

---

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA**



**COMPÓSITO DE CEMENTO MECANO-ACTIVADO PARA  
ELABORACIÓN DE CONCRETO RESISTENTE A LA NORMA UL-  
752 (NIVEL X)**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA

PRESENTA

**C. CAP. 1/o. I.C.**

**ORLANDO GUTIÉRREZ OBESO**

DIRECTOR DE TESIS

**DR. SEBASTIÁN DÍAZ DE LA TORRE**



SIP-14

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*ACTA DE REVISIÓN DE TESIS*

En la Ciudad de México siendo las 09:00 horas del día 19 del mes de enero del 2017 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIITEC para examinar la tesis titulada:

**COMPÓSITO DE CEMENTO MECANO ACTIVADO PARA ELABORACIÓN DE CONCRETO RESISTENTE A LA NORMA UL 752 (NIVEL "X").**

Presentada por el alumno:

Gutiérrez Obeso  
 Apellido paterno Apellido materno

Nombre(s)

Orlando

Con registro: 

A	1	5	0	3	0	8
---	---	---	---	---	---	---


aspirante de:

Maestría en Tecnología Avanzada.


Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

  
 DR. SEBASTIAN DÍAZ DE LA TORRE

  
 DR. DAVID JARAMILLO VIGUERAS

  
 DR. FERNANDO JUÁREZ LÓPEZ

  
 DR. RICARDO AMBRIZ ROJAS

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
 DR. JOSÉ CLAUDIO CENOBIO MÉNDEZ GARCÍA



SEP  
 INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
 CENTRO DE INVESTIGACIÓN E  
 INNOVACIÓN TECNOLÓGICA  
 DIRECCIÓN



## CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 18 de enero de 2017, quien suscribe el Cap. 1/o. I.C. **Orlando Gutiérrez Obeso**, alumno del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro A-150308, adscrito a CIITEC-AZCAPOTZALCO, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. **Sebastián Díaz de la Torre** y cede los derechos del trabajo intitulado: **COMPÓSITO DE CEMENTO MECANO ACTIVADO PARA ELABORACIÓN DE CONCRETO RESISTENTE A LA NORMA UL-752 (NIVEL X)**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: [sediazt@ipn.mx](mailto:sediazt@ipn.mx) si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA

C. CAP. 1/o. I.C. **ORLANDO GUTIÉRREZ OBESO**

## Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACT .....	10
CAPÍTULO 1. ....	11
INTRODUCCIÓN .....	12
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	13
1.2 HIPÓTESIS.....	13
2 OBJETIVO GENERAL.....	13
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	14
2.1 GENERALIDADES DEL CEMENTO Y CONCRETO .....	15
2.1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO.....	16
2.1.2 PROPIEDADES DEL CEMENTO PÓRTLAND ORDINARIO (CPC) .....	18
2.1.3 HIDRATACIÓN DEL CEMENTO .....	19
2.2 HIDRATACIÓN DE COMPUESTOS PUROS DEL CEMENTO PORTLAND .....	19
2.3 CEMENTO PÓRTLAND ULTRAFINO .....	19
2.4 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA (DTP) .....	21
2.5 DETERMINACIÓN DEL ÁREA SUPERFICIAL (BLAINE) .....	22
2.6 CALOR DE HIDRATACIÓN.....	23
2.7 PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	24
2.7 FIBRA COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL PARA EL REFUERZO DEL CONCRETO .....	26
2.7.1 RESEÑA HISTÓRICA .....	26
2.7.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ACTUALES FIBRAS EN EL MERCADO EN FUNCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMA .....	26
2.7.3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL HORMIGÓN FIBROREFORZADO .....	29
2.7.3.1 COMPRESIÓN .....	29
2.7.3.2 IMPACTO .....	30
2.8 SISMO-RESISTENCIA .....	31
2.9 FUNDAMENTOS BALÍSTICOS .....	35
2.9.1 BALÍSTICA TERMINAL .....	35
2.9.2 FRAGMENTACIÓN .....	35
2.9.3 HISTORIA DEL CAL. 50 .....	36

