



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

APLICACIÓN DE MÉTODOS DE PRUEBA PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO
DEL CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS PARA
REVESTIMIENTO DE TÚNELES

CASO PRÁCTICO: AMPL. L12 METRO, TRAMO: MIXCOAC-OBSERVATORIO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
LILIA AGUILAR CORTÉS

TUTOR PRINCIPAL:
DR. CARLOS MÁXIMO AIRE UNTIVEROS
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, Cd. Mx. Enero 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

Secretario: M.I. MARCO TULIO MENDOZA ROSAS

Vocal: DR. CARLOS MAXIMO AIRE UNTIVEROS

1^{er}. Suplente: ING. CARLOS ENRIQUE VIRELAS MARTÍNEZ

2^{do}. Suplente: M.I. JOSÉ FRANCISCO SUÁREZ FINO

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. CARLOS MÁXIMO AIRE UNTIVEROS

FIRMA

DEDICATORIA

A Dios

Porque todas las cosas proceden de él, y existen por él y para él. ¡A él sea la gloria por siempre! Romanos 11:36

A mis padres

Hipolito Aguilar Cruz y Lilia Pilar Cortés Gaspar por darme la vida, cuidar de mi formación, enseñarme buenos principios y siempre apoyar mi desarrollo profesional. Son mi más grande admiración e inspiración.

A mis hermanos

Leslie Daldier, Eric Omar, Hipolito y Roberto por siempre demostrar su apoyo, amistad, aliento y amor a lo largo de este proceso.

A mi Esposo

Por su apoyo y amor incondicional, por todos los consejos y motivación que me ha brindado. Gracias por transmitirme el deseo de superación y enseñarme que el camino hacia el éxito es la perseverancia y el esfuerzo mutuo.

A ti lector:

Deseando que este trabajo de investigación sea de tu interés y aporte nuevos conocimientos.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco al Dr. Carlos Máximo Aire Untiveros por ser mi mentor a lo largo del desarrollo de esta tesis, gracias por sus consejos, los conocimientos, la motivación, atención y dedicación que mostró en todo momento.

A mis sinodales M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, M.I. Marco Tulio Mendoza Rosas, Ing. Carlos Enrique Virelas Martínez y M.I. José Francisco Suarez Fino por sus consejos y sugerencias para enriquecer esta tesis.

A todo el personal del Laboratorio de Estructuras y Materiales (LEM) del Instituto de Ingeniería de la UNAM, por su apoyo para desarrollar todas las pruebas que se incluyen en esta campaña experimental.

Al personal de obra y empresas que participan en la obra: Ampliación de la Línea 12 del Metro, tramo Mixcoac-Observatorio” especialmente en las lumbreras Poniente 83, calle E y Rosa Roja, de quienes recibí todo el apoyo y acompañamiento para desarrollar diversas actividades incluidas en este trabajo de investigación.

A la Dirección General de Obras para el Transporte de la Ciudad de México, periodo 2016-2018 y 2019-2021, por la atención a las solicitudes para aplicar el tema de tesis en una obra de su jurisdicción. Gracias por brindar su apoyo, confianza y acompañamiento en todo momento. Recibí las mejores atenciones y gratas amistades.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico que me brindó durante el curso de la maestría.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por permitirme ser parte de este centro de investigación, hacer uso de sus instalaciones, servicios y brindarme todas las facilidades para realizar este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por otorgar la oportunidad de cursar mis estudios de posgrado y ser parte de esta máxima casa de estudios.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. GENERALIDADES	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2 ANTECEDENTES	3
1.3 JUSTIFICACIÓN	5
1.4 OBJETIVOS	5
1.4.1 General.....	5
1.4.2 Específicos	6
1.5 ALCANCES	6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	7
2.1 ELEMENTOS DE SOSTENIMIENTO Y REVESTIMIENTO UTILIZADOS EN TÚNELES	7
2.2 CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS	7
2.2.1 Materiales	8
2.2.2 Modo de aplicación.....	13
2.2.2.1 Colado en el sitio.....	13
2.2.2.2 Lanzado	15
2.2.3 Recomendaciones para una adecuada aplicación	20
2.2.4 Características principales	22
2.2.5 Aplicación en túneles en México.....	23
2.2.6 Control de calidad.....	24
CAPÍTULO III. CASO PRÁCTICO: Ampliación de la L12 metro, tramo: Mixcoac-Observatorio	26
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	26
3.2 CONTROL DE CALIDAD DE LOS CLRF A USAR COMO REVESTIMIENTO PRIMARIO DE TÚNEL	32
3.2.1 Materiales	32
3.2.2 Producción	33
3.2.3 Transportación	34
3.2.4 Colocación	38

3.2.5 Muestreo y pruebas de laboratorio	40
3.2.6 Curado	43
CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DE MÉTODOS DE PRUEBA	45
4.1 MUESTREO	45
4.2 ENSAYOS	49
4.2.1 Ensayo de panel cuadrado. Norma Europea EN 14488-5	49
4.2.2 Ensayo de panel circular. Norma Americana ASTM C1550	52
4.2.3 Ensayo de doble punzonamiento. UNE 83515	54
4.3 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE FIBRA	58
4.3.1 Estado fresco.....	59
4.3.2 Estado endurecido.....	62
4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	67
4.4.1 Panel cuadrado. Norma Europea EN 14488-5.....	68
4.4.2 Panel circular. Norma Americana ASTM C1550.....	74
4.4.3 Ensayo de doble punzonamiento. UNE 83515	80
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES	100
APORTACIONES	101
LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	103
REFERENCIAS	104
APÉNDICE A	
APÉNDICE B	
APÉNDICE C	
APÉNDICE D	

INTRODUCCIÓN

Para fines de este trabajo se considera como revestimiento primario al elemento de sostenimiento referente al Concreto Lanzado Reforzado con Fibras metálicas. y revestimiento secundario o definitivo, al soporte estructural conformado por concreto lanzado con acero de refuerzo.

La absorción de energía o tenacidad es la propiedad más significativa del Concreto Lanzado Reforzado con Fibra (CLRF). Su uso es una tendencia tecnológica de interés y aplicación en el sector de la construcción desde el siglo XIX hasta la actualidad. Aunado a esto, es indispensable y surge la necesidad, que durante la aplicación de esta tecnología se cuenten con parámetros que puedan caracterizar y evaluar adecuadamente sus propiedades mecánicas.

Por tanto, el interés para desarrollar este tema de investigación surge a partir de aplicar en un caso práctico, tres métodos de prueba para caracterizar el comportamiento de los Concreto Lanzados Reforzados con Fibras (CLRF) en túneles, y permitan conocer aspectos técnicos bajo criterios de calidad en la obra de Ampliación de la Línea 12- Metro, de la Ciudad de México, importante proyecto de infraestructura del Sistema de Transporte Colectivo.

Este tema de estudio pretende conocer el comportamiento de los CLRF; conocer los componentes individuales, procedimientos de diseño, técnicas de producción, transporte, colocación, proceso de curado, muestreo y pruebas de laboratorio; determinar la cantidad de fibra en estado fresco y endurecido y, ofrecer a los constructores elementos para la trazabilidad de la calidad de los CLRF usados en obras subterráneas.

Se realizaron recorridos periódicos a la obra para conocer los procesos constructivos y control de calidad que implementan, se obtuvieron muestras en campo para posteriormente ser evaluadas en el Laboratorio de Estructuras y Materiales (LEM) del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Además de complementar con visitas a la planta Concretera y Laboratorio de Control de Calidad.

El contenido del presente trabajo comprende los siguientes capítulos: I.- Generalidades, donde se incluye el planteamiento del problema, antecedentes, justificación, objetivos y

alcances del tema de investigación; II.- Marco Teórico; III.- Caso Práctico, hace referencia a las características generales de la obra y particularmente la descripción de las etapas de colocación de los CLRF; y IV.- Aplicación de Métodos de Prueba, contiene la descripción, aplicación y análisis de resultados de los métodos propuestos en esta tesis. Además de incluir dos procesos para obtener la cantidad de fibra de en un volumen conocido, con la finalidad de comparar contenidos de fibra teórico (suministrado en el caso práctico como unidad de diseño) y contenido real.

Se incluyen cuatro apéndices que corresponden a: dos artículos producto de esta tesis; un protocolo que incluye una lista de normativas aplicadas a CLRF; y una propuesta de normativa para evaluar la capacidad de las fibras (absorción de energía) ante un estado de agrietamiento por parte del núcleo de concreto de una probeta de sección cuadrada de 600 mm x 600 mm x 100 mm.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La utilización del concreto lanzado reforzado con fibras (CLRF) empleado para el soporte y revestimiento de túneles ha aumentado a gran escala con el paso del tiempo, siendo un éxito al lograr mejoras en tiempo y costos de construcción.

Con relación a la evaluación de los requisitos y procedimientos de control de calidad que determinen el cumplimiento de las especificaciones, comportamiento y desempeño del proyecto, en México no es una práctica común la aplicación de protocolos de muestreo y ensayo en obras donde se utiliza CLRF, específicamente en túneles. En la actualidad se cuenta con normatividad nacional e internacional vigente que responde a estas necesidades. Por tal motivo se realiza la siguiente investigación para tener como referente la aplicación de estos procedimientos en un caso práctico que permita conocer los escenarios, facilidades y resultados.

1.2 ANTECEDENTES

La invención del concreto lanzado se otorga al Norteamericano Carl Ethan Akeley en el año de 1907 (Ryan,1976). La industria precursora en la aplicación del concreto lanzado en obras subterráneas como medios de sostenimiento fue la ingeniería civil a través del ingeniero Rabcewicz en el año 1930 (Sinha, 1989). La difusión de esta tecnología ha sido publicada por Rose (1985), Morgan (1992) y Franzén (1992).

De acuerdo con el documento emitido por el American Concrete Institute por sus siglas en ingles ACI 506 (ACI 506, 2016), al concreto lanzado se le conoce como concreto neumático o proyectado, que consiste en un concreto o mortero impulsado y transportado a través de una manguera, que posteriormente es proyectado neumáticamente a alta velocidad contra una superficie. Este método propone el empleo del concreto lanzado, como soporte primario y/o definitivo, las especificaciones para concreto lanzado subterráneo (ACI 506.5R) y las especificaciones para concreto reforzado con fibra (ACI 544.3R-08). Esta técnica se ha popularizado mostrando ventajas tales como: alto rendimiento, facilidad, versatilidad al trabajarse, flexibilidad en su aplicación gracias a las nuevas tecnologías que surgen y su

adaptabilidad a complejas geometrías de los túneles propiciando un mayor rendimiento optimizando los procesos constructivos y avance de manera eficiente.

El uso del concreto lanzado reforzado con fibras (CLRF) ha tenido gran auge en la industria de la construcción por tratarse de una tecnología que aporta grandes avances en los procesos constructivos, debido a que al ser lanzado los procedimientos de colocación y compactación del concreto se presentan en una misma etapa, la adición de fibras a la mezcla de concreto mejora su comportamiento estructural, principalmente al agrietamiento, tenacidad y resistencia al impacto (Aire, 2016).

Actualmente, se considera a la calidad como sinónimo de excelencia y para el caso específico del concreto lanzado garantiza la seguridad y costo efectivo del soporte. El control de calidad debe ser representativo, simple, relativamente barato, que sea realizado a tiempo (Bracamontes, 2014)

(...) Se puede alcanzar los requisitos de calidad, siempre que se cumpla rigurosamente con la calidad requerida en cada una de las etapas; es decir: (a) Componentes individuales, (b) Procedimientos de diseño, (c) Técnicas de producción, (d) Transporte, colocación y proceso de curado y (e) Muestreo y pruebas de laboratorio”. (Patiño y Méndez, 2016, p.60). Estos requisitos deben estar fundamentado en normas y procedimientos estadísticos.

Dentro de los métodos de prueba directos utilizados como parámetro del control de calidad de los concretos lanzados reforzados con fibras se encuentran: *El ensayo Barcelona (BCN) o de doble punzonamiento (UNE 83515, NMX-C-538-ONNCCE-2017)* con base al ensayo de doble punzonamiento propuesto por Chen (1970) y con eficiente aplicabilidad como método de control del comportamiento de tensión indirecta desarrollado por Aguado et al. (2005), para evaluar la capacidad de las fibras en las dos direcciones del plano; *Ensayo de panel de sección circular (ASTM C1550, NMX-C-539-ONNCCE-2017)* desarrollado por Bernard (Bernard, 1999; Bernard y Pircher, 2001); y el *Ensayo de panel de sección cuadrada (EN 14488-5)*. Todos estos ensayos representan una alternativa para evaluar la flexión, tenacidad, resistencia residual y absorción de energía de los CLRF. Recientemente estos y otros métodos se han desarrollado en diversos trabajos de investigación experimental que desarrolla el

Instituto de Ingeniería de la UNAM, con la finalidad de caracterizar el comportamiento de los concretos reforzados con fibras (Aire, 2016).

Son los requisitos que solicite el proyecto en los catálogos de especificaciones, los que establezcan las características, proceso de fabricación, calidad, etc. que debe cumplir el concreto lanzado. Rey (2006) afirma que “Cada vez más, se debe controlar la cadena de fabricación, conociendo cada etapa, y mejorando las deficiencias que pudieran presentarse” (p.20). De la misma forma con los procedimientos de transporte, colocación, curado, muestreo y ensayos que permitan un óptimo desempeño estructural.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los requisitos de calidad están estrechamente relacionados con las normas, por lo tanto, para ser alcanzados se debe cumplir ordenadamente cada etapa de los procesos, particularmente de los concretos lanzados reforzados con fibras, relacionados con los componentes individuales, procedimientos de diseño, técnicas de producción, transporte, colocación, proceso de curado, muestreo y pruebas de laboratorio.

Por tal motivo, el desarrollo de esta tesis se enfoca en realizar todos los protocolos y técnicas propuestas para monitorear los requisitos de calidad que permitan verificar el comportamiento de los CLRF en un caso de estudio, incluyendo aspectos relativos a los procesos que se deben seguir cuando se trata de obras civiles como los túneles y sirvan como referente en la práctica.

La aplicación de esta tecnología en obras civiles a nivel mundial permite tener un referente respecto al éxito en su aplicación que permite alcanzar niveles de calidad, seguridad, costo y tiempo de construcción más exigentes.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 General

Aplicar los ensayos directos establecidos en las normas EN 14488-5, ASTM C1550 y UNE 83515 para evaluar el desempeño de los concretos lanzados reforzados con fibras en túneles.

1.4.2 Específicos

Compilar aspectos técnicos en cada una de las etapas relacionadas con los Concreto Lanzados Reforzados con Fibras (CLRF) a utilizar como revestimiento primario de túneles, es decir, de los componentes individuales, procedimientos de diseño, técnicas de producción, transporte, colocación, proceso de curado, muestreo y pruebas de laboratorio.

Determinar la cantidad de fibra que contiene cada espécimen ensayado y relacionarla con su mezclado, lanzado, desempeño y proporción.

Describir el proceso para determinar la cantidad de fibra que contiene un espécimen en estado fresco.

1.5 ALCANCES

En cada obra se presentan modificaciones en relación con el proceso constructivo y específicamente el control de calidad al emplear distintas tecnologías de acuerdo con los alcances de cada proyecto. Estos sucesos hacen necesario investigar y proponer un sistema global para el control de calidad necesario en el uso de concreto lanzado con fibras para el revestimiento primario de túneles, lo cual conlleva a que el aporte brindado por esta tesis complemente y proporcione conocimiento a los constructores de túneles respecto a las acciones que se deben tomar al utilizar concretos lanzados con fibras para su buen funcionamiento y cumplimiento de sus características físicas y mecánicas.

Conocer las facilidades, dificultades y demás condiciones que se presenten en la aplicación de los métodos actuales para evaluar los Concretos Lanzados Reforzados con fibras en túneles, con fines futuros de establecer un Protocolo de Control de Calidad.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 ELEMENTOS DE SOSTENIMIENTO Y REVESTIMIENTO UTILIZADOS EN

TÚNELES Un túnel puede definirse como una obra civil subterránea de forma lineal regularmente horizontal a excepciones cuando por motivos particulares del terreno tiene ángulos de inclinación, su finalidad es comunicar dos puntos y actualmente se aplica en la construcción de carreteras, ferrocarriles, obras hidráulicas, minas, etc. que permitan el libre transporte de personas, materiales y servicios.

Cuando se realiza una excavación para túnel, las características geomecánicas del terreno pasan de un estado de equilibrio a una descompresión e inestabilidad conforme se tiene avance en la excavación. Para asegurar el entorno cercano a la cavidad y limitar las deformaciones, desplazamientos, caídos, etc., se recurre a la utilización de elementos estructurales de sostenimiento y reforzamiento para estabilizar y consolidar el terreno presente alrededor de una excavación, mismos que favorezcan su equilibrio y seguridad.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes en el Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera (SCT, 2016) indica que los sistemas de sostenimiento comunes, utilizados en excavaciones subterráneas son los siguientes:

- *Soporte convencional o estructural.* Se refiere a anillos, marcos, dovelas, etc.
- *Sostenimiento inducido por estabilización o consolidación.* Incluye las inyecciones, congelación, concreto lanzado, etc.
- *Sostenimiento pasivo o por reforzamiento de la masa.* Tales como anclas comunes de fricción, barras adherida, concreto lanzado, segmentos de marcos, marcos de celosía, etc.

Particularmente dentro de los sistemas de sostenimiento, el concreto lanzado es un método que cumple las características de un sistema para soporte estructural y/o revestimiento. Con la finalidad de mejorar sus características mecánicas, normalmente se puede reforzar con adiciones que permitan la mayor capacidad de absorción de cortante y flexión, etc., que aseguren la durabilidad de este.

2.2 CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

El concreto se define como un material artificial formado a partir de una mezcla de cemento, agregados y agua que puede incluir aditivos y adiciones como las fibras que permite obtener mayor resistencia a flexión, ductilidad, evitar fisuras y reducir espesores, entre otros. Debe cumplir con parámetros de calidad, resistencia, durabilidad y economía.

La ACI 544.1R (2002) define al concreto reforzado con fibras (CRF) como “Un concreto hecho principalmente de cementos hidráulicos, agregados y fibras de refuerzo discretas. Las fibras adecuadas para reforzar el concreto se han producido a partir de acero, vidrio y polímeros orgánicos (fibras sintéticas). Las fibras naturales de asbesto y las fibras vegetales, como el sisal y el yute, también se utilizan para refuerzo (...). En general, la longitud y el diámetro de las fibras utilizadas para CRF no exceden las 3 pulg. (76 mm) y las 0.04 pulg. (1 mm), respectivamente”.

2.2.1 Materiales

A continuación, se mencionan los materiales que se utilizan particularmente en los concretos reforzados con fibras.

Cemento

El cemento hidráulico es un aglutinante que al estar en contacto con el agua tiende a endurecer, representa el 25%-40% del volumen total del concreto. La Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017 clasifica al cemento a partir de los componentes básicos (tipo) y los requisitos de éstos como la resistencia mecánica a la compresión y las características especiales de durabilidad ante agentes agresivos tal como se resume en la tabla 2.1. Además, debe cumplir los requisitos establecidos en la ASTM C-150.

Cuando el concreto está expuesto a la acción de suelos con altas concentraciones de sulfatos, es conveniente emplear cemento sulforresistente.

Agregado

Son materiales granulares que se usan para elaborar concreto hidráulico. Se rigen por las normas NMX C-111-ONNCCE-2018 o ASTM C-33.

El agregado grueso (grava) se define como la fracción de árido mineral retenido en el tamiz n° 4, este debe cumplir los requisitos de ASTM C-1436. El agregado fino (arena) está compuesto por partículas que pasan el tamiz n°4.

Tabla 2.1: Clasificación del Cemento por tipo, resistencia y características especiales. NMX-C-414-ONNCCE-2017

Tipo		Resistencia	Características especiales	
CPO	Cemento Portland Ordinario	20	RS	Resistencia a Sulfatos
CPP	Cemento Portland Pozolánico	30	BRA	Baja Reactividad Alkali-agregado
CPEG	Cemento Portland Escoria Granulada	40	BCH	Bajo Calor de Hidratación
CPS	Cemento Portland Humo de Sílice	30R	B	Blanco
CPC	Cemento Portland Compuesto	40R		
CEG	Cemento Escoria Granulada			

Todos los agregados (grueso y fino) deben estar limpios y libres de materia orgánica y/o contaminante, deben estar compuestos de partículas duras, resistentes y una calidad uniforme.

La ACI 506 R-90 recomienda diferentes granulometrías para los agregados utilizados en la mezcla de los concretos lanzados, tal como se indica en la Tabla 2.2

Tabla 2.2: Límites granulométricos para combinación de agregados en concreto lanzado. ACI 506.

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa por malla individual	
	Graduación 1 (fino)	Graduación 2 (grueso)
3/4 " (19 mm)	-	-
1/2 " (13 mm)	-	100
3/8 " (10 mm)	100	90-100
No. 4 (4.75 mm)	95-100	70-85
No. 8 (2.4 mm)	80-100	50-70
No. 16 (1.2 mm)	50-85	35-55
No. 30 (600 µm)	25-60	20-35
No. 50 (300 µm)	10-30	8-20
No. 100 (150 µm)	2-10	2-10

Agua

Debe ser obtenida a partir de una fuente potable, estar limpia y libre de impurezas o sustancias nocivas, de lo contrario se verificará que el agua a usar este libre de aceites, materia orgánica u otra(s) sustancia(s) que pueda(n) contaminar o dañar el concreto. Se usa principalmente en el mezclado, lavado de agregados y curado. Representa alrededor del 20%-25% del volumen del concreto. Es de vital importancia para el proceso de hidratación del cemento que por

consiguiente proporciona consistencia, desarrolla el fraguado, propiciando la generación de calor y resistencia a compresión (f'_c). Los requisitos de calidad se indican en la NMX-C-122, ASTM C-1602, ASTM C-94, ACI 318, ACI 201. Entre los efectos que puede originar el consumo de esta materia prima, son: retardar o acelerar el fraguado, disminuir la resistencia, manchar el concreto, provocar expansiones o inestabilidad volumétrica.

Aditivo

Representan menos del 1% del volumen de concreto, son compuestos químicos que se utilizan para modificar el comportamiento de los concretos de acuerdo con las condiciones que se requieran y se dosifican conforme al volumen de cemento, generalmente los rangos varían entre 0.5% y 6%.

La Norma Mexicana NMX-C-255-ONNCCE-2013 al igual que la ASTM C-494, ASTM C-1017 y ASTM C-260 presentan una clasificación de los diferentes tipos de aditivos con base en la función que tienen al mezclarse con el concreto (Ver tabla 2.3) y particularmente la norma ASTM C-1141 referente a los materiales calificados para usar en mezclas de concreto lanzado de cemento Portland (Ver tabla 2.4).

Estos productos se agregan durante el mezclado ya sea en planta si es prefabricado o en obra, no debe agregarse directamente a la mezcla, por tanto, debe disolverse junto al agua requerida para la mezcla y por consiguiente hacer un ajuste a la cantidad de agua.

En los concreto reforzado con fibras metálicas, no deberá incorporarse a la mezcla aditivos con cloruros. El aditivo que se utiliza es de tipo acelerante, cuidando en todo momento que éste no sea más alcalino que el cemento empleado y su manejo no represente un riesgo para la salud.

Cuando los concretos son premezclados, es evidente el uso de aditivos de línea para agregar beneficios y ventajas al producto, como acelerar resistencias tempranas, disminuir la permeabilidad, incrementar la trabajabilidad, regular el tiempo de fraguado, reducir la segregación, facilidad de bombeo, entre otros. Estas condiciones propician la necesidad de verificar la compatibilidad entre todos los aditivos que se suministran a la mezcla, a fin de garantizar el cumplimiento de sus objetivos, es decir, para el propósito que fueron suministrados. Cuando se utilizan estos productos, se deben seguir las recomendaciones del proveedor, quien deberá indicar el tipo y dosificación para la aplicación.

La aplicación de aditivos en los concretos lanzados puede realizarse de diferentes formas, por ejemplo, por vía húmeda el aditivo líquido se mezcla en la boquilla; por vía seca regularmente se utilizan aditivos líquidos mezclados en la boquilla o disueltos en el agua de mezclado o en polvo. El suministro de aditivo en la boquilla de los equipos de lanzamiento puede hacerse de tres formas: mediante líneas separadas (manguera de aire y manguera de aditivo); mediante una misma línea (la manguera de acelerante se conecta a la manguera de aire y al final ambos se mezclan con el concreto en la boquilla); y a través de un doble punto de inyección (parecido al anterior, sólo que antes de llegar el aire y aditivo mezclado a la cámara de curado, ésta tiene un doble punto de inyección).

Tabla 2.3: Clasificación de aditivos.

Norma	Tipo	Función
ASTM C-494	A	Reductor de agua
	B	Retardante de fraguado
	C	Acelerante
	D	Reductor de agua y retardante
	E	Reductor de agua y acelerante
	F	Reductor de agua de alto rango
	G	Reductor de agua de alto rango y retardante
ASTM C-1017	I	Superplastificante
	II	Superplastificante y retardante
ASTM C-260	AA	Incluidor de aire

Tabla 2.4: Clasificación de aditivos de acuerdo con la ASTM C-1141

Tipo	Grado	Clase
I: Mezcla seca de concreto lanzado	1: Aditivo acelerante convencional	A: Líquido B: No líquido
	2: Retardar la mezcla	
	3: Aditivo puzolánico	
	4: Aditivo de hierro metálico	
	5: Aditivo para colorear	
	6: Aditivo de polímero orgánico	
	7: No aplicable	
	8: No aplicable	
	9: Aditivo acelerador, fraguado rápido	

Continua

Tabla 2.4: Continua

Tipo	Grado	Clase
	1: Aditivo acelerante convencional	
	2: Retardar la mezcla	
	3: Aditivo puzolánico	
II: Mezcla húmeda de concreto lanzado	4: Aditivo de hierro metálico	A: Líquido
	5: Aditivo para colorear	B: No líquido
	6: Aditivo de polímero orgánico	
	7: Aditivo reductor de agua	
	8: Aditivo de aire incorporado	
	9: Aditivo acelerador, fraguado rápido	

Fibras

La ASTM C-1116 la define como un filamento alargado y esbelto en forma de manojo, malla o hebra de material natural o manufacturado que puede ser distribuido a través del concreto fresco y las clasifica de acuerdo con el tipo de material (Ver tabla 2.5), mientras tanto indica que la fibra de acero, debe ser doblada, trefilada en frío, con resistencia mínima a tensión de 1100 MPa, longitud mínima entre 25 y 35 mm, estar libre de aceite, grasa, corrosión u otros contaminantes, previo a su incorporación en la mezcla. También pueden clasificarse por su diámetro en microfibras que tienen como finalidad controlar las fisuras en estado fresco y macrofibras destinadas a prevenir fisuras en estado endurecido y mejorar el desempeño mecánico, se encargan de aumentar la tenacidad del concreto, es decir, pueden aportar a la matriz del elemento la capacidad de soportar cargas post-agrietamiento, antes de colapsar (capacidad de absorción de energía); otra clasificación está dada por su geometría. Actualmente existe una amplia variedad relacionada con su tamaño, forma y espesor.

Tabla 2.5: Clasificación de fibras de acuerdo con el material empleado. ASTM C-1116

Clasificación	Descripción
Tipo I	Fibras de acero (inoxidable, de aleación, o al carbón).
Tipo II	Fibras de vidrio (pueden sufrir el ataque de los álcalis, a menos que sean especialmente producidas como resistentes a estos).
Tipo III	Fibras sintéticas (polipropileno de homopolímero virgen, otros materiales deben poseer historial de durabilidad).

Las fibras representan un refuerzo adicional al concreto hidráulico. Se agregan durante el mezclado para lograr una distribución aleatoria en proporciones menores al 1% del volumen.

Su empleo aumenta la resistencia al impacto, al agrietamiento, evita la presencia de fisuras y principalmente proporciona capacidad de carga post-fisuración del concreto.

La fibra se puede agregar de dos formas, dependiendo de las condiciones de suministro, al momento de fabricar el concreto si se trata de premezclado (junto con el agregado) o en obra.

Su rendimiento está estrechamente relacionado con la dosificación, relación longitud-diámetro (l/d), forma, mezclado, etc.

2.2.2 Modo de aplicación

El modo de aplicación de los concretos reforzados con fibras suele determinarse a partir de la forma del elemento que lo va a recibir, el acabado y de las condiciones propias de la obra. A continuación, se describe en qué consiste cada forma de aplicación.

2.2.2.1 Colado en el sitio

Los concretos colados en sitio se pueden disponer a partir de mezcladoras estacionarias o premezclados, en ambos casos se debe cuidar la calidad del producto terminado para poder ser colado; es importante elegir el método más apropiado de manejo dependiendo del tipo de obra, la cantidad de concreto requerido y tiempo programado para su correcta aplicación, con la finalidad que impida la presencia de segregación, endurecimiento prematuro, secado, juntas frías, etc.

Algunos métodos de cimbrado (Ver figura 2.1 y 2.2), colado de acuerdo con Martí et al. (2012) y compactación según N CTR CAR 1 05 008/00, se describen en la tabla 2.6.

Tabla 2.6: Métodos de cimbrado, colado y compactación para concreto con fibras colado en sitio.

Métodos de cimbrado	Métodos de colado	Métodos de compactación
Cimbra metálica telescópica/deslizable (Villanueva, 2013)	Bombas	Mecánico: Vibración interna/de inmersión
Método Bernold. (Martí et al., 2012)		
Cimbra deslizante (Martí et al., 2012)	Transportador neumático	Mecánico: Vibración externa/ de contacto

El concreto hidráulico reforzados con fibras es un material fluido, por consiguiente, adquiere la forma que posee la geometría de la cimbra que se utiliza o en su defecto de la forma que posee el elemento a colar.

La utilización de los concretos reforzados con fibras colocados, tiene gran aplicación en pisos industriales, taludes, revestimientos primarios y secundarios de túneles en minería y de obra civil, en donde típicamente se usan cimbras deslizantes construidas a partir de perfiles de acero, por su alta resistencia mecánica y propiedades de deformación, diseñadas de acuerdo con la sección excavada (principalmente circulares). Además, al colocar las cimbras previo a la colocación del concreto, ofrecen soporte ante posibles deformaciones prematuras, evita colapsos y posterior al colado de concreto ofrece un acabado a la superficie.

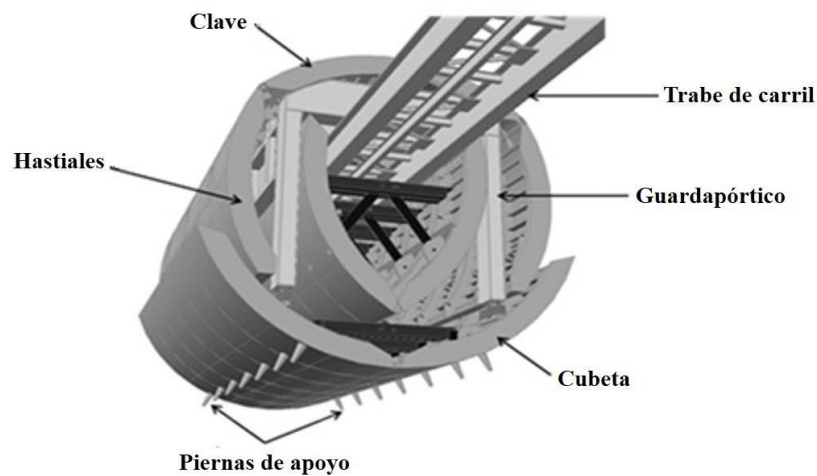


Figura 2.1: Cimbra metálica telescópica. Tomada de Villanueva (2013).



Figura 2.2: Cimbra metálica deslizable usada en la colocación de concreto reforzado con fibras sintéticas, obra: Túnel Emisor Oriente.

2.2.2.2 Lanzado

En las especificaciones para concreto lanzado (ACI 506.2-95), informado por el comité ACI 506 establece que el concreto lanzado es un mortero o concreto lanzado neumáticamente a gran velocidad contra una superficie. Por otro lado, el concreto lanzado es definido por la especificación EFNARC (European specification for sprayed concrete) como una mezcla de cemento, agregados y agua, proyectados neumáticamente desde una boquilla para producir una masa homogénea, puede incluir aditivos y fibras. Cuando se aplican concretos lanzados no se utilizan cimbras y el vibrado se descarta al estar incluido en el proceso de lanzado.

Se define como concreto lanzado reforzado con fibra (CLRF) a la mezcla compuesta por cemento, agregados y agua que contienen fibras discontinuas y dispersas proyectadas neumáticamente a una gran velocidad sobre una superficie. La norma ASTM C 1436 hace referencia a los materiales que se utilizan en el concreto lanzado.

Existen diversas metodologías de diseño para la aplicación de concreto lanzado en túneles con presencia de suelo rocoso, donde se hace uso de métodos empíricos, analíticos o modelación numérica, dependiendo de las circunstancias y alcances del medio a estudiar (Castro, 2016). A manera de ejemplo se presenta a continuación una breve descripción del método empírico basado en el sistema Q, desarrollado por Barton et al (1974, 1993)

determinado con la ecuación (1), que si bien es aplicable para materiales rocosos, se incluye una adaptación de valores de E (Castro, 2016).

$$Q = \left[\frac{RQD}{J_n} \right] \left[\frac{J_r}{J_a} \right] \left[\frac{J_w}{SRF} \right] \quad (1)$$

Donde:

- RQD Índice de calidad de la roca
- J_n Índice del número de familias de fracturas
- J_r Índice de rugosidades en las fracturas
- J_a Índice de alteración de las paredes de las fracturas
- J_w Índice del factor de reducción de agua
- SRF Factor de reducción por esfuerzos

Además de conocer la Q de Barton, conocida también como clasificación geomecánica de acuerdo con la calidad de la roca como se menciona en la tabla 2.7, es necesario determinar la dimensión equivalente de acuerdo con la ecuación (2), definida por los requisitos de seguridad expresados como ESR (Excavation Support Ratio) indicadas en la tabla 2.8 y el claro o altura de excavación. Éstos valores servirán de referencia para conocer en el ábaco de Barton el tipo de sostenimiento sugerido a utilizar en túneles (ver Figura 2.3).

$$\text{Dimensión equivalente} = \frac{\text{Claro o altura en m}}{ESR} \quad (2)$$

Tabla 2.7: Clasificación geomecánica basada en el sistema Q. Extraído de Castro (2016).

Valor Q	Grupo	Clasificación
0.001-0.01	3	Excepcionalmente mala
0.01-0.1		Extremadamente mala
0.1-1		Muy mala
1-4		Mala
4-10	2	Mediana
10-40		Buena
40-100		Muy buena
100-400	1	Extremadamente buena
400-1000		Excepcionalmente buena

Tabla 2.8: Valores de ESR. Extraído de Castro (2016)

Tipo de excavación		Valor ESR
A	Excavación temporal en minas, etc.	3.0-5.0
B	Lumbreras de sección circular, rectangular o cuadrada.	2.0-2.5
C	Mina permanente, túneles de agua para hidroeléctricas, túneles piloto y túneles de desvío.	1.6
D	Túneles carreteros menores, túneles de acceso, drenaje, etc.	1.3

Continúa

Tabla 2.8: Continua

	Tipo de excavación	Valor ESR
E	Centrales eléctricas, plantas de tratamiento, túneles carreteros principales, túneles ferroviarios, intersecciones, portales, etc.	1.0
F	Estaciones nucleares subterráneas, estaciones de trenes, fabricas, etc.	0.8
G	Cavernas muy importantes con una vida de uso larga, o sin acceso para mantenimiento.	0.5

En la figura 2.3 se presentan los valores de Q que han sido asociados y adaptados a los valores de absorción de energía (E) para una flecha de 25 mm en diferentes condiciones de suelo rocoso (ver tabla 2.9) de acuerdo con la clasificación basadas en la Norma Europea EN 14487-1 y al ensayo de placa cuadrada EN 14488-5.

Los refuerzos recomendados en la figura 2.3 representados por números dentro de círculos del 1-8 se describen en la tabla 2.10.

El procedimiento de lanzado depende del equipo a utilizar: manual o robotizado; y por la composición de la mezcla de concreto: por vía seca o húmeda. La selección de estos procedimientos dependerá de los requisitos y alcances particulares de cada proyecto.

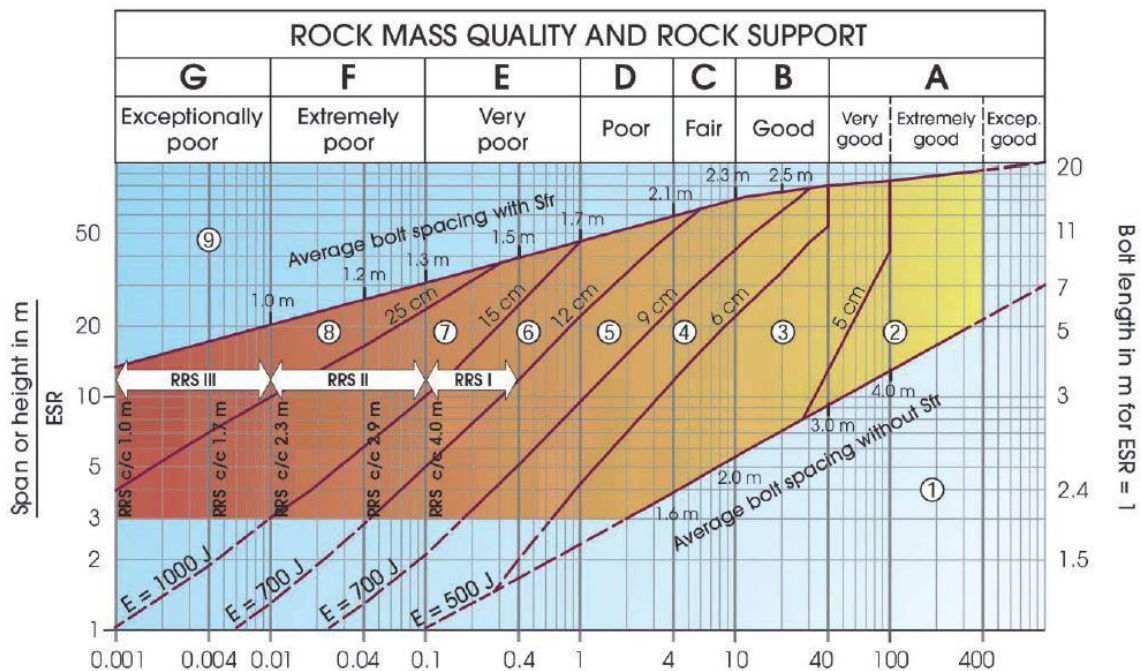


Figura 2.3: Recomendaciones para sostenimientos permanentes basados en el valor de Q y la dimensión equivalente. Extraído de Castro (2016).

Tabla 2.9: Requisitos de absorción de energía EN 14487-1.

Clasificación de tenacidad	Absorción de energía $\delta 25$ mm	Condiciones del terreno
E500	500 Joules	Terreno sólido
E700	700 Joules	Terreno intermedio
E1000	1000 Joules	Terreno difícil

Tabla 2.10: Refuerzos recomendados a partir del cuadro de diseño propuesto por Barton.

Número	Recomendación de refuerzo
1	Sin sostenimiento o anclas
2	Anclas
3	Anclas sistemáticas, concreto lanzado reforzado con fibras de 5-6 cm
4	Concreto lanzado reforzado con fibras de 6-9 cm y anclas
5	Concreto lanzado reforzado con fibras de 9-12 cm y anclas
6	Concreto lanzado reforzado con fibras de 12-15 cm y anclas, más marcos metálicos con concreto lanzado y anclas.
7	Concreto lanzado reforzado con fibras mayor a 15 cm más marcos metálicos con concreto lanzado y anclas.
8	Concreto armado.
9	De evaluación especial.

a) Manual

Es una técnica de colocación menos usada en la actualidad, que ha sido reemplazada en el tiempo por el empleo de equipos robotizados los cuales garantizan una mejor proyección, sin embargo, es una técnica que se sigue utilizando en algunas obras, como en el caso de la presente aplicación en la obra de ampliación de la L12 metro, que se presenta en menor proporción respecto a la proyección mecanizada. Para el desarrollo de esta técnica se dispone de una persona (lanzador) especializada para manejar la manguera de forma manual, resulta más crítico cuando se realiza por vía seca porque es quien debe controlar el suministro de agua en la boquilla, además de resistir los movimientos por rebote de la propia manguera y el peso de esta en las maniobras necesarias para alcanzar las áreas a revestir. Usualmente se recurre a la utilización de plataformas mecanizadas con la finalidad de alcanzar alturas mayores y puntos inaccesibles.

El operador debe mantener la boquilla perpendicularmente al área a revestir durante todo el proceso de lanzado y hacer movimientos circulares u ovals que permitan reducir el rebote del lanzado. La destreza del operador es imprescindible para obtener la superficie requerida, espesores, avances, etc.

b) Robotizado

En este procedimiento se recurre a la utilización de equipos mecánicos robotizados, sus componentes se indican en la figura 2.4.

