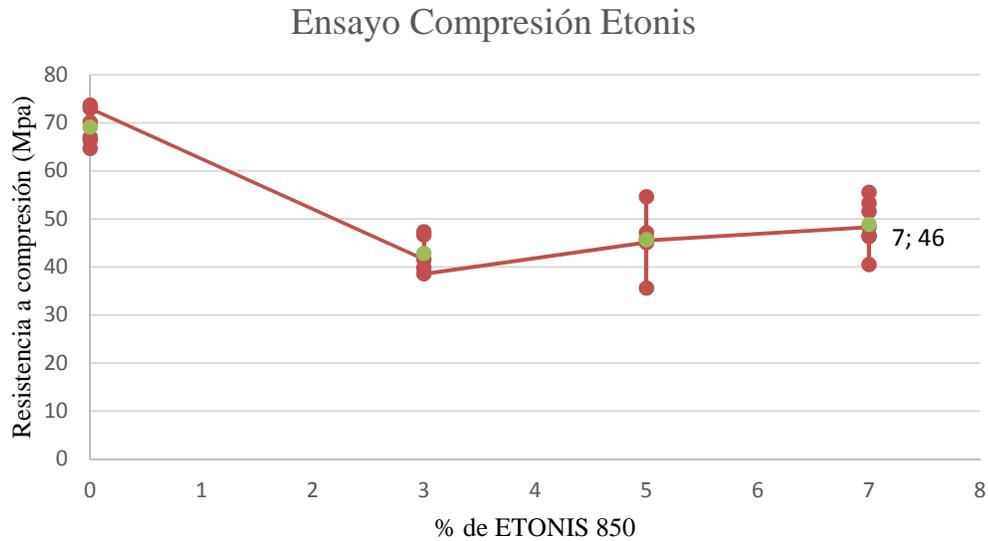


Gráfico N° 3: Resistencia a la Compresión-% de ETONIS 850.

En el gráfico se puede apreciar que el aditivo polímero ETONIS 850 influye directamente en la resistencia a compresión del hormigón, la adición de aditivo polímero en las tres dosificaciones tratadas, 3%, 5% y 7 % respectivamente, disminuye la resistencia a la compresión en un 67% en comparación al hormigón de comparación al cual no fue incorporado el aditivo polímero.

4.2.2 Módulo de Elasticidad

Para obtener el módulo de Elasticidad en los hormigones confeccionados, se determina según la norma ASTM C469/C469M-14. Para estos ensayos se elaboraron 24 probetas cilíndricas de 150 de diámetro [mm] y 300 [mm] de altura ya mencionadas en el punto 4.6, las cuales son curadas a la intemperie durante 28 días para luego ser ensayadas. Previo al ensayo, las probetas fueron refrentadas con un mortero epóxico Sikadur 31 HMG, por la cara de llenado de la probeta.

El ensayo de Módulo de Elasticidad se realiza con prensa hidráulica marca Toni Technik, la cual posee una capacidad máxima de carga de [3000] con una precisión de 0,1 [KN]. Esta prensa posee un sistema de control automático marca Controls MCC8, diseñada para realizar los ensayos de Modulo de elasticidad a la velocidad de carga se fija de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM C469 / C469M-14.

A medida que se realiza el ensayo, se registra carga axial y el desplazamiento que presenta la probeta, esto mediante un sistema electrónico de medición, el cual se compone de dos anillos metálicos y tres transductores tipo LVDT que miden el desplazamiento relativo existente entre ellos y que representa la deformación de la probeta ensayada.

Los anillos son fijados a la probeta mediante tres pernos a una separación de 10 [cm] entre anillos. Estos anillos deben ser concéntricos con la probeta. Los transductores son fijados a los anillos mediante tornillos. Ver Figura N° 10 El sistema de anillos y LVDT montado en la probeta.