2.9.4 DATOS CARACTERÍSTICOS DEL CAL. 50.....	38
2.10 ESTADO DEL ARTE EN MATERIA DE COMPÓSITOS BLINDADOS .....	40
CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	42
3.1 INFRAESTRUCTURA (APARATOS) DE LABORATORIO UTILIZADOS .....	43
3.1.1 CARACTERIZACIÓN Y OBTENCIÓN DE CONCRETO CPC ULTRAFINO.....	43
3.1.2 PRUEBAS BALÍSTICAS.....	48
3.2 MARCHA EXPERIMENTAL PARA PREPARACIÓN DE MEZCLAS COMPÓSITOS.....	51
3.3 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES .....	53
3.4 PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	73
3.5 REALIZACIÓN DE PRUEBAS BALÍSTICAS.....	77
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	82
4.1 CARACTERIZACIÓN.....	83
CONCLUSIONES.....	89
REFERENCIAS .....	90
ANEXO A .....	94
ANEXO B .....	101
ANEXO C .....	108
ANEXO D.....	112
ANEXO E.....	113

## ÍNDICE DE FIGURAS

1 Distribución del tamaño de partícula.....	19
2 Aparato de Vicat con aguja de 10 mm.....	21
3 Mesa de fluidez.....	23
4 Arena Sílica graduada A.S.T.M.....	23
5 Velocidad de generación de calor durante la hidratación del silicato tricálcico.....	26
6 Esquema de la hidratación de una partícula de cemento.....	27
7 Velocidad de generación de calor durante la hidratación del aluminato tricálcico.....	28
8 Curva calorimétrica típica de hidratación del cemento Portland.....	30
9 Calibres utilizados por Fuerzas Armadas.....	39
10 Molino de alta energía.....	41
11 Equipo Simpatíc´s Laser Diffraction.....	42
12 Probeta de compuesto de concreto.....	39
13 Difractogramas comparativos entre el cemento utilizado y clínker.....	42
14 Micrografías obtenidas por MEB para CPC HEM.....	43
15 Patrón de difracción de rayos x del cemento Portland CPC.....	49
16 Comparativa de difracción de rayos x.....	50
17 Comparación de los patrones de difracción de rayos x del cemento CPC.....	51
18 Patrón de difracción de rayos x del cemento CPC molido 720 min. por HME.....	52
19 Curvas de hidratación de CPC después de aplicar HME.....	53
20 Distribución de tamaño de partícula para un CPC sometido a HME.....	54
21 Probeta CBHME 01 sin recubrimiento polimérico previo impacto balístico.....	56
22 Probeta CBHME 01 sin recubrimiento polimérico post-impacto balístico.....	57
23 Probeta CBPHME 01 con recubrimiento polimérico previo impacto balístico.....	58
24 Probeta CBPHME 01 con recubrimiento polimérico post-impacto balístico.....	59
B1. Difractograma correspondiente a CPC normal.....	73
B2. Difractograma correspondiente a 15 min. de molienda HME.....	73
B3. Difractograma correspondiente a 30 min. de molienda HME.....	74
B4. Difractograma correspondiente a 45 min. de molienda HME.....	74
B5. Difractograma correspondiente a 60 min. de molienda HME.....	75
B6. Difractograma correspondiente a 60 min. de molienda HME.....	75
B7. Difractograma correspondiente a 60 min. de molienda HME.....	76

B8. Difractograma correspondiente a 60 min. de molienda HME.....	76
B9. Difractograma correspondiente a 60 min. de molienda HME.....	77
B10. Difractograma correspondiente a 60 min. de molienda HME.....	77
B11. Difractograma correspondiente a 60 min. de molienda HME.....	78
B12. Difractograma correspondiente a 60 min. de molienda HME.....	78
B13. Difractograma correspondiente a 60 min. de molienda HME.....	79
B14. Difractograma correspondiente a 60 min. de molienda HME.....	79
C1. DTP de CPC molido en HME por 15 min.....	80
C2. DTP de CPC molido en HME por 30 min.....	80
C3. DTP de CPC molido en HME por 45 min.....	81
C4. DTP de CPC molido en HME por 60 min.....	81
C5. DTP de CPC molido en HME por 75 min.....	81
C6. DTP de CPC molido en HME por 90 min.....	82
C7. DTP de CPC molido en HME por 105 min.....	82
C8. DTP de CPC molido en HME por 120 min.....	82
C9. DTP de CPC molido en HME por 135 min.....	83
C10. DTP de CPC molido en HME por 150 min.....	83
C11. DTP de CPC molido en HME por 165 min.....	83
E1. Imagen de prototipo de caseta móvil.....	85
E2. Presentación Srio. Def. Nac.....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