Este método se usa siempre y cuando las áreas de maniobra lo permitan y se requiera altos niveles de producción en obra, comúnmente se usan para la aplicación de concretos por vía húmeda. Se trata de equipos que trabajan mediante un control remoto (radio o cable) manipulado por un operador desde un lugar seguro, quien tiene la responsabilidad de gestionar y modificar el uso del concreto, aditivo, brazo de proyección y boquilla.

c) Vía húmeda

Este procedimiento se presenta cuando todos los materiales que componen el concreto, incluyendo el agua, son mezclados antes de transportar el concreto a través de la manguera que lanza el concreto en la superficie a revestir.

d) Vía seca

Se presenta cuando los materiales componentes del concreto se han mezclado excepto el agua, misma que se agrega en la boquilla de salida (manguera) previo al lanzamiento en la superficie a revestir.

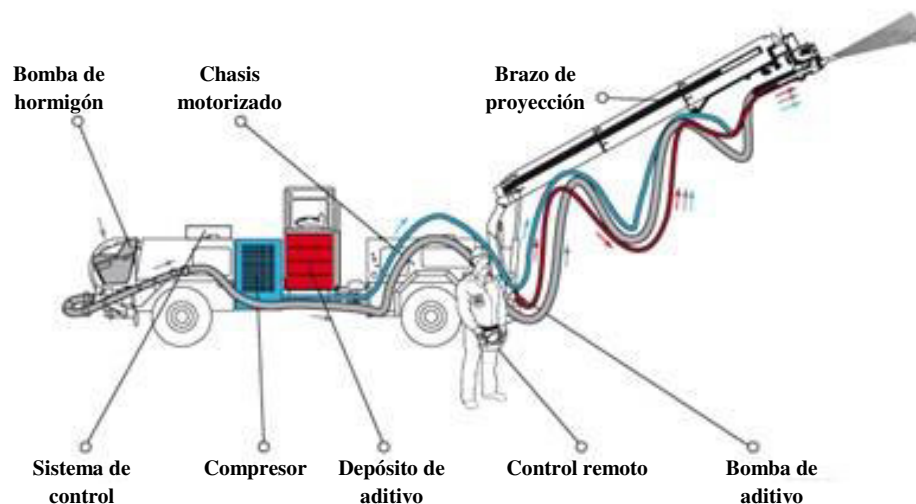


Figura 2.4: Equipo robotizado para colocación de CLRF. Fuente: (bestsupportunderground.com)

2.2.3 Recomendaciones para una adecuada aplicación

La calidad del concreto lanzado aplicado en revestimiento de túneles depende en gran medida del equipo seleccionado, mismo que debe estar en condiciones óptimas de funcionamiento, limpio, calibrado, etc.; e indiscutiblemente que el lanzador/operador cuente con certificación que garantice su destreza y experiencia, el ACI a través de los Programas de Certificación Internacional, dispone con un Programa de Certificación para Lanzadores denominada “Técnico especialista en lanzador de concreto”. En México esta certificación lo aplica la Sección Centro y Sur de México en coordinación con el ACI Internacional.

Recientemente, como iniciativa propuesta por los estudios de esta investigación la Dirección General de Obras para el Transporte (DGOT) emprendió un programa de certificación para los lanzadores de la obra de ampliación de la L12 metro, realizado por un experto Certificador de la Asociación Americana de Concreto Lanzado por sus siglas en inglés ASA. Entre los requisitos para poder certificarse es contar con una experiencia comprobable de 500 horas de lanzado, la certificación consiste en tomar un curso que comprende:

- Curso teórico
- Examen práctico (lanzado para muestreo de paneles cuadrados, ver figura 2.5)
- Examen oral
- Examen escrito
- Verificar que los corazones extraídos de los paneles cuadrados no presenten irregularidades (oquedades) y el perímetro del acero se encuentre cubierto totalmente del concreto lanzado (ver figura 2.6).



Figura 2.5: Molde de Panel cuadrado con varillas de refuerzo para prueba de habilidad de lanzador.



Figura 2.6: Corazones extraídos a partir de panel cuadrado.

Previo al lanzamiento del concreto se debe prestar atención a la superficie a revestir, misma que debe estar libre de partículas y/o tierra suelta de baja calidad. La temperatura debe oscilar entre 5°C y 35°C. Revisar conexiones de mangueras, evitar curvas y dobleces, lubricar, y verificar su funcionamiento en relación con la presión y aire comprimido. Comprobar el buen funcionamiento de las salidas de agua, aditivo y concreto.

Antes de iniciar los lanzados de concreto se debe regular el suministro de mezcla en un espacio distinto al que se va a revestir, posteriormente se debe dirigir el lanzamiento al área a proyectar, iniciando de abajo hacia arriba, cuidando en todo momento la distancia misma que debe ser entre 0.6 m y 1.5 m con la finalidad de lograr una compactación uniforme, óptima y evitar la pérdida de material por rebote; la dirección entre el terreno a revestir y la boquilla

debe ser perpendicular (90°); y el movimiento de la manguera o brazo de proyección será en forma circular a ovalada, tal como se muestra en la figura 2.7. Una vez iniciado el lanzamiento de concreto, el flujo de la mezcla debe ser constante hasta el final de la actividad, de lo contrario, si se interrumpe, el operador debe orientar la boquilla a un sitio lejos del área a revestir.

Al terminar las actividades de lanzamiento se debe limpiar todo el equipo utilizado, para evitar posibles accidentes u obstrucciones de mangueras por endurecimiento de material.

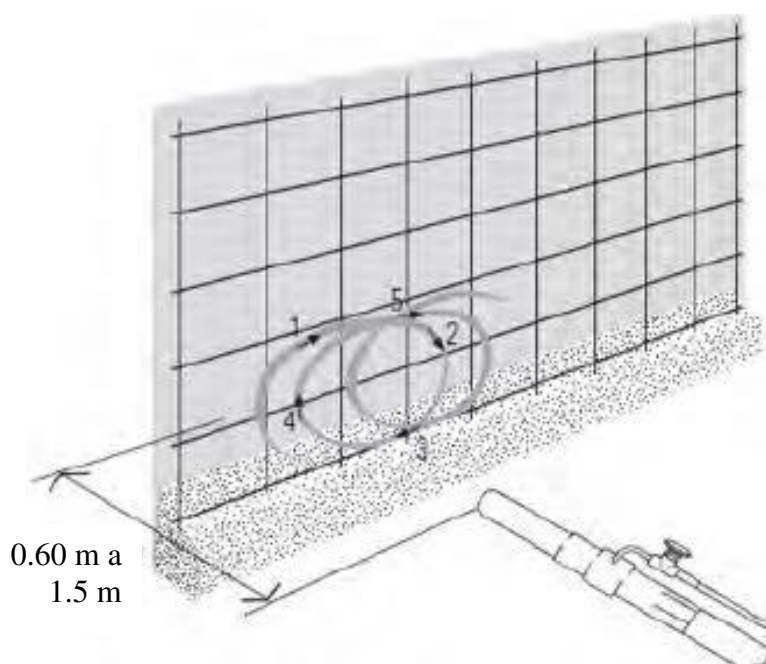


Figura 2.7: Aplicación de concreto lanzado. Fuente: (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile)

2.2.4 Características principales

La incorporación de fibras en el concreto convencional, representa un gran avance tecnológico en la modalidad de concretos especiales, que ha dado como resultado, mejoras tanto en sus propiedades, aplicación y proceso constructivo.

Dentro de las propiedades que más predominan en los CRF desde el punto de vista estructural son: absorción de energía, control de agrietamiento (fisuración), resistencia al impacto y resistencia a flexotensión.

La utilización de concretos reforzados con fibras (CRF) se ha empleado en pisos industriales, estabilización de taludes y actualmente predomina su aplicación en el sostenimiento y revestimiento de túneles y minas. El uso de CRF ha aportado grandes mejoras en los procesos constructivos, dando como resultado la reducción de tiempo y costo de colocación, seguridad, uniformidad, etc.

2.2.5 Aplicación en túneles en México

La tecnología del concreto reforzados con fibras en todas las variantes de aplicación, ha presentado gran incremento en su uso para el revestimiento o sostenimiento de túneles en diferentes tipos de obra como carreteras, hidroeléctricas, drenaje, etc.

México cuenta con un extenso sistema montañoso, por tal motivo la construcción de vialidades que ofrezcan recorridos más cortos es un reto ingenieril evidente, dando como resultado la construcción de túneles.

Otro problema latente es en las ciudades con mayor demanda de servicios de transporte público en donde el área geográfica es limitada, como el caso particular de la Ciudad de México, que han optado por desarrollar obras subterráneas de gran envergadura para dar solución a esta necesidad.

El valle de México naturalmente está compuesto por 5 lagos que en época de lluvias tienden a incrementar su nivel y extenderse en la superficie, dando lugar a inundaciones que afectan a gran parte de la población en esta zona del país. Para dar atención a esta problemática se han desarrollado grandes obras de drenaje profundo con la finalidad de suprimir riesgos de inundación, como es el caso de las obras del Túnel Emisor Oriente (TEO) de reciente puesta en operación y Túnel Emisor Poniente II (TEP II), donde se ha utilizado la tecnología del CRF sintéticas colado en sitio.

En la tabla 2.11 se describen algunos túneles construidos a lo largo del territorio nacional.

Tabla 2.11: Recopilación de túneles más sobresalientes, construidos en México.

Tipo	Año	Nombre	Ubicación	Longitud (m)	Sistema de sostenimiento
Carretero	1996	Maxitúnel interurbano Acapulco	Acapulco, Guerrero	2,953.00	CLRF
Carretero	2013	Túnel Sinaloense	Autopista Durango-Mazatlán	2,794.00	CLRF
Carretero	2013	Túnel el Zoquital	Autopista 32 D México-Tuxpan	2,789.00	CL
Carretero	2015	Túnel de playas de Tijuana	Playas de Tijuana, Tijuana, Baja California.	439.00	CL
Carretero	2017	Túnel Escénica Alterna	Acapulco, Guerrero	3,200.00	CLRF
Carretero	2017	Túnel de la loma larga	Cerro de la loma larga, Monterrey, Nuevo León	522.00	CLRF
Carretero		Túnel en la supervía	Autopista Santa Fe- Av. Luis Cabrera	-	CL
Carretero		Túnel Chimalpa I	Carretera Toluca-Naucalpan		CL
Carretero	2019	Bitúnel para tren interurbano México-Toluca	Sierra de las cruces, México-Toluca	4,700.00	CLRF
Drenaje	En construcción	Túnel Emisor Oriente	Valle de México	62,100.00	CRF
Drenaje	En construcción	Túnel Emisor Poniente II	Valle de México	5,900.00	CRF
Hidroeléctrico	2011	Túneles de desvío P.H. Malpaso y Peñitas	Rio Grijalva, Chiapas	1,135.00	CL
Hidroeléctrico	2012	Túneles de desvío P.H. La Yesca	Rio Santiago, Nayarit	1,444.00	CL
Hidroeléctrico	2007	Túneles de desvío P.H. El Cajón	Rio Santiago, Nayarit	1,545.00	CL

CRF: Concreto reforzado con fibras

CLRF: Concreto lanzado reforzado con fibras

CL: Concreto Lanzado

2.2.6 Control de calidad

En los concretos convencionales y particularmente en los concretos especiales donde se utilizan fibras, se pueden alcanzar los requisitos de calidad siempre y cuando se tenga control, conocimiento y mejora continua en cada etapa, conforme a los requisitos del proyecto,

especificaciones y normativa aplicable, iniciando en los materiales, equipo, fabricación, transporte, selección de personal calificado, colocación, curado, muestreo y pruebas de laboratorio. El cumplimiento de estos requisitos garantiza la seguridad de la estructura al proporcionar un apoyo inmediato y efectivo.

“El control de calidad debe ser: representativo, simple, relativamente barato y que sea realizado a tiempo; los principales aspectos a revisar son: adherencia, resistencia, espesor de capa, (...), diseño de mezcla, equipo, etc.”. (Bracamontes, 2014, p.23).

CAPÍTULO III. CASO PRÁCTICO: Ampliación de la L12 metro, tramo: Mixcoac- Observatorio

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La obra seleccionada como caso práctico es: “Ampliación de la Línea 12 del Metro, tramo Mixcoac-Observatorio” que consiste en un túnel de 4.6 kilómetros de longitud donde se ubicarán dos estaciones de paso (Valentín Campa y Álvaro Obregón) y una estación terminal (Observatorio) que conectarán la estación Mixcoac con la terminal Observatorio, propiciando así, la comunicación entre la zona oriente y poniente de la Ciudad de México, con una reducción de 60% en los tiempos de traslado, disminución de 3,700 toneladas de emisiones de CO₂, conexión de la Línea 1 del Metro y la terminal de Autobuses del Poniente y mitigación de problemas de movilidad en la zona poniente de la Ciudad de México.

El proyecto ejecutivo se encuentra actualmente en su primera etapa que consiste en la construcción de 13 lumbreras (Ver tabla 3.1) repartidas a lo largo de todo el eje de proyecto como se muestra en la figura 3.1, obras inducidas para la desviación de dos colectores de aguas residuales, el túnel de 4.6 kilómetros y cola de maniobras.

Tabla 3.1 Lumbreras para obra: “Ampliación de la Línea 12 del Metro, tramo Mixcoac-Observatorio”.

Nº	Lumbrera
1	Jacobo Ruiz Dael-Giotto
2	Rosa Roja-Giotto
3,4	Valentín Campa Poniente y Oriente (Estación Valentín Campa)
5	Antigua Vía a la Venta
6	Calle E
7,8,9,10	Estación Álvaro Obregón
11	Calle Jardín
12	Calle Poniente 83
13	Barranquilla

De acuerdo con la zonificación geotécnica del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF), la obra de ampliación de la Línea 12 se ubica en la Zona I (lomas) a las faldas de la Sierra de las Cruces, donde predomina la presencia de rocas (suelo firme); se trata de depósitos naturales. Respecto a la exploración que se realizó previo a la construcción de esta obra se encontró que los suelos corresponden a materiales cohesivos friccionantes (tobas) conformado por arenas y gravas rodeados de limos y arcillas no plásticas con bajo

contenido de agua. No existe presencia de nivel de aguas freáticas, pero a lo largo de la construcción se han encontrado cavidades.

Las lumbreras son estructuras que se utilizan como obras auxiliares en proyectos de túneles, con la finalidad de comunicar a los túneles con el exterior y al mismo tiempo introducir la maquinaria, equipo, personal de obra y materiales necesarios para su construcción; durante la etapa operacional del proyecto, estas estructuras funcionan como medios de ventilación y acceso para inspección y mantenimiento del túnel. Alcanzan profundidades que van desde los 13 metros hasta 50 metros y su construcción es monolítica.

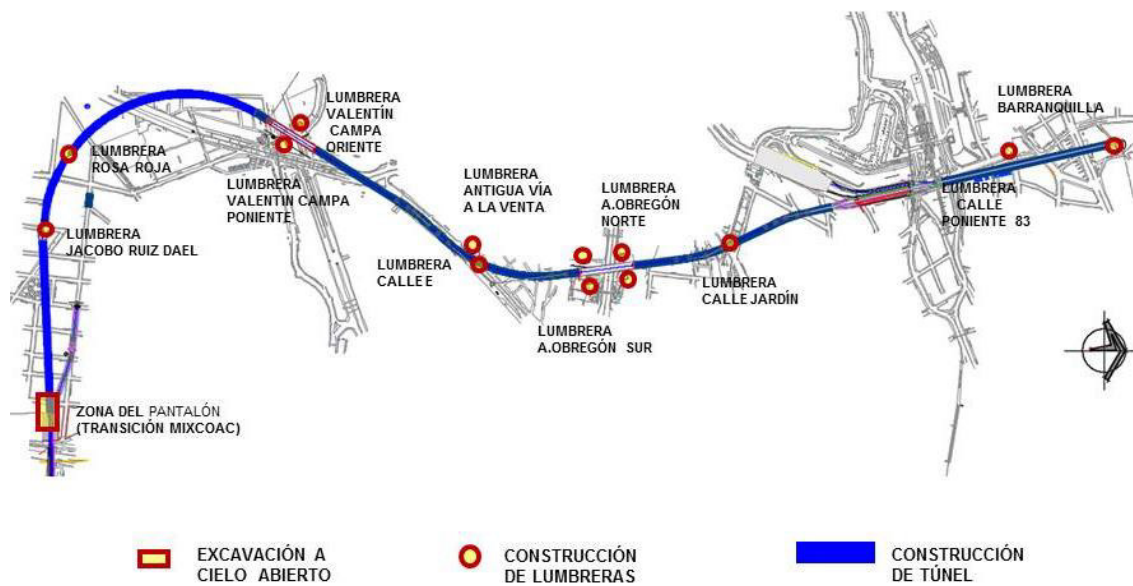


Figura 3.1: Vista en planta de la localización de lumbreras. Fuente: (Dirección General de Construcción de Obras para el Transporte, 2018).

En cada lumbrera se encuentra un túnel de conexión, encapillado y propiamente el túnel en ambas direcciones con sección tipo (figura 3.2). Para la excavación en cada etapa, se utilizan maquinas montadas sobre orugas, que disponen de un brazo articulado y en su extremo se habilita una cabeza rotatoria con picas de fricción cuando el suelo presenta resistencia blanda o media y cuando el suelo es de resistencia dura se habilita un martillo hidráulico, estas máquinas son comúnmente llamadas rozadoras.

La construcción del túnel se desarrolla en las siguientes etapas (ver figura 3.3):

- I. Excavación de la sección media superior con avances de 1.00 m hasta 2.00 m, colocación del revestimiento primario de concreto lanzado $f'c=250\text{ kg/cm}^2$ reforzado con fibras de acero, con relación agua cemento $A/C=0.50$, tamaño máximo de agregado 10 mm, y espesor de 20 cm, colocado en capas de 5 cm cada una y construcción de zapatas laterales con concreto de las mismas características que el revestimiento primario a nivel de la media sección.

En ocasiones el tipo de suelo permite avances de excavación de hasta 1.50 m - 2.00 m, así mismo, eventualmente se presentan frentes donde el tipo de suelo no favorece grandes avances presentándose caídos frecuentes y de gran volumen que aportan poca estabilidad, en estos casos se procede a realizar excavaciones de 0.50 m reforzadas con marcos metálicos, y si es necesario se sueldan láminas entre marcos que impiden la caída del suelo adyacente y al mismo tiempo favorece la aplicación del revestimiento primario, evitando desperdicios considerables del concreto lanzado por falta de adherencia. Cuando se presentan oquedades debido a fracturas de roca, por falta de estabilidad en suelos blandos o para mejoramiento del suelo, se emplean inyecciones de concreto fluido, conocido en el ámbito de la construcción como lechada, una mezcla a partir de cemento y agua que en ocasiones es acompañada de productos químicos que favorecen su función.

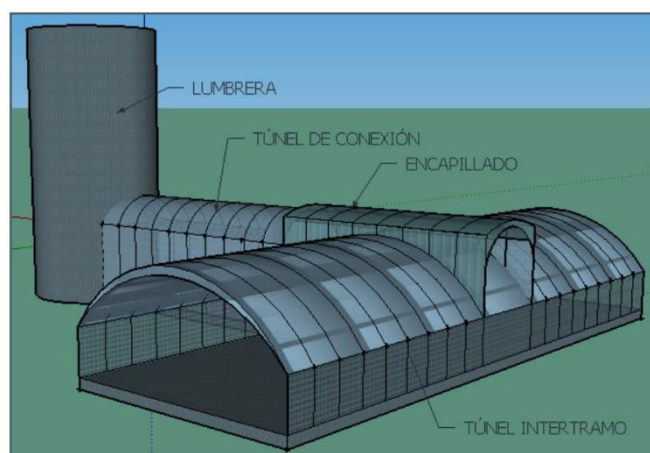


Figura 3.2: Isométrico de los componentes de una lumbra.

- II. Construcción de rampa y excavación de banco central (destroza) y laterales con avances de 2.00 m. Colocación de revestimiento primario en hastiales y construcción de zapatas laterales con concreto lanzado reforzado con fibras de acero a nivel de máxima excavación.

Después de colocar el concreto lanzado reforzado con fibras, no es práctica común en obra, curar este revestimiento primario, sin embargo, se observó que después de avances considerables se coloca un impermeabilizante para evitar las filtraciones de agua al concreto del revestimiento definitivo, conformado por los siguientes elementos: geotextil de drenaje y protección que se sujeta a la pared del túnel por medio de clavos con rondanas y arandelas hechas con el material de la geomembrana, con traslapes soldados de 30 cm, se remata hasta la pared inferior donde se colocan el drenaje longitudinal; posteriormente se coloca la geomembrana de PVC transversalmente, misma que se sujeta con las arandelas colocadas anteriormente por medio de termofusión, con traslapes de 15 cm.

Al finalizar la instalación de la geomembrana, se realizan trabajos de colocación de anclas para sostener el acero de refuerzo para el revestimiento definitivo de acuerdo con las posiciones que indica el proyecto, por lo tanto, es necesario que, al finalizar los trabajos de colocación de anclas, se una el área circundante con discos de PVC de la misma geomembrana para mantener integrado el sistema de impermeabilización. Este sistema de impermeabilización está basado según la Norma Española UNE 104424:2000, también descrito en el Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera (2016). Ver figura 3.4. Este sistema se colocó en lumbrera Rosa Roja, dirección Mixcoac 261 m hasta el cadenamamiento 29+508 y en dirección Valentín Campa 291 m hasta cadenamamiento 30+060.

- III. Armado y colado de elementos del revestimiento secundario también llamado definitivo (zapatas y muros laterales). Para estos elementos se usa concreto estructural $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ y como medio de curado se utiliza una membrana.

Cuando no existe contacto total entre el revestimiento primario y secundario, se procede a colocar una lechada previamente aprobada por el Director Responsable de Obra (DRO).

- IV. Armado y colado del revestimiento definitivo en la sección media superior del túnel (bóveda), con acero estructural y concreto lanzado $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, relación agua cemento $A/C=0.5$, hasta alcanzar un espesor de 40 cm. Después de iniciar el fraguado, este elemento recibe un curado por medio de riego con manguera, durante 7 días.
- V. Se coloca una plantilla y posteriormente se realiza el armado y colado de losa fondo. Cuidando dejar las preparaciones del drenaje, de obra electromecánicas y propiamente para el muro central.

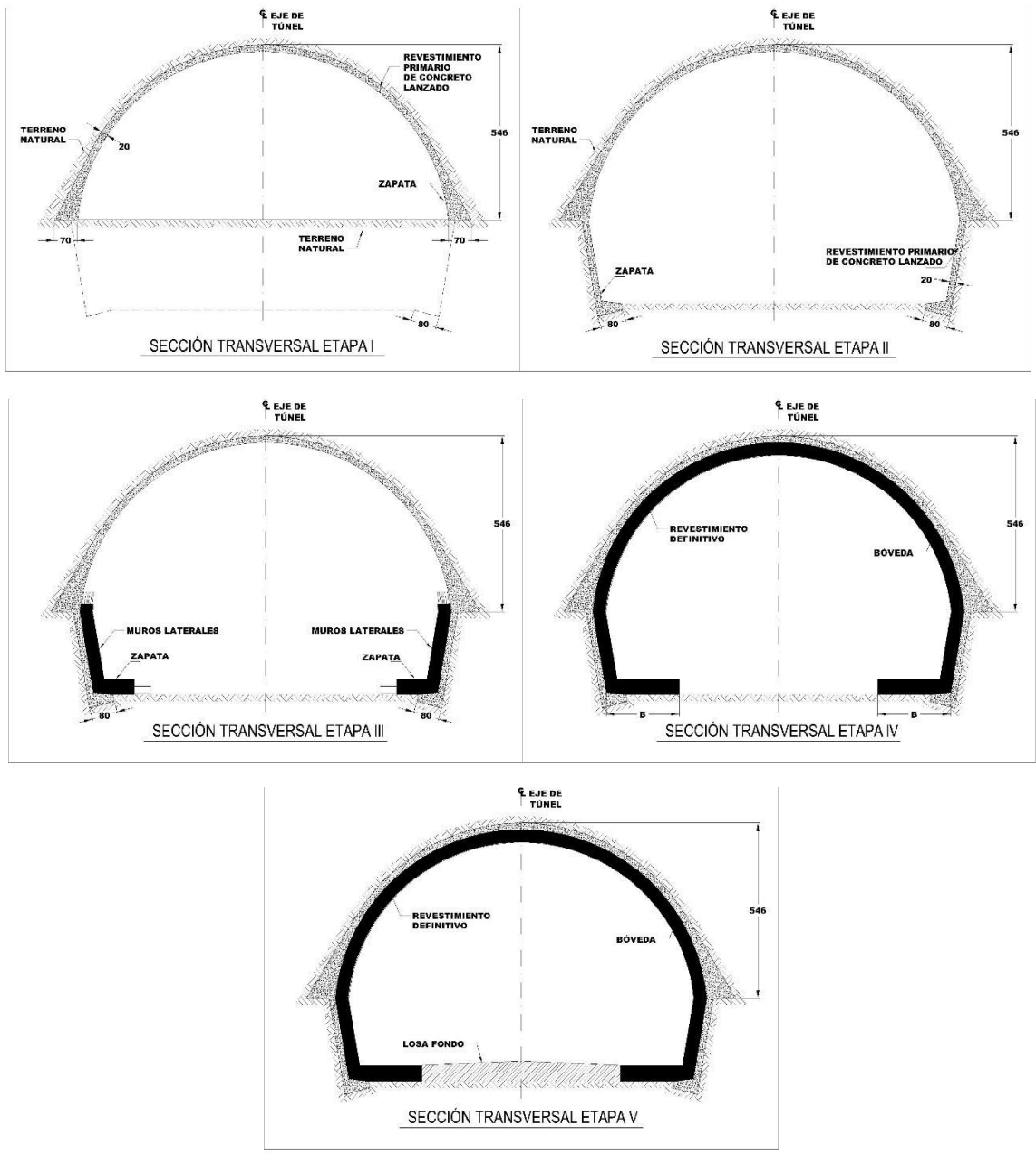


Figura 3.3: Proceso constructivo de túnel. Fuente: (Dirección General de Construcción de Obras para el Transporte, 2018)



Figura 3.4: Impermeabilizante colocado después del CLR en túnel.

3.2 CONTROL DE CALIDAD DE LOS CLR A USAR COMO REVESTIMIENTO PRIMARIO DE TÚNEL

Dentro de la obra elegida para el caso de estudio, se encuentra instalada la empresa encargada de vigilar el cumplimiento de las características físicas y mecánicas, en estado fresco y endurecido y obtener las muestras necesarias in situ para el control de calidad de los concretos utilizados en el proyecto.

3.2.1 Materiales

Las condiciones y características de los materiales que se utilizan para los concretos reforzados con fibras se describen en el apartado 2.2.1 Materiales. Particularmente el control de calidad de estos materiales a excepción de las fibras es responsabilidad del fabricante, es decir, de la planta concretera que suministra el producto en la obra de estudio, por lo tanto, ofrecen una garantía por su producto terminado, además que, por cada entrega, éste es evaluado al llegar a la obra a través de la prueba de revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE-2010) y temperatura (NMX-C-435-ONNCCE-2010) para determinar la aceptación o rechazo del mismo, conforme a las características específicas solicitadas con antelación y condiciones propias del concreto (manejabilidad, consistencia, etc.).

Con relación a las fibras de acero, éstas se suministran a la mezcla después de la aceptación por parte del equipo de control de calidad establecido en la obra, mediante las pruebas de revenimiento, temperatura y masa unitaria, por tanto, se recomienda lo siguiente:

- Aplicar una secuencia de mezcla basado en la ACI 544.1R-96 “agregar las fibras de acero a la tolva del camión mezclador a razón de aproximadamente 45 kg por minuto [...]. Las fibras se deben agregar sin aglomerar para que las paletas del mezclador puedan transportar las fibras al mezclador [...] a una velocidad de mezcla recomendada de 40 a 50 revoluciones por minuto” cuando se suministran desde planta. Un método adecuado para suministrar las fibras es a través de una banda transportadora durante la introducción de agregado en planta (junto con el agregado fino) o un soplador o banda transportadora en el sitio de la obra.
- Cuando se suministra en obra, las fibras no deben agregarse demasiado rápido, deben caer directamente a la mezcla, no en las paletas de la mezcladora, con la finalidad de evitar la formación de grumos, también producidos por un sobremezclado. Se debe evitar que la mezcla doble las fibras para que posteriormente no causen una compactación y resistencia baja.
- Aportar la dosificación exacta requerida, de acuerdo con el diseño definido por el constructor, y vigilar que esta condición se cumpla en todo momento.

En la tabla 3.2 se resumen las características de los materiales utilizados en la fabricación de CLRF a usar como revestimiento primario en caso práctico.

Tabla 3.2 Materiales utilizados para mezcla de concreto lanzado reforzado con fibras en caso práctico.

Material	Designación
Cemento	CPC40 RS
Agregado grueso	Caliza, T.M.A. 10 mm
Agregado fino	Arena de río
Agua	Potable
Fibra de acero	Drámix 3D 65/35 B G (prop. 30 kg/m ³)
Aditivo	Acelerante TamShot 70 AF
Relación	0.50
Agua/Cemento	

3.2.2 Producción

Para la producción de concretos lanzados se recomienda utilizar una planta con mezcladora (figura 3.5), con la finalidad de asegurar una fabricación y mezcla con apariencia uniforme en todos sus ingredientes.

Generalmente, la dosificación de materiales se realiza en unidades de peso, siendo ésta la más recomendable.

Cuando los concretos son premezclados, en estos procesos se tiene mayor control de calidad conforme a los requisitos solicitados por el proyectista, tales como:

- Equipos de mezclado capaces de medir cantidades con tolerancias (Ver tabla 3.3), verificación periódica de escalas y ajustes necesarios para una producción óptima.

Tabla 3.3: Proporción de tolerancias para revoltura individual. ASTM 94

Material	Tolerancia
Material cementante	± 1%
Agregados	± 2%
Agua y aditivos	± 1% ± 3%

- Atención al tiempo de mezclado requerido y tiempo de entrega y descarga (transporte) conforme a la ASTM C 94. Tomando en cuenta las condiciones del lugar donde será colocado el producto.
- Muestreo y ensaye de diferentes porciones de la mezcla, cuidando mantener la resistencia solicitada por el proyectista, masa volumétrica, contenido de aire, revenimiento, temperatura y contenido de agregado grueso.
- Velocidad de mezclado (revoluciones del tambor, ASTM C 94). Velocidad de agitación.
- Softwares diseñados para realizar mezclas exactas desde una sala de control.

Para el caso de estudio, el proyectista indica a la planta concretera que requiere de un concreto bombeable para su transportación y lanzado en túnel, resistente a los sulfatos, con resistencia a compresión de $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$, revenimiento de $16 \text{ cm} \pm 3 \text{ cm}$, temperatura de $23^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$, masa unitaria de $2,200 \text{ kg/m}^3$ y T.M.A. 10 mm. Por decisión propiamente del proyectista, no se incluye la fibra de acero y aditivo acelerante en el concreto premezclado en planta, siendo hasta el sitio de obra donde se incorporan estos materiales.

El diseño de mezcla es propiedad exclusiva de la empresa concretera, informando al contratista únicamente la relación agua-cemento $A/C=0.50$

3.2.3 Transportación

El concreto lanzado requerido en obra, en cumplimiento de las especificaciones solicitadas por el proyectista, dependen en gran medida de la selección del equipo de transporte y la distancia entre planta concretera y obra. Por tanto, están estrechamente relacionadas con el tiempo, derivando la atención en proveer el suficiente material por turno y colocar el concreto lanzado a usar como soporte de terreno en el mínimo tiempo de transporte. Por tanto, el

mayor reto se presenta en la logística para surtir el producto en tiempo y forma hasta su destino final.

A) De planta concretera a obra

El transporte del concreto desde la planta concretera hasta la obra se debe hacer en equipos móviles que eviten la segregación, pérdida de material, endurecimiento prematuro y cuidado de la temperatura.

Al usar camiones mezcladores se seguirán las recomendaciones que indica la ASTM C 94, limitando el tiempo de mezclado y descarga completa del concreto en obra en 1 ½ hora, o antes de que el camión transportador alcance 300 revoluciones después de la adición del agua a cemento y agregados, o en su defecto de introducir el cemento a los agregados.

Se recomienda que sea imprescindible la coordinación dentro de la planta concretera y de ésta con el personal en obra. El control en las solicitudes y la organización y preparación en obra del personal y área (organización y logística) para recibir el camión con el pedido son indispensables para evitar tiempos de espera (ocasionados por la ejecución de otras actividades como: descarga de acero, carga de material producto de la excavación, etc.) hasta la revisión de revenimiento, temperatura y masa unitaria, suministro de fibras y muestreo. Siempre debe ser prioridad el suministro de concreto para evitar los rechazos, y se debe disponer de una persona encargada de vigilar y recibir las llegadas de los camiones transportadores de concreto, y dirigir todas las actividades necesarias para su correcto suministro.

Para el caso de estudio se utilizan camiones mezcladores con capacidad de 5 m³, mismos que al llegar al sitio de la obra presentan remisión de pedido, donde incluyen características particulares y determinan las condiciones de entrega y garantía del producto.

En el sitio de la obra, la empresa encargada del aseguramiento de calidad recibe el producto para realizar las pruebas de control de calidad en superficie, tales como: temperatura, revenimiento y masa unitaria (por cada 40 m³ de concreto) y determinar si el producto se acepta para ser colocado o en su defecto se rechaza.

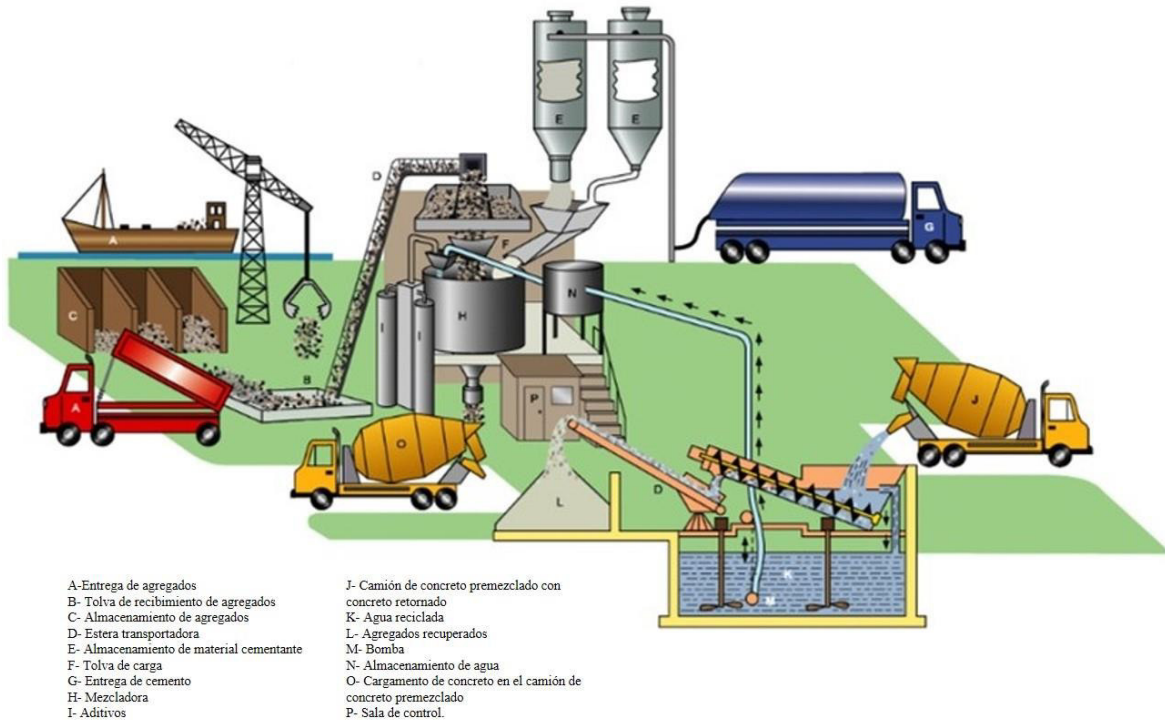


Figura 3.5: Planta de producción de concreto premezclado. Fuente: (www.cemexmexico.com)

Posterior a la aceptación del concreto premezclado, se colocan las fibras de acero de manera manual a la olla de concreto como se muestra en la figura 3.6, en una proporción de 30 kg/m^3 (cantidad definida por el proyectista), después de colocar el total de fibra, se mezcla durante 1 min a 40 rpm para garantizar la distribución uniforme de éstas en el concreto. El personal encargado de vigilar estos procedimientos debe tener el conocimiento de cada uno de los trabajos que intervienen y su correcta ejecución, a fin de asegurar la velocidad de mezclado del camión al llegar a obra, la velocidad de agitación, y cambio de revoluciones durante el suministro de fibras; verificar que las fibras sean incorporadas adecuadamente en tiempo y forma, confirmar que la cantidad suministrada sea la correcta, es decir, pesar exactamente la cantidad de fibra requerida de acuerdo con el proyecto. En la obra se coloca un bulto y medio de fibra por cada metro cubico de concreto, equivalente a 30 kg/m^3 , se conoce que cada bulto de fibra contiene 20 kg, sin embargo, no se sabe con certeza que, al momento de colocar el medio bulto, este realmente corresponda a la proporción deseada, debido a que no pesan la cantidad exacta. Por políticas de planta concretera, ésta no se hace responsable y por consiguiente se cancela la garantía del

producto, al momento en que el proyectista modifica el concreto al incorporar o retirar algún material, en el caso particular del CLRF usado en caso práctico, la fibra de acero y acelerante.



Figura 3.6: Colocación de fibras de acero en olla de concreto premezclado.

B) En obra

Cuando los CLRF son utilizados como revestimiento de túneles, estos deben ser transportados hasta el frente de excavación a través de equipos y aditamentos que garanticen la calidad del producto, evitando en todo momento, en las descargas verticales y transporte dentro del túnel, la segregación, endurecimiento, cambios bruscos de temperatura y pérdida de material. Actualmente existen amortiguadores que evitan la segregación del concreto y absorben la energía producida por el impacto en caída libre a través de la tubería de descarga, colocados en la parte inferior de la tubería, antes de transportar el concreto por la banda que lleva el material hasta el camión revolador dentro del túnel, en obra se debe contar con estos aditamentos. Todo este proceso debe realizarse dentro del tiempo de vida del concreto, es decir, mientras este manejable y libre de segregación, de lo contrario, aun cuando se encuentre a pie de frente de excavación éste deberá desecharse.

Cuando se realizan descargas verticales, se debe verificar el desgaste y fricción que pueda sufrir la tubería a causa de la velocidad en caída libre y verificar que cuenten

con una salida a presión de agua y aire para realizar trabajos de limpieza. Antes de ser utilizada se deberá lubricar con agua o en su defecto lechada.

Posterior a la incorporación de fibras y mezclado requerido para obtener una mezcla uniforme de concreto, se realiza la descarga por gravedad a través de un tubo de 9” de diámetro, previamente lubricado con agua, esto con la finalidad de evitar que el concreto presente una pérdida de humedad. La caída a través de la lumbrera varía en cada una, con alturas desde 13 m hasta 50 m. En el extremo inferior de la tubería, la descarga es recibida por un camión revolvedor con capacidad de 5 m³ que lo transporta hasta el frente de excavación, donde se encuentra el equipo a utilizar para lanzar el concreto (figura 3.7).

Al terminar la transportación del concreto por la tubería instalada en la lumbrera, ésta debe ser lavada para evitar el endurecimiento de partículas que quedan atrapadas y puedan provocar taponamientos y/o contaminación de los siguientes lotes de concreto.



Figura 3.7: Transportación de CLR en obra.

3.2.4 Colocación

El lanzado de concreto en caso de estudio es por vía húmeda y se inicia después de tener un avance de excavación de 1.5 m, se utiliza un Robot SPM 500 Putzmeister con una velocidad de salida de 30 m³/h y presión de 45 bar., incluyendo aditivo acelerante de fraguado (Ver figura 3.8).



Figura 3.8: Lanzado de Concreto reforzado con fibras en Túnel, caso práctico.

Se coloca en capas de 5 cm hasta alcanzar el espesor de 20 cm, para controlar y medir los espesores se utilizan escantillones. Aproximadamente se utilizan de 8-9m³ de concreto por cada sección de 1.5 m de largo y 12 m de diámetro.

Durante la colocación del concreto lanzado es común la pérdida de material a causa del rebote, ocasionado por las partículas que no se adhieren a la superficie de lanzado. Las causas del rebote pueden ser varias, entre ellas: se puede presentar por el tipo de suelo donde se aplica, el diseño de mezcla, el tamaño de agregado, la cantidad de aditivo acelerante suministrado, las presiones de lanzado, los espesores de capa conforme al procedimiento constructivo, y no menos importante, la habilidad del operador de lanzado (lanzador).