Para realizar este ensayo se debe utilizar un amperímetro el cual mide la corriente eléctrica que pasa por la celda de carga (Pieza de vidrio) y el transductor, este dispositivo transforma la corriente en información binaria que entrega datos de carga y desplazamiento, y son registrados en un computador. Este computador posee un software que procesa esta información y permite generar la curva carga vs desplazamiento, y a su vez exportar los datos registrados en un archivo Excel, para su posterior análisis. Ver Figura N° 10 y Fotos N° 9, 10 y 11.

Figura N°10: Esquema Montaje Sistema Anillos y LVDT.

Foto N°9: Probeta y Sistema de anillos.

Foto N°10: Sistema lector de datos.

Foto N°11: Prensa hidráulica, MCC8 para ensayo de Modulo de Elasticidad.

En los ensayos se aplicaron 3 ciclos de cargas y los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Probeta Número	Código	Aditivo Etonis (%)	Módulo de Elasticidad [MPa]	Me Promedio [MPa]
13	D1-2B	0	25217	24568 ± 0,068
14	D1-2B		23821	
15	D1-2B		25146	
27	D1-2B		21803	
29	D1-2B		24591	
30	D1-2B		26829	
19	D4-2B	3	19331	18376 ± 0,113
20	D4-2B		18673	
26	D4-2B		15261	
28	D4-2B		20238	
21	D5-1B	5	17740	18554 ± 0,103
22	D5-1B		16915	
23	D5-1B		15947	
24	D5-2B		20539	
25	D5-2B		19904	
31	D5-2B		21473	
32	D5-2B		17561	
33	D5-2B		18353	
16	D3-2B	7	17027	17329 ± 0,072
17	D3-2B		15640	
18	D3-2B		16183	
34	D3-2B		17982	
35	D3-2B		18644	
36	D3-2B		18501	

Tabla N°14: Resultados de Módulo de Elasticidad a los 28 días.

(a)

(b)

(c)

(d)

Gráfico N°4: Módulo de Elasticidad de las Probetas estudiadas con 3 ciclos de carga.

En el Gráfico N° 5 se muestra un gráfico con los módulos de elasticidad promedio por cantidad de Aditivo polimérico ETONIS 850 en relación a la rigidez del hormigón.

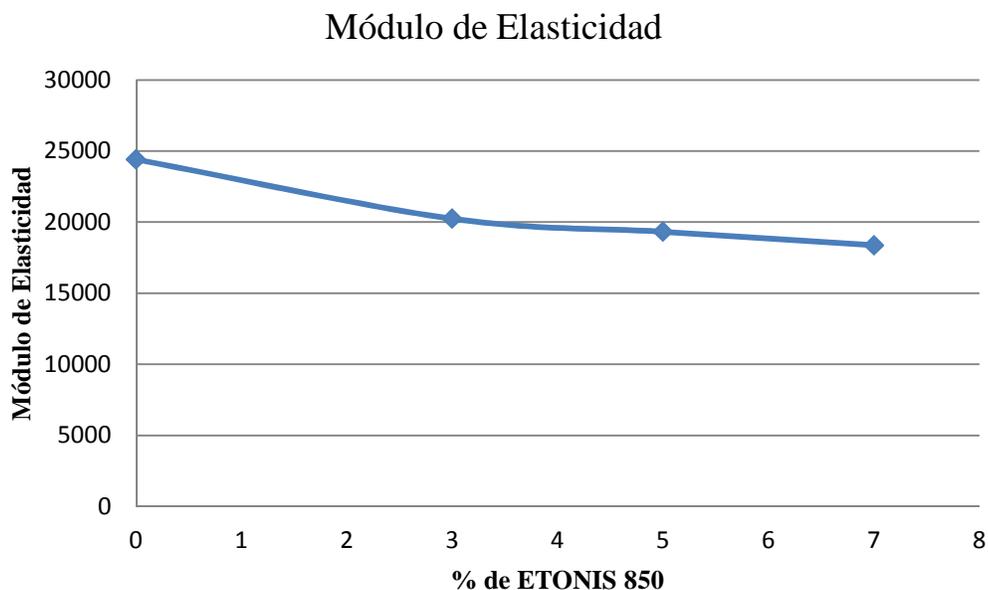


Gráfico N° 5: Módulo de Elasticidad - % de ETONIS 850.