1 Nomenclatura usada en el campo cementero.....	17
2 Composición química general del cemento Portland.....	18
3 Composición química del cemento Portland de acuerdo a sus fases.....	18
4 Distribución del tamaño de partícula.....	19
5 Reacciones químicas de las principales fases del cemento Portland.....	25
6 Principales productos derivados de la reacción química del C3A.....	27
7 Calores de reacción de las principales fases del cemento.....	30
8 Datos representativos del cartucho 12.7 x 99 mm B.P.....	32
9 A) Relación agua/cemento de un concreto $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$ .....	35
10 B) Relación agua/cemento de un concreto $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ .....	36
11 Relación agua cemento de un concreto $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ .....	37
12 Patentes relacionadas al uso de concretos blindados.....	38
13 Materiales seleccionados para llevar a cabo la mezcla de compuesto.....	43
14 Clasificación de muestras y condiciones de molienda del CPC.....	43
15 Área superficial específica mediante Blaine.....	46
16 Distribución del tamaño de partícula (en micras) del cemento CPC refinado.....	54



## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se diseñaron mezclas de cemento Portland compuesto CPC mecano-activado por molienda mecánica de alta energía (high energy milling HEM) con otros ingredientes, tales como: cemento CPC ordinario, arena(s) fina(s), fibras, y aditivos poliméricos, entre otros compuestos para preparar muros compósitos de alto desempeño, capaces de arrestar varios calibres hasta el tipo 50 (típicamente cargado en rifle Barret). El trabajo se enfocó en establecer la optimización de los parámetros de molienda y/o mecano-activación (HEM) del cemento ordinario, así como en la relación de mezclado CPC mecano-activado/CPC ordinario, agua/mezcla de cemento y cemento/aditivo(s). Derivado de la caracterización microestructural realizada por rayos-X del CPC sometido a mecano-activación (HEM hasta 7h) se observó que a medida que se refina el tamaño de partícula del cemento y paralelamente se incrementan tanto el área superficial (Blaine) como su reactividad química, la tendencia a la amorfización del CPC se incrementa, tan sólo al contacto con la humedad del aire. La reactividad química del cemento CPC mecano-activado se deduce del análisis isotérmico realizado, que revela las curvas de hidratación correspondientes.

Siguiendo las normas mexicanas y americanas para pruebas balísticas, que implican la aprobación del muro de concreto con fines de resistencia balística, siempre y cuando éste resista un sólo impacto con el calibre 50 del Barret, se logró desarrollar muros compósitos (de 40 x 40 x 15 cm) con cemento mecano-activado cuyo desempeño resistió hasta seis impactos antes de fallar totalmente. Lo anterior abre un panorama de gran interés comercial, en materia de construcción de edificaciones como barricadas, retenes, edificaciones de alta seguridad como embajadas, consulados, etc., para seguridad ante ataques balísticos.

## ABSTRACT

In the present work, mixtures of Portland cement composite CPC mecano-activated by high energy milling HEM were designed with other ingredients, such as: ordinary CPC cement, fine sand (s), fibers, and polymer additives, among other compounds to prepare high-performance composite walls capable of arresting various calibers up to type 50 (typically loaded on Barret rifle). The work focused on the optimization of grinding and / or mechano-activation parameters (HEM) of ordinary cement, as well as on the mixing ratio CPC mechano-activated / ordinary CPC, water / cement mixture and cement / additive (S). It was observed that as the cement particle size is refined and the surface area (Blaine) as well as its reactivity are increased in parallel with the microstructural characterization performed by X-ray of the CPC subjected to mecano-activation (HEM up to 7h) Chemistry, the tendency to cushion the CPC increases, only on contact with the humidity of the air. The chemical reactivity of the mechanically-activated CPC cement is deduced from the isothermal analysis performed, which reveals the corresponding hydration curves.