Es importante que en obra se tenga un plan y programa que verifique y controle las condiciones de colocación de los concretos lanzados, desde el conocimiento del suelo a revestir, la forma de aplicación de concretos lanzados, tal como se indica en el apartado 2.2.3 *Recomendaciones para una adecuada aplicación*, conocer la dosificación de aditivo, presiones de lanzado, las condiciones de los equipos que intervienen (mantenimiento), y logística controlada en el suministro del concreto lanzado de planta hasta el frente de trabajo.

En obra se debe considerar la participación de lanzadores certificados con la finalidad de asegurar la calidad durante el proceso de colocación. Con esta medida se asegura la habilidad

y toma de decisiones del lanzador, así como el dominio de los protocolos ante diferentes escenarios que surjan durante la colocación del concreto lanzado con fibras, como: la distancia, velocidad y forma de lanzado, evitar la formación de juntas frías, disminuir el rebote, verificar el suministro adecuado de aditivo para no afectar tanto la mezcla como las muestras, donde éstas últimas han presentado oquedades y apariencia porosa y desmoronable aún a los 28 días de curado a razón del uso excesivo o, en su defecto, por acumulación de aditivo; entre otros.

3.2.5 Muestreo y pruebas de laboratorio

El uso de los CLRF en la industria de la construcción ha revolucionado a partir del siglo XX, del mismo modo el aseguramiento de su calidad para cumplir con los requisitos del proyecto, mismos que deben controlarse desde la producción (materiales y diseño de mezcla) hasta la colocación del concreto lanzado (personal especializado, equipo, y concreto lanzado colocado). Deben realizarse muestreos y ensayos previos y durante la ejecución de obra para validar y verificar el cumplimiento de las especificaciones de proyecto.

Para el caso de los ensayos previos, los encargados del diseño de la mezcla deben asegurar su elaboración de acuerdo con el diseño del proyecto, para los ensayos a realizar durante la ejecución de la obra, es importante contar con una empresa acreditada en la disciplina, imparcial, encargada exclusivamente de esos trabajos (laboratorio), misma que tendrá la responsabilidad de notificar y dependiendo de sus alcances, recomendar las acciones preventivas y/o correctivas cuando así se requiera además de contar con equipo de medición calibrado.

Las pruebas que se realicen a los CLRF tienen el propósito de determinar las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, su aplicación incrementa el aseguramiento de la calidad. En México se han normalizado algunos de los ensayos recomendados para los CLRF principalmente en estado endurecido. Otros países con amplia experiencia en la tecnología de los CLRF emplean diferentes métodos para evaluar su calidad basados en normativas americanas ASTM y europeas UNE. En la tabla 3.4 se resume una serie de pruebas halladas en diversos documentos de divulgación científica para evaluar los concretos lanzados reforzados con fibras.

Tabla 3.4: Pruebas recomendadas para CLRF.

Estado	Método	Normas Internacionales	Normas Mexicanas
Fresco	Revenimiento	ASTM C 143	NMX-C-156-ONNCCE-2010
	Temperatura	ASTM C 1064	NMX-C-435-ONNCCE-2010
	Masa unitaria	ASTM C 138	NMX-C-162-ONNCCE-2000
Fresco/Endurecido	Contenido de aire	ASTM C 231	NMX-C-162-ONNCCE-2000
	Contenido de fibras	UNE-EN 14488-7	-
Endurecido (edad temprana)	Penetrómetro de aguja	-	NMX-C-177-1997-ONNCCE
	Pistola HILTI	MÉTODO DEL Dr. KUSTERLE, G. BRACHER	-
Endurecido	Panel cuadrado	EN 14488-5	En desarrollo
	Panel circular	ASTM C1550	NMX-C-539-ONNCCE-2017
	Viga	ASTM C1609, EN 14488-3	NMX-C-535-ONNCCE-2017
	Doble punzonamiento (cilindro)	UNE 83515	NMX-C-538-ONNCCE-2017

Dentro de las instalaciones del caso en estudio, se cuenta con la presencia de un laboratorio encargado del control de la calidad (Sistema mixto, ISO 9001) de los concretos con acreditación por parte de la Entidad Mexicana de Acreditación A.C. (EMA).

Particularmente para los CLRF en estado endurecido, determinan la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto (NMX-C-169-ONNCCE, NMX-C-109-ONNCCE, NMX-C-083-ONNCCE), extraídos a partir de una artesa de B (Base mayor) 500mm x b (base menor) 260 mm x h (altura) 150 mm.

El muestreo se realiza por cada 40 m³ de concreto lanzado. Para la toma de muestra, el molde debe estar libre de partículas contaminantes, con presencia de desmoldante, inclinado a 30° respecto a la superficie a revestir y asegurar su fijación para evitar volteos o movimientos a causa de la velocidad de proyección. La toma de muestra se realiza después de haber lanzado concreto durante al menos 5 minutos, inmediatamente después, se procede a enrasar y colocar en un sitio que no afecte la transitabilidad de personal y equipo dentro de la obra, se cubre con material impermeable (nailon) y se deja inmóvil durante 24 hrs antes de ser llevado a la superficie, con la finalidad de evitar agrietamientos. Pasado el tiempo de reposo, la muestra es transportada en grúa a través de la lumbrera hasta la superficie donde se procede a desmoldar, posteriormente es llevada al cuarto de curado, en donde pasado los 5 primeros días se procede a extraer 6 núcleos de 50 mm de diámetro cada uno. Mismos que se ajustará altura hasta 100 mm, cortar hasta altura ajustada, pesar y ser nuevamente ingresados al cuarto de curado hasta alcanzar los días de ensaye a 7 días (2 núcleos), 14 días (2 núcleos) y 28 días (2 núcleos), donde, previo al ensaye deberán ser cabeceados con mortero de azufre. De esta

forma se cumple el ciclo de muestreo (figura 3.9) y ensaye (figura 3.10) de especímenes para determinar el cumplimiento de la resistencia a compresión del CLRF.



Figura 3.9: Proceso de muestreo de artesas.



Figura 3.10: Proceso de ensaye de cilindros (NMX-C-083-ONNCCE).

Como parte de los trabajos de investigación de este estudio se realizó conteo de fibras tanto en estado fresco como endurecido. De acuerdo con esta iniciativa, en obra implementaron una actividad similar realizando el conteo de fibras a pie de túnel. En nuestro caso de estudio el conteo de fibras se realizó de muestras de concreto lanzado con fibras tomadas en el frente de excavación, con la finalidad de conocer la condición real de la mezcla con fibras hasta el frente de trabajo. En el subtema 4.3 del cuarto capítulo de este trabajo de investigación se presentan los protocolos propuestos para el conteo de fibras en estado fresco y endurecido. Es importante implementar en obra, acciones que permitan medir la cantidad de fibra perdida en el rebote, en las ollas revolvedoras para transporte de concreto dentro del túnel y en todo el sistema de transporte desde la superficie hasta el frente donde será lanzado y poder determinar si esta cantidad afecta el proporcionamiento de fibras requerido conforme al diseño del elemento de sostenimiento.

Para los concretos colados o con otras características usadas en obra, se realiza muestreo de cilindros de ϕ 150 mm x h 300 mm para ensayar conforme a la norma NMX-C- 083-ONNCCE; y vigas de L (Largo) 600 mm x A (Ancho) 150 mm x h (Altura) 150 mm para

ensayar conforme a la norma NMX-C-191-ONNCCE, obtenidos en un inicio en superficie y posteriormente a pie de túnel para obtener las características análogas al revestimiento.

Además de verificar el $f'c$ del CLRF, es necesario evaluar la absorción de energía por medio de los métodos propuestos en este trabajo de investigación para garantizar el desempeño del concreto con fibras y del mismo modo sustentar el diseño del CLRF usado como revestimiento primario.

Cuando exista el caso de cambiar y/o modificar la cantidad de fibra, el método de refuerzo del revestimiento con barras de acero o malla electrosoldada a fibras, es necesario verificar la memoria de cálculo y avalar con pruebas el desempeño del concreto con fibras, como las propuestas en el capítulo 4 de este trabajo de investigación.

3.2.6 Curado

El término curado hace referencia a los trabajos que permiten mantener en un ambiente adecuado al concreto a través del suministro o retención de humedad y permitir que la mezcla prolongue su reacción química que favorece la resistencia e impermeabilidad, evita agrietamientos y es más durable.

De acuerdo con las Especificaciones para Concreto Lanzado (ACI 506.2-95) se debe llevar a cabo el proceso de curado inmediatamente después de colocar el concreto lanzado y hasta que se cumpla alguna de las siguientes condiciones: durante siete días; hasta que sea alcanzada la resistencia de diseño; o hasta que se coloque otra capa de concreto lanzado (revestimiento definitivo). También indica que sólo se podrá aceptar un curado natural siempre y cuando la humedad relativa ambiental sea mayor del 95 por ciento. Además, menciona diferentes métodos de curado que a continuación se enlistan:

- Estanque o aspersión continua
- Cubrir con una estera absorbente o arena que se mantenga continuamente húmeda.
- Recubrimiento con material de lámina impermeable.
- Compuestos de curado

En la práctica, resulta difícil realizar el curado con agua en obras subterráneas (túneles), por ser espacios pequeños en constante movimiento de personal y maquinaria. Por tanto, la alternativa más usual es el suministro de agentes de curado industrializados, que impiden la

pérdida de agua del concreto. Si no se realiza un curado adecuado existe el riesgo para el concreto lanzado reforzado con fibras de sufrir agrietamiento por contracción por secado al estar expuesto a condiciones ambientales que afecten la pérdida de humedad en la superficie del revestimiento.

En el caso práctico desarrollan proceso de curado con agentes de curado que se aplican en la superficie de los hastiales inmediatamente después de descimbrar y en bóveda (revestimiento definitivo) rocían agua a través de una manguera inmediatamente después de terminar el lanzamiento de concreto. Ver figura 3.11



Figura 3.11: A) Curado de concreto definitivo en bóveda. B) Curado de concreto definitivo en muro hastial.

CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DE MÉTODOS DE PRUEBA

4.1 MUESTREO

Dentro de los objetivos de este trabajo esta proponer ensayos directos establecidos en las normas EN14488-5, ASTM C1550 y UNE 83515 para el control de calidad de los concretos lanzados reforzados con fibras (CLRF); realizar muestreos en el caso práctico y documentar la complejidad de los protocolos a seguir; comparar los beneficios de los ensayos propuestos con los que se realizan en la obra desde el punto de vista de control de calidad de los CLRF y posteriormente obtener el contenido de fibra dentro de cada espécimen en estado fresco y endurecido (post-ensayo) para evaluar los procesos de mezclado, colocación y distribución de las fibras usadas por metro cubico (m^3) de concreto. La propuesta de los ensayos se basa en la caracterización de muestras con más área para la redistribución de esfuerzos con la finalidad de obtener valores más objetivos durante los ensayos de CLRF.

A continuación, se describen los protocolos de muestreo y transporte de especímenes en obra y hasta el cuarto de curado propuestos en esta investigación:

1. Para el proceso de muestreo los moldes deben ser colados en el sitio donde se lanza el concreto, para el caso particular de túneles, se debe realizar al pie de la sección a revestir, con la finalidad de incluir las mismas condiciones de trabajo.
2. El molde se coloca cuidando que la inclinación sea semejante a la sección donde se hace el muestreo, en dirección a los lanzados y descansar en el área a revestir, tal como se muestra en la figura 4.1, se tendrá que asegurar su fijación al terreno para evitar volteos durante el lanzamiento de concreto y posteriormente colocar el desmoldante cuidando que no se contamine con material suelto producto de la excavación.



Figura 4.1: Colocación de moldes en posición para muestreo.

Se recomienda que, en caso de presencia de material muy suelto alrededor de la base de apoyo de los moldes, colocar material de plástico entre el molde y el suelo para evitar la contaminación de la mezcla durante el lanzamiento de concreto, debido a que se pueden levantar partículas de suelo por la velocidad de lanzamiento. Además, mantener boca abajo los demás moldes que no se estén muestreando para evitar que se contaminen e ir levantando uno a uno después de haber llenado el anterior y así sucesivamente hasta terminar.

3. Se debe comenzar el muestreo poco después de iniciar los trabajos de lanzamiento de concreto con la finalidad de homogeneizar las características y propiedades de la mezcla, debido a que el primer concreto lanzado contiene más agua a causa de la purga de las mangueras o en su defecto, contenido de concreto de otras características (por disponer del mismo equipo de lanzamiento para colocar concreto con otras características), lo cual disminuye y/o modifica la resistencia del concreto. Los moldes deben llenarse de abajo hacia arriba con movimientos circulares hasta formar óvalos. Se recomienda realizar un muestreo a la vez para desarrollar los trabajos de enrase en tiempo y forma. Si se cuenta con suficiente personal y barras para enrasar, se pueden muestrear más de uno a la vez.
4. Inmediatamente después de llenar el molde y antes de que el concreto comience a endurecer, se procede a enrasar la superficie con ayuda de una regla, de preferencia metálica, previamente humedecida, para evitar la pérdida de humedad del concreto, para obtener un acabado plano y uniforme. (figura 4.2).



Figura 4.2: Enrase de especímenes.

5. Posteriormente, las muestras se deben disponer en un lugar que esté libre de vibraciones y que no dificulte el desarrollo de otras actividades en la obra, Se debe cubrir la superficie expuesta a la intemperie con telas saturadas de agua y nailon u otro material que impida la pérdida de agua y permita su proceso de curado. Se tendrá especial cuidado en mover las muestras lo menos posible. Debe permanecer al menos 24 horas en reposo antes de ser transportada al cuarto de curado tal como se muestra en la figura 4.3.



Figura 4.3: Protección de muestras dentro del túnel.

6. Para transportar (ver figura 4.4) las muestras desde el frente de excavación hasta la superficie y de este sitio hasta el cuarto de curado, se mencionan las siguientes recomendaciones:

Dentro del túnel se sugiere que el transporte sea con maquinaria hasta el área de la lumbrera, con la finalidad de asegurar el traslado, prevenir accidentes y evitar fatigas del personal, por el peso de estos especímenes (aprox. 90 kg) al trasladarse con otro tipo de transporte como carretillas o diablos.

En lumbrera se recomienda transportar las muestras hasta la superficie a través de una bacha sujeta a la grúa que permite traslados verticales misma que comúnmente se utiliza para extraer materia producto de la excavación en estas obras.

Hasta el cuarto de curado es necesario utilizar transporte que asegure el manejo de las muestras, evitando movimientos bruscos que puedan provocar daños en su estructura, deberán permanecer protegidos de la intemperie en todo momento.



Figura 4.4: Transporte de muestras

7. Todos los especímenes se desmoldan hasta llegar al laboratorio donde se ubica la cámara de curado y son almacenados bajo condiciones de temperatura y humedad relativa (23°C, 95% H.R.) monitoreadas las 24 horas.
8. Las muestras deben ser curadas conforme a lo establecido en ACI-308

Se realizaron tres etapas de muestreo por cada tipo de ensayo, en diferente tiempo y ubicación (frentes y cadenamiento de túneles), tal como se presenta en la tabla 4.1, con la finalidad de desarrollar los protocolos de muestreo propuestos, así como evaluar y comparar el comportamiento de los ensayos en diferentes períodos a lo largo del desarrollo de la obra.

Tabla 4.1: Programa de muestreos

Etapa	Tipo	Nº Especímenes	Fecha de muestreo	Tipo de lanzado	Ubicación	Fecha de Ensayo (28 días)
1	Panel cuadrado (L600 mm x h100 mm). EN14488-5	3	30/08/2018	Manual	Lumbrera Rosa Roja (Dirección V. Campa)	27/09/2018
	Panel circular (ø 800 mm x h75 mm). ASTM C 1550, NMX-C-539-ONNCCE-2017	3	13/09/2018	Robot	Lumbrera calle E (Dirección V. Campa)	11/10/2018
	Artesa (B 650mm x b 350 mm x h 150 mm)	2	21/09/2018	Manual	Lumbrera Rosa Roja (Dirección Mixcoac)	19/10/2018

Continúa

Tabla 4.1: Continua

Etapa	Tipo	Nº Especímenes	Fecha de muestreo	Tipo de lanzado	Ubicación	Fecha de Ensayo (28 días)
2	Panel circular (ø 800 mm x h75 mm). ASTM C 1550, NMX-C-539-ONNCCE-2017	3	14/03/2019	Robot	Lumbrera Rosa Roja (Dirección Mixcoac)	11/04/2019
	Panel cuadrado (L600 mm x h100 mm). EN14488-5	3	26/03/2019	Robot	Lumbrera Rosa Roja (Dirección Mixcoac)	23/04/2019
	Artesa (B 650mm x b 350 mm x h 150 mm)	2	02/04/2019	Robot	Lumbrera calle E (Dirección A. Obregón)	30/04/2019
3	Artesa (B 650mm x b 350 mm x h 150 mm)	2	24/07/2019	Robot	Lumbrera Rosa Roja (Dirección Mixcoac)	21/08/2019
	Panel cuadrado (L600 mm x h100 mm). EN14488-5	3	26/07/2019	Robot	Lumbrera Rosa Roja (Dirección V. Campa)	23/08/2019
	Panel circular (ø 800 mm x h75 mm). ASTM C 1550, NMX-C-539-ONNCCE-2017	3	02/08/2019	Robot	Lumbrera Rosa Roja (Dirección Mixcoac)	30/08/2019

Los muestreos que se llevaron a cabo conforme a la tabla 4.1, en todas las etapas, pertenecen a un mismo diseño de mezcla teórico, y cada tipo de muestreo se elaboró a partir de la misma mezcla suministrada en obra.

4.2 ENSAYOS

4.2.1 Ensayo de panel cuadrado. Norma Europea EN 14488-5

Este ensayo se utiliza para evaluar las propiedades de los CLRF, así como para determinar la capacidad de absorción de energía y representa una forma más realista de evaluar la flexión biaxial de una probeta de sección cuadrada de 600 mm x 600 mm x 100 mm.

Se utilizó un molde de acero con dimensiones interiores igual a las requeridas por la probeta a ensayar. La Norma Europea EN 14488-5 indica que la probeta debe ser enrasada hasta un espesor de 100_0^{+5} mm inmediatamente después del muestreo. Es indispensable cuidar en todo momento el espesor del espécimen, para que el promedio sea lo más cercano a los 100 mm, por lo tanto, durante el muestreo el proceso de enrase debe ser adecuado. El equipo para ensayo consiste en un marco rígido de carga con actuador de 500 kN de capacidad, máquina de comando servo-controlada, sistema de montaje centrado que permita fijar y nivelar una plataforma cuadrada de concreto (muerto) de 1000 mm x 1000 mm y altura necesaria para alcanzar el libre desplazamiento del pistón instrumentado en marco, mismo que recibe una base metálica cuadrada de 500 mm x 500 mm utilizada como apoyo para recibir el panel

cuadrado, un pistón de \varnothing 50 mm y h 200 mm sujeta al actuador y una placa base de 100 mm x 100 mm x 20 mm alineada al pistón y centrada en la cara superior proyectada de la probeta, debido a que la carga se aplica a través de la placa base en la cara enrasada. Este ensayo simula el comportamiento del revestimiento de túnel que soporta la presión del suelo rocoso, demuestra la capacidad de carga y absorción de energía que presenta.

En la parte inferior central del panel se coloca un transductor de desplazamiento (CDP-100) con rango de 100 mm fijada a una base magnética que registra el desplazamiento en la zona a tensión. Todos los componentes deben estar calibrados, alineados y nivelados. La prueba se realiza a una velocidad de desplazamiento de 1 mm/min de acuerdo con lo especificado en la EN 14488-5 y el ensayo finaliza una vez que se haya alcanzado un desplazamiento en el centro del panel de 25 mm como lo especifica la norma.

Se realizaron tres etapas de muestreo, en diferente tiempo, de tres probetas cada una por unidad de sección de concreto lanzado (lote), ensayados a la edad de 28 días. En la tabla 4.2 (etapa 1), 4.3 (etapa 2) y 4.4 (etapa 3) se muestra el peso de cada probeta, promedio de longitud (μ_L), promedio de espesor (μ_E) que cumple la condición que indica la norma y carga máxima que soportó cada espécimen. Para colocar las probetas en posición correcta e iniciar el ensayo, se requiere la participación de al menos 2 personas, con la finalidad de facilitar la manipulación debido a que el peso de las muestras es considerable (aprox. 90 kg). El modo de falla de los paneles cuadrados presenta diversas grietas (en cara inferior sometida a flexión) de ancho variable que no logran cruzar hasta la cara sometida a compresión. Generalmente se presentan dos fisuras principales similar a una cruz y otras más secundarias. En la figura 4.6 se aprecia un espécimen durante ensayo y el modo de falla característico.

En la tabla 4.2 se puede apreciar que el PN-C3 obtuvo una carga máxima inferior a los otros dos paneles, esto se puede atribuir a las condiciones que mostró el espécimen cuando se desmoldó pasadas las 24 horas después de ser moldeado, concernientes a desprendimientos de material en todo el perímetro inferior del espécimen que hace contacto con el molde, principalmente en las esquinas, observando que no se había presentado el proceso de fraguado, debido a que se apreciaba una consistencia desmoronable como se muestra en la figura 4.7, esto originó menor contacto del espécimen con la placa base al momento del ensayo. Esta particularidad también se manifestó en los especímenes P-CU-1, P-CU-2 y

PCO-3 correspondientes a la etapa dos, además de otras condiciones que se describen en el apartado 4.4.1. que puedan haber influido en la menor carga máxima alcanzada.

Tabla 4.2: Características de paneles cuadrados ensayados. Etapa 1

Probeta	Peso (kg)	Longitud μ_L (mm)	Espesor μ_E (mm)	Carga máxima (kN)
PN-C1	76.94	600.20	100.43	37.76
PN-C2	78.86	600.24	100.57	39.06
PN-C3	77.17	600.64	100.44	28.42

Tabla 4.3: Características de paneles cuadrados ensayados. Etapa 2

Probeta	Peso (kg)	Longitud μ_L (mm)	Espesor μ_E (mm)	Carga máxima (kN)
P-CU-1	77.78	600.11	100.24	24.11
P-CU-2	76.91	599.46	100.13	24.91
P-CU-3	76.25	599.81	99.58	28.04

Tabla 4.4: Características de paneles cuadrados ensayados. Etapa 3

Probeta	Peso (kg)	Longitud μ_L (mm)	Espesor μ_E (mm)	Carga máxima (kN)
PCO-1	78.380	600.75	100.64	49.24
PCO-2	78.195	601.75	100.80	50.52
PCO-3	78.835	602.38	101.11	43.41



Figura 4.6: Ensayo y modo de falla de paneles cuadrados.



Figura 4.7: Desprendimientos de material en paneles cuadrados.

4.2.2 Ensayo de panel circular. Norma Americana ASTM C1550

Este procedimiento permite conocer la tenacidad a flexión y su comportamiento post-agrietamiento representado por la energía absorbida hasta alcanzar el desplazamiento requerido, de una probeta de sección circular de $75 -5/+15$ mm de espesor y 800 ± 10 mm de diámetro como lo indica la norma ASTM C1550, además, la desviación estándar en 10 medidas del espesor debe ser inferior a 3.0 mm. En ocasiones cuando la superficie del panel sobrepase el espesor requerido o presente rugosidades mayores, es posible pulir con apoyo de equipo especial, para evitar estos trabajos complejos, se debe cuidar el enrase inmediatamente después de muestrear.

Se debe disponer de, al menos, tres especímenes para cada edad a evaluar por unidad de sección de concreto lanzado (lote) y el ensayo se acepta, cuando al menos, dos de los tres especímenes cumplan con el modo de falla formado por tres grietas radiales como lo especifica la ASTM.

El molde usado para muestreo de panel circular está compuesto por una base cuadrada de acero con asas colocadas en sus extremos para facilitar su manipulación, y una tira de acero para conformar la sección circular, con ancho igual al espesor deseado (75 mm) sujeta con soldadura en la media sección inferior, para permitir el libre movimiento de la otra mitad del molde, unidas por dos pernos, con la finalidad de facilitar el desmolde.

Para los ensayos se requiere de un marco de carga con actuador de 500 kN de capacidad aplicada al centro del panel, máquina de comando servo-controlada y sistema de montaje que permita fijar una base circular que dispone de tres pivotes distribuidos simétricamente en el perímetro de la circunferencia y reciben el panel como se muestra en la figura 4.8, cuidando

que la carga se aplique en la cara enrasada. En la parte inferior central del panel se debe disponer de un transductor de desplazamiento (CDP-100) con rango de 100 mm fijada a una base magnética que registra la flecha en la zona a tensión. Todos los componentes deben estar calibrados, alineados y nivelados. La norma establece que debe aplicarse una velocidad de desplazamiento de 4 mm/min y el ensayo concluye una vez que se alcanzada un desplazamiento mínimo de 40 mm. Esta deflexión se especifica para cumplir los requerimientos de hermeticidad a altas deformaciones en estructuras subterráneas (caso práctico), como revestimientos. En la figura 4.9 se puede apreciar el comportamiento de un espécimen en proceso de ensayo y las fisuras post-agrietamiento al término del ensayo.

Se realizaron tres etapas de muestreo de tres especímenes cada una en diferente tiempo y se ensayaron a la edad de 28 días. En la tabla 4.5 (etapa 1) y 4.6 (etapa 2) y 4.7 (etapa 3) se indica el peso, promedio de longitud (μ_L), promedio de espesor (μ_E), desviación estándar del espesor (σ_E) y carga máxima resistida por cada espécimen, respectivamente. Los valores de longitud y espesor se encuentran dentro del rango establecido por la norma ASTM C1550. Este ensayo tiene un grado de complejidad igual a los paneles cuadrados y mayor respecto a los cilindros para el ensayo de Doble Punzonamiento, por la manipulación de especímenes de aproximadamente 85 kg en espacios reducido.



Figura 4.8: Instrumentación de marco de carga.



Figura 4.9: Comportamiento de panel circular durante aplicación de carga y fisura post- ensayo.

Tabla 4.5: Características de paneles circulares ensayados. Etapa 1

Probeta	Peso (kg)	Longitud μ_L (mm)	Espesor		Carga máxima (kN)
			μ_E (mm)	σ_E (mm)	
P-CI-1	82.70	799.60	78.87	0.82	22.19
P-CI-2	83.50	800.00	77.88	0.78	20.65
P-CI-3	82.50	800.00	77.45	0.60	21.28

Tabla 4.6: Características de paneles circulares ensayados. Etapa 2

Probeta	Peso (kg)	Longitud μ_L (mm)	Espesor		Carga máxima (kN)
			μ_E (mm)	σ_E (mm)	
PCI-1	80.91	800.58	76.25	1.16	18.04
PCI-2	81.72	797.60	76.64	0.94	19.55
PCI-3	82.24	799.60	77.22	1.63	20.34

Tabla 4.7: Características de paneles circulares ensayados. Etapa 3

Probeta	Peso (kg)	Longitud μ_L (mm)	Espesor		Carga máxima (kN)
			μ_E (mm)	σ_E (mm)	
PCR-1	84.215	800.60	76.60	1.35	19.11
PCR-2	84.690	800.40	76.20	0.86	18.76
PCR-3	84.645	800.40	76.69	1.07	20.55

4.2.3 Ensayo de doble punzonamiento. UNE 83515

El ensayo de doble punzonamiento (EDP), también conocido como ensayo Barcelona (BCN) permite conocer la resistencia máxima, residual y absorción de energía del CLRF.

Para la caracterización de estos especímenes se requiere de testigos extraídos de moldes denominados artesas, que, por su forma amplia en la base mayor, permite recibir el CLRf sin problema alguno. Se requiere extraer un mínimo de tres testigos por artesa y al menos ensayar 6 testigos por cada edad a evaluar por unidad de sección de concreto lanzado (lote).

Los testigos deben medir \varnothing 150 mm x h 150 mm, para cumplir los requisitos indicados en la norma referentes a mantener la relación de diámetro igual a la altura, por tal motivo se fabricaron dos artesas de madera de B 650 mm x b 350 mm x h 150 mm, y por cada una se obtuvieron 4 testigos.

La extracción de los 8 testigos se realizó en una jornada, un día antes de cumplir los 28 días de curado. Se utilizó una extractora con broca de 150 mm de diámetro, nivelada respecto a las muestras para cuidar el corte vertical. (Ver figura 4.10).

El ensayo se cumplió a los 28 días, como lo describe la norma UNE 83515, con apoyo de un equipo MTS de 250 kN; para la instrumentación, se utiliza una cadena que es colocada a media altura del espécimen, ajustada por un extensómetro que mide la abertura circunferencial; dos placas cilíndricas de acero utilizadas durante el montaje, que son de ayuda para centrar el cilindro con respecto al punzón, colocadas en el extremo inferior y superior del testigo, estas placas poseen una abertura radial que ayuda a colocar los punzones de acero concéntricamente del cilindro a ensayar, mismos que someten al espécimen a compresión uniaxial, estos punzones deben presentar una relación con el diámetro y altura del cilindro de un cuarto, en la figura 4.11 se aprecian la instalación de la probeta antes de iniciar el ensayo.



Figura 4.10: Extracción de cilindros para ensayo BCN

En la base inferior se coloca la placa con hendidura para asegurar el punzón y debe permanecer fija durante todo el ensayo para asegurar la posición del punzón inferior. La placa superior solo es utilizada para el montaje y debe ser retirada después de colocar en posición el punzón superior, esta placa también sirve para rectificar la alineación del testigo respecto a la placa inferior.

Se debe configurar la aplicación de carga a una velocidad de 0.5 mm/min, y terminar el ensayo cuando se alcance una abertura circunferencial mínima de 6 mm (UNE 83515). Siempre corresponderá a la cara enrasada de la probeta quedar en la parte superior, por tal motivo, es indispensable garantizar una superficie lisa durante el proceso de enrase después del muestreo.



Figura 4.11: Montaje e instrumentación en marco de carga para ensayo BCN

El modo de falla característico de los cilindros se presenta en las caras de carga formada por 2 o 3 grietas radiales principales que recorren toda la altura del espécimen y grietas secundarias de menor tamaño que no logran cruzar la altura del espécimen. En la figura 4.12 se observa el comportamiento de un espécimen durante el ensayo y el modo de falla.



Figura 4.12: Ensayo de espécimen y modo de falla de los cilindros ensayados, BCN.

En la tabla 4.8 (etapa 1) y 4.9 (etapa 2) y 4.10 (etapa 3) se indica el peso, promedio de los diámetros (μ_{ϕ}), promedio de las alturas (μ_H) y carga máxima resistida por cada espécimen.

Tabla 4.8: Características de cilindros para ensayo BCN. Etapa 1

Artesa	Probeta	Peso (kg)	Diámetro	Altura	Carga máxima (kN)
			μ_{ϕ} (mm)	μ_H (mm)	
1	BCN-1	5.595	150.40	149.00	59.40
	BCN-2	5.590	150.80	148.55	80.33
	BCN-3	5.655	150.80	148.75	81.85
	BCN-4	5.600	150.45	149.05	67.87
2	BCN-5	5.595	150.40	148.80	77.68
	BCN-6	5.510	150.85	148.10	75.83
	BCN-7	5.575	150.80	147.70	81.62
	BCN-8	5.530	150.85	148.15	69.70

Tabla 4.9: Características de cilindros para ensayo BCN. Etapa 2

Artesa	Probeta	Peso (kg)	Diámetro	Altura	Carga máxima (kN)
			μ_{ϕ} (mm)	μ_H (mm)	
1	DP-1	5.730	150.45	151.25	78.18
	DP-2	5.755	150.50	151.55	79.00
	DP-3	5.680	150.60	151.25	61.29
	DP-4	5.695	150.75	151.60	45.28
	DP-5	5.350	150.80	148.30	23.98
2	DP-6	5.415	151.00	146.65	31.83
	DP-7	5.500	150.50	147.15	73.33
	DP-8	5.385	150.65	148.90	63.82

Tabla 4.10: Características de cilindros para ensayo BCN. Etapa 3

Artesa	Probeta	Peso	Diámetro	Altura	Carga máxima
		(kg)	$\mu\phi$ (mm)	μH (mm)	
1	SPB-1	5.85	150.40	149.50	114.34
	SPB-2	5.895	150.45	150.00	111.99
	SPB-3	5.885	150.40	150.55	112.81
	SPB-4	5.940	150.30	151.30	113.89
	SPB-5	5.985	150.40	151.30	116.59
2	SPB-6	5.875	150.35	149.70	111.01
	SPB-7	5.945	150.75	150.25	119.07
	SPB-8	5.905	150.35	149.25	118.77

4.3 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE FIBRA

La mezcla del concreto lanzado con fibras debe ser uniforme para garantizar su distribución durante la colocación, a fin de mantener la misma proporción (kg/m^3) que se suministra en obra (contenido teórico) con la que se lanza para revestir el túnel (contenido real). Se conoce que el aporte de fibra a las mezclas de concreto utilizadas para el revestimiento primario del túnel de obra en estudio, es de 30 kg/m^3 (contenido teórico). La presentación de las fibras es por bulto de 20 kg. El concreto premezclado se entrega en obra en ollas de 5 m^3 , por tanto, la cantidad de fibras que se suministran por cada olla es de 150 kg, equivalente a siete sacos y medio.

La norma española UNE -EN 14488-7 “Contenido en fibras del concreto reforzado con fibras”, sugiere procedimientos para conocer el contenido de fibra en especímenes de concreto fresco y/o endurecido, según sea el caso. Actualmente en México, no existe normatividad aplicada para conteo de fibras a fin de conocer y comparar el contenido de fibra real respecto al contenido de fibra teórico, por tal motivo en los siguientes incisos se mencionan las actividades desarrolladas para poder determinar la cantidad de fibra existente en cada muestra post-ensayo (endurecido) y en muestras de concreto lanzado reforzado con fibras en estado fresco.

Para conocer el contenido de fibra en un volumen determinado (kg/m^3) se aplicó la siguiente fórmula (EN 14488-7):

$$C_f = \frac{m_f \times 1000}{V_c} \quad (2)$$

Donde:

- C_f Contenido de fibras (kg/m^3)
- m_f Peso de la fibra (g)
- V_c Volumen de muestra (cm^3)

4.3.1 Estado fresco

El conteo de fibras en concreto fresco facilita conocer la cantidad de fibra contenida dentro de un molde en un lapso de tiempo relativamente corto, debido a que las actividades de lavado, secado y conteo de fibras, puede desarrollarse en menor tiempo comparado con el conteo de fibras en estado endurecido, además de considerar el personal, espacio y herramientas disponible para desarrollar dichas actividades.

Para la determinación de contenido de fibras en estado fresco se optó por muestrear un panel cuadrado de $L 600\text{mm} \times h 100\text{mm}$ en obra, siguiendo los protocolos de muestreo indicados en los incisos 1-4 del apartado 4.1 de este capítulo. Previamente se obtuvo el peso del molde para considerarlo en el análisis y obtención de datos. Para desarrollar las actividades de muestreo, lavado y conteo de fibras de concreto en estado fresco, participaron dos personas, estos trabajos también los puede llevar a cabo una sola persona.

En la tabla 4.11 se indican las características principales del concreto fresco utilizado para la obtención de fibras. La resistencia del concreto reforzado con fibras utilizada para revestimiento primario es $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$, en esta ocasión, por razones propias de la obra, se optó por utilizar otra resistencia y diferente proporción de fibras. Sin embargo, esta situación no afecta el desarrollo de la actividad, debido a que el objetivo es encontrar relación entre el contenido de fibra teórico y real.

Después de muestrear el espécimen, éste se transportó dentro del túnel en carretilla hasta la lumbrera, y desde el fondo hasta la superficie de la lumbrera, se subió en una canastilla ligada a la grúa.

Tabla 4.11: Características de concreto para conteo de fibras en estado fresco.

Resistencia (kg/cm ²)	Revenimiento (cm)	Temperatura (° C)			Humedad (%)		Contenido teórico de fibra (kg/m ³)
		Llegada	Antes de lanzar	Durante lanzando	Antes de lanzar	Durante lanzando	
300	18	32	25.5	29.7	26	32	28

En la superficie se dispuso de un espacio para realizar las siguientes actividades:

- 1- En cuanto el espécimen llegó a la superficie se procedió a pesar, para conocer por diferencias, el peso del concreto.
- 2- Posteriormente se colocó toda la mezcla contenida en el molde, dentro de una carretilla saturada de agua tratada (disponible en obra) para iniciar el proceso de lavado, con la finalidad de evitar el proceso de fraguado y endurecimiento de la mezcla (separar el cemento de los agregados y la fibra).
- 3- Se procedió a revolver gradualmente el concreto saturado de agua con ayuda de una varilla, a fin de deshacer grumos y evitar la presencia de piedras de concreto endurecido.
- 4- Para separar la lechada de los agregados, se utilizaron tamices de tres diferentes aberturas, N° 4, 16, 32, con el propósito de evitar la pérdida de fibras principalmente.
- 5- Se realizaron dos lavados de la mezcla en obra y posteriormente el material sobrante se transportó semihúmedo en cubetas hasta las instalaciones del Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Para evitar obstrucciones en obra durante tiempos prolongados, se sugirió terminar el proceso en el laboratorio de la institución, debido a que el tiempo necesario para lavar el material hasta quedar sin presencia de cemento es largo.
- 6- En el laboratorio se procedió a realizar dos lavados más al material y después de pasar por el tamiz el agua sobrante, cuidando en todo momento no perder ninguna fibra por lavado, todo el material se dispuso en moldes especiales para llevarlos al horno, en donde permanecieron durante 72 hrs a 16 °C, para obtener un material seco en condiciones favorables para extraer las fibras.
- 7- Después de retirar el material del horno, éste se extendió en capas delgadas dentro de un molde de madera, para iniciar la extracción de fibras con apoyo de un imán.

Cuidando en todo momento la distribución uniforme del imán en toda la superficie del material disgregado.

- 8- Después de extraer las fibras de todo el material, se procedió a hacer una limpieza para evitar la presencia de partículas que puedan alterar el peso de las fibras. Terminada esta actividad, toda la fibra encontrada se pesó.

Los resultados obtenidos a partir del muestreo, lavado y extracción de fibras se presentan en las tablas 4.12 y 4.13.

Tabla 4.12: Características de espécimen para conteo de fibras en estado fresco.

Tipo			Nº Especímenes	Fecha de muestreo	Peso panel (kg)	Peso panel+concreto (kg)	Peso concreto	Volumen CLRF (m ³)
<i>L (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>h (mm)</i>	1	04/04/2019	5.13	84.945	79.815	0.0360
600	600	100						

Se observa en la tabla 4.13 que en el espécimen utilizado para conteo de fibras en estado fresco se deben encontrar 1.008 kg de fibras, sin embargo, sólo se encontró el 84.41% de este peso, que representa los 0.85089 kg, por lo tanto, esta cantidad determina que la proporción de contenido real es de 23.636 kg/m³, menor al contenido teórico de 28 kg/m³.

Tabla 4.13: Resultados del conteo de fibras en estado fresco.

Nº de lavados	Temperatura de secado (°C)	Fibras Tiempo de secado (hr)	Por espécimen (kg)	Contenido teórico (kg)	Contenido real	
					%	kg/m ³
4	16	72	0.85089	1.0080	84.41%	23.636

En la figura 4.13 se muestran los pasos mencionados anteriormente, para el proceso de conteo de fibras en estado fresco.



Figura 4.13: Procedimiento para el conteo de fibras en estado fresco.

4.3.2 Estado endurecido

Con el propósito de conocer la cantidad de fibra contenida en cada probeta obtenida a partir de cada una de las etapas de muestreo que se realizaron para el desarrollo de esta tesis y que previamente fueron ensayadas, se planteó un proceso para demoler, triturar y extraer las fibras de acero que permitan conocer la relación entre el contenido teórico y el contenido real, que a continuación se expone:

1. Antes de proceder a los ensayos, sea para panel cuadrado, panel circular o doble punzonamiento, cada probeta se pesa y mide de acuerdo con los requisitos que establecen las normas correspondientes, tal como se muestra en las tablas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7, respectivamente. Esta información se retoma para representar los resultados de contenido de fibra más adelante.

2. Después de ensayar los paneles (cuadrado y circular) y los cilindros, se procede a recabar información acerca del modo de falla, número de grietas presentadas después del ensayo, entrelazado de fibras post-agrietamiento y medición de ángulos de cada grieta presente en el espécimen, particularmente para los paneles circulares.
3. Posteriormente con ayuda de un marro se demuelen los especímenes en fragmentos pequeños que permitan el libre paso en la máquina trituradora, con la finalidad de reducir el tamaño de las piedras de concreto para separar las fibras con menor esfuerzo, como se muestra en la figura 4.14. Después de triturar cada espécimen, se deberá tener cuidado en el resguardo del material para evitar el contacto con los ingredientes triturados de otro espécimen.



Figura 4.14: Proceso de demolición y trituración de espécimen.

4. Después de haber triturado todo el espécimen, se procede a la extracción de fibras. En esta actividad se utilizó un contenedor de madera amplio, donde se extendió material en capas delgadas para poder desplazar uniformemente el imán en toda la superficie y obtener las fibras. A continuación, se procedió a desprender pequeñas partículas de concreto que contenía algunas fibras, hasta quedar limpias para evitar discrepancia en el peso. Finalmente, se procedió a pesar el contenido de fibra encontrado en cada espécimen. En la tabla 4.14 se indican los resultados correspondientes al contenido de fibra encontrado en cada espécimen post-ensayo de la primera, segunda y tercera etapa de muestreos que se realizaron para el desarrollo de la tesis.