En el gráfico se puede apreciar que a medida que se aumenta la cantidad de aditivo polimérico ETONIS 850, disminuye el Módulo Elasticidad, aproximadamente, en un 70% con respecto al hormigón patrón.

De acuerdo a lo expuesto por el fabricante, el producto polímero ETONIS 850 dentro de sus propiedades menciona que en el hormigón en estado endurecido reduce su módulo de elasticidad; es decir, entrega mayor flexibilidad al hormigón.

4.2.3 Ensayo de Panel Cuadrado EFNARC

Para realizar el ensayo de panel cuadrado EFNARC, se hizo la aplicación de la norma *European Specification for Sprayed Concrete of 1996* de EFNARC y bajo norma UNE-EN 14488-5:2007. Se elaboraron 12 probetas prismáticas cuadradas de dimensiones 600x600x100 [mm], las cuales fueron curadas durante 28 días. Previo al ensayo, las probetas fueron curadas en agua como lo indica la norma.

Las probetas se ensayan a través de un bastidor de carga con capacidad máxima de 1000 [kN]. Este bastidor de carga posee un sistema de control automático marca Controls MCC8 Multitest, diseñado para realizar los ensayos de resistencia a compresión de energía, entre otros. Los parámetros de ensayos deben ser introducidos en el sistema de control MCC8. Ver Foto N° 10.

Foto N°1: Ensayo Panel Cuadrado EFNARC.

El sistema de bastidor de carga está compuesto por un bastidor auxiliar y un vástago con cabezal de carga, estos son instalados al bastidor principal. A modo de lograr un posicionamiento preciso de las probetas, se le realizan unas marcas al bastidor principal, como guía auxiliar, y así la carga se ejecuta en el centro de la probeta.

Se utilizan dos soportes magnéticos con fijaciones móviles para montar los transductores (LVDT) de 50 [mm]. Estos transductores son conectados al sistema de control MCC8 Multitest y son los encargados de medir el desplazamiento y representan la deformación de la probeta ensayada.

Para ejecutar el ensayo, se debe realizar desde el computador conectado al sistema de control MCC8 Multitest, un software que registra los datos obtenidos.

El sistema MCC8 Multitest cuenta con 8 canales, de los cuales 4 son canales de carga y 4 canales para medir desplazamiento o deformación mediante transductores. En el software se configuran los parámetros de los canales 6 y 7, que miden el desplazamiento, además se configuran los parámetros para el canal 2 que registra la carga. En esta investigación se usaron los parámetros establecidos para un hormigón reforzado con fibras.

El software MCC8 Multitest registra los datos obtenidos de los transductores, traduce la información y la almacena en una base de datos que contiene información de cargas, desplazamientos, tiempo y resistencias. Esta base de datos se archiva en una planilla Excel. Posteriormente se analizan los registros y se obtienen los gráficos de Carga vs Desplazamiento, gráficos Energía vs Desplazamiento.

El ensayo de Panel Cuadrado EFNAE permite determinar la Energía de Absorción, se determina de acuerdo a la Norma UNE-EN 1448-5:2007

El ensayo finaliza cuando los controles de desplazamientos indican los 250 [mm].

Para los efectos de esta investigación, se realizaron 12 probetas prismáticas para ver las posibles variaciones de las curvas de energía de absorción y carga desplazamiento. A modo de prueba, dado que este ensayo se está recién implementando en el Laboratorio, se analizaron los paneles más representativos de la muestra.

Para efecto de una mejor representación de los resultados de los ensayos de Absorción de energía se promediaron las energías absorbidas de los paneles de igual densidad a $16 \pm 0,50$.

En la Tabla N° 15 se muestran los resultados de los ensayos de Paneles Cuadrados (EFNARC).