Following the Mexican and American standards for ballistic tests, which imply the approval of the concrete wall for ballistic resistance purposes, as long as it resists a single impact with the Barret 50 caliber, it was possible to develop composite walls (40 x 40 x 15 cm) with mechano-activated cement whose performance withstand up to six impacts before completely failing. This opens a panorama of great commercial interest in the construction of buildings such as barricades, checkpoints, high security buildings such as embassies, consulates, etc., for security against ballistic attacks.



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## INTRODUCCIÓN

Desde hace varios sexenios Presidenciales en México, se ha identificado a la seguridad nacional como una prioridad que no puede dejarse de atender. Desafortunadamente lo anterior es consecuencia del incremento en las acciones del narcotráfico y armamento clandestino en que el país ha sido envuelto.

Una de las acciones que el Ejército Mexicano ha emprendido para atacar la situación descrita es la inversión en el desarrollo de tecnología y formación científica de su personal militar. Para lo anterior, se han creado el Centro de Investigación y Desarrollo del Ejército y Fuerza Aérea Mexicano (C.I.D.E.F.A.M.), enfocado al área de materiales, salud, telecomunicaciones y tecnologías de la información, así mismo se han hecho alianzas entre la Secretaría de la Defensa Nacional SEDENA e Instituciones de Educación Superior, a través de convenios de colaboración. Con el objeto de dar solución a los diversos retos que enfrenta nuestro país.

Esta tesis se orienta al campo de los materiales avanzados, específicamente de los concretos de alto desempeño buscando innovar la tecnología de los concretos blindados, como medida urgente para salvar la vida de los seres humanos expuestos a enfrentamientos de arma de fuego de alto poder. Es decir, dotar a las unidades del Ejército Mexicano con la capacidad de repeler una agresión mediante la fortificación de las instalaciones militares existentes y para construcciones futuras.

Actualmente, existe una gran cantidad de trabajos preliminares en este campo de investigación, contándose una multitud de publicaciones y patentes disponibles nacional e internacionalmente. En la SEDENA, específicamente en la Escuela Militar de Ingenieros EMI ubicada en el Campo Militar No. 1-B (Popotla, Cd. Méx.) se comenzó a trabajar en esta línea de investigación y se autorizó al autor de este trabajo a buscar alianza con el CIITEC del IPN para desarrollar paralelamente conocimiento original y un material cementoso de alta resistencia y de fácil colocación en cualquier terreno o vehículo donde se pudiera sucitar un ataque con armas de fuego. Los tipos de materiales desarrollados y patentados con este fin de protección varían en su composición química, tipos de agregados, cantidad y tipo de cemento y aditivos, entre otras variables. Sin embargo, dichos productos resultan por lo general costosos y voluminosos.

Debido al estado actual de estos materiales avanzados en el ámbito económico, como Nación, ser pioneros en la explotación y uso de Concretos de Ultra Alto Desempeño tanto en instalaciones militares como su aplicación en la ingeniería civil es una oportunidad histórica que será irrepetible para México en décadas posteriores.

## 1.1 JUSTIFICACIÓN

Acorde con el Índice Global de Terrorismo 2015 elaborado por el Instituto para la Economía y la Paz, de una lista de 124 naciones analizadas, México se encuentra entre los 50 países más violentos a nivel mundial. En nuestro país el crimen organizado y la violencia con la cual opera son dos amenazas que durante la última década, lejos de aminorarse, se extienden.

Tomando como antecedente un problema real y latente en nuestra nación, enfocar los conocimientos relacionados a materiales avanzados tales como: concretos de alto y ultra alto desempeño, en aplicaciones de uso constructivo como lo puede ser un concreto blindado, brinda la oportunidad de crear una herramienta para el mantenimiento de la paz y la seguridad nacional de los Estados Unidos Mexicanos, pero ante todo, salvar vidas humanas.