Conforme a las cantidades de fibra encontradas por cada espécimen se demuestra que el contenido real se encuentra por debajo del contenido teórico en todos los casos; siendo los más críticos el panel circular de la primera etapa, el panel cuadrado de la segunda etapa, y los cilindros para ensayo de doble punzonamiento de la artesa 2 (DP-1 hasta DP-4) correspondientes a la segunda etapa.

Por otro lado, la cantidad de fibra concentrada en un espécimen influye en términos de la capacidad de absorción de energía y tenacidad, en ese sentido, entre más fibra entrelazada se encuentre en el espécimen, la absorción de energía incrementa, por lo tanto, si se conocen los requisitos de diseño, a partir de estos parámetros podrá determinarse la aceptación o rechazo del elemento, debido a que la dosificación depende de los valores de absorción de energía necesarios para el concreto lanzado.

Cabe mencionar que la fibra no encontrada posiblemente se deba a pérdidas por adherencia en la olla de despacho, el tubo de conducción a través de la lumbrera, la revolvedora que circula a través del túnel, en el equipo de lanzado, en la mezcla que se pierde durante el lanzado (rebote) y en algunas ocasiones, cuando quedan en la superficie de los moldes muestreados y crean una nula o débil adherencia a la mezcla de concreto. Por tal motivo, se sugiere cuidar en todo momento el despacho del concreto lanzado reforzado con fibras y tener un constante control de este suministro, además, plantear un sistema de control de calidad en el suministro de fibras a través del conteo de éstas en concreto en estado fresco justo en el sitio de lanzado o hacer un ajuste en la cantidad de fibra suministrada.

Además de conocer el peso total, para conocer las unidades de fibra encontradas en cada espécimen, se tomó como referencia el peso de 100 fibras, por tanto, se conoce que estas fibras juntas pesan 0.00696 kilogramos. Esta información se traduce en la tabla 4.15, donde se presenta la cantidad de fibra en peso y unidades estimadas encontradas por cada espécimen.

Tabla 4.14: Resultado del contenido de fibra en probetas de concreto endurecido post-ensayo.

ETAPA	Probeta			Fibras (30kg/m ³)		Contenido real		
	Tipo	ID	Peso (kg)	Volumen (m ³)	Por espécimen (kg)	Contenido teórico (kg)	(%) (kg/m ³)	
PRIMERA ETAPA	PANEL CUADRADO	PN-C1	76.94	0.036	0.7288	1.09	67.15	20.1443
		PN-C2	78.86	0.036	0.7803	1.09	71.78	21.5340
		PN-C3	77.18	0.036	0.7533	1.09	69.30	20.7907
	PANEL CIRCULAR	P-CI-1	82.70	0.040	0.3904	1.19	32.86	9.8569
		P-CI-2	83.50	0.039	0.4271	1.17	36.36	10.9094
		P-CI-3	82.50	0.039	0.4569	1.17	39.12	11.7365
	CILINDROS ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO	BCN-1	5.595	0.0026	0.0489	0.079	61.58	18.4730
		BCN-2	5.590	0.0027	0.0508	0.080	63.85	19.1544
		BCN-3	5.655	0.0027	0.0445	0.080	55.77	16.7310
		BCN-4	5.575	0.0026	0.0517	0.079	64.99	19.4961
		BCN-5	5.600	0.0026	0.0491	0.079	61.90	18.5696
		BCN-6	5.595	0.0026	0.0450	0.079	56.67	17.0011
		BCN-7	5.510	0.0026	0.0511	0.078	64.62	19.3860
		BCN-8	5.530	0.0026	0.0589	0.079	74.16	22.2488
	PANEL CUADRADO	P-CU-1	77.78	0.036	0.3621	1.08	33.43	10.0297
		P-CU-2	76.91	0.036	0.3653	1.08	33.85	10.1538
		P-CU-3	76.25	0.036	0.3856	1.07	35.88	10.7630
	PANEL CIRCULAR	PCI-1	80.91	0.038	0.8977	1.15	77.96	23.3874
		PCI-2	81.72	0.038	0.9092	1.15	79.14	23.7429
		PCI-3	82.24	0.039	0.9221	1.16	79.27	23.7823
	CILINDROS ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO	DP-1	5.730	0.0027	0.0247	0.081	30.57	9.1711
		DP-2	5.755	0.0027	0.0195	0.081	24.11	7.2329
		DP-3	5.680	0.0027	0.0319	0.081	39.47	11.8401
		DP-4	5.695	0.0027	0.0367	0.081	45.20	13.5595
DP-5		5.350	0.0026	0.0374	0.078	47.74	14.3208	
DP-6		5.415	0.0026	0.0364	0.078	46.81	14.0443	
DP-7		5.500	0.0026	0.0365	0.077	47.08	14.1239	
DP-8		5.385	0.0026	0.0425	0.079	54.05	16.2155	

Continua

Tabla 4.14: Continua

ETAPA	Tipo	Probeta			Fibras (30kg/m ³)		Contenido real	
		ID	Peso (kg)	Volumen (m ³)	Por espécimen (kg)	Contenido teórico (kg)	(%)	(kg/m ³)
TERCER ETAPA	PANEL CUADRADO	PCO-1	78.380	0.036	0.9715	1.09	89.16	26.75
		PCO-2	78.195	0.036	0.9576	1.09	87.45	26.24
		PCO-3	78.835	0.037	0.9442	1.10	85.79	25.74
	PANEL CIRCULAR	PCR-1	84.22	0.039	0.8982	1.16	77.64	23.29
		PCR-2	84.69	0.038	0.9003	1.15	78.27	23.48
		PCR-3	84.65	0.039	0.9339	1.16	80.67	24.20
	CILINDROS ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO	SPB-1	5.85	0.0027	.0684	0.080	85.84	25.75
		SPB-2	5.895	0.0027	.0577	0.080	72.13	21.64
		SPB-3	5.885	0.0027	.0632	0.080	78.78	23.63
		SPB-4	5.940	0.0027	.0663	0.081	82.32	24.69
		SPB-5	5.985	0.0027	.0699	0.081	86.63	25.99
		SPB-6	5.875	0.0027	.0690	0.080	86.56	25.97
		SPB-7	5.945	0.0027	.0705	0.080	87.62	26.29
		SPB-8	5.905	0.0026	.0675	0.079	84.87	25.46

Tabla 4.15: Cantidad de fibras por espécimen.

ETAPA	Tipo	ID	Fibras (30kg/m ³)	
			Por espécimen (kg)	Por espécimen (pza.)
PRIMERA ETAPA	PANEL CUADRADO	PN-C1	0.7288	10,471.26
		PN-C2	0.7803	11,211.21
		PN-C3	0.7533	10,823.28
	PANEL CIRCULAR	P-CI-1	0.3904	5,609.20
		P-CI-2	0.4271	6,136.49
		P-CI-3	0.4569	6,564.66
	CILINDROS ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO	BCN-1	0.0489	702.59
		BCN-2	0.0508	729.89
		BCN-3	0.0445	639.37
		BCN-4	0.0517	742.82
		BCN-5	0.0491	705.46
		BCN-6	0.0450	646.55
		BCN-7	0.0511	734.20
		BCN-8	0.0589	846.26

Continua

Tabla 4.15: Continua

ETAPA	Tipo	ID	Fibras (30kg/m ³)		
			Por espécimen (kg)	Por espécimen (pza.)	
SEGUNDA ETAPA	PANEL CUADRADO	P-CU-1	0.3621	5,202.59	
		P-CU-2	0.3653	5,248.56	
		P-CU-3	0.3856	5,540.23	
	PANEL CIRCULAR	P-CI-1	0.8977	12,897.99	
		P-CI-2	0.9092	13,063.22	
		P-CI-3	0.9221	13,248.56	
	CILINDROS ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO	DP-1	0.0247	354.89	
		DP-2	0.0195	280.17	
		DP-3	0.0319	458.33	
		DP-4	0.0367	527.30	
		DP-5	0.0374	537.36	
		DP-6	0.0364	522.99	
		DP-7	0.0365	524.43	
		DP-8	0.0425	610.63	
	TERCERA ETAPA	PANEL CUADRADO	PCO-1	0.9715	13,958.33
			PCO-2	0.9576	13,758.62
PCO-3			0.9442	13,566.09	
PANEL CIRCULAR		PCR-1	0.8982	12,905.17	
		PCR-2	0.9003	12,935.34	
		PCR-3	0.9339	13,418.10	
CILINDROS ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO		SPB-1	0.0684	982.76	
		SPB-2	0.0577	829.02	
	SPB-3	0.0632	908.05		
	SPB-4	0.0663	952.59		
	SPB-5	0.0699	1,004.31		
	SPB-6	0.0690	991.38		
	SPB-7	0.0705	1,012.93		
	SPB-8	0.0675	969.83		

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para conocer el comportamiento de cada espécimen durante los ensayos descritos anteriormente, correspondiente a paneles cuadrados, paneles circulares y cilindros para el ensayo de doble punzonamiento, toda la información recabada se traduce en gráficas que representan parámetros de carga contra desplazamiento que al calcular el área bajo ésta curva, se puede conocer la absorción de energía.

4.4.1 Panel cuadrado. Norma Europea EN 14488-5

Los resultados encontrados en los ensayos de paneles cuadrados se muestran en la figura 4.15, 4.16 y 4.18 para la primera, segunda y tercera etapa, respectivamente. Se aprecian las curvas carga-desplazamiento y la gráfica que representa la absorción de energía. El comportamiento de la curva carga vs desplazamiento al inicio presenta un incremento casi lineal hasta alcanzar un primer pico, donde teóricamente es el concreto que trabaja para resistir las cargas actuantes, posteriormente se registran más incrementos y decrementos pasando por las cargas máximas resistidas hasta llegar al agrietamiento o falla por parte del concreto y donde la fibra aporta resistencia para soportar el post-agrietamiento, evitando la separación del elemento, creando un descenso progresivo o zona de fluencia que representa el incremento de la capacidad residual a medida que la resistencia disminuye dando lugar a la tenacidad del elemento. La gráfica representada por la curva absorción de energía vs desplazamiento, nos indica en términos de energía (Joules) los valores que soporta el elemento de concreto reforzado con fibras. A partir de estos valores, se puede definir si se alcanzó la absorción especificada conforme al diseño de proyecto.

En la figura 4.15 se observa que las muestras presentan al menos tres picos a lo largo del desarrollo del ensayo, particularmente el comportamiento del panel PN-C3 es bastante desigual respecto a los otros dos, esto se asocia a la carga máxima que resistió, encontrándose menor absorción de energía. Evaluando las tres muestras, el coeficiente de variación incrementa al haber un espécimen más alejado del comportamiento de los otros dos. No se ha descartado ningún espécimen debido a que presentan el modo de falla típico y respecto a la variabilidad de los resultados encontrados en la literatura que oscila entre el 8% y 10% en este caso se encontró 12%. Si sólo se considera para el análisis el panel PN-C1 y PN-C2 el coeficiente de variación resultaría de 5.1% para mostrar un desempeño sistemático, sin embargo, no se descarta ninguna probeta, pero resulta evidente que el espécimen PN-C3 presenta un comportamiento desigual que puede estar relacionado con diferentes aspectos, tales como: el tiempo de muestreo y vida del concreto por tratarse de la última probeta moldeada en obra, además, al desmoldar pasadas las 24 horas se observó que el concreto presentó una apariencia desmoronable incluso a los 28 días de curado; también las grietas

formadas al término del ensayo presenta poco entrelazado de fibras que puede traducirse a una distribución inadecuada de estos elementos.

En la tabla 4.16 se indica el promedio (μ), desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (C_v) de la energía absorbida que presenta cada muestra hasta un desplazamiento de 25 mm correspondientes a la etapa 1. La absorción de energía promedio alcanza los 600 Joules, esto representaría una energía aceptable para un terreno solido de acuerdo con la clasificación que emite la norma EN 14487-1.

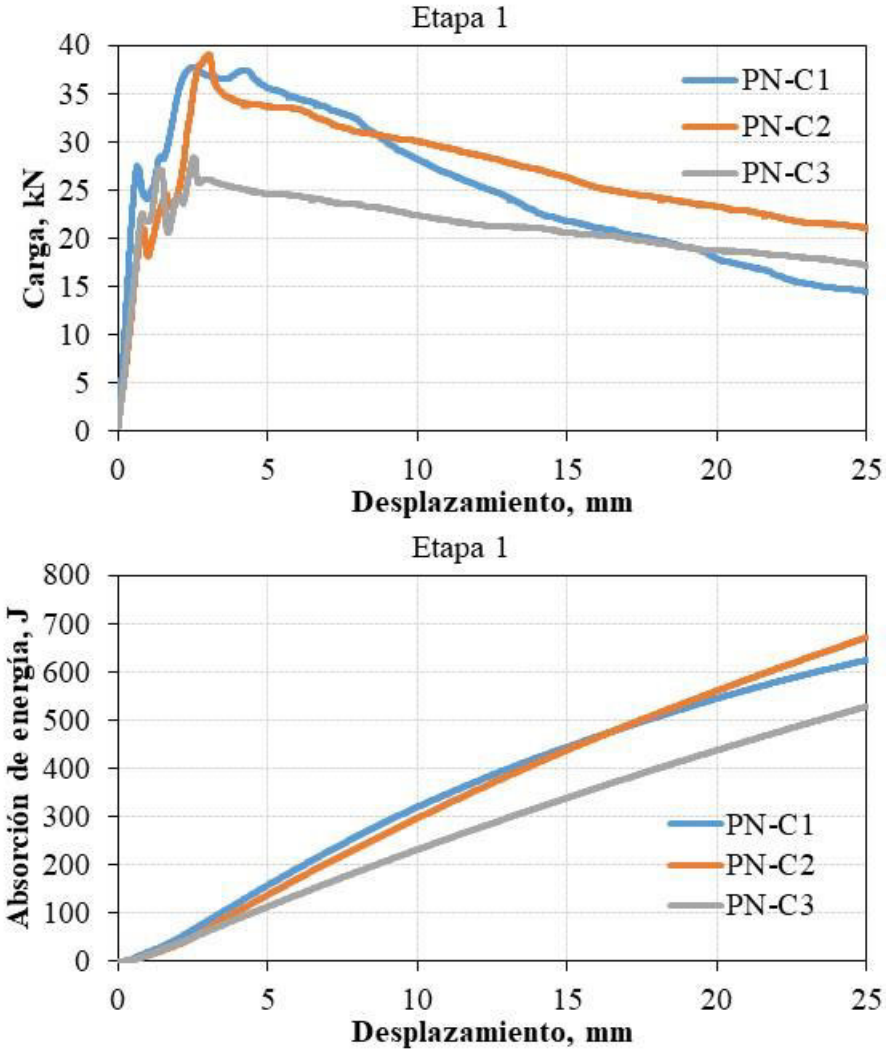


Figura 4.15: Grafica carga vs desplazamiento y curva Absorción de energía vs desplazamiento de especímenes cuadrados correspondientes a la etapa 1.

Tabla 4.16: Resultado de ensayo EN 14488-5. Etapa 1

PANEL CUADRADO EN 14488-5 (T δ_{25} mm)				
Muestra	Absorción de energía (J)	μ	C_v	Contenido de fibra
PN-C1	624.29	607.76	12.00%	67.15%
PN-C2	671.00			71.78%
PN-C3	528.00			69.30%

Los resultados de la etapa 2 se muestran en la figura 4.16 el comportamiento de la curva carga vs desplazamiento, donde se aprecia la formación definida de tres picos encontrándose entre ellas la carga máxima resistida por cada espécimen. Se observa que la curva correspondiente a la muestra denominada P-CU-1 se encuentra por debajo de las otras dos, esto se atribuye a que obtuvo la menor carga máxima, además de encontrarse menos fibra. Por otro lado, presentó un mayor peso comparado con las otras dos muestras. Es importante destacar que el espécimen P-CU-1 y P-CU-2 presentaron una característica particular con relación a las grietas formadas durante el ensayo, debido a que éstas ranuras traspasaron por completo el espesor de la probeta provocando una separación total de las partes (ver figura 4.17), y se observó que a lo largo de las ranuras se encontraba poca o casi nula presencia de fibras, esto se traduce al contenido teórico de fibras encontrado en los tres especímenes por debajo del 35%. En relación con la energía absorbida, se encontró que los tres especímenes promediaron 327.74 Joules, cantidad que no se encuentran dentro de la clasificación de la norma EN 14487-1.

El coeficiente de variación calculado es mayor al 20% tal como se resume en la tabla 4.17, si se desprecia el espécimen P-CU-1 el coeficiente de variación disminuiría a 4 % para convertirse en un valor regularmente aceptable en términos de variación.

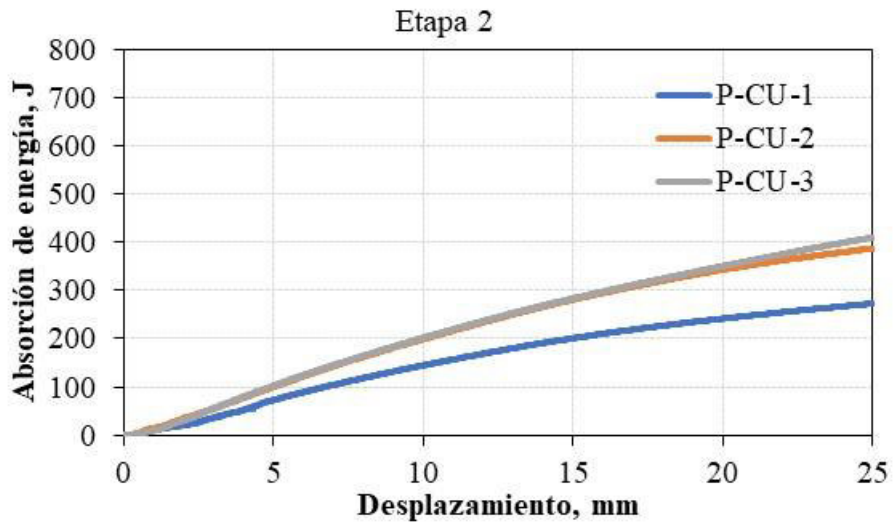
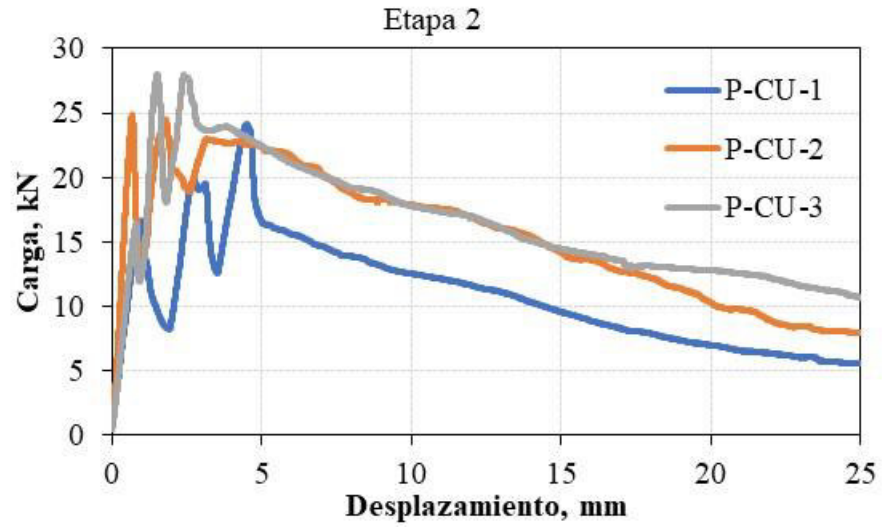


Figura 4.16: Gráfica carga vs desplazamiento y curva Absorción de energía vs desplazamiento de especímenes cuadrados correspondientes a la etapa 2.



Figura 4.17: Modo de falla de paneles cuadrados correspondientes a la etapa 2.

Tabla 4.17: Resultado de ensayo EN 14488-5. Etapa 2

PANEL CUADRADO EN 14488-5 (T δ_{25} mm)				
Muestra	Absorción de energía (J)	μ	C_v	Contenido de fibra
P-CU-1	272.61			33.43%
P-CU-2	387.39	356.65	20.65%	33.85%
P-CU-3	409.97			35.88%

En la figura 4.18 se presentan las gráficas carga vs desplazamiento y absorción de energía vs desplazamiento que muestran los resultados de los ensayos correspondientes a la etapa 3. Se observa que los tres especímenes presentan alrededor de los primeros 5 mm de desplazamiento, un incremento gradual de la carga donde el concreto prácticamente trabaja sin aporte de la fibra y se presenta el agrietamiento y recuperación (ascensos y descensos) del concreto hasta alcanzar la carga máxima para posteriormente las fibras iniciar su trabajo junto con el concreto a partir del cual se presenta un descenso gradual en el tramo de post-agrietamiento. Esta prueba finaliza hasta alcanzar un desplazamiento mínimo de 25 mm. El PCO-2 y PCO-3 presentan más de tres picos, mientras que el PCO-1 solo presenta tres picos. Se aprecia en la gráfica que el comportamiento de las curvas es bastante similar en términos

de carga máxima y absorción de energía, esto se traduce a un coeficiente de variación entre las tres probetas menor al 6 %.

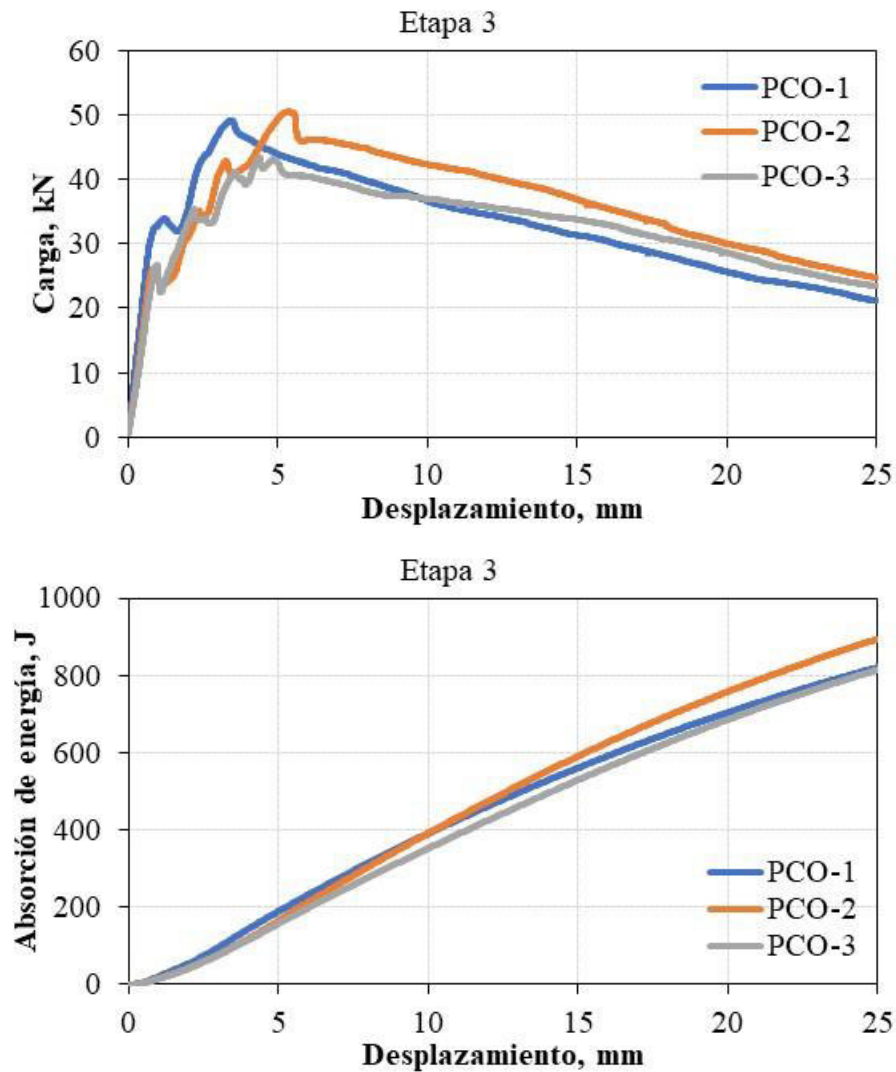


Figura 4.18: Grafica carga vs desplazamiento y curva Absorción de energía vs desplazamiento de especímenes cuadrados correspondientes a la etapa 3.

En la tabla 4.18 se presenta los valores de absorción de energía para cada panel de la etapa 3 hasta un desplazamiento de 25 mm, el promedio de la serie de 3 paneles, el coeficiente de variación y el contenido de fibra encontrado a partir de la trituración post-ensayo de cada probeta. Es el panel PCO-2 quien presenta mayor absorción de energía, mientras que en el panel PCO-1 se encontró el mayor contenido de fibra.

Tabla 4.18: Resultado de ensayo EN 14488-5. Etapa 3

PANEL CUADRADO EN 14488-5 (T δ_{25} mm)				
Muestra	Absorción de energía (J)	μ	C_v	Contenido de fibra
PCO-1	820.83			89.16%
PCO-2	894.29	843.14	5.27%	87.45%
PCO-3	814.31			85.79%

Los valores de absorción de energía están estrechamente relacionados con el contenido de fibra encontrado en cada espécimen, fue en la tercera etapa donde se presentaron los valores más altos en relación con la carga máxima, absorción de energía y por lo tanto, el contenido de fibra. Además, presentó el coeficiente de variación más bajo (5.27%). Cabe mencionar que la diferencia de tiempo entre la etapa de muestreo 1 y 2 es de aproximadamente seis meses y entre la etapa de muestreo 2 y 3 de cuatro meses, en la primera etapa de muestreos el concreto lanzado reforzado con fibras fue por medios manuales en donde se logró obtener valores de absorción de energía mayores respecto a la segunda etapa donde el lanzado se realizó con apoyo de un robot, del mismo modo el muestreo de la etapa 3 se realizó con equipo robotizado.

4.4.2 Panel circular. Norma Americana ASTM C1550

En la figura 4.19 se presentan las curvas carga-desplazamiento para cada uno de los tres especímenes ensayados en la primera etapa de muestreos. El área bajo la curva carga-desplazamiento representa el desempeño post-agrietamiento de las fibras asociada a la energía absorbida también representadas en la gráfica absorción de energía vs desplazamiento. El desarrollo de cada curva tiene la particularidad de formar un pico evidente que alcanza la resistencia máxima antes de agrietarse, en el post-agrietamiento la curva tiende a descender considerablemente donde el elemento fluye y las fibras trabajan junto con la matriz de concreto hasta alcanzar el desplazamiento permitido de acuerdo con la norma. Aproximadamente a partir de los 25 mm de desplazamiento, el elemento continúa desplazándose aun cuando la carga aplicada es mínima, esto se debe a la presencia de más de una fisura en la cara inferior del espécimen.

El espécimen P-CI-1 presentó la mayor carga máxima resistida, pero en valores de absorción de energía fue la más baja, así como en la cantidad de fibra encontrada en el espécimen. Esta

relación puede atribuirse que, a menor cantidad de fibra, puede presentar valores menores en términos de absorción de energía.

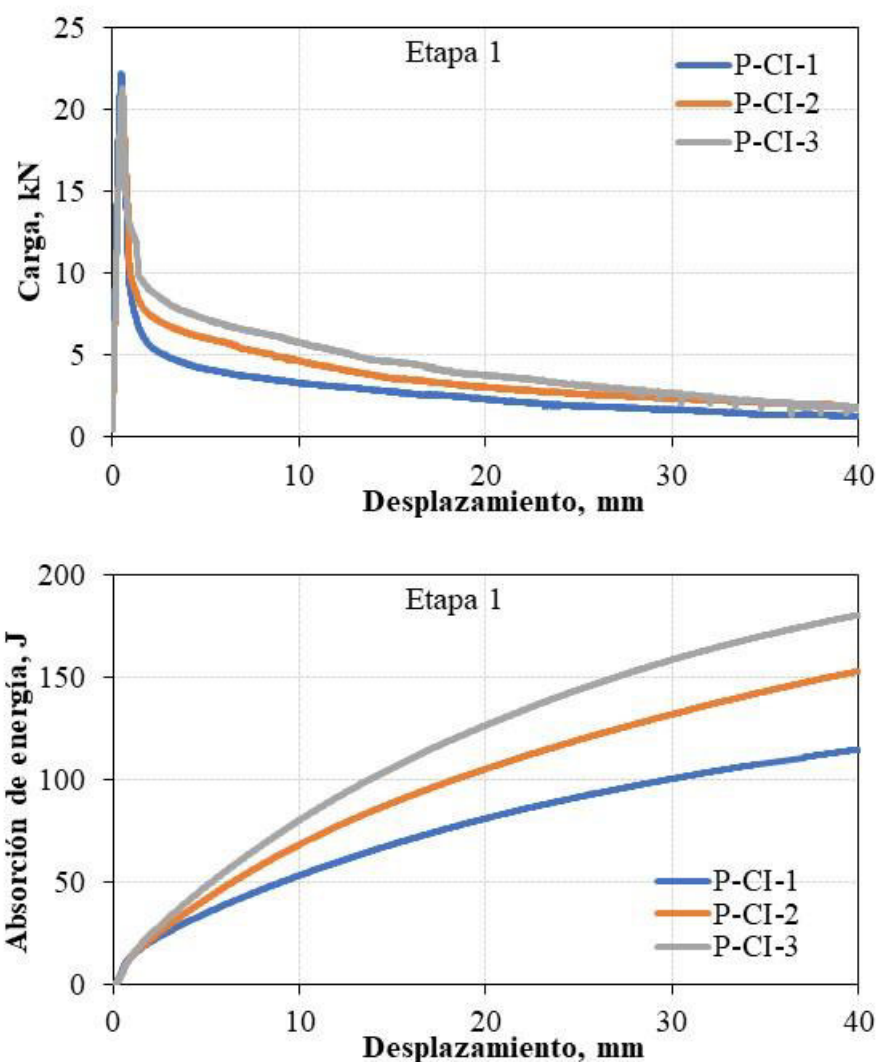


Figura 4.19: Curva carga-desplazamiento y absorción de energía vs desplazamiento de paneles circulares. Etapa 1

Los valores de absorción de energía calculados indican que la variación entre los resultados de las tres muestras es bastante alto, del orden de 22% como se indica en la tabla 4.19, al observar que existe menor diferencia en valores de absorción de energía entre el espécimen P-CI-2 y P-CI-3 que entre el espécimen P-CI-1 y P-CI-2, si sólo se considerara el primer planteamiento basándose en el contenido de fibra encontrado, el coeficiente de variación rondaría el 12%.

Tabla 4.19: Resultado de ensayo ASTM C 1550, etapa 1.

Muestra	PANEL CIRCULAR ASTM C1550			μ	C_v
	Absorción de energía (J)				
	P-CI-1	P-CI-2	P-CI-3		
T $\delta_{5\text{ mm}}$	34.9	41.9	48.1	41.6	15.9%
T $\delta_{10\text{ mm}}$	53.3	68.5	80.4	67.4	20.1%
T $\delta_{20\text{ mm}}$	81.2	105.5	126.8	104.5	21.8%
T $\delta_{40\text{ mm}}$	115.0	153.2	180.7	149.6	22.1%
Contenido de Fibras	32.86%	36.36%	39.12%	-	-

Los resultados de la segunda etapa de muestreos de paneles circulares se presentan en la figura 4.20, se observa que después de presentarse la carga máxima resistida por los especímenes, ésta comienza a descender hasta alcanzar el desplazamiento de los 40 mm, éstas muestras alcanzaron valores menores de carga máxima respecto a las muestras de la etapa 1. Al término de la prueba las muestras de la etapa 2 soportaron cargas mayores que las muestras de la etapa 1, esto ocasiona que se presente mayor área bajo las curvas y por consiguiente los valores de absorción de energía son mayores respecto a los valores de la etapa 1. Las curvas carga vs desplazamiento de la etapa 2 presentaron un comportamiento análogo, situación distinta a las muestras de la etapa 1.

Se puede observar en la siguiente figura que todos los especímenes comienzan a soportar aproximadamente los 5 kN después de llegar a los 30 mm de desplazamiento, mientras que las muestras de la etapa uno soportan la misma carga en los 10 mm de desplazamiento, esta diferencia da lugar para que las muestras de la segunda etapa presenten mayor absorción de energía tal como se indica en la segunda gráfica de la figura 4.20, los valores a diferentes desplazamientos se resumen en la tabla 4.20 y se encontró que en términos de absorción de energía a los 40 mm de desplazamiento las muestras de la etapa 2 presentan valores al doble respecto a las muestras de la etapa 1, esta diferencia también se presenta en relación a la cantidad de fibra encontrada en cada espécimen cercano al 80 % en las tres probetas, un valor estrechamente relacionado con la tenacidad de los elementos.

En la tabla 4.20 se indica el promedio (μ), desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (C_v) de la energía absorbida que presenta cada muestra a diferentes desplazamientos.

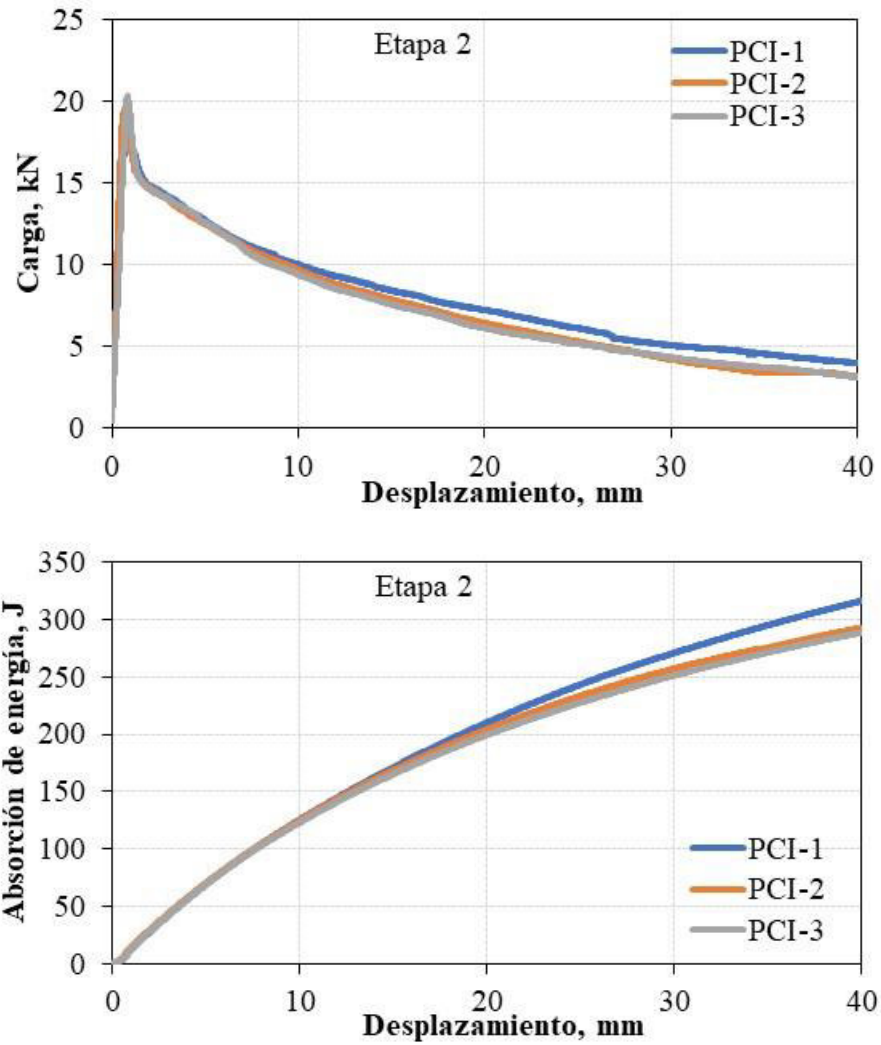


Figura 4.20: Curva carga-desplazamiento y absorción de energía vs desplazamiento de paneles circulares. Etapa 2

Tabla 4.20: Resultado de ensayo ASTM C 1550, etapa 2.

Muestra	PANEL CIRCULAR 721 C1550			μ	C_v
	Absorción de energía (J)				
	PCI-1	PCI-2	PCI-3		
T $\delta_{5\text{ mm}}$	69.2	69.9	69.1	69.4	0.7%
T $\delta_{10\text{ mm}}$	125.1	124.8	123.1	124.3	0.9%
T $\delta_{20\text{ mm}}$	210.0	204.0	199.5	204.5	2.6%
T $\delta_{40\text{ mm}}$	316.3	292.9	288.5	299.2	5.0%
Contenido de Fibras	77.96%	79.14%	79.27%	-	-

En la tercera etapa de muestreos se ensayaron los especímenes PCR-1, PCR-2 y PCR-3, en la figura 4.21 se muestra en primer lugar, la gráfica carga vs desplazamiento donde las curvas

presentan poco desplazamiento en el tramo inicial, debido a que la carga asciende gradualmente de forma lineal hasta alcanzar la carga máxima resistida por el concreto, posteriormente el concreto presenta un proceso de agrietamiento, la carga resistida por el concreto disminuye pero al mismo tiempo, se registra una recuperación de la carga debido a la intervención de las fibras, en este momento, el desplazamiento se incrementa a razón de una carga cada vez menor y paulatinamente las fibras absorben toda la carga hasta alcanzar una deformación de 40 mm como lo indica la norma ASTM C 1550. Se observa que el panel PCR-3 presentó mayor carga máxima y además su comportamiento post-agrietamiento fue mayor, por ende, en la gráfica absorción de energía vs desplazamiento, su comportamiento sobresale respecto a los otros dos paneles.

En la tabla 4.21 se presentan los valores de absorción de energía a diferentes desplazamientos para las probetas de la etapa 3, así como promedio, coeficiente de variación y contenido de fibra. El panel PCR-1 y PCR-2 tienen un comportamiento análogo, con poca diferencia en contenido de fibra y absorción de energía, mientras tanto, el panel PCR-3 presenta la mayor absorción de energía y se encontró más contenido de fibra respecto a los otros dos, además, se observa que en las ranuras originadas por la falla típica en esta probeta, hay más concentración de fibras entrelazadas respecto a los otros paneles (ver figura 4.22), la zona de falla se mantiene más unida. Estos valores elevados presentes en el panel PCR-3 origina que el coeficiente de variación sea cercano al 20% a 40 mm de desplazamiento.

Las tres probetas presentaron el modo típico de falla definido por tres grietas, por tanto, ninguno se descarta, sin embargo, si no se considera el panel PCR-3 para el análisis del coeficiente de variación, éste sería menor al 6%.

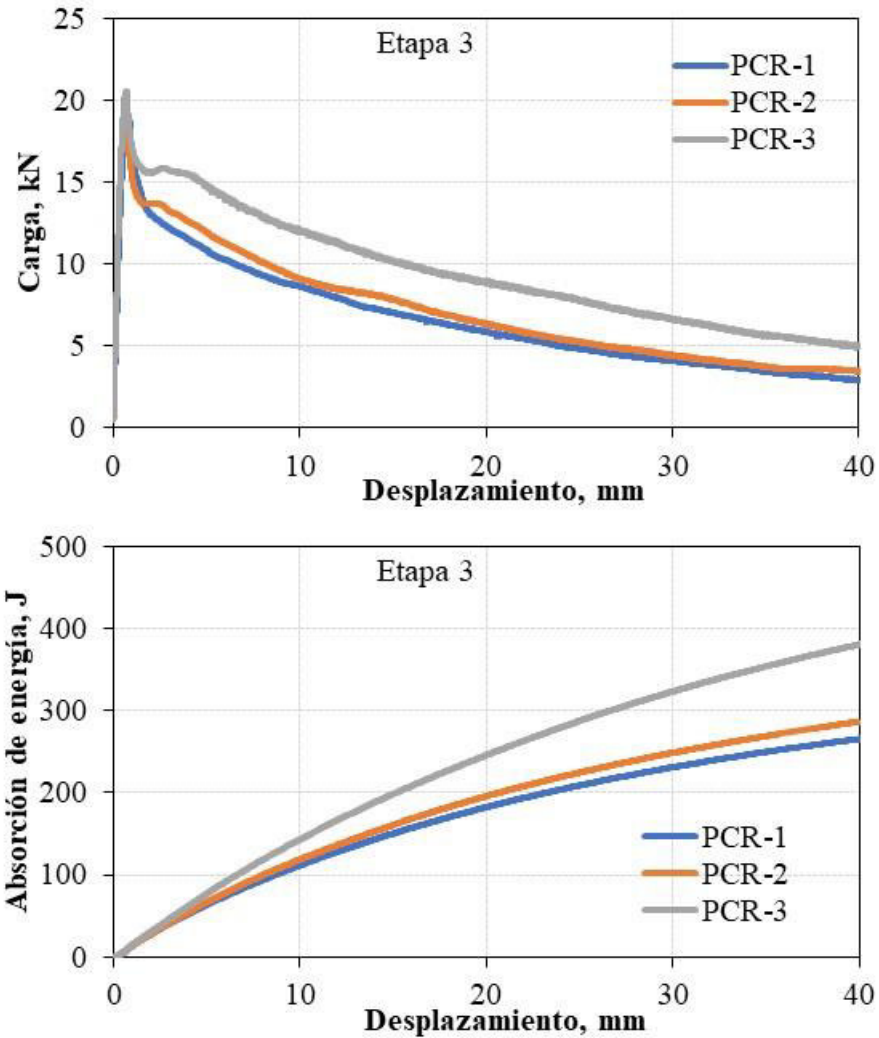


Figura 4.21: Curva carga-desplazamiento y absorción de energía vs desplazamiento de paneles circulares. Etapa 3

Tabla 4.21: Resultado de ensayo ASTM C 1550, etapa 3.