PANEL	Etonis (%)	Energía Promedio [J]
D1E0	0	$919 \pm 0,25$
D2E3	3	$851 \pm 0,04$
D3E5	5	$926 \pm 0,21$
D4E7	7	$906 \pm 0,26$

Tabla N°15: Resultados Ensayos absorción de energía con desplazamiento a 25mm.

Gráfico N°6: Resumen Carga Desplazamiento Paneles estudiados.

El análisis de los ensayos de paneles cuadrados EFNARC se basó en los gráficos de absorción de Energía- Desplazamiento

Gráfico N°7: Resumen Energía-Desplazamiento Paneles estudiados.

Del Gráfico N°6 Carga-Desplazamiento, se observó de las curvas obtenidas que se tienen un similar desplazamiento en el primer peak de carga- punto en que se fisura el panel. Los paneles D4E7 (ETONIS 7%) y D3E5 (ETONIS 5%) su primer peak de carga son similares, y los paneles D3E3 (ETONIS 3%) y D1E0 (Hormigón Patrón sin aditivo polimérico ETONIS) obtienen su primer peak de carga más bajos que los paneles antes mencionados. La curva D3E5 (ETONIS 5%) obtiene su mayor peak de carga, punto en el cual empieza actuar las fibras de hormigón, el hormigón patrón a comparación obtiene su mayor peak de carga inferior a la curva D3E5 (ETONIS 5%). Por último la curva D2E3 (ETONIS 3%) obtiene su mayor peak de carga inferior a las curvas antes mencionadas.

De acuerdo a esto, la adición de aditivo polimérico ETONIS 850 si tiene incidencia en la obtención de los peak de cargas, puntos en los cuales se abren las primeras fisuras de la matriz de hormigón y es el momento en que empieza actuar la fibra

Del Grafico N°7 Energía/Desplazamiento, se ve la absorción de energía de los paneles ensayados. La tenacidad queda representada como el área bajo la curva medida en [J]. El Gráfico Carga/Desplazamiento (Gráfico N° 6)

Los paneles D3E5 (ETONIS 5%) obtiene una tenacidad de un $926 \pm 0,21$ [J], mientras que el panel D4E7 (ETONIS 7%) obtiene una tenacidad de un $906,26$ [J]. Los paneles D1E0 que corresponden a un hormigón patrón sin aditivo obtiene una tenacidad de $919 \pm 0,25$ [J]. Los paneles D2E3 (ETONIS 3%) obtienen una tenacidad de $851 \pm 0,04$ [J]. Se observa que la incorporación de aditivo polimérico ETONIS 850 no muestra gran diferencia con la energía absorbida con la muestra patrón D1E0.

Dado estos resultados del ensayo Absorción de energía, se clasifica la tenacidad de los hormigones estudiados en E700 según la Clasificación de tenacidad, EFNARC.

4.2.3.1 Modo de falla

ETONIS 0%	ETONIS 3%
-----------	-----------

ETONIS 5%	ETONIS 7%
-----------	-----------

Foto N°12: Imágenes comparativa post Ensayo Panel Cuadrado EFNARC.

En las imágenes se observan el modo de falla de los ensayos de panel EFNARC.

Todos los paneles contienen la misma cantidad de fibra sintética, $6 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, en todas las muestras ensayadas muestran 4 grietas características.

Capítulo 5: Conclusiones

Dado que los parámetros actuales de ensayo están enfocados a hormigones reforzados con y sin fibra, no existe registro en el laboratorio LEMCO de la IUTFSM acerca de que se hayan experimentado hormigones modificados con polímeros, puede ser afectado por no tener información comparativa. La variabilidad de los resultados de los ensayos realizados fue analizada bajo el criterio Grubbs con un 95% de confianza, por lo que no fue necesario excluir ningún dato.

En base a los resultados obtenidos en el laboratorio se comprueba que la incorporación de aditivos polímeros ETONIS 850 en el hormigón aumenta significativamente el valor de asentamiento del cono de Abrams, es decir, dando mayor trabajabilidad del hormigón, y reduce considerablemente el uso de aditivo tipo plastificante para lograr el mismo resultado.