## 1.2 HIPÓTESIS

La reactividad química de las partículas del cemento Portland CP se incrementa sustancialmente con la disminución del tamaño de partícula (aumento del área superficial), lo que conlleva a la precipitación acelerada de las fases mineralógicas y microestructurales que ocurren típicamente en el cemento fraguado a tiempos largos (años). Tanto el refinamiento de partícula como la mecano-activación (por la deformación microcristalina de los compuestos) de las partículas del cemento conllevan al endurecimiento del compuesto de cemento, reuniendo con ello las características físico-químicas necesarias en la fabricación de muros compósitos antibalas.

## 2 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar y preparar a nivel laboratorio un compuesto de concreto que resista el impacto del calibre 50 B.P. (BALA PERFORANTE).



## CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

## 2.1 GENERALIDADES DEL CEMENTO Y CONCRETO

El nombre de Cemento Portland se debe a Joseph Aspdin, quien el 21 de octubre de 1824 patentó así el cemento que él producía tratando de aprovechar que en ese tiempo la piedra Portland en Inglaterra tenía una alta reputación por su durabilidad y calidad. Quiso dirigir la atención de la gente en el parecido en color y calidad de su cemento con dicha piedra. [1]

Aspdin usó una caliza dura, tal como la que se empleaba para la reparación de caminos, molida y calcinada, la mezclaba con arcilla y la molía en agua para formar una pasta fina. Luego separaba la pasta en moldes y la calcinaba en un horno similar al usado para la producción de óxido de calcio, hasta que se desprendía el ácido carbónico. El producto era entonces molido a un polvo fino y vendido como cemento Portland.

Ese primer cemento de Aspdin no era otra cosa que un óxido de calcio hidráulico y no tiene nada que ver con el cemento Portland que conocemos hoy en día. Su mineralogía era completamente diferente, así como su actividad hidráulica. Sin lugar a dudas, la patente de Aspdin fue un enlace esencial en el desarrollo que llevó, a través de avances tecnológicos, a los silicatos de calcio que hoy conocemos como cemento Portland.

William, el hijo más joven de Joseph Aspdin, trabajó durante 12 años en la firma de su padre hasta que, probablemente por alguna discusión, se separó de la misma. William empezó una planta de cemento en Rotherhite en el lado sur del Río Támesis en Londres durante el verano de 1843, en la que producía un cemento mejorado. Había encontrado, seguramente en forma accidental, que clinkerizando o sobre cocinando el material, se incrementaba sustancialmente la resistencia de su cemento. De esta manera, se sintetizaron los silicatos de calcio que son los causantes del incremento en resistencia, y que son el preámbulo para el cemento Portland actual.

Así, el primer cemento (proto cemento), producido por Joseph Aspdin, era esencialmente una mezcla calcinada de caliza y arcilla con muy poca evidencia de una interacción  $\text{CaO-SiO}_2$ , debido a que la temperatura de cocimiento era demasiado baja para la síntesis de los compuestos.

El cemento producido por William Aspdin (meso cemento), era un material extremadamente heterogéneo, pero con evidencia clara de la interacción  $\text{CaO-SiO}_2$  (principalmente  $\text{B-2CaO-SiO}_2$  y muy poco de  $\text{3CaO-SiO}_2$ ) y con fases fundidas pobremente definidas. La muestra es producto de un enfriamiento lento debido a la presencia de una solución sólida ternaria de baja temperatura con ocasionales granos de sílice sin reaccionar. [2]

El cemento Portland puede producirse ya sea a través de un proceso seco o húmedo, en donde el proceso seco requiere más energía. En cualquiera de los procesos, se pone en la tierra una fuente de carbonato de calcio y se mezcla con cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y una arcilla o limo que proporcionan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a la mezcla. Debido a la prevalencia de distintos hierros, aluminios, óxidos de calcio y silicatos, se desarrolló un sistema estándar de nomenclatura abreviada. Dicha nomenclatura puede ser encontrada en la tabla 1.