Muestra	PANEL CIRCULAR 721 C1550			μ	C _v
	Absorción de energía (J)				
	PCR-1	PCR-2	PCR-3		
T $\delta_{5\text{ mm}}$	63.8	66.7	77.2	69.2	10.2%
T $\delta_{10\text{ mm}}$	111.6	118.8	143.3	124.5	13.3%
T $\delta_{20\text{ mm}}$	182.4	196.0	246.1	208.2	16.1%
T $\delta_{40\text{ mm}}$	265.6	286.9	380.8	311.1	19.7%
Contenido de Fibras	77.64%	78.27%	80.67%	-	-

El modo de aplicación del concreto lanzado reforzado con fibras para las tres etapas fue con robot, los especímenes de la primera etapa registraron mayor carga máxima resistida, los especímenes de la tercera etapa presentaron los valores más altos en relación con la absorción

de energía y contenido de fibra muy cercanos a los valores de la etapa 2, mientras que los especímenes de la etapa 2 presentaron el menor coeficiente de variación (5%) relacionado con la absorción de energía a un desplazamiento de 40 mm respecto a las demás etapas.



Figura 4.22: Entrelazado de fibras en zona de falla de paneles circulares. Etapa 3

4.4.3 Ensayo de doble punzonamiento. UNE 83515

Con relación a los ensayos de doble punzonamiento, estos también se realizaron en tres etapas, a continuación, se describen los resultados.

En la figura 4.23 se presentan dos gráficas, la primera indica el comportamiento de las curvas carga vs desplazamiento circunferencial de los cuatro cilindros (BCN-1, BCN-2, BCN-3 y BCN-4) obtenidos a partir de la artesa 1, correspondientes a la primera etapa de muestreos. Estos cilindros mostraron comportamientos heterogéneos, obteniendo desplazamientos muy pequeños antes de presentar una carga máxima promedio de 72.36 kN, posteriormente se presentan las primeras grietas o fisuras, apreciándose más el desplazamiento circunferencial donde conjuntamente la carga descende hasta un punto en que se comporta más uniforme y se registra mayor abertura perimetral del espécimen en ensayo. En esta fase las fibras trabajan para soportar la carga post-agrietamiento, y dar lugar a la energía absorbida por la probeta, información que se resume en la segunda gráfica de la figura 4.23, alcanzando un promedio

de 173 J. Mostrando menor capacidad de absorción de energía, el cilindro 1, mientras que el cilindro 3 y 4 tienen un comportamiento similar y mayor energía respecto a los demás.

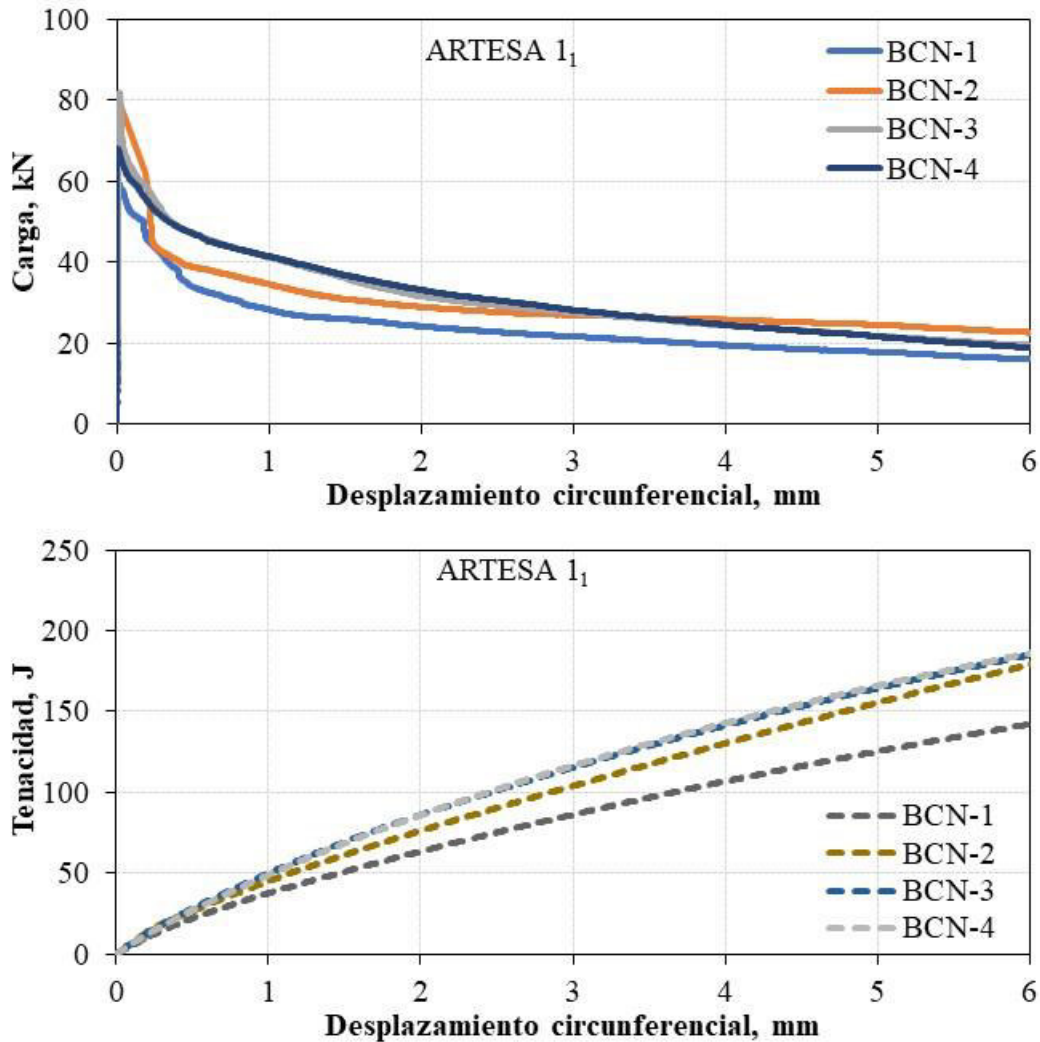


Figura 4.23: Curva carga-desplazamiento y tenacidad-desplazamiento, de cilindros obtenidos a partir de la artesa 1. Etapa 1

En la tabla 4.22 se resumen los resultados en términos de tenacidad, referida a la capacidad de absorción de energía que presenta una muestra durante un desplazamiento circunferencial definido. Los coeficientes de variación han alcanzado valores de 12-13 %.

Tabla 4.22: Absorción de energía a diferentes desplazamientos de cilindros obtenidos de artesa 1. Etapa 1.

ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO UNE 83515						
Muestra	Absorción de energía (J)				μ	C_v
	BCN-1	BCN-2	BCN-3	BCN-4		
T $\delta_{2.0\text{ mm}}$	63.6	76.3	86.2	86.0	78.0	13.7%
T $\delta_{2.5\text{ mm}}$	75.3	90.5	101.3	102.0	92.2	13.5%
T $\delta_{4.0\text{ mm}}$	106.9	130.4	141.4	142.9	130.4	12.8%
T $\delta_{6.0\text{ mm}}$	142.2	179.0	185.0	186.1	173.1	12.0%
Contenido de Fibras	61.58%	63.85%	55.77%	64.99%	-	-

Los resultados de los cilindros extraídos de la artesa 2, del primer muestreo, se presentan en la figura 4.24. En este lote, se observa más uniformidad en el comportamiento de las curvas carga-tenacidad vs desplazamiento circunferencial, encontrándose un promedio de carga máxima de 76.21 kN, mayor que el promedio de los cilindros de la artesa 1. En relación con los valores de tenacidad, los cilindros de la artesa 2 son menores que los cilindros de la artesa 1.

En la tabla 4.23 se indica el promedio (μ), desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (C_v) de la energía absorbida que presentan cuatro cilindros obtenidos de la artesa 2, a diferentes desplazamientos. El coeficiente de variación hasta alcanzar los 6 mm de desplazamiento circunferencial se encuentra entre el 4%, un valor bastante aceptable en términos de variación de los datos obtenidos.

Los ocho cilindros evaluados en la primera etapa de ensayos presentan valores similares en cuanto al contenido de fibra, las artesas de donde se obtuvieron los cilindros fueron muestreados con equipo manual.

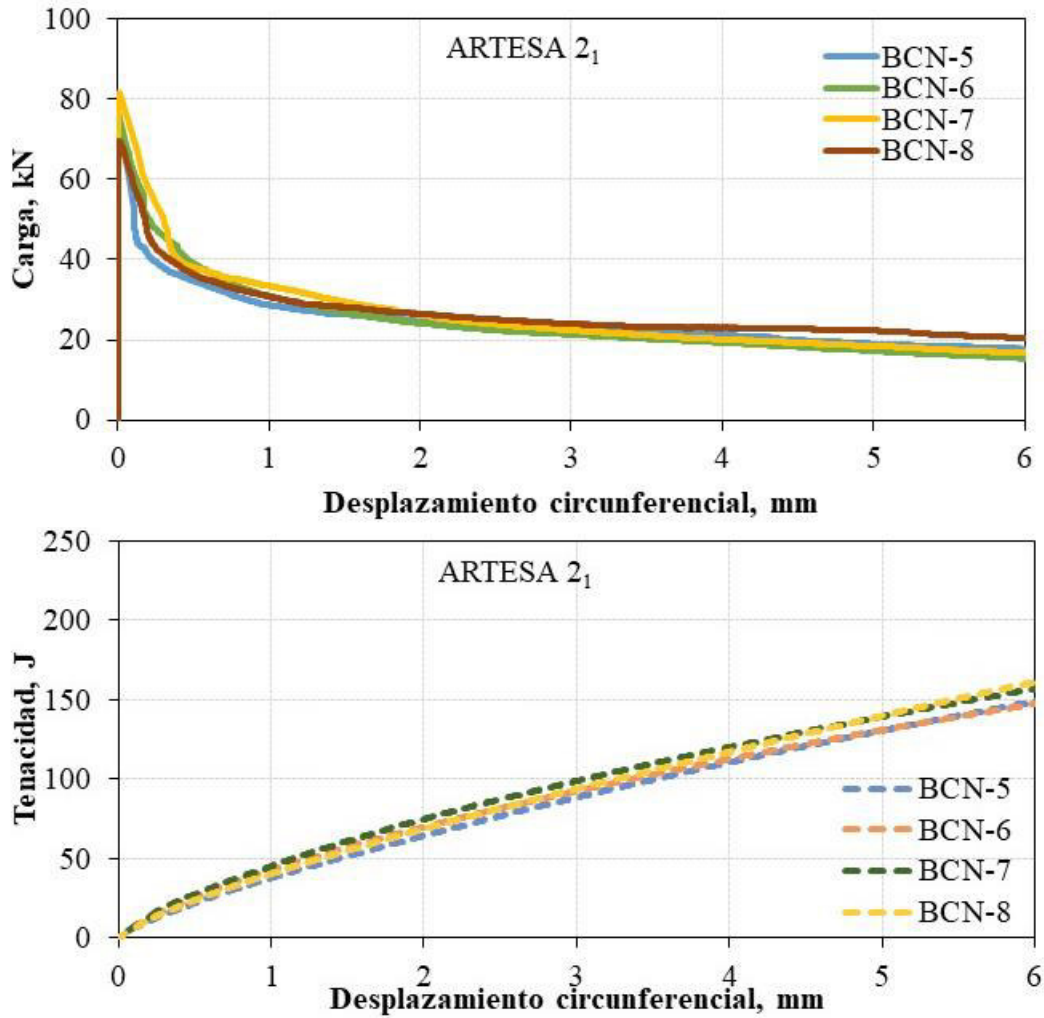


Figura 4.24: Curva carga-desplazamiento y tenacidad-desplazamiento, de cilindros obtenidos a partir de la artesa 2. Etapa 1

Tabla 4.23: Absorción de energía a diferentes desplazamientos de cilindros obtenidos en artesa 2. Etapa 1

ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO UNE 83515						
Muestra	Absorción de energía (J)				μ	C_v
	BCN-5	BCN-6	BCN-7	BCN-8		
T $\delta_{2.0\text{ mm}}$	64.5	70.0	74.9	68.8	69.6	6.2%
T $\delta_{2.5\text{ mm}}$	76.8	81.6	87.4	81.6	81.8	5.3%
T $\delta_{4.0\text{ mm}}$	110.5	112.8	120.1	117.2	115.2	3.8%
T $\delta_{6.0\text{ mm}}$	148.9	147.3	156.9	161.2	153.6	4.3%
Contenido de Fibras	61.90%	56.67%	64.62%	74.16%	-	-

Seis meses después se realizó otra serie de muestreos de dos artesas definida como etapa 2, de concreto lanzado con apoyo de un robot, los resultados se describen a continuación:

En la figura 4.25 se aprecian las gráficas curva-tenacidad vs desplazamiento circunferencial, de la artesa 1, segunda etapa. Particularmente el cilindro DP-4 presentó la menor carga

máxima pero además la mayor absorción de energía respecto a las demás muestras. Los cilindros DP-1 y DP-2 presentaron la mayor carga máxima resistida, además, una caída lineal post-agrietamiento dentro del primer milímetro de desplazamiento, este comportamiento es atípico debido a que el descenso debe ser gradual, esto se atribuye al estado físico de las probetas debido a las oquedades y una superficie rugosa, dando origen que durante el ensayo ambas probetas presentaran una penetración asimétrica del punzón superior ocasionando que la rótula se ladeara para hacer contacto paralelo con punzón (ver figura 4.26). La penetración del punzón superior y la poca presencia de fibras ocasionó que la falla quedara totalmente separada sin presencia de fibras entrelazadas, esta situación también originó una abertura súbita de la cadena circunferencial. Después del primer milímetro de desplazamiento circunferencial los cilindros DP-1, DP-2 y DP-3 presentaron un comportamiento lineal donde prevalece mayor abertura circunferencial a razón de una menor carga. Por el comportamiento distante del cilindro DP-4 respecto a las demás muestras, los coeficientes de variación se presentan hasta el 20% a un desplazamiento circunferencial de 6 mm tal como se expresa en la tabla 4.24, mientras que en los primeros 4 mm la variación alcanza hasta el 13%, un valor menor.

Es el cilindro DP-4 donde se encontró mayor presencia de fibras, sin embargo, en los cuatro cilindros se encontró menos del 50% de fibras y los valores de absorción de energía son menores que los encontrados en cilindros de la etapa 1. Cabe destacar que el desplazamiento circunferencial es variable en cada cilindro situación que está estrechamente relacionada con la cantidad de fibra presente en cada muestra.

Durante la extracción de núcleos se observó la presencia de oquedades a diferentes alturas del contorno de las muestras, tal como se muestra en la figura 4.27, esto se puede atribuir al procedimiento de lanzado del concreto ocasionado por retardar o interrumpir el lanzado, dando origen a la formación de capas provocando excentricidades.

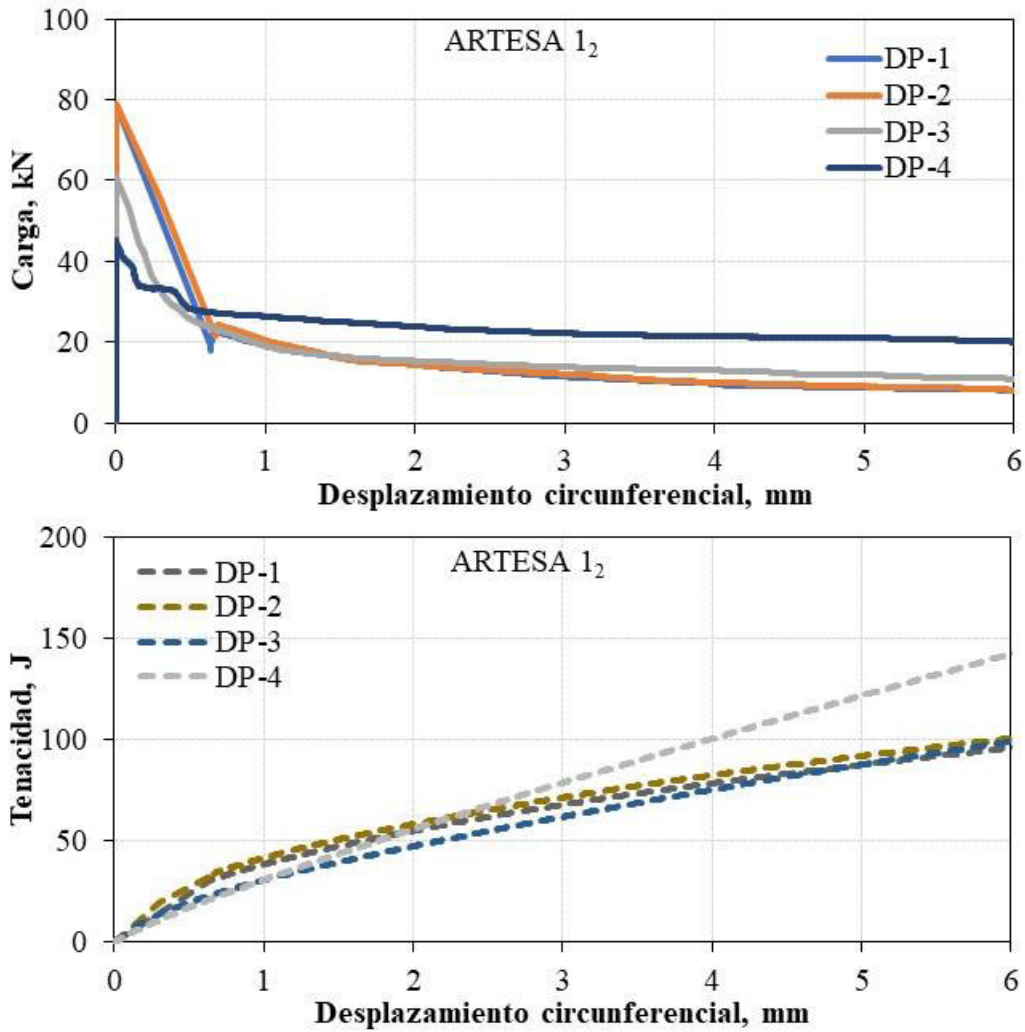


Figura 4.25: Curva carga-desplazamiento y tenacidad-desplazamiento, de cilindros obtenidos a partir de la artesa 1. Etapa 2

Tabla 4.24: Absorción de energía a diferentes desplazamientos de cilindros obtenidos en artesa 1. Etapa 2

ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO UNE 83515						
Muestra	Absorción de energía (J)				μ	Cv
	DP-1	DP-2	DP-3	DP-4		
T $\delta_{2.0\text{ mm}}$	55.1	58.3	47.4	55.9	54.2	8.7%
T $\delta_{2.5\text{ mm}}$	61.9	65.2	54.9	67.5	65.4	8.8%
T $\delta_{4.0\text{ mm}}$	78.5	82.5	75.3	100.6	84.2	13.4%
T $\delta_{6.0\text{ mm}}$	96.0	100.7	99.1	142.4	109.6	20.0%
Contenido de Fibras	30.57%	24.11%	39.47%	45.20%	-	-



Figura 4.26: Comportamiento de cilindros DP-1 y DP-2 durante ensayo (rótula desalineada).



Figura 4.27: Presencia de oquedades en cilindros de artesa 1. Etapa 2

Los resultados de los cilindros extraídos de la artesa 2 perteneciente a la etapa 2 se muestran en la figura 4.28, en la gráfica carga vs desplazamiento circunferencial se aprecia que el cilindro DP-7 y DP-8 alcanzaron una carga máxima con escasa diferencia entre ambas, y posterior a la falla comenzaron a presentar mayor desplazamiento circunferencial, y cerca de los 2 mm de abertura de la cadena conservaron un comportamiento uniforme hasta los 6 mm, por esta razón también los valores de tenacidad son próximos. El cilindro DP-6 soportó

menor carga máxima y después de fallar desarrolló mayor abertura de cadena resistiendo menor carga, por consiguiente, los valores de tenacidad son menores comparados con los otros dos cilindros. Particularmente las curvas carga-tenacidad vs desplazamiento circunferencial para el cilindro DP-5 no se presentan debido a que éste se comportó de manera extraña durante el ensayo, la cadena circunferencial permaneció en la misma posición, es decir, no registró extensión alguna y su carga máxima fue de 23.98 kN. Por esta razón el cilindro tuvo que descartarse para el análisis de los resultados mostrados en la tabla 4.25, donde se indican los valores de absorción de energía expresada en Joules a diferentes desplazamientos con coeficientes de variación altos debido al comportamiento heterogéneo entre los cilindros, principalmente de DP-6 respecto a los otros dos, si también se despreciara este cilindro la variación disminuiría por la mitad, sin embargo, al menos se deben considerar tres probetas por cada artesa.

Las probetas extraídas de la artesa 2, también presentaron irregularidades en distintos puntos a lo largo de los 15 cm de altura, como se muestra en la figura 4.29. Esta situación puede estar relacionada con el comportamiento de las probetas durante el ensayo y los resultados obtenidos.

El cilindro DP-5 presentó una falla atípica debido a que adquirió la forma que tienen las irregularidades, ocasionando un desplazamiento de la sección superior sin llegar a la altura donde se ubica la cadena circunferencial, por tal motivo no se registró ninguna extensión. El modo de falla de esta probeta se muestra en la figura 4.30. El cilindro DP-5 presentó características de porosidad y múltiples oquedades que pueden estar relacionadas con la calidad del lanzado donde interviene la habilidad del lanzador, la posición de la boquilla, la distancia entre la boquilla y el área a lanzar (cuando son muy largas es contraproducente), la presión de aire requerida, una mala compactación por la formación de capas o por rebote atrapado en las probetas.

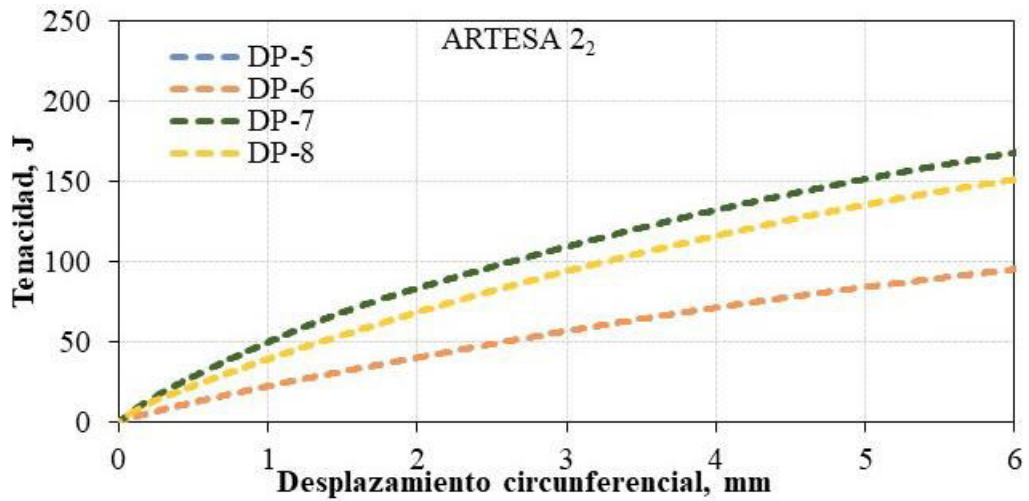
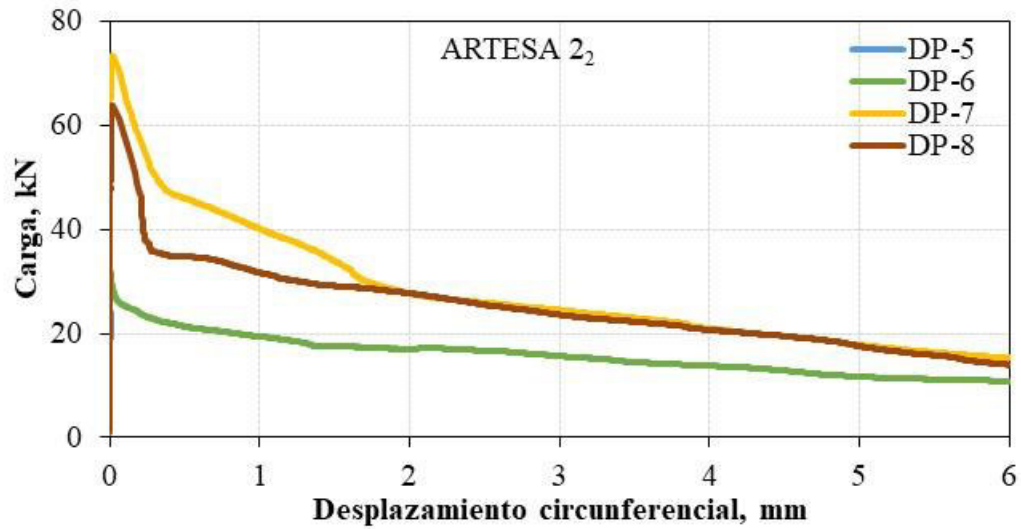


Figura 4.28: Curva carga-desplazamiento y tenacidad-desplazamiento, de cilindros obtenidos a partir de la artesa 2. Etapa 2

Tabla 4.25: Absorción de energía a diferentes desplazamientos de cilindros obtenidos en artesa 2. Etapa 2

ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO UNE 83515						
Muestra	Absorción de energía (J)				μ	Cv
	DP-5	DP-6	DP-7	DP-8		
T $\delta_{2.0}$ mm	0.0	39.9	83.2	68.2	63.8	34.5%
T $\delta_{2.5}$ mm	0.0	48.4	96.5	81.6	75.5	32.7%
T $\delta_{4.0}$ mm	0.0	71.1	132.0	116.0	106.4	29.7%
T $\delta_{6.0}$ mm	0.0	95.1	167.8	151.1	138.0	27.6%
Contenido de Fibras	47.74%	46.81%	47.08%	54.05%	-	-



Figura 4.29: Irregularidades presentes en probetas extraídas a partir de la artesa 2. Etapa 2



Figura 4.30: Modo de falla de cilindro DP-5, artesa 2. Etapa 2

Para la etapa 3 se muestrearon en obra dos artesas de donde se obtuvieron los especímenes SPB-1 hasta SPB-4 de la artesa 1 y SPB-5 hasta SPB-8 de la artesa 2.

Para apreciar el comportamiento de los 8 especímenes durante el ensayo, en la figura 4.31 se presentan los cilindros extraídos a partir de la artesa 1, la primera gráfica muestra la curva carga-desplazamiento circunferencial de los cilindros SPB-1 hasta SPB-4. Al inicio, las

curvas presentan un desplazamiento casi nulo hasta alcanzar la carga máxima, posteriormente se registran las primeras fisuras post-agrietamiento, se presenta una disminución de carga gradual a desplazamientos más amplios donde las fibras comienzan su trabajo, observándose una recuperación de carga y comportamiento residual. El cilindro SPB-1 presentó la mayor carga resistida, siguiendo el SPB-4, SPB-3 y finalmente el SPB-2. Mientras tanto, en la gráfica tenacidad vs desplazamiento que representa el área bajo la curva, es el cilindro SPB-3 quien presenta mayor absorción de energía seguido del espécimen SPB-4, SPB-2 y SPB-1.

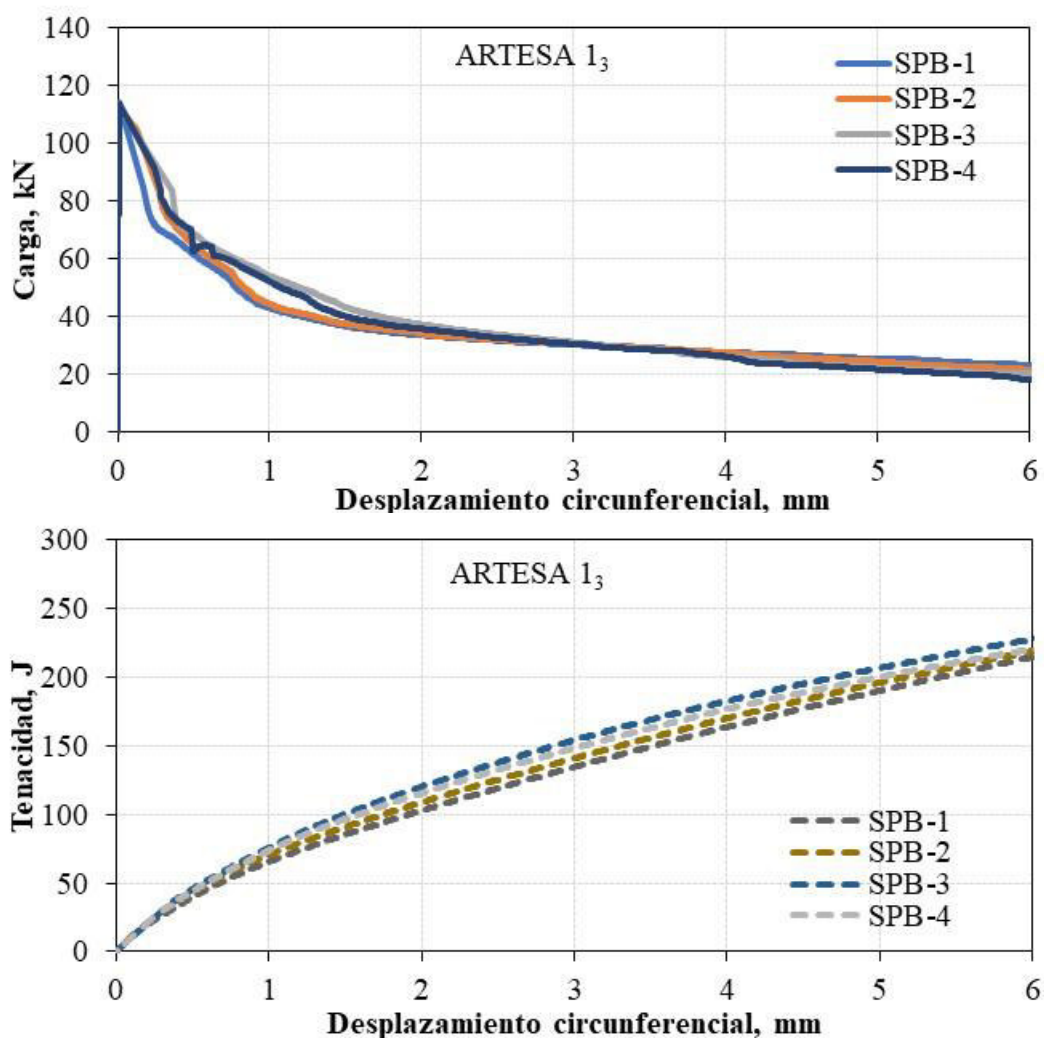


Figura 4.31: Curva carga-desplazamiento y tenacidad-desplazamiento, de cilindros obtenidos a partir de la artesa 1. Etapa 3

El comportamiento de los cuatro cilindros es relativamente similar en términos absorción de energía a lo largo del desplazamiento circunferencial, esto se traduce a una variabilidad por

debajo del 3% hasta alcanzar un desplazamiento de 6 mm. En la tabla 4.26 se resumen los valores de absorción de energía presentados en cada cilindro a lo largo de diferentes desplazamientos, el valor medio y coeficiente de variación, observando que éste último va de 6.8% a un desplazamiento de 2 mm hasta llegar al 2.5% a un desplazamiento de 6 mm, un valor bastante aceptable. También, en esta tabla se presentan los porcentajes de fibra encontrados en los cilindros, recordando que los 30 kg/m³ que se suministran en obra representan el 100%. Se encontró mayor presencia de fibras en el cilindro SPB-1, sin embargo, esta probeta presentó menor absorción de energía, por consiguiente, en este caso, es posible que la distribución de la fibra a lo largo de la altura no haya sido uniforme, aunque no se hizo un análisis para ello. Una forma de evaluar la distribución de la fibra en la probeta es hacer un conteo de fibras tomando diferentes “rebanadas” a lo largo de la altura del cilindro, para verificar la densidad de fibra a diferente altura del cilindro. El cilindro SPB-1 tuvo menor recuperación después de resistir la mayor carga respecto a los otros tres, este comportamiento se puede presentar debido a que las fisuras ocasionadas al resistir la carga máxima son bastante grandes respecto a las presentes en los otros tres cilindros, también, el entrelazado de las fibras justo en el área de la fisura pudo ser mínimo.

Tabla 4.26: Absorción de energía a diferentes desplazamientos de cilindros obtenidos en artesa 1. Etapa 3

ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO UNE 83515						
Muestra	Absorción de energía (J)				μ	C_v
	SPB-1	SPB-2	SPB-3	SPB-4		
T $\delta_{2.0\text{ mm}}$	102.9	108.9	120.2	115.5	111.9	6.8%
T $\delta_{2.5\text{ mm}}$	119.2	125.5	137.9	132.5	128.8	6.3%
T $\delta_{4.0\text{ mm}}$	163.8	170.2	182.8	177.2	173.5	4.8%
T $\delta_{6.0\text{ mm}}$	214.7	219.1	227.9	220.5	220.6	2.5%
Contenido de Fibras	85.84%	72.13%	78.78%	82.32%	-	-

Respecto a la segunda artesa de la serie de muestreos número 3, en la figura 4.32 se presentan dos gráficas. La primera muestra las curvas carga vs desplazamiento circunferencial de los cilindros SPB-5 hasta SPB-8, siendo la muestra llamada SPB-7 la que presentó la mayor carga resistida. Las curvas muestran un comportamiento heterogéneo desde la aplicación de carga hasta los 2 mm de desplazamiento, posteriormente, los cuatro cilindros presentan un comportamiento similar y se mantienen a una carga casi constante hasta alcanzar los 6 mm de desplazamiento.

Particularmente el cilindro SPB-5 presenta un comportamiento atípico debido a una caída lineal post-agrietamiento y no gradual como es común durante el ensayo de estos especímenes. Esto se puede atribuir a que, durante el ensayo, después de presentar la mayor carga, el agrietamiento que se presenta en el cilindro ocasionó una apertura repentina de la cadena circunferencial, presentando una fatiga que, por un periodo inicial, la resistencia de carga fue muy baja, después se presenta una recuperación donde las fibras participan hasta alcanzar los 6 mm de desplazamiento. En la segunda gráfica tenacidad vs desplazamiento que representa el área bajo la curva de la gráfica que le antecede, se observa un comportamiento variable. El cilindro SPB-8 presenta mayor absorción de energía.

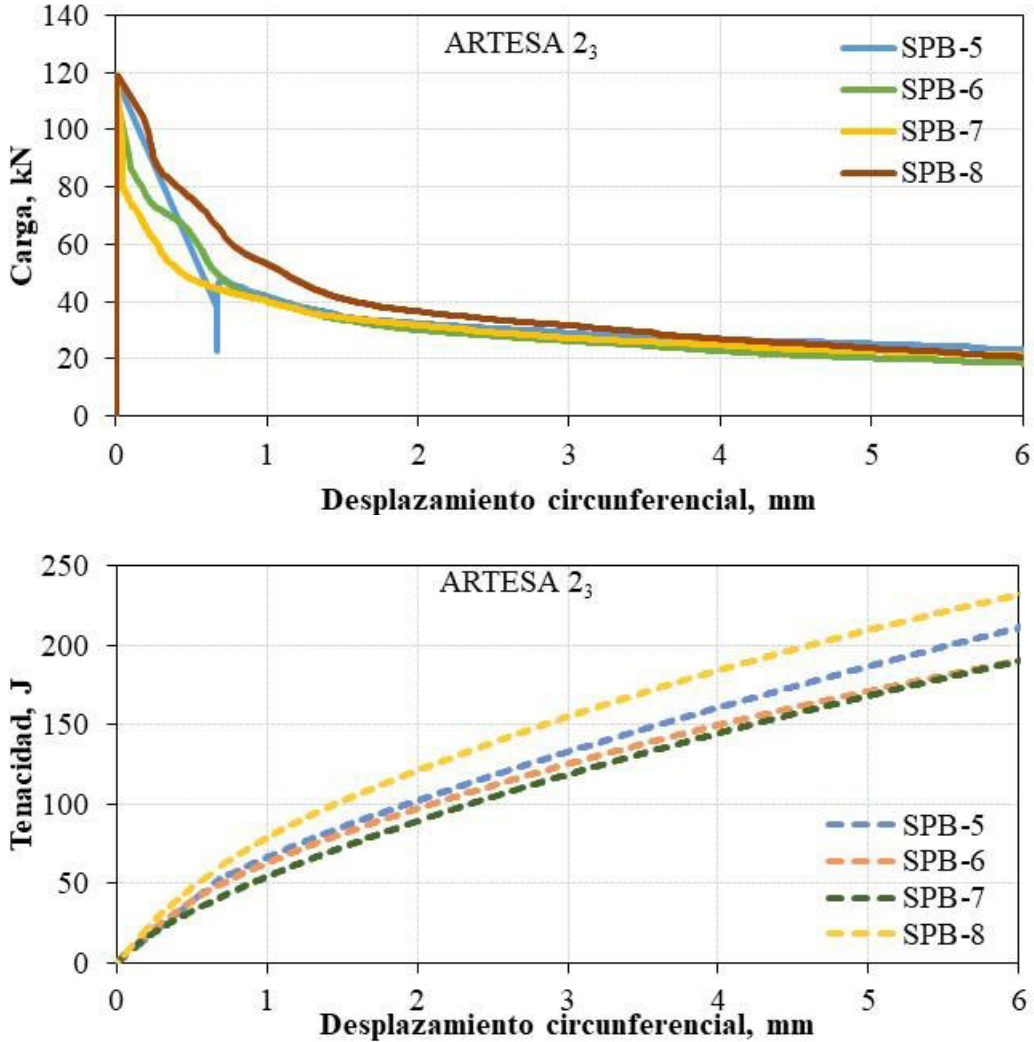


Figura 4.32: Curva carga-desplazamiento y tenacidad-desplazamiento, de cilindros obtenidos a partir de la artesa 2. Etapa 3

En la tabla 4.27 se presentan los valores de absorción de energía de los cuatro cilindros extraídos a partir de la artesa 2 a diferente desplazamiento, el promedio y coeficiente de variación de estos valores. Además, se muestran los porcentajes de contenido de fibra encontrados en cada cilindro post-ensayo. Particularmente el cilindro SPB-7 el cual presentó la mayor carga resistida, es donde se encontró mayor presencia de fibras, sin embargo, el valor de absorción de energía fue el más bajo comparado con los otros tres cilindros. Mientras tanto, el cilindro SPB-8 obtuvo la segunda carga máxima más alta respecto a los otros tres, el cual muestra la mayor absorción de energía, pero en contenido de fibras presenta el menor porcentaje. Esto puede atribuirse a la falta de entrelazado de fibras en el núcleo de concreto y poca adherencia entre los materiales que conforman la mezcla de concreto y las fibras.

Tabla 4.27: Absorción de energía a diferentes desplazamientos de cilindros obtenidos en artesa 2. Etapa 3

ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO UNE 83515						
Muestra	Absorción de energía (J)				μ	C_v
	SPB-5	SPB-6	SPB-7	SPB-8		
T $\delta_{2.0}$ mm	102.5	97.3	89.4	121.3	102.6	13.2%
T $\delta_{2.5}$ mm	118.1	111.8	104.7	138.9	118.4	12.4%
T $\delta_{4.0}$ mm	160.9	149.8	144.8	184.4	160.0	11.0%
T $\delta_{6.0}$ mm	211.1	190.6	190.2	231.9	205.9	9.6%
Contenido de Fibras	86.63%	86.56%	87.62%	84.87%	-	-

En la falla típica de todas las probetas ensayadas en la primera, segunda y tercera etapa se presentan tres fisuras radiales principales a lo largo de la altura de los cilindros, algunas más abiertas que otras, y se puede encontrar una variación de grietas de ± 1 llamadas grietas secundarias con longitud menor.

En la tabla 4.28 se presentan los valores de absorción de energía, coeficiente de variación y contenido real de fibras para cada probeta evaluada en cada una de las tres etapas de ensayos que se propusieron para esta tesis. Encontrándose, generalmente mejores resultados, en cuanto al contenido de fibra, en la tercera etapa, esto puede atribuirse a que, durante la participación en la obra utilizada como caso de estudio, se contribuyó en la mejora de los procesos de suministro y colocación del Concreto Lanzado Reforzado con Fibras, así como en la difusión de la importancia que tiene la capacitación del personal responsable de estos procesos, para lograr una mejora continua.

Tabla 4.28: Resumen de resultados de las tres etapas de ensayo.