Respecto a las propiedades mecánicas del hormigón, se puede concluir que el aditivo polímero ETONIS 850 tiende a disminuir significativamente la resistencia a la compresión. Si se realiza una comparación con el hormigón patrón sin aditivo, disminuye la resistencia en un orden de un 67%.

La incorporación de aditivo polímero ETONIS 850 tiende a reducir el Módulo de Elasticidad del hormigón, es decir, le entrega mayor flexibilidad. En comparación con las probetas que contienen el hormigón patrón sin aditivo, hay una disminución del módulo de elasticidad en un 74,80% para los hormigones con 3% de aditivo polimérico; en un 75,55% para los hormigones con 5% de aditivo polimérico, y en un 70,53% para los hormigones con 7% de aditivo polimérico ETONIS 850.

En el ensayo de panel cuadrado ENARC se observó el modo de falla se observan en todos los paneles 4 grietas características, por lo tanto, no se ve que el producto ETONIS 850, influya en la formación de nuevas grietas.

Del Gráfico N°6 Carga/Desplazamiento, la adición de aditivo polimérico ETONIS 850 si tiene incidencia en la obtención de los peak de cargas, puntos en los cuales se obtienen las primeras fisuras de la matriz de hormigón y es el momento en que empieza a actuar la fibra.

Del Gráfico N°7 Energía/Desplazamiento, se observa que la incorporación de aditivo polimérico ETONIS 850 no muestra gran diferencia con la energía absorbida con la muestra hormigón patrón D1E0.

De los resultados obtenidos de absorción de energía se clasifica la tenacidad de los hormigones estudiados en E700 según la Clasificación de tenacidad, EFNARC.

En esta investigación se pretendía realizar el ensayo de permeabilidad mediante el Método de la penetración de agua bajo presión de la norma Nch 2262. Of 97 de las probetas estudiadas pero no se pudo llevar a cabo porque no existían las condiciones de laboratorio.

REFERENCIAS.

NORMAS

- NCh 163 Of. 1979, Áridos para morteros y hormigones - Requisitos Generales.
- NCh 164 Of. 1976, Áridos para morteros y hormigones - Preparación y extracción de muestras.
- NCh 1116 Of. 1977, Áridos para morteros y hormigones - Determinación de la densidad aparente.
- NCh 1117 Of. 1977, Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y netay la absorción de agua de las gravas.
- NCh 1239 Of. 1977, Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y netade la absorción de agua de las arenas.
- NCh 148 Of. 1968, Cemento *f* Terminología, clasificación y especificaciones generales.
- NCh 165 of 1977, €Áridos para morteros y hormigones *f* Tamizado y determinación de la granulometría•.
- NCH 1172 of 1978,• Hormigón *f* Refrentado de probetas•.
- NCh 1037 of 1977, €Hormigón *f* Ensayo de compresión de probetas cubicas y cilíndricas•.
- Norma Americana, ASTM C469-94. €Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson,s Ratio of Concrete in Compression•.
- Norma Española, UNE 83316-96. €Ensayos deHormigón. Determinación del Módulo de Elasticidad•.
- Norma Española, UNE 83507-04. €Hormigones con Fibras. Roturapor Compresión•.
- UNE-EN 14488-5 of 2007, €Ensayos de hormigón proyectado *f* Parte 5: €Determinación de la capacidad de absorción de energía de probetas planas reforzadas con fibras•.
- BS EN 14889, €Fibras para hormigón• *f* Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad•.
- ASTM C1116-03, €Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete•.

- UNE-EN 14488-1 of 2007, € Ensayos de hormigón proyectado *f* Parte 1: Toma de muestras de hormigón fresco y endurecido•.
- Norma Americana, ASTM C469-94. € Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity•.
- Norma Americana, ASTM C1018-97, € Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beams with Third Point Loading),• 1997.Bibliografía.