Tabla 1: Nomenclatura taquigráfica para los constituyentes del cemento Portland.

ABREVIACIÓN	COMPUESTO
A	$\text{Al}_2\text{O}_3$
C	$\text{CaO}$
F	$\text{FeO}_3$
H	$\text{H}_2\text{O}$
S	$\text{SiO}$

Dentro de las características principales a alcanzar en la producción de cemento Portland se encuentran la producción de un cemento con costos bajos y que cumpla con ciertas propiedades mínimas, entre ellas, que tenga un área superficial de 300-350  $\text{m}^2/\text{kg}$  (Blaine) y una resistencia a la compresión de 40-50  $\text{N}/\text{mm}^2$  a los 28 días de curado.

Aunque la palabra cemento es de hecho un término genérico que se refiere a cualquier material capaz de aglutinar cosas, desde una perspectiva de materiales el término significa sea cementos hidráulicos, los cuales requieren agua para formar un sólido, o cementos no hidráulicos, los cuales forman sólidos sin necesidad de agua.

El cemento hidráulico más común, el cemento Portland, está hecho de nódulos pulverizantes de silicatos de calcio sinterizados. Debido a que estos silicatos de calcio son abundantes en la caliza, gis, depósitos de concha y esquisto, el cemento Portland es uno de los materiales de construcción más barato disponible. El uso común del cemento Portland es como la matriz de un material para el material de construcción casi ubicuo concreto.

### 2.1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO

La composición química del cemento se puede presentar típicamente de dos maneras: como óxidos o como fases principales presentes.

#### **Composición química del cemento OPC en base a óxidos.**

La composición del cemento expresada en forma de óxidos es principalmente  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  referidos como los óxidos principales y componen el 95% del total. Otros componentes



menores son  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ . En la Tabla 2 se presenta la composición típica de un cemento Portland expresada en función de sus óxidos principales. [2]

Tabla 2. Composición química general del cemento Portland OPC en base a sus óxidos principales.

Óxido	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Wt %	67	22	5	3

### Composición química del cemento Portland en base a sus fases presentes.

El cemento Portland presenta cuatro fases principales:

a. Alita (C3S o  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ).

Es la fase principal, la cual reacciona rápidamente con el agua y es la más importante en cuanto al desarrollo de las propiedades mecánicas alcanzadas hasta los 28 días del fraguado.

b. Belita (C2S o  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ).

Presente principalmente en la forma de polimorfo B. Reacciona más lentamente con el agua y durante los primeros 28 días contribuye poco a la resistencia mecánica pero lo hace sustancialmente en etapas posteriores.

c. Aluminato tricálcico (C3A).

Reacciona rápidamente con el agua y puede causar fraguado rápido indeseable a menos de que se emplee un agente retardante como el yeso ( $\text{Ca}_2\text{SO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

d. Ferro-aluminato tetracálcico (C4AF).

Con relación entre óxido  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$  variable, reacciona con velocidad variable en función de la composición química.

Los silicatos de calcio dominan el fraguado, endurecimiento y las propiedades subsecuentes de la pasta de cemento, mientras que las fases intersticiales (aluminatos) juegan un papel importante en las propiedades reológicas tempranas de la pasta y en la estabilidad dimensional de pastas expuestas a iones sulfato o aquellas tratadas térmicamente.

En la Tabla 3 se muestra la composición química típica de un cemento Portland CPC en base a las fases principales presentes.

Tabla 3. Composición química del cemento Portland CPC de acuerdo a sus fases principales. [2]

<b>Fase</b>	<b>C3S</b>	<b>C2S</b>	<b>C3A</b>	<b>C4AF</b>
<b>Wt %</b>	50-70	15-30	5-10	5-15

### 2.1.2 PROPIEDADES DEL CEMENTO PÓRTLAND ORDINARIO (CPC)

Algunas de las pruebas más importantes que se le practican a un cemento Portland compuesto son la determinación de su distribución de tamaño de partículas, su área superficial, la relación agua/cemento para consistencia normal y para fluidez, los tiempos inicial y final de fraguado, su velocidad de generación de calor, su susceptibilidad de expansión posterior y su resistencia a la compresión.