ETAPA	Tipo	ID	Probeta		Contenido real		
			Absorción de Energía (J)	Cv (%)	(%)	(kg/m ³)	μ (kg/m ³)
PRIMERA ETAPA	PANEL CUADRADO	PN-C1	624.29		67.15	20.1443	
		PN-C2	671.00	12.00	71.78	21.5340	20.82
		PN-C3	528.00		69.30	20.7907	
	PANEL CIRCULAR	P-CI-1	115.00		32.86	9.8569	
		P-CI-2	153.20	22.10	36.36	10.9094	10.83
		P-CI-3	180.70		39.12	11.7365	
	CILINDROS ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO	BCN-1	142.20		61.58	18.4730	
		BCN-2	179.00		63.85	19.1544	
		BCN-3	185.00		55.77	16.7310	
		BCN-4	186.10	11.00	64.99	19.4961	18.88
		BCN-5	148.90		61.90	18.5696	
		BCN-6	147.30		56.67	17.0011	
		BCN-7	156.90		64.62	19.3860	
		BCN-8	161.20		74.16	22.2488	
	PANEL CUADRADO	P-CU-1	272.61		33.43	10.0297	
		P-CU-2	387.39	20.65	33.85	10.1538	10.32
P-CU-3		409.97		35.88	10.7630		
PANEL CIRCULAR	PCI-1	316.30		77.96	23.3874		
	PCI-2	292.90	5.00	79.14	23.7429	23.64	
	PCI-3	288.50		79.27	23.7823		
	CILINDROS ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO	DP-1	96.00		30.57	9.1711	
		DP-2	100.70		24.11	7.2329	
		DP-3	99.10		39.47	11.8401	
		DP-4	142.40	25.00	45.20	13.5595	12.56
		DP-5	0.00		47.74	14.3208	
DP-6	95.10		46.81	14.0443			
DP-7	167.80		47.08	14.1239			
DP-8	151.10		54.05	16.2155			

Continua

En las figuras 4.33 y 4.34 se muestran las absorciones de energía correspondientes a paneles cuadrados con paneles circulares y paneles cuadrados con doble punzonamiento, respectivamente. Además, en las figuras se muestra una función lineal, obtenida por mínimos cuadrados, que relaciona a los resultados obtenidos para cada caso. De acuerdo con los coeficientes de correlación mostrados en las figuras se puede ver que existe una mejor relación lineal para el caso de panel cuadrado con doble punzonamiento que para el caso de panel cuadrado con paneles circulares. Se hace notar que para obtener expresiones más confiables es necesario cuidar que el número de muestras sea significativo y se obtengan a partir de mezclas definidas. Sin embargo, estas expresiones preliminares pueden servir de base para comparaciones con estudios futuros.

Tabla 4.28: Continua

ETAPA	Tipo	Probeta			Contenido real		
		ID	Absorción de Energía (J)	Cv (%)	(%)	(kg/m ³)	μ
TERCER ETAPA	PANEL CUADRADO	PCO-1	820.83		89.16	26.75	
		PCO-2	894.29	5.27	87.45	26.24	26.24
		PCO-3	814.31		85.79	25.74	
	PANEL CIRCULAR	PCR-1	265.60		77.64	23.29	
		PCR-2	286.90	19.7	78.27	23.48	23.66
		PCR-3	380.80		80.67	24.20	
	CILINDROS ENSAYO DOBLE PUNZONAMIENTO	SPB-1	214.70		85.84	25.75	
		SPB-2	219.10		72.13	21.64	
		SPB-3	227.90		78.78	23.63	
		SPB-4	220.50	7.00	82.32	24.69	24.93
		SPB-5	211.10		86.63	25.99	
		SPB-6	190.60		86.56	25.97	
		SPB-7	190.20		87.62	26.29	
		SPB-8	231.90		84.87	25.46	

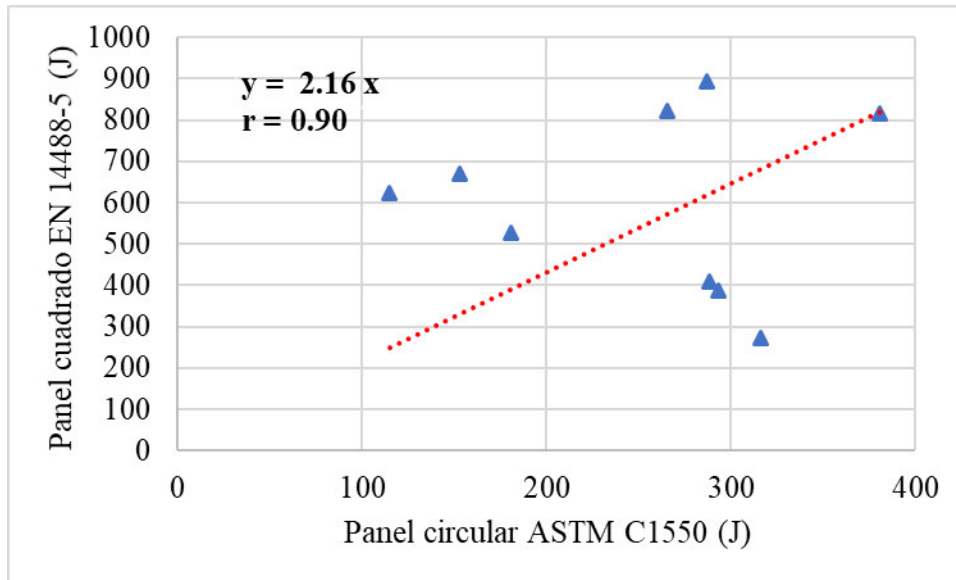


Figura 4.33: Relación de absorción de energía entre panel cuadrado y panel circular.

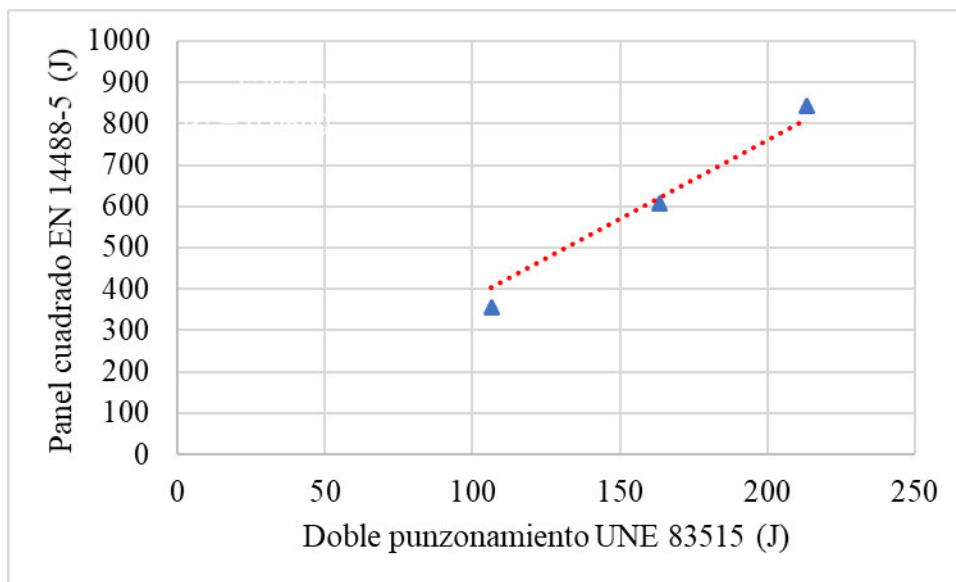


Figura 4.34: Relación de absorción de energía entre Panel cuadrado y doble punzonamiento.

CONCLUSIONES

En esta tesis se presentó la aplicación de tres métodos propuestos para evaluar el desempeño del concreto lanzado reforzado con fibras metálicas para revestimiento de túneles aplicados en un caso práctico con la finalidad de evaluar el comportamiento post-agrietamiento, recopilar aspectos técnicos y experiencias que sean de utilidad para todos los responsables del área de control de calidad de los CLRF y en adelante se presenten mejores prácticas para asegurar la calidad de los concretos usados en obras subterráneas.

El muestreo de paneles principalmente circulares resulta ser más agotador por tratarse de probetas con mayor peso y dimensiones, lo que dificulta su manipulación dentro del túnel. Sin embargo, por tratarse de especímenes con mayor área, aportan mayor superficie de falla, asemejándose más al comportamiento del revestimiento del túnel. La experiencia ha mostrado que presenta menor variabilidad en los resultados.

La aplicación de los tres métodos de ensaye propuestos en caso práctico para el control de calidad de los CLRF, son funcionales para evaluar su comportamiento post-agrietamiento, mientras tanto en la práctica, el muestreo de paneles cuadrados y circulares, al presentar mayor volumen, se requiere de al menos tres personas para manipular, enrasar y transportar a través del túnel hasta la superficie, cada uno tiene un peso superior a los 80 kg, además, el tiempo de muestreo es considerable por tratarse de tres especímenes respectivamente, y los protocolos de ensaye requieren instalaciones más amplias, equipos con mayor capacidad de carga, personal y la duración del ensayo es cercana a los 25-30 minutos; mientras tanto, el muestreo de artesas para extracción de cilindros, resulta más sencillo, se utilizan menos moldes con dimensiones y volumen menores, por la geometría del mismo permite su manipulación más rápida a través del túnel generando ahorros en tiempo, los protocolos de ensaye requieren menos personal por la manipulación de especímenes de dimensiones pequeñas, equipo de menor capacidad de carga y la duración del ensayo es de aproximadamente 15 minutos, . Sin embargo, estos tres métodos propuestos deben ser usados dependiendo de las especificaciones propias que requiera cada proyecto para evaluar el desempeño del CLRF.

Es importante disponer de un plan de calidad en cada proyecto donde se utilicen los CLRF, particularmente en obras subterráneas que deben asegurar la calidad de sus estructuras, con la finalidad de optimizar rendimientos, evaluar su desempeño, tener una mejora continua y la capacidad de poder intervenir a tiempo mediante acciones apropiadas si se detectan problemas.

Los daños que presentaron algunos paneles cuadrados y circulares, referentes al desmoronamiento en el perímetro inferior que hace contacto con el molde, después de ser desmoldados pasadas las 24 horas del muestreo y aún después de ser curados durante 28 días, se observaba en esta zona un aspecto húmedo, y suave, puede atribuirse a la concentración de aditivo acelerante, principalmente cuando los muestreos se hacían de forma manual, debido al deficiente control en el suministro de aditivo acelerante.

Las condiciones que presentaron los cilindros de la etapa 2 de muestreos, suelen ser anormales conforme al comportamiento que se presentan en diferentes estudios relacionados con la línea de investigación del concreto lanzado reforzado con fibras, alcanzando cargas máximas y valores de tenacidad relativamente bajas. Por tal motivo es importante prestar atención a los protocolos de muestreo para evitar la presencia de irregularidades en los moldes, el concreto lanzado, el lanzador, la manipulación de las muestras dentro del túnel, etc.

Respecto a la cantidad de fibra encontrada para cada espécimen ensayado y en estado fresco se concluye que puede existir una pérdida de material principalmente por condiciones de rebote o por el transporte de la mezcla hasta el frente de excavación, por consiguiente, es necesario un ajuste en la cantidad de fibra a suministrar que contemple las pérdidas para que el producto final mantenga la cantidad conforme al diseño, y además, promover la certificación y habilidad de los lanzadores para evitar la presencia de rebote, que en gran medida, tiene relación con el proceso de colocación.

El entrelazado de fibras que se conforme en el núcleo de los especímenes tendrá mucha influencia en el comportamiento de éstos durante el ensayo y principalmente en el sitio donde se presenten las grietas, debido a que esta condición evita separar las partes post-agrietamiento y por consiguiente presentar mayores valores de absorción de energía. El

cuidado en el mezclado, transporte, lanzado y rebote del concreto dará origen a una mezcla con fibras uniformemente repartidas.

Durante el desarrollo de la tesis se llevaron a cabo diversas acciones que fueron implementadas en obra a raíz de este estudio, con la finalidad de mejorar los protocolos de calidad de los concretos lanzados. Tales como, control en el suministro de fibras, conteo de fibras en concreto fresco, ensayos de revenimiento, temperatura y masa unitaria a nivel de túnel, promover la certificación de los lanzadores, procedimiento de lanzado y control en el suministro de aditivo acelerante. Estas iniciativas son aportaciones de la campaña experimental desarrollada en el presente trabajo de tesis, que han promovido la implementación de nuevos alcances en obra.

La elaboración del presente trabajo tiene como propósito ser un parteaguas para la propuesta de un sistema de control de calidad para evaluar el desempeño del Concreto Lanzado Reforzado con Fibras en obras subterráneas.

RECOMENDACIONES

Para el caso práctico y en general para todo tipo de obras donde se aplique concreto lanzado reforzado con fibras es indispensable contar con un sistema para el curado del concreto, que permita desarrollar un fraguado adecuado.

Identificar los valores de pérdida de fibra en ollas y tuberías de transporte, en el equipo de lanzado y principalmente en el material producto del rebote. Además, realizar prueba de revenimiento y masa unitaria al concreto lanzado, después de suministrar las fibras metálicas, preferentemente cerca del lugar donde será colocado (dentro del túnel). Cuando el revenimiento sea menor a 10 cm, se recomienda emplear la prueba del cono invertido.

Evaluar especímenes de menor tamaño, que tengan correlación con las indicadas en la norma, con la finalidad de mejorar la manipulación de las probetas durante el muestreo en el túnel y en los ensayos, que dé como resultado muestreos óptimos y prácticos.

Establecer correlaciones entre los ensayos de paneles cuadrados, paneles circulares y cilindros para ensayo de Doble Punzonamiento como nueva línea de investigación, con la finalidad de poder desarrollar el método más práctico y favorable de acuerdo con los requisitos de cada proyecto donde intervenga la tecnología de los CLRF.

En el apéndice 3 se enlistan algunas normativas que pueden aplicarse a los Concretos Lanzados Reforzados con Fibras (CLRF), con la finalidad de ser referencia para la implementación de protocolos de control de calidad o programas de verificación.

En el apéndice 4 se presenta una propuesta de normativa para evaluar la capacidad de las fibras (absorción de energía) ante un estado de agrietamiento por parte del núcleo de concreto de una probeta de sección cuadrada de 600 mm x 600 mm x 100 mm.

APORTACIONES

Como resultado de esta investigación y habiendo cumplido con los objetivos propuestos, es importante destacar los principales aportes, tanto a nivel de investigación, contribución de información experimental con resultados de ensayos de los métodos actuales para evaluar el desempeño de los concretos con fibra aplicados a una obra real, y la transferencia de esta información y procedimientos en los trabajos del revestimiento primario de concreto lanzado reforzado con fibras de acero en las obras del túnel de la línea 12 del metro de la ciudad de México. Entre estas, podemos señalar los siguientes

- ✓ Se ha demostrado la aplicabilidad de los métodos de prueba actuales para evaluar el desempeño del concreto con fibras. Es posible el muestreo en obra de especímenes de tipo panel y artesa, que permiten su ensayo en laboratorio de acuerdo con los estándares internacionales ASTM y UNE.
- ✓ Los métodos actuales del ensayo de panel circular ASTM C1550, panel cuadrado EN 14488-5 y ensayo de doble punzonamiento, son actualmente metodologías consideradas como medios de control para el concreto con fibras en obras subterráneas, son métodos que ya se incluyen y requieren las especificaciones de túneles en diferentes países, como USA, Canadá y algunos de Europa. En la medida de su conocimiento y dado el auge de la aplicación de este material en obras subterráneas, ha surgido la inquietud en el medio de evaluar el desempeño del concreto con fibras en obras de túneles, muestra de ello es la variedad de solicitudes de estudio que ha recibido el Instituto de Ingeniería de la UNAM para evaluar el desempeño del concreto con fibras para túneles de obras civiles y minería, mediante ensayos de paneles, vigas y ensayo de doble punzonamiento. Lo anterior es resultado de diversos estudios realizados en el II-UNAM en esta línea de investigación de los concretos reforzados con fibras, en la que se incluye este estudio.
- ✓ Los protocolos y procedimientos considerados en esta investigación han servido como iniciativa y motivado en la Dirección General de Obras para el Transporte de la Ciudad de México, a implementar varios de los procedimientos empleados en este estudio, entre ellos:
 - Procedimientos de muestreo, para muestras de tipo panel y artesas

- Conteo de fibras en estado fresco. Actualmente en obra, se realiza esta actividad en la superficie, inmediatamente después de incorporar las fibras a la olla de concreto. Se ha recomendado y propuesto que el conteo de fibras (toma de muestras) se realice hasta el frente de excavación, durante el lanzamiento del concreto, conforme a lo realizado en este estudio. Ensayos comparativos entre el conteo de fibra en superficie y pie de obra, mostraron una diferencia importante.
- Programa de Certificación implementado, como consecuencia de los resultados obtenidos (absorción de energía y conteo de fibras) y a recomendación de los responsables de este estudio para valorar esta importante tarea para garantizar el correcto lanzamiento del concreto en la obra. Recientemente, se realizó un Curso de Certificación impartido por un experimentado Certificador avalado por el ACI y ASA, Certificación otorgada por el ACI Internacional, mediante el patrocinio del ACI Sección Centro y Sur de México.
- Control del suministro de la fibra a la olla de concreto. Entre los procedimientos implementados en obra, actualmente se lleva un control más estricto en el control de la cantidad correcta del suministro de la fibra a la olla de concreto.
- Control en el suministro de aditivo acelerante en obra, y la importancia de conocer el diseño de mezcla a fin de poder determinar la proporción de aditivo de acuerdo con el contenido de cemento, así como la compatibilidad entre los productos químicos suministrados al concreto.

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Durante la realización de este estudio académico-experimental surgieron nuevas inquietudes que no fueron posible resolver ni atender, debido al tiempo y los objetivos demarcados. Algunas de ellas se iniciaron, sin embargo, requieren de más información y mayor número de pruebas con la finalidad de valorar los resultados. Entre algunas de ellas, podemos mencionar las siguientes.

- Encontrar una correlación entre los ensayos de panel cuadrado y panel circular, adicionalmente con el ensayo Barcelona. Si bien, en esta tesis, se presenta una correlación de resultados entre los ensayos realizados; ésta, es una correlación preliminar y requiere de mayores datos para poder establecer una correlación más definitiva. Actualmente, se encuentra en marcha un estudio preliminar para establecer esta correlación con datos de especímenes de ensayo de la obra. En paralelo, se plantea un estudio más completo a nivel de Laboratorio para establecer esta correlación.
- Verificación de la calidad del concreto lanzado colocado mediante extracción de testigos en la sección del túnel. El ensayo Barcelona es una metodología competente para este fin. Obtener testigos de 15 cm de diámetro y 15 cm de espesor permitirá realizar el ensayo Barcelona para obtener los parámetros característicos del concreto del revestimiento.
- Verificar la cantidad de fibra colocada en el revestimiento. Existe un método no destructivo que permite determinar la cantidad de fibra (de acero) en un cilindro de concreto. Es un método conocido como Método Inductivo. Existe un programa experimental preliminar que contempla este estudio. En una primera etapa se tiene considerado realizar ensayos en cilindros obtenidos de artesas moldeadas in situ. En futuras investigaciones, se tiene considerado ampliar el estudio considerando obtener testigos del revestimiento de concreto lanzado en túnel. El método Inductivo requiere de especímenes cilíndricos de 15 cm de diámetro y 15 cm de altura, dimensiones similares al requerido para el ensayo Barcelona, lo cual es una ventaja, que permite obtener dos datos de un mismo espécimen, cantidad de fibra y absorción de energía.

REFERENCIAS

Acero, J. P. (2017). *Evaluación del uso combinado de fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto aplicado al soporte y revestimiento de túneles* (Tesis de maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, D.C.

ACI 201.2R (1997). *Guide to Durable Concrete*. Reported by ACI Committee 201.

ACI 318 (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Reported by ACI Committee 318.

ACI 506 (2016). *Guide to shotcrete*. ACI 506.5R-09: Guide for Specifying Underground Shotcrete. Reported by ACI Committee 506.

ACI 544.1R (1996). *Report on Fiber Reinforced Concrete*. Reported by ACI Committee 544.

ACI 544.2R (1989). *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*. Reported by ACI Committee 544.

Aire, C. (2016). *Métodos de prueba para evaluar el desempeño del concreto reforzado con fibras en estado plástico y endurecido*. Instituto de Ingeniería UNAM. México.

Aire, C. (2018). *Ensayos de control de calidad de hormigón reforzado con fibras en túneles: Experiencia mexicana*. V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales. Valencia, España, pp. 721-732.

Aire, C., Molins, C., Aguado, A. Y Zárata G. (2014). *Nuevo método de prueba para determinar la resistencia a tracción indirecta de concreto reforzado con fibra empleando el ensayo de doble punzonamiento*. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, pp. 1-20.

Aire C., Zarate G., Aguado A., Molins C., y García T. (2016). *Sistema de control de calidad para evaluar la tenacidad del hormigón lanzado reforzado con fibras*. Fondo de investigación del Instituto de Ingeniería. Productos internos. Informe Interno Instituto de Ingeniería UNAM. P5538, pp. 89

Aguado A., Marí A. y Molins C. (2005). *Estudio de viabilidad del ensayo Barcelona*. III Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Zaragoza, 14-17 de noviembre. Vol. 1. Gestión de Estructuras, pp. 275-288.

ASTM C 33/C33M (2016). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C 94/C94M (2015). *Standard Specification for Ready-Mixed Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C 150/C150M (2012). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C 260/C260M (2010). *Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C 494/C494M (2017). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C 1017/C1017M (2007). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C 1116/C1116M (2008). *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C 1141/C1141M (2015). *Standard Specification for Admixtures for Shotcrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C 1436 (2012). *Standard Specification for Materials for Shotcrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C 1550 (2012). *Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete. Using Centrally Loaded Round Panel*. Book of Standards Vol. 04.02, ASTM International. West Conshohocken, PA, USA, pp.14.

ASTM C 1602/C1602M (2012). *Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete*. Book of Standards Vol. 04.02, ASTM International. West Conshohocken, PA, USA.

Bernard E. (1999). *Correlations in the performance of fibre reinforced shotcrete beams and panels*. Engineering Report CE9. School of Civil Engineering and Environment. University of Western Sydney. Nepean. Australia.

Bernard E. y Pircher M. (2001). *The influence of thickness on performance of fibre reinforced concrete in a round determinate panel test*. Cement, Concrete & Aggregates, V23 (1), pp. 27-33.

Bracamontes R. (2017). *Manual para el diseño y aplicación del concreto lanzado*. Segunda edición. México.

Bracamontes R. (2014). *Concreto lanzado: en la industria minera*. Construcción y Tecnología en Concreto, pp. 16-23.

Chen W., (1970). *Double punch test for tensile strength of concrete*. ACI Materials Journal, Vol. 67 (2), pp. 993-995.

EN 14487-1 (2008). *Sprayed concrete- Part 1: Definitions, specifications and conformity*. European Standard, European Committee for Standardization, Bruselas.

EN 14488-5 (2002). *Testing sprayed concrete- Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens*. European Standard, European Committee for Standardization, Bruselas, pp.12.

EN 14488-7 (2007). *Testing sprayed concrete- Part 7: Fibre content of fibre reinforced concrete*. European Standard, European Committee for Standardization, Bruselas.

García, S. (2014). *Shotcrete guía chilena del hormigón proyectado*. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, Santiago, Chile.

Patiño O.; Méndez R. (2016). *Control de calidad del concreto (Normas, pruebas y cartas de control)*. Universidad Tecnológica de Panamá. RIDTEC VOL. 4, N° 1 y 2, pp. 59-64.

Martí J.V.; Yepes V.; González F.; Alcalá J. (2012). *Técnicas de voladuras y excavación en túneles*. Apuntes de la Universidad Politécnica de Valencia. Ref. 530, pp. 165.

NMX-C-083-ONNCCE-2014. *Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes. – Método de Ensayo*.

NMX-C-109-ONNCCE-2013. *Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico – Cabeceo de Especímenes Cilíndricos*.

NMX-C-111-ONNCCE-2018. *Industria de la Construcción- Agregados para Concreto Hidráulico- Especificaciones y Métodos de Ensayo*.

NMX-C-122-ONNCCE-2018. *Industria de la Construcción- Agua para concreto- Especificaciones*

NMX-C-156-ONNCCE-2010. *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico – Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco.*

NMX-C-169-ONNCCE-2009. *Industria de la Construcción - Concreto – Extracción de Especímenes Cilíndricos o Prismáticos de Concreto Hidráulico Endurecido.*

NMX-C-191-ONNCCE-2015. *Industria de la Construcción - Concreto – Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto Usando una Viga Simple con Carga en los Tercios del Claro.*

NMX-C-255-ONNCCE-2013. *Industria de la Construcción - Aditivos Químicos Para Concreto - Especificaciones y Métodos de Ensayo.*

NMX-C-414-ONNCCE-2017. *Industria de la Construcción- Cementantes Hidráulicos- Especificaciones y Métodos de Ensayo.*

NMX-C-435-ONNCCE-2010. *Industria de la Construcción- Concreto Hidráulico- Determinación de la Temperatura del Concreto fresco.*

NMX-C-538-ONNCCE-2017. *Industria de la Construcción- Concreto Reforzado con Macrofibras- Determinación de la Resistencia al Agrietamiento, Tenacidad y Resistencia Residual a Tensión. Método de ensayo.*

NMX-C-539-ONNCCE-2017. *Industria de la Construcción- Concreto Reforzado con Macrofibras- Determinación de la Tenacidad a la Flexión Utilizando el Panel Circular con Carga Central- Método de ensayo*

Rey, A. (2006). *Hormigón proyectado. Dosificación, fabricación y puesta en obra*". Madrid, España.

Ryan, T. (1976). *Concreto lanzado*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A. C. México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes S.C.T. (2016). *Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera*.

Tenorio, J. G. (2016). *Propuesta de criterios de aceptación o rechazo de testigos de hormigón proyectado utilizado en fortificación de túneles mineros y civiles* (Tesis de pregrado). Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile.

Túneles y obras subterráneas. Ed. Sika, S.A.U. Madrid, España.

UNE 83515 (2010). “*Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción, Ensayo Barcelona*”. Madrid, España, pp. 7.

Villanueva, H., (2013). *Procedimiento constructivo del revestimiento definitivo en túneles, para el desalojo de aguas residuales, mediante concreto colado en sitio*. Tercer Simposio Internacional sobre Túneles y Lumbreras en Suelos y Roca, Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM). México D.F.

APÉNDICE A



Evaluación del desempeño del concreto lanzado reforzado con fibras de acero para aplicaciones de túnel en México

Performance evaluation of steel-fiber reinforced shotcrete for tunnel applications in Mexico

Carlos Aire (1) y Lilia Aguilar (2)

*PhD, Investigador del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México
Ing., Becaria de Maestría del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México*

Resumen

El creciente interés y uso del Concreto Reforzado con Fibra (CRF) en la industria de la construcción en México, ha llevado a la necesidad de caracterizar adecuadamente sus propiedades mecánicas para una especificación apropiada y proponer un sistema práctico de control de calidad para evaluar su cumplimiento. Se han desarrollado una variedad de métodos de prueba para el concreto reforzado con fibra (CRF) en todo el mundo; sin embargo, su uso en aplicaciones industriales todavía es limitado y la selección del método adecuado para un propósito específico no está lo suficientemente extendida.

En años anteriores, el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) llevó a cabo varios programas experimentales para evaluar el desempeño del CRF, que incluía la prueba de viga (ASTM C1609), las pruebas de panel redondo y cuadrado (ASTM C1550 y UNE 14488-5, respectivamente), y el ensayo Barcelona (UNE 83515).

Un importante proyecto de infraestructura de túneles en investigación es la extensión del metro de la Línea 12 (L-12) de la ciudad de México, que considera el uso de concreto lanzado reforzado con fibras de acero (CLRFA) como el revestimiento primario. Basándose en la experiencia de investigaciones sobre CRF, el Instituto de Ingeniería ha propuesto evaluar el comportamiento de CRF para este proyecto de construcción subterránea. El Instituto de Ingeniería de la UNAM ha emprendido un programa experimental considerando un conjunto completo de pruebas. Paneles y cilindros fueron seleccionados para determinar la absorción de energía (tenacidad) y caracterizar el rendimiento del CLRFA. Las muestras se tomaron del sitio de trabajo de la L12. Se presentan en este documento los resultados de paneles cuadrados (UNE 14488-5), paneles redondos (ASTM C1550) y ensayo Barcelona (UNE 83515).

Palabras claves: Concreto reforzado con fibras, método de ensayo, ensayo de viga, ensayo de panel, ensayo Barcelona, fibras de acero, revestimiento de túnel

Abstract

The growing interest and use of Fiber Reinforced Concrete (FRC) in the construction industry in Mexico, has led the need to adequately characterize its mechanical properties for an appropriate specification and propose a practical quality control system to evaluate its compliance. A variety of test methods have been developed for Fiber Reinforced Concrete (FRC) worldwide; nevertheless, its use at industry applications is still limited and the selection of the suitable method for a specific purpose is not sufficiently widespread.

In past years the Engineering Institute of the National University Autonomous of Mexico (UNAM) undertook several experimental program to evaluate the performance of FRC which included the beam test (ASTM C1609), round and square panel test (ASTM C1550 and UNE 14488-5, respectively), and the Barcelona test (UNE 83515).

An important tunnel infrastructure project in research is the Line 12 Subway extension, considers the use of Steel Fiber Reinforced Shotcrete (SFRS) as the primary lining. Based on the experience in researches on FRC, the Engineering Institute has proposed to evaluate the behavior of FRC for this underground construction projects. The UNAM Engineering Institute has undertaken an experimental program considering a complete testing set. Panels and cylinders were selected to determine the energy absorption (toughness) to characterize the performance of the SFRS. The samples were taken from the L12 jobsite. Square panels (UNE 14488-5), round panels (ASTM C1550) and Barcelona test (UNE 83515) results are presented in this document.

Keywords: Fiber Reinforced Concrete, test method, beam test, panel test, Barcelona test, steel fibers, tunnel lining.



1. Antecedentes

El uso creciente del concreto reforzado con fibras (CRF) en México, principalmente para la construcción subterránea, ha llevado al Instituto de Ingeniería UNAM (II-UNAM) a implementar los principales métodos de prueba para evaluar su comportamiento y proporcionar una guía para determinar los parámetros de especificación de esta tecnología, las cuales se basan en la determinación de la resistencia residual a la flexión y la absorción de energía. De esta manera, fueron implementados en el II-UNAM los ensayos de viga ASTM C1609, de panel circular ASTM C1550, de panel cuadrado EN 14488-5 y ensayo Barcelona UNE 83515. Para implementar estas metodologías se emprendieron amplias campañas experimentales de laboratorio y de aplicación industrial, incluyendo diferentes tipos de fibras (acero y sintéticas), en variadas dosis de fibras y tipos de muestras (vigas, panel cuadrado, panel circular y cilindros). Como resultado añadido se desarrollaron las primeras normas mexicanas NMX para concreto reforzado con fibras, la NMX C535 (ASTM C1609), NMX C538 (UNE 83515) y NMX C539 (ASTM C1550), actualmente vigentes.

En el área Metropolitana de la Ciudad de México, existen tres importantes proyectos de infraestructura subterránea, en los que se consideraron el uso de CRF para el revestimiento de los túneles. Dos de estos proyectos, el Túnel Emisor Oriente (TEO) y el Túnel Emisor Poniente pertenecen al Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México, construidos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), con la finalidad de aumentar la capacidad de evacuación de las aguas residuales y pluviales de la ciudad de México. En estos proyectos, TEO y TEP-II se viene colocando CRF sintética para el revestimiento definitivo de los túneles. El tercer proyecto, las obras de Ampliación de la Línea 12 del Metro (L-12), lo desarrolla la Dirección General de Construcción de Obras para el Transporte (DGCOT), que se construye para mejorar el transporte de la ciudad de México. En estos túneles de la L-12 se está utilizando Concreto Lanzado Reforzado con Fibras (CLRF) de acero para el revestimiento primario, donde actualmente, por especificaciones propias del proyecto, sólo se verifica la resistencia a compresión de testigos extraídos a partir de artesas.

En este artículo se presenta los resultados de diferentes pruebas, a partir de una iniciativa por parte del Instituto de Ingeniería de la UNAM, para evaluar el desempeño en términos de absorción de energía de los concretos "CLRF" que se están utilizando en las obras de ampliación de la L-12. Para ello se tomaron muestras de diferentes geometrías, las cuales se ensayaron en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del II-UNAM. Se realizaron tres tipos de prueba: ensayo de panel de sección cuadrada EN 14488-5 (l 600 \times a 600 \times h 100 mm), ensayo de panel circular ASTM C1550 (ϕ 800 \times e 75 mm) y ensayo Barcelona UNE 83515 (h 150 \times ϕ 150 mm).

En la figura 1 se muestra la configuración típica de los ensayos empleados en este estudio: métodos de prueba ASTM C1550 de panel circular, EN 14488-5 de panel cuadrado y ensayo Barcelona UNE 83515 implementados en el laboratorio del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM).



Anais do
61º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2019
Outubro / 2019



@ 2019 - IBRACON - ISSN 2175-8182



Figura 1 - Métodos de prueba para concreto reforzado con fibras

2. Ampliación de la Línea 12 del metro de la ciudad de México – L-12

La Secretaría de Obras y Servicios de la Dirección General de Construcción de Obras para el Transporte (DGOT) construye la ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México. Es un proyecto de infraestructura de túnel de 4.6 kilómetros de longitud en los que se ubicarán tres estaciones de metro que conectarán las estaciones Mixcoac y Observatorio, uniendo las zonas Oriente y Poniente de la ciudad de México. Con esta ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México, se prevé que el tiempo de traslado entre las Estaciones Mixcoac a Observatorio se reduzca en hasta 60 por ciento.

El proyecto ejecutivo, que actualmente se encuentra en su primera fase consiste en la construcción de 13 lumbreras de una profundidad entre 15 y 46.5 m. Las lumbreras son excavaciones verticales que se utilizan como obras auxiliares para comunicar al túnel con el exterior y al mismo tiempo introducir la maquinaria, equipo, personal de la obra y materiales necesarios para la construcción. El perfil estratigráfico del suelo a lo largo del trazo del proyecto es predominante de arcilla arenosa de consistencia dura, sin embargo, en algunos tramos de túnel se encuentra suelos blandos de poca estabilidad.

Eventualmente, en el caso de suelos inestables se resuelven con elementos de soporte, entre ellos marcos metálicos separados entre ellos 0.50 m a 1.00 m dependiendo del tipo de suelo blando. En otros casos, cuando se presenta sobreexcavación se resuelve con productos de inyección, como lechadas de cemento y concreto fluido, cuya selección se adopta de acuerdo con la magnitud de la sobreexcavación.

Para la construcción del túnel de 4.6 km de longitud y diámetro promedio de 11 m, se emplea el método de excavación mecánica convencional mediante máquinas rozadoras. Las rozadoras excavan mediante una cabeza giratoria, provista de dientes de corte que van montadas sobre un brazo mecánico que permite la excavación. El avance promedio de excavación es de 1.5 m. Posterior a la excavación de la sección media superior, se coloca el revestimiento primario para dar estabilidad al terreno, que consiste en aplicar concreto lanzado reforzado con fibras (CLRF) de acero. El espesor de revestimiento primario es de 20 cm, que se coloca en dos capas de 10 cm cada una, aproximadamente.



Excavación de banco central y banco lateral para colado de zapatas de concreto similar al revestimiento primario. Se instala una geomembrana de PVC que funciona como impermeabilizante para evitar posibles filtraciones de agua hacia el revestimiento definitivo. Armado y colado de elementos del revestimiento en la sección media inferior denominados zapatas y muros laterales. Se coloca un revestimiento secundario de concreto de 40 cm de espesor en bóveda. En esta segunda capa de revestimiento, se emplea concreto lanzado, sin fibras; el refuerzo es convencional con varillas de acero. Y por último el armado y colado de losa fondo.

La figura 2 muestra un procedimiento típico de la colocación del revestimiento primario de CLRF de acero en el túnel L-12. Consiste en lo siguiente: al llegar a obra el camión de concreto se procede a medir la temperatura y revenimiento para su rechazo o aceptación, cuando sucede el segundo caso, incorporan la cantidad de fibra de diseño, permitiendo se integre y mezcle durante el tiempo establecido. Enseguida se suministra el concreto mediante una tubería hacia un camión revolvedor que transporta el concreto en el túnel hacia el equipo de lanzado. Los materiales empleados en la fabricación del concreto son: cemento CPC 40RS (NMX C414), arena andesita, grava caliza de 10 mm de tamaño máximo, aditivo acelerante y fibra de acero de 35 mm de longitud en una dosis de 30 kg/m³ de concreto.



Figura 2 - Procedimiento de colocación de revestimiento primario del túnel L-12

La propiedad más significativa del CLRF es la absorción de energía o tenacidad en flexión. Después de que el concreto se agrieta, las fibras empiezan a trabajar durante el proceso de agrietamiento, redistribuyendo y controlando la propagación de las grietas a medida que el sistema de revestimiento de CLRF experimenta deformación. La capacidad de carga del CLRF determina el desempeño del sistema de revestimiento.

La absorción de energía del CLRF se determina a partir de ensayos de flexión, usando paneles circulares o cuadrados; y vigas. Para su determinación se han desarrollado nuevos métodos de prueba estandarizados, los cuales se usan internacionalmente.

El desempeño post-elástico de paneles circulares/cuadrados sujetos a una carga puntual en el centro, es representado por la energía absorbida hasta una deflexión central especificada. En este método de prueba, la energía absorbida hasta una deflexión dada representa la habilidad o capacidad de redistribución de esfuerzos que tiene el concreto reforzado con fibras después del agrietamiento. Los métodos típicos de prueba de resistencia a flexión incluyen el ASTM C1550, de paneles circulares, y la EN 14488-5, de ANAIS DO 61º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2019 – 61CBC2019

paneles cuadrados. La determinación de la capacidad de absorción de energía es el factor más importante para evaluar el rendimiento del CLRF, la cual se calcula para una deflexión especificada.

Otros métodos para evaluar la resistencia a flexión son las pruebas en vigas. Para ello se requiere paneles de CLRF que se cortan en vigas y son ensayadas de acuerdo con los estándares ASTM C1609 y UNE 14561, para determinar la tenacidad en flexión.

Un reciente desarrollo, es el ensayo de doble punzonamiento (UNE 83515), conocido como ensayo Barcelona (ensayo BCN). Con este ensayo se determina la tenacidad en cilindros que se calcula para una apertura circunferencial de fisura especificada.

Como parte de los trabajos de un Proyecto de Investigación referente a evaluar el desempeño de los concretos lanzados reforzados con fibras (CLRF) de acero colocados en el revestimiento primario de las obras de ampliación del metro L-12 de la ciudad de México, se realizaron tres tipos de prueba, ensayos de panel cuadrado, ensayo de panel circular y ensayo Barcelona. A continuación, se presentan los resultados.

3. Ensayos de panel cuadrado – EN 14488-5

El ensayo se realizó de acuerdo con la EN 14488-5, en panel cuadrado de 600 × 600 × 100 mm. La carga se aplicó en el centro del panel a través de una placa 100 × 100 × 20 mm. La velocidad de desplazamiento del ensayo fue de 1 mm/min. Se midió la flecha con un transductor de desplazamiento colocado en la parte inferior del panel. La prueba finaliza al alcanzar una flecha de 25 mm. La figura 3 muestra la configuración del ensayo.

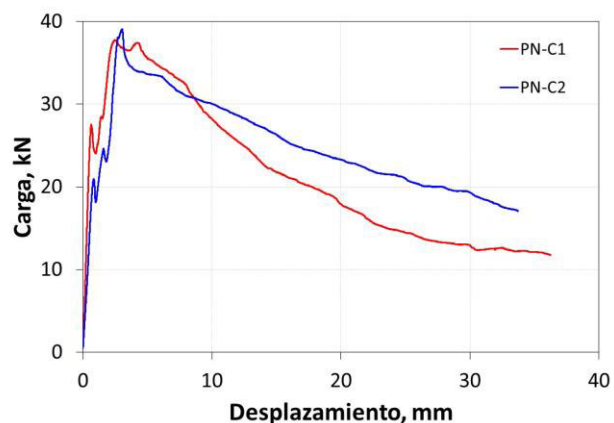


Figura 3 - Ensayo de panel de sección cuadrada, EN 14488-5

Los paneles ensayados con carga central fallaron formando fisuras que empiezan en el centro del panel y dividen el espécimen en varias secciones, como se muestra en la figura 4. La falla fue gradual, debido a la presencia de las fibras en la matriz de concreto. En



Anais do
61º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2019
Outubro / 2019



@ 2019 - IBRACON - ISSN 2175-8182

todos los casos se observa dos fisuras principales que parten del centro del panel y se extienden hacia los lados extremos del panel.