PUBLICACIONES

- €Ficha Técnica• ETONI850. WACKER CHEMIE A.G.
- €Flexible Polymer cement repair materials and their applications•, Ivan Razl, Ph.D.,P.Eng.
- Admixture Technical SheetAST 11, Polymer dispersion mixtures, Cement Admixtures Association EFCA.
- CBD-241. • Polymer Modified ConcreteA. Blaga, J.J. Beaudoin
- €Energy absorption and flexural toughness evaluation of fibre reinforced polymer modified concrete•.
- €Experiences with polymer modified shotcrete•, Shotcrete for underground support XI.
- €Implementaci3n del ensayo de panel cuadrado EFNA para determinar la capacidad de absorci3n de energ3a del hormig3n proyectado•, alumno memorista Diego Salvador D3az Sotomayor de la UTFSM.
- €European Specification for Sprayed Concreteof 1996 de EFNARC•.
- Revestimiento de t3neles en concreto lanzado con fibras, German Hermida. RC 2010, Reuni3n del Concreto.
- Seminario Internacional, €Dise1o y Durabilidad del Shotcrete•, Instituto del Cemento y del Hormig3n de Chile, ICH.
- ACI 506R-05, €Guide to Shotcrete, American Concrete Institute•.
- ACI 548.1R97, €Guide for the use of polymers in concrete•.
- ACI 548.3R03, €Polymer Modified Concrete•.
- ACI 548.3R09, • Report on Polymer Modifier Concrete•.
- ASTM C143899, €Standard Specification for Latex and Powder Polymer Modifiers for Hydraulic Cement, Concrete and Mortar•.
- ASTM C143999, €Standar Test Methods for Polymer Modified Mortar and Concrete

ANEXOS

Resultados y gráficos de ensayos de Absorción de energía de cada panel ensayado.

PANEL	CODIGO	CARGA P (kN)	ENERGIA (J)	ETONIS (%)
2	D5B1	20,293	832,79	5

Anexo N°1: Resultado y Gráficos Panel 2 D5B1.

PANEL	CODIGO	CARGA P (kN)	ENERGIA (J)	ETONIS (%)
3	D4B2	21,467	826,44	3

Anexo N^o2: Resultado y Gráficos Panel 3 D4B2.

PANEL	CODIGO	CARGA P (kN)	ENERGIA (J)	ETONIS (%)
4	D5B1	29,227	799,95	5

Anexo N^o3: Resultado y Gráficos Panel 3 D4B2.

PANEL	CODIGO	CARGA P (kN)	ENERGIA (J)	ETONIS (%)
5	D4B2	24,934	874,62	3

Anexo N⁴: Resultado y Gráficos Panel 5 D4B2.

PANEL	CODIGO	CARGA P (kN)	ENERGIA (J)	ETONIS (%)
6	D1B1	15,018	829,09	0

Anexo N⁵: Resultado y Gráficos Panel 6 D1B1.

PANEL	CODIGO	CARGA P (kN)	ENERGIA (J)	ETONIS (%)
	7 D1B2		29,423	1163,62
				0

Anexo N°6: Resultado y Gráficos Panel 7 D1B2.

PANEL	CODIGO	CARGA P (kN)	ENERGIA (J)	ETONIS (%)
8	D1B1	14,77	765	0

Anexo N°7: Resultado y Gráficos Panel 8 D1B1.

PANEL	CODIGO	CARGA P (kN)	ENERGIA (J)	ETONIS (%)
9	D2B1	23,606	823,66	7

Anexo N⁸: Resultado y Gráficos Panel 9 D1B1.

PANEL	CODIGO	CARGA P (kN)	ENERGIA (J)	ETONIS (%)
10	D2B1	25,28	800,39	7

Anexo N⁹: Resultado y Gráficos Panel 10 D2B1.

PANEL	CODIGO	CARGA P (kN)	ENERGIA (J)	ETONIS (%)
11	D3B2	27,518	1030,89	7

Anexo N°10: Resultado y Gráficos Panel 11 **D3B2**.

PANEL	CODIGO	CARGA P (kN)	ENERGIA (J)	ETONIS (%)
12	D5B2	23,328	1117,97	5

Anexo N°11: Resultado y Gráficos Panel 12 **D5B2**.