De las pruebas mencionadas algunas se practican al cemento en polvo, otras al cemento como pasta y otras como mortero.

Al cemento Portland en polvo se le practican generalmente la determinación de distribución de tamaños de partícula y el área superficial específica.

A la pasta de cemento (cemento más agua) se le practica consistencia normal, tiempo de fraguado inicial y final, fraguado temprano, expansión y calor de hidratación.

Las pruebas realizadas a morteros (cemento, arena y agua) son: fluidez del mortero, resistencia a la compresión, contenido de aire y expansión de sulfatos. [2]

### 2.1.3 HIDRATACIÓN DEL CEMENTO

Las reacciones del silicato de calcio suceden en cinco etapas diferentes. La etapa 1 sucede durante los primeros minutos después de que el agua se mezcla con el cemento. Los iones de calcio e hidróxido son liberados del  $C_3S$ , resultando en la generación de calor y un aumento rápido del pH. EL CH y el C-S-H también comienza a cristalizarse en la etapa 1. Después de aproximadamente 15 minutos, entra a un periodo inactivo (etapa 2) durante el cual la reacción se hace lenta. Una cubierta de C-S-H se desarrolla en la superficie del cemento, la cual crea una barrera de difusión para el agua. Mientras el grosor aumenta, la velocidad de reacción se vuelve incrementadamente controlada por la difusión. Después de 2-4 horas se logra una masa crítica de iones y la velocidad de reacción (etapa 3) se acelera. Durante la etapa 3, el  $C_3S$  y el menos reactivo  $C_2S$  se hidratan rápidamente. Después de alrededor de 8 horas, la velocidad de reacción se desacelera y la difusión controla por completo todas las velocidades (etapa 4). Finalmente, una etapa estable (etapa 5) sucede, en la que la hidratación es esencialmente independiente de la temperatura.

## 2.2 HIDRATACIÓN DE COMPUESTOS PUROS DEL CEMENTO PORTLAND

El fraguado y el endurecido del concreto son el resultado de procesos físicos y químicos que tienen lugar entre el cemento y el agua. Para lograr la completa apreciación de las propiedades de los cementos y de los concretos se requiere de un entendimiento adecuado de la química de hidratación de los mismos.

Se han estudiado primero las reacciones de hidratación en los compuestos puros del cemento asumiendo, aunque no es totalmente válido, que la hidratación de cada uno tiene lugar de manera independiente de la presencia de los otros.

## 2.3 CEMENTO PÓRTLAND ULTRAFINO

El Cemento Portland Ultrafino (UCP en inglés) es químicamente igual a un Cemento Pórtland Compuesto (CPC), pero con una distribución de Tamaño de Partícula (DTP) tal que el 95 % es menor a 10 micras, a diferencia del CPC que para el mismo porcentaje del 95 % del material requiere que sea menor a 90 micras.

La activación mecano-química del OPC al refinarlo por medio de molienda de alta energía pretende dotar el cemento Pórtland de nuevas características que lo acerquen más a los cerámicos avanzados, como por ejemplo mejora en sus propiedades mecánicas, mayor vida útil, resistencia a agentes químicos, soportar cambios drásticos de temperatura ambiente, entre otras.

Mientras que en el área de los cerámicos avanzados un polvo altamente refinado y adecuadamente sinterizado-compactado, entre otros factores, conlleva por lo general a una mejora en sus propiedades tradicionales e incluso al desarrollo de otras nuevas, para el caso del cemento, la disminución de tamaño genera problemas de índole diversa según se ha reportado por diferentes autores. [3]

Z. Sekulic [4], reporta que una activación mecánica por molienda del cemento durante 3 o 4 minutos, logra una mayor resistencia a la compresión del producto fraguado. Lo que no menciona en su artículo es que el refinamiento provocó una mejora en la fluidez permitiendo disminuir el volumen de agua añadida y como se sabe, a menor cantidad de agua mayor resistencia alcanzada. Esto quiere decir que el incremento en la resistencia que estos investigadores reportan no puede ser atribuida exclusivamente a la activación mecánica de las partículas refinadas.