Figura 4 - Modo de falla típico de los paneles cuadrados ensayados

La figura 3 muestra las curvas carga vs desplazamiento de los paneles ensayados. Las curvas son muy similares para ambos paneles. En el primer tramo de curva la carga asciende gradualmente con pequeños incrementos de desplazamiento, además se presenta varios picos hasta alcanzar el pico máximo (carga máxima). En este primer tramo de la curva el aporte de la fibra es mínimo, hasta que se presenta el agrietamiento a partir del cual la fibra trabaja en conjunto con el concreto. La carga máxima, en ambos casos, es muy similar, así como el comportamiento post-agrietamiento.

La tabla 1 muestra los resultados de tenacidad, que se determinó como el área bajo la curva carga vs desplazamiento entre el origen y la flecha central de 25 mm, como lo especifica la EN 14488-5. Los resultados muestran que la tenacidad promedio de los paneles ensayados es de 648 Joules, con un coeficiente de variación de 5.10%.

Tabla 1 - Resultados de tenacidad, $T_{\delta_{25mm}}$

ID	Panel	U	Tenacidad	Promedio
$T_{\delta_{25mm}}$	PN-C1	Joules	624.29	$T_{prom} = 647.65 J$
$T_{\delta_{25mm}}$	PN-C2	Joules	671.00	C.V. = 5.10%

4. Ensayos de panel circular – ASTM C1550

El ensayo se realizó de acuerdo con la ASTM C1550, en panel de sección circular de $75 h \times 800 \phi$ mm, para caracterizar el comportamiento de flexión del concreto expresado como absorción de energía en el rango de post-agrietamiento. La velocidad de desplazamiento del ensayo fue de 4 mm/min, y el desplazamiento se registra para cuatro valores de desplazamiento, 5., 10, 20 y 40 mm. Para medir el desplazamiento se colocó un transductor de desplazamiento de 100 mm de rango en la parte inferior del panel. La

carga se aplicó al centro de la superficie del panel sobre la cara enrasada, mientras que la cara lisa queda sobre los tres apoyos, como lo especifica la ASTM C1550.

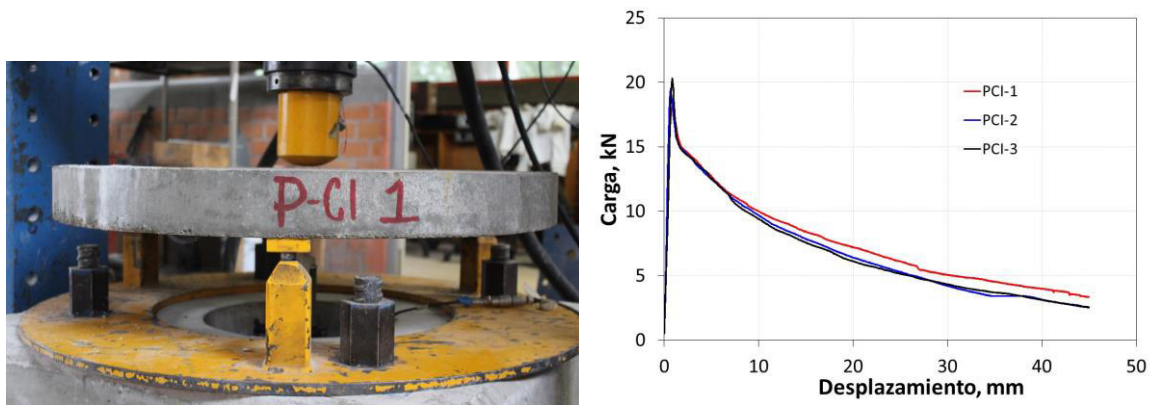


Figura 5 - Ensayo de panel de sección circular, ASTM C1550

La figura 6 muestra el modo de falla del panel circular. De acuerdo con la ASTM C1550, para que un ensayo se considere exitoso, al menos dos de tres paneles deben presentar falla típica formada por tres grietas; en otro caso, se debe descartar el panel con falla diferente y considerar únicamente los dos paneles que presenten la falla típica. En este caso de estudio los paneles presentaron tres grietas.

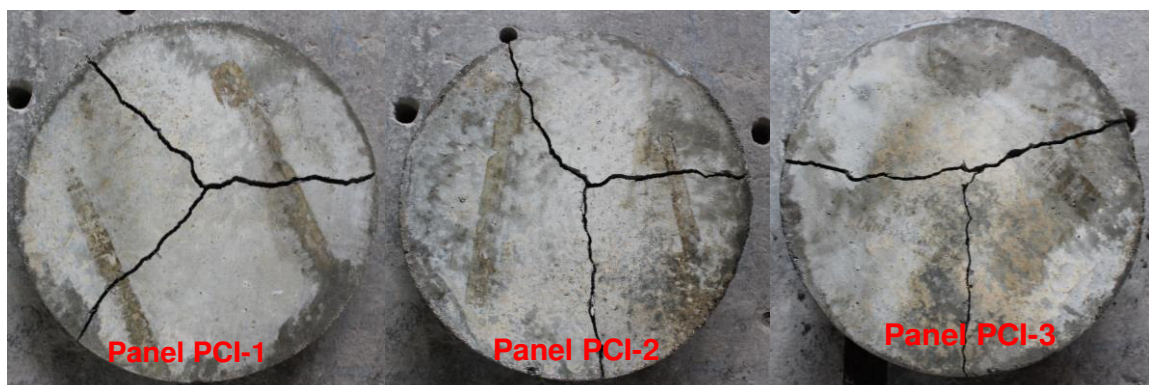


Figura 6 - Modo de falla de paneles circulares

En la figura 5 se muestra las curvas cargas vs desplazamiento de los ensayos ASTM C1550. Las curvas presentan un tramo inicial ascendente donde la carga asciende gradualmente con pequeños incrementos de desplazamiento. En este tramo inicial lineal la carga es soportada por el concreto y el aporte de la fibra es mínimo o nulo. En esta primera fase, la curva alcanza un pico máximo (carga máxima), y enseguida se inicia el proceso de agrietamiento del concreto y la carga se transmite a las fibras, hasta que finalmente absorben toda la carga y las fibras trabajan en conjunto con el concreto. Como se aprecia se presenta una recuperación de la carga debido a la contribución de las fibras. Finalmente, al alcanzar una deformación determinada se inicia el proceso de descarga en

la que se incrementa el desplazamiento a una carga cada vez menor. El comportamiento post-agrietamiento es muy similar para los paneles ensayados.

La absorción de energía se determinó como el área bajo la curva carga vs flecha entre el origen y la flecha central especificada en la ASTM C1550. Los resultados se muestran en la tabla 2. La absorción de energía promedio para los paneles ensayados es de 299.2 Joules para una flecha de 40 mm. La variabilidad de los resultados es menor a 5%; similares resultados se reportan en otros estudios.

Tabla 2 - Resultados de tenacidad, $T_{\delta 5\text{mm}}$, $T_{\delta 10\text{mm}}$, $T_{\delta 20\text{mm}}$ y $T_{\delta 40\text{mm}}$

ID	U	$T_{\delta 5\text{mm}}$	$T_{\delta 10\text{mm}}$	$T_{\delta 20\text{mm}}$	$T_{\delta 40\text{mm}}$
PCI-1	Joules	69.2	125.1	210.0	316.3
PCI-2	Joules	69.9	124.8	204.0	292.9
PCI-3	Joules	69.1	123.1	199.5	288.5
T_{prom}	Joules	69.4	124.3	204.5	299.2
CV	%	0.7%	0.9%	2.6%	5.0%

5. Ensayo Barcelona – UNE 83515

Para la realización de este ensayo se llevó a cabo el muestreo de artesa de madera de $650 B \times 350 b \times 150 h$ mm, de donde fueron extraídos 4 testigos. Para la extracción de testigos se usó una extractora de corazones, como la que se muestra en la figura 7. Para facilitar la extracción la extractora se dispuso sobre una base perpendicular nivelada para asegurar la verticalidad de la extracción. La carga se aplicó sobre la cara enrasada.



Figura 7 – Extracción de testigos para Ensayo Barcelona.

El ensayo se realizó de acuerdo con la UNE 83515, en cilindro de $150 h \times 150 \phi$ mm, para caracterizar tenacidad expresado como absorción de energía en el rango de post-agrietamiento. La velocidad de desplazamiento del ensayo fue de 0.5 mm/min, y se midió la apertura circunferencial para lo cual se coloca una cadena circunferencial a media altura del cilindro. La prueba finaliza alcanzar una apertura circunferencial de 6 mm. La figura 8 muestra la configuración del ensayo.

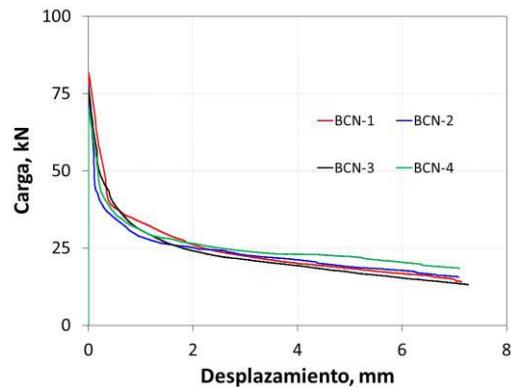


Figura 8 - Ensayo de doble punzonamiento, configuración, EN 83515

La falla del cilindro del ensayo Barcelona presenta 3-4 grietas que atraviesan toda la altura del cilindro., como se aprecia en la figura 9.



Figura 9 - Modo de falla típico de los cilindros, Ensayo Barcelona.

En la figura 8 se presentan las curvas carga vs desplazamiento circunferencial de los cilindros ensayados. Las curvas presentan un desplazamiento casi nulo desde el inicio de carga hasta alcanzar la carga máxima. Al llegar a la carga máxima se presentan las primeras fisuras y el post-agrietamiento. La carga disminuye hasta una abertura circunferencial determinada y empiezan a trabajar las fibras. La carga se recupera y se presenta el comportamiento residual.

La tabla 7 muestra los resultados de tenacidad de los cilindros ensayados. El coeficiente de variación de los resultados varía entre 4% y 6.5%.

Tabla 7 - Resultados de tenacidad¹

	U	BCN-1	BCN-2	BCN-3	BCN-4	Prom	CV %
$T_{ct\ 2\ mm}$	Joules	64.5	70.0	74.9	68.8	69.6	6.2%
$T_{ct\ 2.5\ mm}$	Joules	76.8	81.6	87.4	81.6	81.8	5.3%
$T_{ct\ 4\ mm}$	Joules	110.5	112.8	120.1	115.2	115.2	3.8%
$T_{ct\ 6\ mm}$	Joules	148.9	147.3	156.9	153.6	153.6	4.3%

6. Conclusiones



Anais do
61º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2019
Outubro / 2019



@ 2019 - IBRACON - ISSN 2175-8182

El concreto reforzado con fibras es una tecnología que durante los últimos años se utiliza con bastante frecuencia en la industria de la construcción, por lo tanto, es importante evaluar su desempeño en obra. Este trabajo presentó una aplicación de los métodos actuales para evaluar el desempeño del concreto reforzado con fibras. Se realizaron muestreos y ensayos para determinar la capacidad de absorción de energía del concreto de revestimiento del túnel de la ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México. Se fabricaron en obra tres tipos de muestras: panel circular, panel cuadrado y artesas para obtener cilindros para el ensayo Barcelona.

Los muestreos hasta ahora desarrollados en la obra de ampliación de la L12 representan un proyecto piloto, parteaguas para la implementación de un Protocolo de Control que evalúe el desempeño del CLRF y permita conocer los diferentes escenarios, facilidades, etc. que se presentan en obra durante el desarrollo de los muestreos, resultado de ensayos y análisis de todos los componentes involucrados.

Como conclusión se puede afirmar que es posible obtener muestras estándar a partir de las cuales se puede evaluar el desempeño del concreto reforzado con fibras y su aplicación como método de control de calidad en construcciones subterráneas. Varios de estos métodos ya se usan actualmente como métodos de prueba para evaluar las propiedades del concreto reforzado con fibras en túneles, el cual se mide por su capacidad residual, en términos de resistencias residuales y capacidad de absorción de energía.

Basado en la experiencia ganada en estos trabajos de campo y de investigaciones, el Instituto de Ingeniería de la UNAM plantea proponer dos nuevas normas mexicanas para el control de concreto reforzado con fibras, las cuales impulsarán un nuevo sistema de control de calidad para el concreto reforzado con fibras en obras subterráneas.

7. Referencias

ASTM C1550 (2012), Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)

EN 14488-5: Test sprayed concrete – Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens

UNE 83515 (2008), "Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Ensayo Barcelona", Madrid, España, 7 pp.

APÉNDICE B

Ensayos de control del concreto lanzado con fibras en el túnel de la línea 12 del metro de la CDMX

C. Aire^{1*}, L. Aguilar²

*Autor de Contacto: aire@pumas.iingen.unam.mx

¹ Instituto de Ingeniería, UNAM, México

² Instituto de Ingeniería, UNAM, México

RESUMEN

Un importante proyecto de infraestructura de túneles en investigación es la extensión del metro de la Línea 12 (L-12) de la ciudad de México, que considera el uso de concreto lanzado reforzado con fibras de acero (CLRFA) como el revestimiento primario.

La propiedad más significativa del CLRFA es la absorción de energía o tenacidad. Los principales métodos de prueba que se emplean para evaluar esta propiedad se basa en ensayos de paneles, que pueden ser de sección cuadrada o circular; y mediante ensayo de cilindros.

Basándose en la experiencia de investigaciones sobre Concretos Reforzados con fibra (CRF), el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, ha emprendido un programa experimental considerando un conjunto completo de pruebas para caracterizar el comportamiento del concreto de revestimiento primario del túnel de la L-12, determinando la capacidad de absorción de energía de los concretos colocados. Se presentan los resultados de ensayos de paneles cuadrados (UNE 14488-5), paneles redondos (ASTM C1550) y ensayo Barcelona (UNE 83515).

Como conclusión se puede afirmar que es posible obtener muestras estándar a partir del cual se puede evaluar el desempeño del concreto lanzado reforzado con fibras y su aplicación como método de control de calidad en construcciones subterráneas.

Palabras clave: concreto lanzado reforzado con fibras; absorción de energía; ensayo de paneles circulares, ensayo de paneles cuadrados; ensayo Barcelona

SUMMARY

An important tunnel infrastructure project under investigation is the extension of the metro line 12 (L-12) of Mexico City, which considers the use of steel fiber reinforced shotcrete (SFRS) as the primary coating.

The most significant property of SFRS is the energy absorption or toughness. The main test methods used to evaluate this property are based on panel tests, which can be square or circular in section; and by cylinder testing.

Based on the experience of research on Fiber Reinforced Concrete (FRC), the Instituto de Ingeniería of the Universidad Nacional Autónoma de México has undertaken an experimental program considering a complete set of tests to characterize the behavior of concrete of primary lining of the L-12 tunnel, determining the energy absorption capacity of placed concrete. The results of square panel tests (UNE 14488-5), round panels (ASTM C1550) and Barcelona test (UNE 83515) are presented.

In conclusion, it can be affirmed that it is possible to obtain standard samples from which the performance of fiber reinforced shotcrete and its application as a quality control method in underground constructions can be evaluated.

Keywords: fiber reinforced shotcrete; energy absorption; circular panels test, square panel test; Barcelona test

RESUMO

Um importante projeto de infraestrutura de túnel sob investigação é a extensão da linha 12 do metrô (L-12) da Cidade do México, que considera o uso de concreto lançado reforçado com fibra de aço (CLRF) como revestimento primário.

A propriedade mais significativa do CLRF é a absorção de energia ou resistência. Os principais métodos de teste usados para avaliar essa propriedade são baseados em testes em painel, que podem ser quadrados ou circulares em seção; e por teste de cilindro.

Com base na experiência de pesquisa em concreto reforçado com fibra (CRF), o Instituto de Engenharia da Universidade Nacional Autónoma do México realizou um programa experimental considerando um conjunto completo de testes para caracterizar o comportamento do concreto de revestimento primário do túnel do L-12, determinando a capacidade de absorção de energia do concreto colocado. Os resultados dos testes de painel quadrado (UNE 14488-5), painéis redondos (ASTM C1550) e teste de Barcelona (UNE 83515) são apresentados.

Concluindo, pode-se afirmar que é possível obter amostras padrão a partir das quais o desempenho do concreto reforçado com fibra foi lançado e sua aplicação como método de controle de qualidade em construções subterrâneas.

Keywords: concreto moldado com fibra reforçada; absorção de energia; teste de painel circular, teste de painel quadrado; Ensaio de Barcelona

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de fibras en el concreto se ha convertido en una tendencia frecuente en la industria de la construcción. En nuestro país, inicialmente reemplazaron mallas electrosoldadas en concretos lanzados, pisos industriales y elementos prefabricados. A nivel internacional, son variadas las aplicaciones de esta tecnología; entre ellas, pavimentos, pisos industriales, sostenimiento de taludes, elementos arquitectónicos y en túneles. En México, las primeras aplicaciones fueron en pisos industriales, sin embargo, recientemente se ha incrementado su uso, principalmente en obras subterráneas, tanto en obras civiles como en minería. Al ser una tecnología un poco reciente en el país, existe interés en conocer el desempeño de este tipo de concreto, que a diferencia del concreto convencional que falla de manera frágil y repentina, el comportamiento del concreto reforzado con fibras (CRF) es muy diferente. Debido a ello, la medición de las propiedades del CRF bajo parámetros estandarizados se ha vuelto prioritaria para todas las partes interesadas durante la ejecución de un proyecto, tanto para especificadores como para los constructores. Una de las principales propiedades beneficiadas por el reforzamiento con fibras en el concreto es la capacidad de absorción de energía después de la fisuración, esto quiere decir que, por más que el elemento se fisure, éste podrá seguir resistiendo carga y deformarse sin colapsar. Esta propiedad se conoce normalmente como tenacidad. La absorción de energía o tenacidad de un elemento implica dos conceptos de manera simultánea, su capacidad de resistir carga y su capacidad de reformarse.

Para medir la absorción de energía se han desarrollado diferentes métodos de prueba estandarizados que permite evaluar el desempeño del concreto reforzado con fibras. El Instituto de Ingeniería de la UNAM ha implementado varios de estas metodologías, entre ellos: los ensayos de viga ASTM C1609 y EN 14651, los ensayos de panel circular ASTM C1550 y panel cuadrado EN 14488-5 y el ensayo Barcelona UNE 83515.

En el área Metropolitana de la Ciudad de México, existen importantes proyectos de infraestructura subterránea, en los que se considera el uso de CRF para el revestimiento de los túneles. Una de ellas es la obra de Ampliación de la Línea 12 del Metro (L-12), que se construye para mejorar el transporte de la ciudad de México, que es un proyecto a cargo de la Dirección General de Construcción de Obras para el Transporte (DGCOT). En estos túneles de la L-12 se está utilizando Concreto Lanzado Reforzado con Fibras (CLRF) de acero para el revestimiento primario. Teniendo en cuenta la amplia experiencia del Instituto de Ingeniería de la UNAM en investigaciones sobre CRF, se implementó un Programa Experimental para evaluar el desempeño del CLRF de un Caso Práctico de Obra en Ejecución, considerando las obras de Ampliación de la L-12 del Metro de la CDMX. El programa incluyó la evaluación de la Absorción de Energía (Tenacidad) del concreto del revestimiento primario del túnel de la L-12, para lo cual se fabricaron tres tipos de muestras de CLRF obtenidas a pie de obra, durante los trabajos de lanzado del concreto.

En este artículo se presenta los resultados de absorción de energía de muestras de CLRF que se están utilizando en las obras de ampliación de la L-12. Para ello se tomaron muestras de diferentes geometrías, las cuales se ensayaron en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del II-UNAM. Se realizaron tres tipos de prueba: ensayo de panel de sección cuadrada EN 14488-5 (l 600 × l 600 × h 100 mm), ensayo de panel circular ASTM C1550 (ϕ 800 × e 75 mm) y ensayo Barcelona UNE 83515 (h 150 × ϕ 150 mm).

2. OBRA DE AMPLIACIÓN DE LA LÍNEA 12 DEL METRO DE LA CDMX

2.1 Generalidades

La Secretaría de Obras y Servicios de la Dirección General de Construcción de Obras para el Transporte (DGOT) construye la ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México. Es un proyecto de infraestructura que consiste en un túnel de 4.6 kilómetros de longitud en los que se

ubicarán tres estaciones de metro que conectarán las estaciones Mixcoac y Observatorio, uniendo las zonas Oriente y Poniente de la ciudad de México. Con esta ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México, se prevé que el tiempo de traslado entre las Estaciones Mixcoac a Observatorio se reduzca en hasta 60 por ciento.

El proyecto ejecutivo, que actualmente se encuentra en su primera fase consiste en la construcción de 13 lumbreras de una profundidad entre 15 y 46.5 m. Las lumbreras sirven para comunicar al túnel con el exterior y al mismo tiempo introducir la maquinaria, equipo, personal de la obra y materiales necesarios para la construcción. El perfil estratigráfico del suelo a lo largo del trazo del proyecto es predominante de arcilla arenosa de consistencia dura, sin embargo, en algunos tramos de túnel se encuentran suelos blandos de poca estabilidad. No existe presencia de nivel de aguas freáticas. En el caso de suelos inestables se resuelve con elementos de soporte, tales como marcos metálicos con separación de 0.50 m a 1.00 m entre ellos, dependiendo del tipo de suelo blando. En otros casos, cuando se presenta sobreexcavación se resuelve con productos de inyección, como lechadas de cemento y concreto fluido, cuya selección se adopta de acuerdo con la magnitud de la sobreexcavación.

Para la construcción del túnel de 4.6 km de longitud y diámetro promedio de 11 m, se emplea el método de excavación mecánica convencional mediante máquinas rozadoras. Las rozadoras excavan mediante una cabeza giratoria, provista de dientes de corte que van montadas sobre un brazo mecánico que permite la excavación. El avance promedio de excavación es de 1.5 m. Posterior a la excavación de la sección media superior, se coloca el revestimiento primario para dar estabilidad al terreno, que consiste en aplicar concreto lanzado reforzado con fibras (CLRF) de acero. El espesor de revestimiento primario es de 20 cm, que se coloca en dos capas de 10 cm cada una, aproximadamente. Entre la capa de revestimiento primario y secundario se coloca una geomembrana de PVC para evitar posibles filtraciones de agua hacia el revestimiento definitivo. El revestimiento secundario es de concreto de 40 cm de espesor en bóveda. En esta segunda capa de revestimiento, se emplea concreto lanzado sin fibras; el refuerzo es con varillas de acero.

2.2 Ensayos de control

La propiedad más representativa CLRF es la absorción de energía. Después de que el concreto se agrieta, las fibras empiezan a trabajar durante el proceso de agrietamiento, redistribuyendo y controlando la propagación de las grietas a medida que el sistema de revestimiento de CLRF experimenta deformación. La capacidad de carga del CLRF determina el desempeño del sistema de revestimiento.

La absorción de energía del CLRF se determina mediante la realización de ensayos de flexión. Existen dos procedimientos de uso tradicional: a) el ensayo de panel, de sección circular o sección cuadrada, y b) el ensayo de viga. Para su determinación se han desarrollado nuevos métodos de prueba estandarizados, los cuales se usan internacionalmente. El ensayo de viga se usa principalmente en aplicaciones de pavimentos.

El desempeño post-elástico de paneles circulares/cuadrados sujetos a una carga puntual en el centro, es representado por la energía absorbida hasta una deflexión central especificada. En este método de prueba, la energía absorbida hasta una deflexión dada representa la habilidad o capacidad de redistribución de esfuerzos que tiene el concreto reforzado con fibras después del agrietamiento. Los métodos típicos de prueba de resistencia a flexión incluyen el ASTM C1550, de paneles circulares, y la EN 14488-5, de paneles cuadrados. La determinación de la capacidad de absorción de energía es el factor más importante para evaluar el rendimiento del CLRF, la cual se calcula para una deflexión especificada, 25 mm en panel cuadrado y 40 mm en panel circular.

Otros métodos para evaluar la resistencia a flexión son las pruebas en vigas. Para ello se requiere paneles de CLRF que se cortan en vigas y son ensayadas de acuerdo con los estándares ASTM C1609 y UNE 14561, para determinar la tenacidad en flexión.

Un reciente desarrollo, es el ensayo de doble punzonamiento (UNE 83515), conocido como ensayo Barcelona. Con este ensayo se determina la tenacidad en cilindros que se calcula para una apertura circunferencial de fisura especificada de 6 mm.

Para evaluar el desempeño de los concretos del revestimiento primario del túnel de la L-12 el II-UNAM realizó ensayos de control, para lo cual se fabricaron diferentes tipos de muestras de CLRF obtenidas en el túnel, para lo cual emprendió una campaña experimental dando seguimiento a todas las operaciones de colocación del concreto, con énfasis en el muestreo y ensayo de especímenes.

La figura 1 muestra un procedimiento típico de la colocación del revestimiento primario de CLRF de acero en el túnel L-12. Al llegar a obra el camión de concreto se procede a medir a obtener una muestra de concreto sin fibra, se mide la temperatura y revenimiento para su rechazo o aceptación. En caso de aceptación, enseguida se incorporan la cantidad de fibra de diseño, permitiendo se integre y mezcle durante el tiempo establecido. Una vez terminado el tiempo de mezclado, el concreto se suministra al interior del túnel mediante una tubería, la cual es recibida por un camión revolvente que transporta el concreto desde la lumbrera hacia el frente de trabajo incorporándolo al equipo de lanzado. Los materiales empleados en la fabricación del concreto fueron: cemento CPC 40RS, arena andesita, grava caliza de 10 mm de tamaño máximo, aditivo acelerante y fibra de acero de 35 mm de longitud en una dosis de 30 kg/m³ de concreto.

Se realizaron tres tipos de muestreo, panel circular, panel cuadrado y artesas, a partir de los cuales se realizaron los ensayos ASTM C1550 (panel circular), EN 14488-5 (panel cuadrado) y UNE 83515 (ensayo Barcelona)



Figura 1. Procedimiento de colocación del revestimiento primario del túnel L-12

3. ENSAYO DE PANEL CUADRADO – EN 14488-5

Las pruebas de absorción de energía en panel de sección cuadrada de l 600 × l 600 mm de sección y h 100 mm de espesor se realizaron de acuerdo con la norma EN 14488-5. La prueba consiste en ensayar paneles cuadrados, que se someten a una carga central que se aplica a través de una placa cuadrada de 100 × 100 mm y 20 mm de espesor. Del ensayo se obtiene el comportamiento carga-desplazamiento y a partir de esta curva se calcula la capacidad de absorción de energía en el rango de post-agrietamiento hasta un desplazamiento especificado de 25 mm, calculada como el área bajo la curva.

Las pruebas de panel de sección cuadrada requieren de un marco de acero rígido con actuador integrado y un sistema de control de lazo cerrado que permita el control por desplazamiento para registrar el comportamiento post-agrietamiento. Para realizar el ensayo de panel cuadrado se dispone de un sistema de control por lazo cerrado que permite el control por desplazamiento, y un marco de carga que se integra a un sistema de actuador y celda de carga. El actuador tiene una capacidad de 500 kN, y para la instrumentación de los paneles se emplea un transductor de desplazamiento tipo LVDT. La velocidad de aplicación del desplazamiento del pistón del actuador fue de 1 mm/min. El rango de medición del LVDT empleado es de 100 mm.

En la figura 2, se muestra la configuración del ensayo de panel cuadrado, de acuerdo con la EN 14488-5. La cara del panel que se enrasa, corresponde a la cara superior del espécimen en la prueba (EN 14488-5).

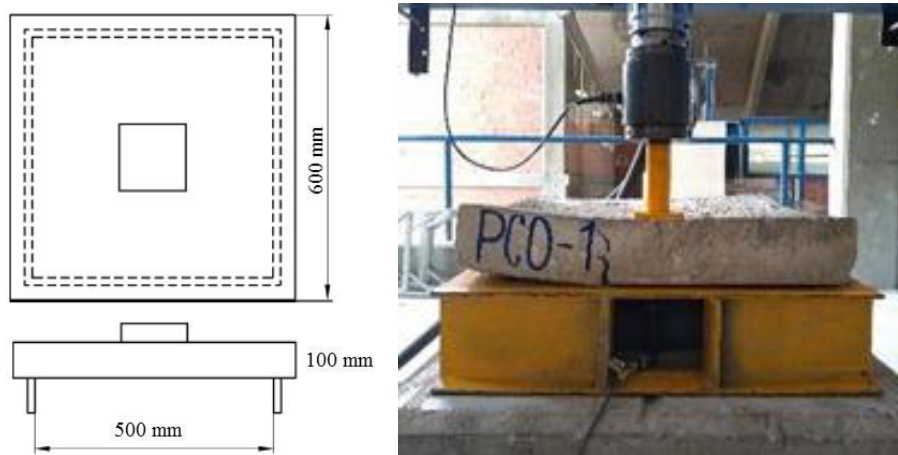


Figura 2. Esquema de configuración del ensayo de panel, según la EN 14488-5

La información de la respuesta completa carga-desplazamiento de la prueba de absorción de energía en panel cuadrado, requiere de un equipo de prueba muy rígido y un sistema de control que permita obtener información del post-pico (post-agrietamiento). Es indispensable que el sistema de control del ensayo permita aplicar la carga controlando el desplazamiento, sin el cual no es posible obtener la información post-agrietamiento. Para esto se empleó un marco de carga con actuador de 500 kN de capacidad, controlado por un sistema analógico de lazo cerrado que permite el control por desplazamiento. La velocidad de desplazamiento aplicada fue de 1 mm/min, como lo establece la EN 14488-5. La prueba finaliza cuando se alcanza, como mínimo, un desplazamiento de 25 mm. La instrumentación se hizo mediante un transductor de desplazamiento tipo LVDT de 100 mm de rango, que se coloca por la parte inferior al centro del panel. La absorción de energía en esta prueba se determina para un desplazamiento de 25 mm.

Los paneles ensayados con carga central fallaron formando dos fisuras principales que atraviesa toda la sección del panel, otras fisuras secundarias, como se muestra en la figura 3. La falla fue gradual, debido a la presencia de las fibras en la matriz de concreto.

La figura 4 muestra las curvas carga-desplazamiento de los paneles ensayados. Las curvas muestran un comportamiento similar, independientemente del panel ensayado. Las curvas presentan dos tramos, un tramo inicial ascendente y el post-agrietamiento descendente. En el primer tramo la carga asciende gradualmente con pequeños incrementos de desplazamiento, y se presentan varios picos. En este tramo inicial de la curva el aporte de la fibra no es total, hasta que se presenta el agrietamiento a partir del cual la fibra trabaja en conjunto con el concreto. En esta fase, se observó varios descensos de carga que se debe principalmente al agrietamiento del concreto, sin embargo, hay una recuperación en todos los casos hasta alcanzar un valor de carga máxima, a partir del cual se presenta un descenso gradual en el post-agrietamiento. La prueba finaliza al alcanzar un desplazamiento mínimo de 25 mm. La figura 4 muestra que el comportamiento post-agrietamiento es muy similar para ambos paneles, asimismo, los valores de carga máxima son bastante parecidas; por lo que se estima que la absorción de energía presente valores semejantes.



Panel 1 – PCO-1

Panel 2 – PCO-2

Figura 3. Modo de falla típico de los paneles cuadrados ensayados

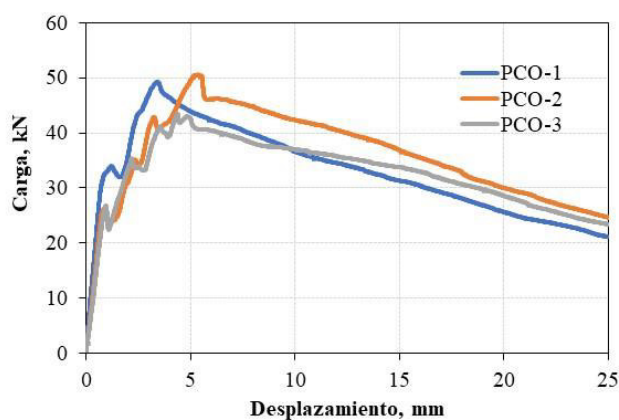


Figura 4. Curvas carga-desplazamiento de los paneles cuadrados ensayados

La tenacidad se determinó como el área bajo la curva carga-desplazamiento entre el origen y el desplazamiento central de 25 mm, como lo especifica la EN 14488-5. Los resultados se muestran en la tabla 1. Los resultados muestran que la tenacidad (absorción de energía) promedio de los paneles ensayados es de 843, con un coeficiente de variación de 5.1%. La repetitividad de los resultados es bastante aceptable (C. V. de 5.3%).

Tabla 1. Resultados de tenacidad, $T_{\delta_{25\text{mm}}}$

Tabla 1. Resultados de tenacidad, $T_{\delta_{25\text{mm}}}$

ID	Panel	U	Tenacidad	Promedio
$T_{\delta_{25\text{ mm}}}$	PCO-1	Joules	820.83	$T_{\text{prom}} = 843.14 \text{ J}$
$T_{\delta_{25\text{ mm}}}$	PCO-2	Joules	894.29	C.V. = 5.27%
$T_{\delta_{25\text{ mm}}}$	PCO-3	Joules	814.31	

4. ENSAYO DE PANEL CIRCULAR – ASTM C1550

Las pruebas de absorción de energía en panel de sección circular de $75 e \times 800 \phi$ mm, se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C1550. La prueba permite caracterizar el comportamiento de flexión del concreto expresado como absorción de energía en el rango de post-agrietamiento.

Para la realización de las pruebas se dispone de un dispositivo de montaje para los paneles que cumple con las especificaciones de la ASTM C1550. El dispositivo está conformado por una placa circular sobre el cual se colocan tres puntos de apoyo diametralmente equidistantes. De acuerdo con la ASTM C1550, estos tres puntos de apoyo se colocan simétricamente circunscritos en un círculo de 750 mm de diámetro, y deben resistir la aplicación de una carga vertical de 100 kN en el centro del panel y ser lo suficientemente rígido para que no se presenten desplazamientos inadmisibles durante la prueba. Estos apoyos están conformados por unas bases piramidales de acero con dispositivos en los vértices que hacen de rotula y permiten el libre giro de la placa durante la prueba.

El panel se apoya en los tres pivotes dispuestos simétricamente y se aplica una carga puntual sobre el centro del panel, como se muestra en la figura 5. La carga se aplica en la cara enrasada, estando la cara moldeada del panel apoyada sobre los tres pivotes. Durante la prueba se registra la carga y desplazamiento de manera continua y se obtiene la curva carga-desplazamiento a partir del cual se puede obtener la absorción de energía.

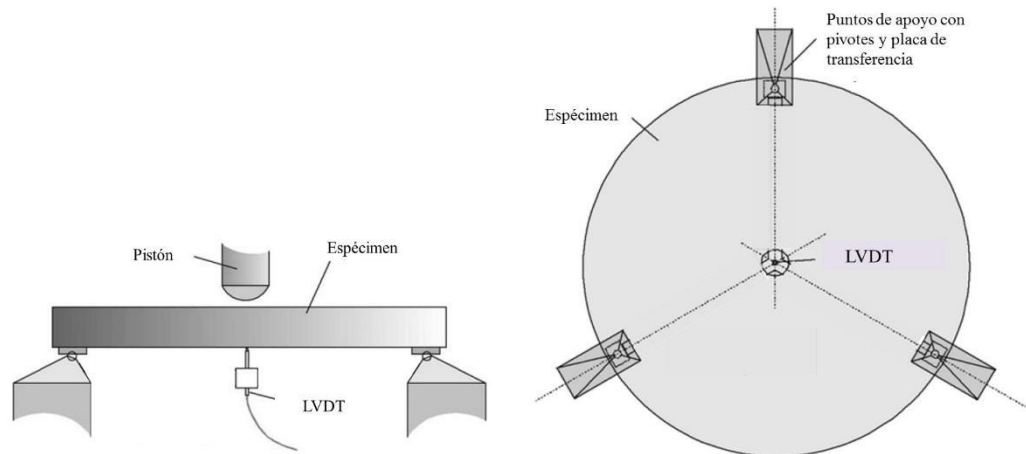


Figura 5. Esquema de configuración del ensayo de panel, según la ASTM C1550

La información de la respuesta completa carga-desplazamiento del ensayo ASTM C1550, también requiere de un equipo de prueba muy rígido y un sistema de control que permita obtener información del post-pico (post-agrietamiento), por lo cual, se empleó el mismo equipo ensayo del panel cuadrado. La velocidad de desplazamiento aplicada fue de 4 mm/min, como lo establece la ASTM C1550. La prueba finaliza cuando se alcanza, como mínimo, un desplazamiento de 40 mm. La instrumentación se hizo mediante un transductor de desplazamiento tipo LVDT de 100 mm de rango, que se coloca al centro de la parte inferior del panel. La absorción de energía, calculada como el área bajo la curva carga-desplazamiento se determina para 5, 10, 20 y 40 mm de desplazamiento, como lo especifica la ASTM C1550.

Los paneles ensayados con carga central puntual fallaron típicamente formando tres fisuras radiales que empiezan en el centro del panel y dividen el espécimen en tres secciones, como se muestra en la figura 6. El modo de falla fue gradual, debido a la presencia de las fibras en la matriz de concreto, a diferencia del ensayo de paneles sin fibra, en donde de experiencias previas se ha observado que la falla es repentina.

De acuerdo con la ASTM C1550, un ensayo exitoso implica un modo de falla que incluya al menos tres grietas radiales. Ocasionalmente, los especímenes presentan un modo de falla que implica una sola fisura, los cuales se caracterizan por presentar una baja absorción de energía. El resultado de esta prueba deber ser descartada y solo se deben considerar el resultado de dos ensayos que presenten modo de falla que incluya tres grietas radiales. En este estudio los tres paneles presentaron tres fisuras radiales.

La figura 7 muestra las curvas carga-desplazamiento de los paneles ensayados y la figura 3.13, el conjunto de ellas. Las curvas carga-desplazamiento presentan un tramo inicial ascendente donde la carga asciende gradualmente con pequeños incrementos de desplazamiento. En este tramo inicial lineal la carga es soportada por el concreto y el aporte de la fibra es mínimo o nulo. En esta primera fase, la curva alcanza un pico máximo (carga máxima), y enseguida se inicia el proceso de agrietamiento del concreto y la carga se transmite a las fibras, hasta que finalmente absorben toda la carga y las fibras trabajan en conjunto con el concreto. La fase de post-agrietamiento se caracteriza por el descenso gradual de la carga y desplazamiento. Los tres paneles presentan capacidades residuales similares.

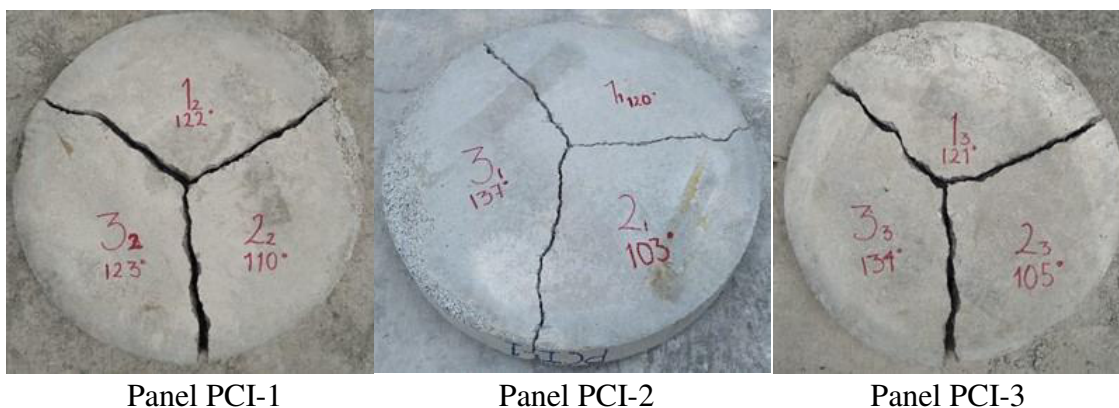


Figura 6. Modo de falla de paneles circulares

La tenacidad se determinó como el área bajo la curva carga-desplazamiento entre el origen y el desplazamiento central especificada en la ASTM C1550. Los resultados se muestran en la tabla 2. La absorción de energía se determinó como el área bajo la curva carga-desplazamiento entre el origen y el desplazamiento central especificada en la ASTM C1550. Los resultados se muestran en la tabla 2. La absorción de energía promedio para los paneles ensayados es de 311 Joules para un desplazamiento de 40 mm, con un coeficiente de variación de 19.7%.

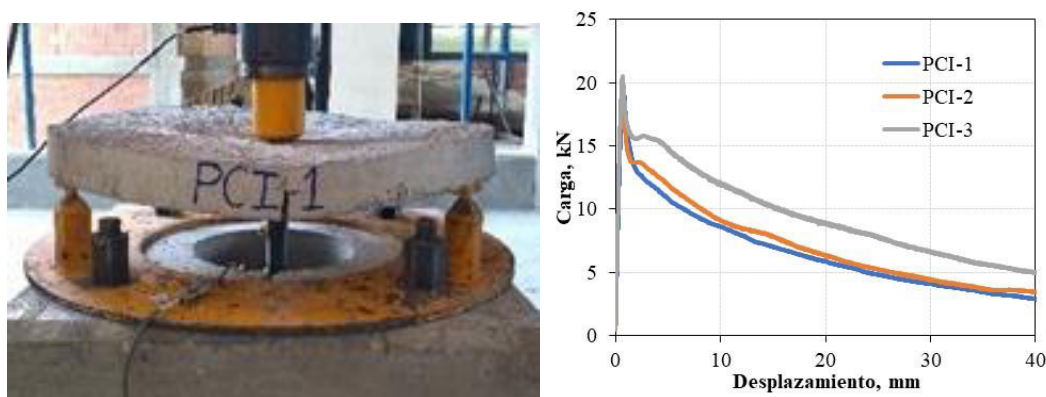


Figura 7. Ensayo de panel de sección circular, ASTM C1550

Tabla 2. Resultados de tenacidad, $T_{\delta 5\text{mm}}$, $T_{\delta 10\text{mm}}$, $T_{\delta 20\text{mm}}$ y $T_{\delta 40\text{mm}}$

ID	U	$T_{\delta 5\text{ mm}}$	$T_{\delta 10\text{ mm}}$	$T_{\delta 20\text{ mm}}$	$T_{\delta 40\text{ mm}}$
PCI-1	Joules	63.8	111.6	182.4	265.6
PCI-2	Joules	66.7	118.8	196.0	286.9
PCI-3	Joules	77.2	143.3	246.1	380.8
T_{prom}	Joules	69.2	124.5	208.2	311.1
CV	%	10.2	13.3	16.1	19.7

5. ENSAYO BARCELONA – UNE 83515

El ensayo Barcelona es un método de ensayo para determinar la resistencia a fisuración, la tenacidad y la resistencia residual del concreto reforzado con fibras mediante un ensayo de doble punzonamiento. Es aplicable a probetas cilíndricas de concreto, moldeadas o extraídas de una estructura, de altura aproximadamente igual a su diámetro. Los elementos indispensables para la aplicación de este método de prueba son: la cadena circunferencial con extensómetro, discos de carga (punzones) y discos de montaje. Las probetas de ensayo pueden obtenerse de moldeo directo de moldes cilíndricos de $h 150 \times \phi 150$ mm, de moldes cilíndricos de $h 150 \times \phi 300$ mm y corte posterior para obtener $h/\phi = 1$, o de extracción de testigos de $\phi 150$ mm de estructuras reales, que es una ventaja del método cuando se requiere evaluar el desempeño del concreto colocado en obra. La prueba se realiza de acuerdo con la norma UNE 83515. La figura 8 muestra un esquema de la configuración del ensayo Barcelona. La carga se debe aplicar de forma uniforme con una velocidad de descenso del pistón de la prensa de 0.5 ± 0.05 mm/min durante todo el ensayo. Éste se considera finalizado cuando el desplazamiento circunferencial total alcance como mínimo los 6 mm.

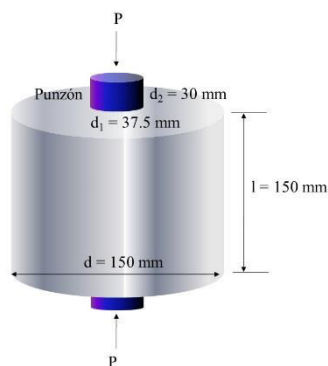


Figura 8 Configuración del ensayo Barcelona – UNE 83515

Para la realización de este ensayo se llevó a cabo el muestreo de artesa de madera de $650 B \times 350 b \times 150 h$ mm, de donde fueron extraídos 4 testigos. Para la extracción de testigos se usó una extractora de corazones, como la que se muestra en la figura 9. Para facilitar la extracción la extractora se dispuso sobre una base perpendicular nivelada para asegurar la verticalidad de la extracción. La carga se aplicó sobre la cara enrasada.



Figura 9. Extracción de testigos para Ensayo Barcelona.

El ensayo se realizó de acuerdo con la UNE 83515, en cilindro de $150\text{ h} \times 150\text{ } \phi\text{ mm}$, para caracterizar la tenacidad expresado como absorción de energía en el rango de post-agrietamiento. Se utilizó un equipo MTS con celda de carga con capacidad de 500 kN, La velocidad de desplazamiento del ensayo fue de 0.5 mm/min, y se midió la apertura circunferencial para lo cual se coloca una cadena circunferencial a media altura del cilindro. La prueba finaliza al alcanzar una apertura circunferencial de 6 mm. La figura 10 muestra la configuración del ensayo.



Figura 10 - Ensayo de doble punzonamiento, configuración, UNE 83515

La falla del cilindro del ensayo Barcelona presenta 3-4 grietas que atraviesan toda la altura del cilindro., como se aprecia en la figura 9.



Figura 9 - Modo de falla típico de los cilindros, Ensayo Barcelona.

En la figura 11 se presentan las curvas carga-desplazamiento circunferencial de los cilindros ensayados. Las curvas presentan un desplazamiento casi nulo desde el inicio de carga hasta alcanzar la carga máxima. Al llegar a la carga máxima se presentan las primeras fisuras y el post-

agrietamiento. La carga disminuye hasta una abertura circunferencial determinada y empiezan a trabajar las fibras. La carga se recupera y se presenta el comportamiento residual.

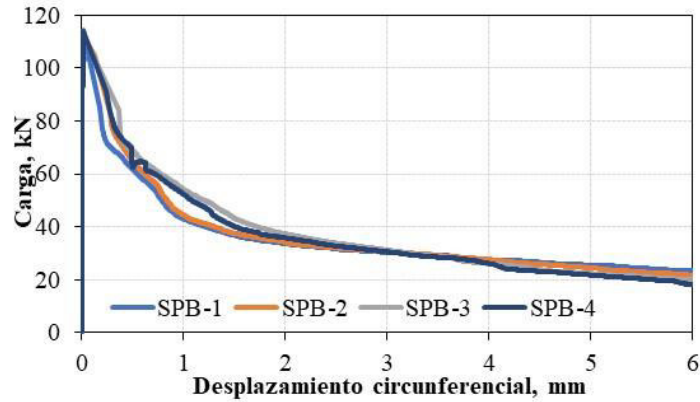


Figura 11. Curvas carga-apertura circunferencial del ensayo Barcelona

La tabla 7 muestra los resultados de tenacidad de los cilindros ensayados. El coeficiente de variación de los resultados varía entre 2.5% y 6.8%.

Tabla 7. Resultados de tenacidad, $T_{\delta 2\text{mm}}$, $T_{2.5\text{mm}}$, $T_{\delta 4\text{mm}}$ y $T_{\delta 6\text{mm}}$

Tabla 3. Resultados de tenacidad¹

ID	U	BCN-1	BCN-2	BCN-3	BCN-4	Prom	CV %
$T_{ct 2\text{ mm}}$	Joules	102.9	108.9	120.2	115.5	111.9	6.8
$T_{ct 2.5\text{mm}}$	Joules	119.2	125.5	137.9	132.5	128.8	6.3
$T_{ct 4\text{ mm}}$	Joules	163.8	170.2	182.8	177.2	173.5	4.8
$T_{ct 6\text{ mm}}$	Joules	214.7	219.1	227.9	220.5	220.5	2.5

6. CONCLUSIONES

El concreto reforzado con fibras es una tecnología que durante los últimos años se utiliza con bastante frecuencia en la industria de la construcción, por lo tanto, es importante evaluar su desempeño en obra. Este trabajo presentó una aplicación de los métodos actuales para evaluar el desempeño del concreto lanzado reforzado con fibras. Se realizaron muestreos y ensayos para determinar la capacidad de absorción de energía del concreto de revestimiento del túnel de la ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México. Se fabricaron en obra tres tipos de muestras: panel circular, panel cuadrado y artesas para obtener cilindros para el ensayo Barcelona. Los muestreos hasta ahora desarrollados en la obra de ampliación de la L12 representan un proyecto piloto, parteaguas para la implementación de un Protocolo de Control que evalúe el desempeño del CLRF y permita conocer los diferentes escenarios, facilidades, dificultades y otros aspectos que se presentan en obra durante el desarrollo de los muestreos, resultado de ensayos y análisis de todos los componentes involucrados.

Como conclusión se puede afirmar que es posible obtener muestras estándar a partir del cual se puede evaluar el desempeño del concreto lanzado reforzado con fibras y su aplicación como método de control de calidad en construcciones subterráneas. Varios de estos métodos se usan actualmente como métodos de prueba para evaluar las propiedades del concreto reforzado con fibras en túneles, el cual se mide por su capacidad residual, mediante la resistencia residual y capacidad de absorción de energía.

Basado en la experiencia ganada en estos trabajos de campo y de investigaciones, el Instituto de Ingeniería de la UNAM plantea proponer dos nuevas normas mexicanas para el control de concreto reforzado con fibras, los cuales impulsarán un nuevo sistema de control de calidad para el concreto reforzado con fibras en obras subterráneas.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Construcción de Obras para el Transporte de la Ciudad de México por las facilidades brindadas durante los trabajos de muestreo de especímenes en el túnel, que permitió la realización de este trabajo.

8. REFERENCIAS

ASTM C1550 (2012), Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)

EN 14488-5 (2007): Test sprayed concrete – Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens

UNE 83515 (2008), “Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Ensayo Barcelona”, Madrid, España, 7 pp.

APÉNDICE C

**LISTADO DE NORMATIVIDAD APLICABLE A CONCRETOS HIDRÁULICOS
ESTRUCTURALES**

ETAPA	NORMATIVIDAD	
	No.	Título
General	NMX-C-155-ONNCCE-2014	Concreto hidráulico- Dosificado en masa, Especificaciones y métodos de ensayo.
	NMX-C-403-ONNCCE-1999	Métodos de prueba para concreto hidráulico para uso estructural.
	Capítulo 4.01.01.002- COVITUR	Especificaciones para el proyecto y Construcción de las Líneas del Metro de la Ciudad de México
Cemento	NMX-C-414-ONNCCE-2017	Cementos hidráulicos. Especificaciones y métodos de prueba.
	NMX-C-049-ONNCCE-2015	Determinación de la finura de cementantes hidráulicos, mediante el tamiz No. 130 M
	NMX-C-056-ONNCCE-2013	La finura de los cementantes hidráulicos. (Método de permeabilidad al aire).
	NMX-C-057-ONNCCE-2015	Cementantes hidráulicos. Determinación de la consistencia normal.
	NMX-C-061-ONNCCE-2015	Determinación de la resistencia a la compresión de los cementantes hidráulicos.
	NMX-C-062-ONNCCE-2015	Método de prueba para determinar la sanidad de cementantes hidráulicos.
	NMX-C-131-ONNCCE-2016	Determinación del análisis químico de cementos hidráulicos.
	NMX-C-151-ONNCCE-2015	Determinación del calor de hidratación de los cementantes hidráulicos.
	ASTM C-150-07	Especificación estándar para cemento portland
	ASTM C-188-17	Método de prueba estándar para la densidad del cemento hidráulico
	Agregado	NMX-C-111-ONNCCE-2018
NMX-C-084-ONNCCE-2018		Agregados para concreto- Partículas más finas que la criba F0.075 (200)- Por medio de lavado-Método de prueba.
NMX-C-030-ONNCCE-2004		Agregados-Muestreo
NMX-C-071-ONNCCE-2004		Agregados-Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales.
NMX-C-072-ONNCCE-1997		Agregados-Determinación de partículas ligeras.
NMX-C-073-ONNCCE-2004		Agregados-Masa volumétrica- Método de prueba.
NMX-C-076-ONNCCE-2019		Agregados-Efecto de las impurezas orgánicas en los agregados finos sobre la resistencia de los morteros. Método de prueba.
NMX-C-077-ONNCCE-1997		Agregados para concreto- Análisis granulométrico-Método de prueba.
NMX-C-164-ONNCCE-2014		Agregados- Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso- Método de prueba.
NMX-C-165-ONNCCE-2014		Agregados- Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino- Método de prueba.
NMX-C-166-ONNCCE-2006		Agregado-Contenido total de humedad por secado- Método de prueba.

**LISTADO DE NORMATIVIDAD APLICABLE A CONCRETOS HIDRÁULICOS
ESTRUCTURALES**

ETAPA	NORMATIVIDAD	
	No.	Título
Agregado	NMX-C-265-ONNCCE-2010	Agregados para concreto-Examen petrográfico- Método de prueba.
	NMX-C-271-ONNCCE-1999	Agregados para concreto-Determinación de la reactividad potencial (método químico).
	ASTM C-33	Especificación estándar para concreto-agregados.
	ASTM C 88-18	Método de prueba estándar para la solidez de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.
	ASTM C 131-14	Método de prueba estándar para resistencia a la degradación de agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles
Agua	NMX-C-122-ONNCCE-2019	Agua para concreto-Especificaciones.
	NMX-AA-130-SCFI-2006	Potabilización del agua para uso y consumo humano - Policloruro de aluminio - Especificaciones y métodos de prueba.
	ASTM C-94	Especificación estándar para concreto premezclado
	ASTM C-1602	Especificación estándar para mezclar agua utilizada en la producción de concreto.
	ACI 318	Requisitos de reglamento para concreto estructural
	ACI 201	Guía para la durabilidad del concreto
Aditivo	NMX-C-083-ONNCCE-2014	Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes. Método de ensayo
	NMX-C-014-ONNCCE	Concreto-Aditivos químicos-Prueba de uniformidad y equivalencia.
	NMX-C-156-ONNCCE-2010	Concreto- Determinación del revenimiento del concreto fresco.
	NMX-C-157-ONNCCE-2006	Concreto-Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión.
	NMX-C-159-ONNCCE-2016	Concreto-Elaboración y curado en el laboratorio de especímenes en el laboratorio.
	NMX-C-162-ONNCCE-2014	Concreto-Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico.
	NMX-C-173-ONNCCE-2010	Concreto-Determinación de la variación en la longitud de especímenes de mortero de cemento y concreto endurecido.
	NMX-C-191-ONNCCE-2015	Concreto-Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga a los tercios del claro.
	NMX-C-255-ONNCCE-2013	Aditivos químicos que reducen la cantidad de agua y/o modifican el tiempo de fraguado del concreto.
	NMX-C-153-ONNCCE	Método de prueba para la determinación del sangrado en pasta de cemento y en mortero.
	NMX-C-200-ONNCCE	Aditivos inclusores de aire para concreto.
	NMX-C-140-ONNCCE	Aditivos expansores del concreto.
	NMX-C-090-ONNCCE	Método de prueba para aditivos expansores y estabilizadores de volumen del concreto.

**LISTADO DE NORMATIVIDAD APLICABLE A CONCRETOS HIDRÁULICOS
ESTRUCTURALES**

ETAPA	NORMATIVIDAD	
	No.	Título
Aditivo	NMX-C-199-ONNCCE-2010	Aditivos para concreto y materiales complementarios- Terminología y clasificación en concreto hidráulico y mortero.
	ASTM C-260	Especificación normalizada de aditivos incorporadores de aire para concreto.
	ASTM C 494/C494M-08A	Especificación normalizada de Aditivos Químicos para Concreto
	ASTM C 1017/C1017M-13E1	Especificación normalizada para Aditivos Químicos para Uso en la Producción de Concreto Fluido
Procedimiento de diseño	ACI 304	Guía para la medición, mezcla, transportación y colocación del concreto.
	ACI 211.1	Práctica estándar para seleccionar proporciones para concreto normal, pesado y de masa.
	ASTM C 512	Método de prueba estándar para la fluencia de hormigón en compresión
Producción	ASTM C-94	Especificación estándar para concreto premezclado
Transporte	NMX-C-296-ONNCCE	Concreto-Determinación del sangrado-Método de prueba
	ACI 304	“Guía para la medición, mezclado, transporte y colocación del concreto”.
	ASTM C 94/C94M-09	Especificación normalizada para Concreto Premezclado
Revenimiento	NMX-C-156-ONNCCE-2010	Concreto- Determinación del revenimiento del concreto fresco.
	ASTM C-143	Método de prueba para el revenimiento de concreto de cemento hidráulico.
Temperatura	NMX-C-435-ONNCCE-2010	Concreto hidráulico- Determinación de la temperatura del concreto fresco.
	ASTM C-1064	Método de ensayo normalizado de temperatura de concreto de cemento hidráulico recién mezclado.
Masa unitaria	NMX-C-162-ONNCCE-2014	Concreto-Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico.
	ASTM C-138	Método de ensayo normalizado de densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) del concreto.
Contenido de aire	NMX-C-157-ONNCCE-2006	Concreto-Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión.
	NMX-C-158-ONNCCE-2006	Concreto-Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método volumétrico.
	NMX-C-162-ONNCCE-2014.	Concreto-Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico.
	ASTM C-138	Método de ensayo normalizado de densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) del concreto.

**LISTADO DE NORMATIVIDAD APLICABLE A CONCRETOS HIDRÁULICOS
ESTRUCTURALES**

ETAPA	NORMATIVIDAD	
	No.	Título
Contenido de aire	ASTM C-173	Método de ensayo normalizado de contenido de aire de concreto recién mezclado por el método volumétrico.
	ASTM C-231	Método de ensayo normalizado de contenido de aire del concreto recién mezclado mediante el método volumétrico.
Fraguado	NMX-C-059-ONNCCE-2017	Determinación del tiempo de fraguado de los cementantes hidráulicos.
	NMX-C-132-ONNCCE-2015	Determinación del fraguado falso del cemento portland. Método de pasta.
	NMX-C-177-ONNCCE-1997	Concreto-Determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto mediante la resistencia a la penetración.
	ASTM C 1398-07	Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio del tiempo de fraguado de morteros de cemento hidráulico que contienen aditivos para hormigón proyectado mediante el uso de agujas Gillmore (Retirado 2010).
Curado	NMXC-304-ONNCCE	Aditivos-Determinación de la retención de agua por medio de compuestos líquidos que forman membrana para el curado del concreto.
	NMXC-309-ONNCCE	Aditivos para concreto-Determinación del factor de reflectancia de membranas de color blanco para el curado de concreto.
	NMXC-081-ONNCCE	Aditivos para concreto-Curado-Compuestos líquidos que forman membranas.
	ASTM C-171	Materiales laminares para curado de concreto.
	ASTM C-156	Determinación de la humedad.
	ASTM D-2103	Determinación del espesor de materiales laminares.
	ASTM D-829	Determinación de la resistencia a la tensión en el papel impermeable.
	ASTM D-882	Determinación de la resistencia a la tensión en el papel impermeable.
ACI 308	“Guía para el curado del concreto”	
Muestreo y pruebas	NMX-C-083-ONNCCE-2014	Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes. Método de ensayo
	NMX-C-109-ONNCCE-2013	Cabeceo de especímenes
	NMX-C-159-ONNCCE-2016	Elaboración y curado de especímenes de ensayo.
	NMX-C-161-ONNCCE-2013	Concreto fresco-Muestreo
	NMX-C-169-ONNCCE-2009	Extracción de especímenes cilíndricos o prismáticos de concreto hidráulico endurecido.
	NMX-C-191-ONNCCE-2015	Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.
	NMX-C-219-ONNCCE-2005	Resistencia a la compresión a edades tempranas y predicción de la misma a edades posteriores- Métodos de prueba.

**LISTADO DE NORMATIVIDAD APLICABLE A CONCRETOS HIDRÁULICOS
ESTRUCTURALES**

ETAPA	NORMATIVIDAD	
	No.	Título
Muestreo y pruebas	NMX-C-236-ONNCCE-2015	Práctica para examinar y muestrear el concreto endurecido en el sitio de colado.
	NMX-C-128-ONNCCE-2013	Concreto sometido a compresión- Determinación del Módulo de elasticidad estático y relación de Poisson.
	ASTM C-469	Método de prueba estándar para módulo de elasticidad estática y relación de Poisson del concreto en compresión
	ASTM C 823/C823M-07	Práctica estándar para el examen y muestreo de concreto endurecido en construcciones.
	ACI 214 R-11	Guía para la evaluación de resultados de ensayos de resistencia del concreto.
	ACI 224	Causas, evaluación y reparación de fisuras en estructuras de concreto.
Durabilidad	NMX-C-520-ONNCCE-2018.	“Inspección detallada de daños en estructuras de concreto hidráulico con criterios de durabilidad- Procedimientos.
	ACI 201	“Guía para la durabilidad del concreto”
Calidad	N-CMT-2-02-005/04	Calidad del Concreto Hidráulico
	M-CAL-1-03/03	Análisis estadísticos de Control de Calidad
	N-CAL-1-01/00	Ejecución del Control de Calidad Durante la Construcción y/o Conservación
	N-CAL-1-01/05	Ejecución del Control de Calidad Durante la Construcción y/o Conservación
	M-CAL-1-02/01	Criterios Estadísticos de Muestreo

CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS

<i>ETAPA</i>	<i>NORMATIVIDAD</i>	
	<i>No.</i>	<i>Título</i>
General	ACI 506.5R	Guía para especificar concreto lanzado subterráneo
Componentes individuales	ACI 544.1R-7	Reporte de concreto lanzado con fibras. CRFA
	ACI 506.2R-6	Especificación de materiales, dosificación y aplicación concreto lanzado.
	ASTM C-1141	Especificación estándar para aditivos para concreto lanzado.
	ASTM C-1116	Especificación para concreto reforzado con fibras y concreto lanzado.
	ASTM C-1436	Especificación Estándar para Materiales para Concreto lanzado.
Mezcla	ASTM C-138	Método de ensayo normalizado de densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) del concreto.
	ASTM C-173	Método de ensayo normalizado de contenido de aire de concreto recién mezclado por el método volumétrico.
	ASTM C-231	Método de ensayo normalizado de contenido de aire del concreto recién mezclado mediante el método volumétrico.
	ACI 544.4R	Consideraciones de diseño para concreto reforzado con fibras de acero.
	ACI 506.4R	Guía para la evaluación del concreto lanzado.
	ASTM C 1398-07	Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio del tiempo de fraguado de morteros de cemento hidráulico que contienen aditivos para hormigón proyectado mediante el uso de agujas Gillmore (Retirado 2010).
Colocación	ACI 506.2R	Especificación de materiales, dosificación y aplicación concreto lanzado.
	ACI 544.3R	Guía para especificar, dosificar, mezclar, colocar y terminar el concreto reforzado con fibras de acero.
	ACI 506.3R	Guía para la certificación de lanzadores de concreto lanzado.
	ACI CP60	Libro de trabajo para la certificación ACI de lanzadores de concreto lanzado.
	ACI C 660	Políticas de certificación para lanzadores de concreto lanzado y lanzadores de concreto lanzado en entrenamiento.
Curado	ACI 506.2R	Especificación de materiales, dosificación y aplicación concreto lanzado.

CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS

<i>ETAPA</i>	<i>NORMATIVIDAD</i>	
	<i>No.</i>	<i>Título</i>
Contenido de fibra	UNE-EN- 14488-7	Ensayos de concreto lanzado. Parte 7: Contenido de fibras del concreto lanzado con fibras
Absorción de energía	EN 14488-5	Ensayos de concreto lanzado. Parte 5: Determinación de la capacidad de absorción de energía en probetas planas reforzadas con fibras.
	UNE 83515	Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona.
	ASTM C 1550	Método de prueba estándar para la resistencia a la flexión del concreto reforzado con fibra (usando un panel redondo con carga central)
Propiedades	ACI 544.2R	Medición de propiedades del concreto reforzado con fibras.
Calidad	N-CTR-CAR-1-05-006/00	Concreto Lanzado en Túneles

APÉNDICE D

PROPUESTA DE NORMA

MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN
DE ENERGÍA EN PANELES CUADRADOS DE CONCRETO REFORZADO CON
FIBRAS

Propuesta de norma

Carlos M. Aire U.*

Lilia Aguilar C.**

**PhD, Investigador del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.*

**Estudiante de Maestría del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México*

PRÓLOGO

El presente “Método de Prueba para Determinar la Capacidad de Absorción de Energía en Paneles Cuadrados de Concreto Reforzado con Fibras”, es una propuesta de Norma que ha sido planeada a raíz de la aplicación del tema de tesis en un caso práctico, con la intención de ser normalizado en el País para su aplicación indispensable como medio de control de calidad en el sector de la construcción donde se utilicen Concretos Lanzados.

Propuesta de norma

INDICE DE CONTENIDO

1.	Alcance.....	1
2.	Documentos de referencia.....	1
3.	Terminología.....	1
3.1.	Deflexión central.....	1
3.2.	Capacidad de deflexión.....	1
3.3.	Sistema de carga.....	1
3.4.	Tenacidad.....	1
4.	Resumen del método de prueba.....	2
5.	Equipo.....	2
5.1.	Máquina de ensayo.....	2
5.2.	Dispositivo de apoyo.....	2
5.3.	Equipo de medición de desplazamiento.....	3
5.4.	Sistema de registro de datos.....	3
5.5.	Dispositivo de aplicación de fuerza (Pistón y placa).....	3
6.	Recopilación de material (muestreo).....	4
6.1.	Moldes.....	4
6.2.	Especímenes.....	5
7.	Preparación de la muestra de ensayo.....	6
8.	Procedimiento.....	6
9.	Expresión de resultados.....	7
10.	Reporte.....	8

MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN PANELES CUADRADOS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

1. Alcance

Esta propuesta de Norma tiene como finalidad ser aplicada como un método de control de calidad en los parámetros de diseño para evaluar el desempeño en términos de absorción de energía de los Concretos Reforzados con Fibras (CRF) con fines estructurales, usados en el sector de la Construcción.

Se evalúa la absorción de energía (post-agrietamiento) en un desplazamiento específico a partir del área bajo la curva carga-desplazamiento en un Panel Cuadrado apoyado en una placa cuadrada con aplicación de carga puntual al centro de la cara superior, para el ensayo se utiliza un equipo de comando servo-controlado de ciclo cerrado.

2. Documentos de referencia

- NMX-C-159-ONNCCE-2016 Industria de la construcción – Concreto – Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.
- NMX-C-161-ONNCCE-2013 Industria de la construcción – Concreto Fresco – Muestreo.

3. Terminología

3.1. Deflexión central

Es el desplazamiento vertical al centro del panel, medido con relación al plano definido por el bastidor metálico que lo soporta. Este desplazamiento excluye las deformaciones ajenas relacionadas con el sistema de cargas y de apoyos, así como los desplazamientos del panel que se generen entre los apoyos.

relativa

3.2. Capacidad de deflexión

Es una medida de la tendencia de una estructura a flexionarse bajo una carga, inversamente proporcional a la rigidez, o equivalente a la deflexión dividida entre la carga correspondiente.

3.3. Sistema de carga

Conjunto de partes que integran la máquina de ensayo, conformada por una prensa con capacidad para 50 ton. que aplique carga al espécimen para generar un desplazamiento constante y controlado durante un ensayo mecánico.

3.4. Tenacidad

MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN PANELES CUADRADOS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

Es la energía absorbida por el espécimen, equivalente al área bajo la curva carga-desplazamiento desde el inicio de la carga hasta la deflexión central especificada.

4. Resumen del método de prueba

La absorción de energía o tenacidad es la propiedad más significativa del Concreto Reforzado con Fibra (CRF). Resulta indispensable y necesario que, durante la aplicación de esta tecnología se cuenten con parámetros que puedan caracterizar y evaluar adecuadamente la capacidad del concreto (absorción de energía) ante un estado de agrietamiento por parte del núcleo de concreto de una probeta de sección cuadrada de 600 mm x 600 mm x 100 mm.

Este método proporciona un procedimiento para determinar la capacidad de absorción de energía en un Panel Cuadrado.

5. Equipo

5.1. Máquina de ensayo

Para este ensayo se debe utilizar una máquina con equipo de comando servo-controlado que cuente con un ciclo electrónico de retroalimentación que utilice la deformación medida del actuador de carga y/o el desplazamiento de un transductor. Para evitar un comportamiento inestable después del agrietamiento, la rigidez de la máquina de ensayo debe exceder la rigidez del espécimen; lo mismo aplica al marco de carga, la celda de carga (si se utiliza) y los accesorios de apoyo. No deben utilizarse máquinas de ensayo con carga controlada que contengan válvulas hidráulicas o mecanismos de atornillado sin ciclo electrónico de retroalimentación para controlar automáticamente la tasa de incremento del desplazamiento. El dispositivo de carga debe tener una rigidez suficiente de al menos, 200 kN/mm.

5.2. Dispositivo de apoyo

Consiste en un bastidor metálico cuadrado de 20 mm (± 1) de espesor y 500 mm (± 2) x 500 mm (± 2) de dimensiones internas utilizado como apoyo para recibir el panel cuadrado en la posición de ensayo (véase Figura 1).

MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN PANELES CUADRADOS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

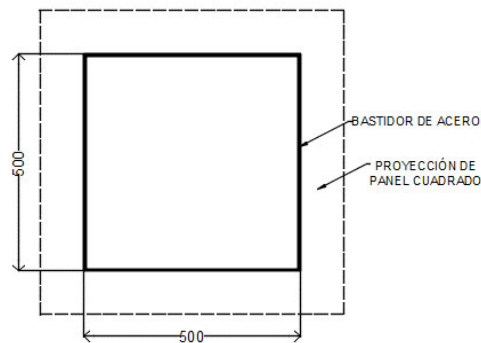


Figura 1 Vista en planta de la configuración de bastidor metálico.

5.3. Equipo de medición de desplazamiento

Se utiliza un transductor electrónico calibrado con precisión de al menos 0.05 mm preferentemente con rango de 100 mm que va fijada a una base magnética. Registra el desplazamiento vertical en el centro de la cara inferior (tensión) del espécimen. Se coloca en la parte inferior central del panel (zona a tensión)

5.4. Sistema de registro de datos

Registra simultáneamente el desplazamiento central de la cara inferior que surge a través de la aplicación de carga en la cara superior del panel a una velocidad controlada en incrementos de no más de 0,05 mm cuando se utiliza un sistema de registro digital y se deben registrar al menos 100 puntos de datos para determinar los parámetros de energía absorbida.

5.5. Dispositivo de aplicación de fuerza (Pistón y placa)

Los dispositivos utilizados para la aplicación de carga durante el desarrollo del ensayo de Panel Cuadrado consisten en un pistón de \varnothing 50 mm y h 200 mm sujeta al actuador y una placa base de sección cuadrada de acero con un espesor de 20 mm (± 1) y una superficie de contacto de 100 mm (± 1) x 100 mm (± 1) alineada al pistón y centrada en la cara superior proyectada de la probeta (véase figura 2).

MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN PANELES CUADRADOS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

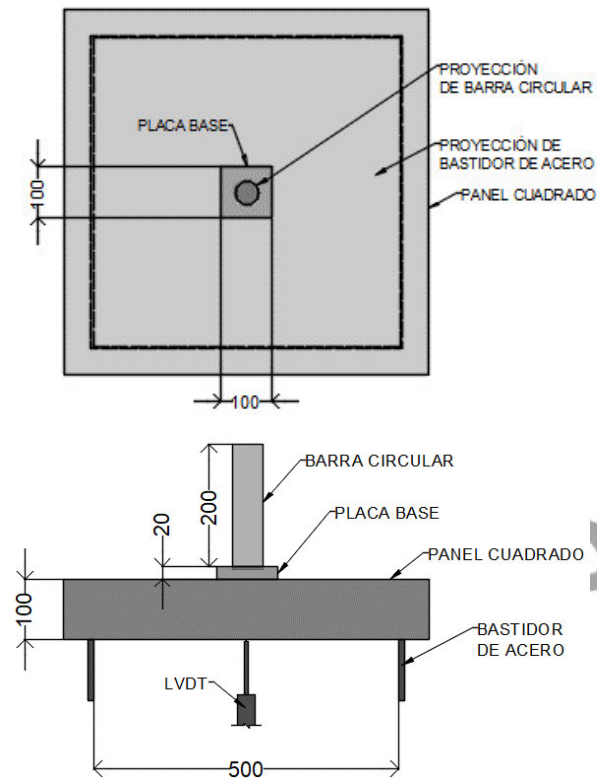


Figura 2 Configuración de equipo para ensayo de Panel Cuadrado.

6. Recopilación de material (muestreo)

6.1. Moldes

Para la fabricación de paneles cuadrados, los moldes deben ser preferentemente de metal no reactivo, rígido para evitar deformaciones y/o distorsiones durante su manejo en los muestreos. Es conveniente que se incorporen aditamentos para desmoldar fácilmente. La dimensión interior del molde debe ser de 600 mm de largo por 600 mm de ancho. La altura de la pared cuadrada debe ser de 100 mm (véase Figura 3).

MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN PANELES CUADRADOS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

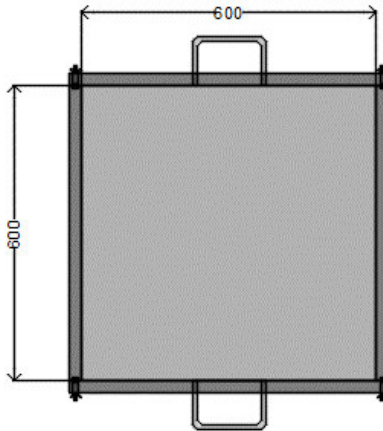


Figura 3 Molde de metal para muestreo de Panel Cuadrado

6.2. Especímenes

Para este ensayo se requiere la elaboración de al menos tres especímenes de sección cuadrada de longitud 600 mm x 600 mm y espesor de 100 mm (con espesor permisible de 100 mm a 105 mm). Se deben obtener en el sitio de la obra.

Para el proceso de muestreo los moldes deben ser colados en el sitio donde se lanza el concreto, para el caso particular de túneles, se debe realizar al pie de la sección a revestir, con la finalidad de incluir las mismas condiciones de trabajo.

El molde se debe colocar cuidando que la inclinación sea semejante a la sección donde se hace el muestreo, en dirección a los lanzados y descansar en el área a revestir, se tendrá que asegurar su fijación al terreno para evitar volteos durante el lanzamiento de concreto y posteriormente colocar el desmoldante cuidando que no se contamine con material suelto producto de la excavación. Se deberá proteger el área contigua al molde para evitar la contaminación del concreto con polvo suelto que se pueda esparcir por la presión de lanzamiento. Se debe cuidar que en cada molde se coloque suficiente concreto para evitar adicionar concreto durante el proceso de enrase.

Para asegurar el espesor deseado, los especímenes deben ser enrasados inmediatamente después de llenar cada molde, con regletas planas y rígidas preferentemente de metal no reactivo. Se podrán desmoldar de manera cuidadosa hasta que se haya alcanzado

MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN PANELES CUADRADOS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

suficiente resistencia para ser transportado al laboratorio, preferentemente veinticuatro horas después de obtener las muestras en campo.

Si se requiere que los especímenes se ensayen con la condición de humedad del curado, el ensayo debe realizarse dentro de los primeros 15 min después de remover los especímenes del ambiente de curado. En este lapso, mantener la humedad protegiendo a los especímenes con un textil húmedo hasta el tiempo de ejecución del ensayo. El micro agrietamiento causado por la pérdida de humedad del espécimen puede reducir la resistencia a la flexión y la absorción de energía post-agrietamiento.

7. Preparación de la muestra de ensayo

Previo al proceso de ensayo, los especímenes deben mantenerse en condiciones ambientales que no generen pérdida de humedad que perjudiquen sus propiedades mecánicas. Se debe tener especial cuidado en la manipulación de los especímenes antes y durante los ensayos para evitar daños particulares.

Se deberá tener un registro del peso de cada espécimen y las medidas de 5 (cinco) espesores (a cada 15 cm) y 2 (dos) longitudes (superior e inferior) por cada cara perimetral.

8. Procedimiento

- Previo al montaje del espécimen en el equipo de ensayo, se deberá colocar el transductor de velocidad fijado a una base magnética a la altura conveniente en la parte inferior central del panel (zona a tensión).
- La posición del espécimen en el equipo de ensayo debe conservar la cara enrasada hacia arriba, donde se aplicará la carga y la cara moldeada en la sección inferior, siendo esta última la que debe descansar sobre el bastidor de soporte, mismo que deberá estar debidamente nivelado y centrado respecto al pistón de aplicación de carga y propiamente del espécimen.
- Se deberá colocar la placa base sobre la cara enrasada del espécimen, cuidando siempre que se mantenga centrado respecto al pistón y el panel cuadrado.
- Operar el equipo de ensayo por control de desplazamiento de tal manera que el pistón (ubicado en el centro del espécimen). avance a una velocidad constante de 1

MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN PANELES CUADRADOS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

mm/min \pm 1 mm/min hasta llegar a un desplazamiento central de por lo menos 25 mm. El ensayo puede llevarse a un desplazamiento central mayor a 25 mm si se desea evaluar el comportamiento a niveles más altos de deformación.

9. Expresión de resultados

A partir de la información procesada por el equipo que registra los datos de desplazamiento y carga en un plano XY, respectivamente, se puede obtener la curva carga-desplazamiento (ver Figura 4).

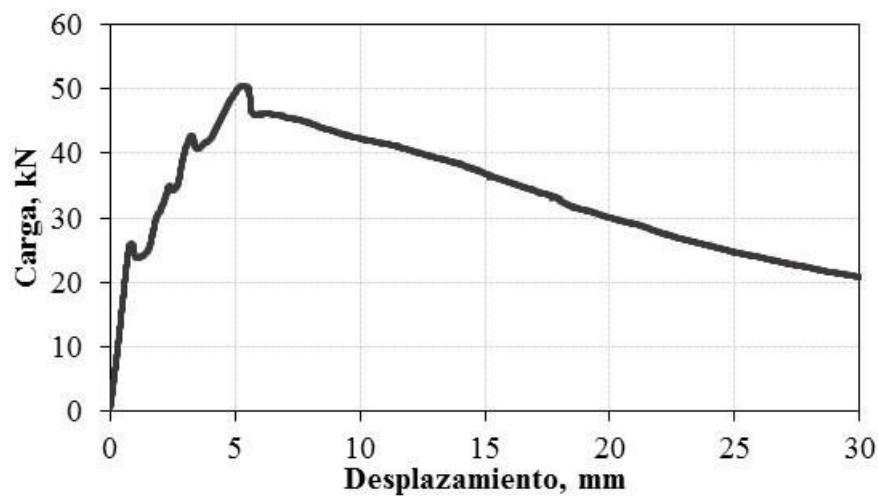
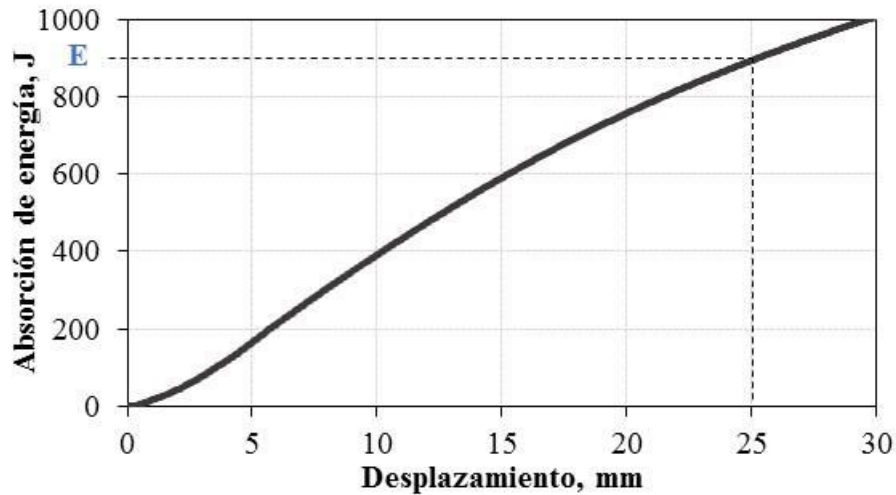


Figura 4 Ejemplo de curva carga - desplazamiento

De la gráfica conformada por la carga vs desplazamiento, se calcula el área bajo la curva, entre 0 mm y 25 mm, que representa la capacidad de absorción de energía en joules en el eje de las ordenadas, en función del desplazamiento en el eje de las abscisas como se muestra en la Figura 5.

MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN PANELES CUADRADOS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS



E Capacidad de absorción de energía

Figura 5 Ejemplo de curva energía - flecha

10. Reporte

El informe del ensayo debe contener la siguiente información:

- Tipo de espécimen: concreto industrializado o concreto reforzado con fibras.
- Identificación del espécimen;
- Edad del espécimen al momento del ensayo;
- Especificaciones del concreto: resistencia f'_c , tipo de material cementante, clase de agregados, rel. A/C, rel. G/A, TMA;
- Tipo de fibra y dosis utilizada;
- Espesor promedio del espécimen con una aproximación de 1mm y una desviación estándar con una aproximación de 1 mm;
- Longitud promedio del espécimen, por cada cara perimetral, con una aproximación de 1 mm.
- Número y posición de grietas que ocurrieron en el espécimen.

MÉTODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN PANELES CUADRADOS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

- Carga pico registrada y carga pico corregida, valores redondeados a decenas de Newtons, N;
- Absorción de energía al desplazamiento central especificado antes y después de la corrección, valores redondeados a la unidad de Joule, J;
- Descripción del curado y condiciones de humedad del espécimen al momento del ensayo; y
- Cualquier defecto del espécimen antes del ensayo y anomalías en el comportamiento de este durante el ensayo.

Propuesta de norma