Por su parte Shoondeep [3], encontró que un cemento ultrafino (95 % < 10 micras) presenta importantes inconvenientes como son: retrogresión de las resistencias a la compresión, tiempos de fraguado muy cortos y una alta velocidad de generación de calor. Su trabajo se enfocó en determinar cómo contrarrestar estos problemas y poder utilizar el cemento ultrafino principalmente para relleno de fisuras, pero sin tener el objetivo de incrementar su resistencia por compresión.

La literatura siempre indica que la fineza de un cemento no resuelve por si misma todos los problemas que se presentan en la práctica, como son el encogimiento al darse el secado, reducción de la durabilidad del concreto a ciclos de congelamiento – descongelamiento y altas resistencias, entre otros. En particular se sabe que a mayor fineza del cemento se tendrá:

- a) Una mayor reactividad del C3A debido a que ya no será suficiente el sulfato de calcio para contenerlo pudiendo presentarse fraguado rápido, o bien una reducción importante en el tiempo de plasticidad.
- b) A mayor fineza, mayor área superficial específica, por lo tanto se requerirá de mayor cantidad de agua para obtener la fluidez estándar, por consiguiente se deberán esperar resistencias menores y mayor encogimiento por el secado.
- c) La velocidad de generación de calor se incrementará sustancialmente lo que provocará que su uso sea restringido a estructura con dimensiones pequeñas que faciliten la remoción de calor y se eviten las microfracturas causadas por temperaturas altas.

Para el caso del UPC empleado como base para la preparación de un nuevo material, quedó demostrado tanto por De la Garza como por Arteaga, que bajo ciertas condiciones es posible producir un cemento ultrafino con comportamiento cercano a uno de alto desempeño (High Performance Cement) a partir de un OPC, en los que se incrementó de manera significativa la resistencia a la compresión. [5]

Para lograr el refinamiento del cemento CPC se utilizó un molino comercial de alta energía GmbH-Zoz Simoloyer CM01 controlado por computadora. El recipiente de molienda es de acero inoxidable, recubierto en su parte interior con un sistema de lanas de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  para evitar la erosión del contenedor y por ende evitar la contaminación del material molido. Dicho recipiente tiene un volumen interior de 2 litros y su operación de seguridad está limitada por el fabricante a un máximo de 1800 R.P.M. y  $100^\circ\text{C}$  de temperatura. El medio de molienda consistió de 3 kg de bolas de acero de 5 mm de diámetro. En el Subcapítulo 3.2 del presente trabajo: infraestructura (aparatos) de laboratorio utilizada, se brinda más detalle acerca de citado equipo de laboratorio.

## 2.4 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA (DTP)

Muchas de las propiedades de un cemento Portland están relacionadas directamente con la distribución del tamaño de partícula (DTP). Como se sabe, un menor tamaño de partícula conlleva a tener mayor área superficial, misma que por lo general por lo general provocará una demanda de mayor cantidad de agua para lograr la fluidez estándar. Es decir, se incrementará la relación agua/cemento y con ello disminuirán la resistencia a la compresión alcanzadas debido, en parte, a la porosidad remanente ocasionada por la eliminación del agua. Además, una mayor fineza en las partículas provocará una alta velocidad de hidratación por encontrarse el material en una forma más activa, con las consiguientes alteraciones en las velocidades de calor generado y en los tiempos inicial y final de fraguado.

Así la distribución de tamaño de partícula para un cemento Portland compuesto (CPC), la cual generalmente se mide por difracción de rayos láser, establece que como máximo se tenga un 9% menor a  $2\ \mu\text{m}$  y del orden del 95% menor a  $90\ \mu\text{m}$  [5]. Sin embargo, aún con estas restricciones no se da información acerca de la distribución completa de tamaños de partícula y este método se usa generalmente para un control de calidad rápido en los molinos Clinker. De hecho, no hay acuerdo sobre “la mejor” distribución de tamaño de partícula para un cemento Portland CPC, que conduzca a incrementar la resistencia mecánica de concretos y/o mortero.

A continuación, (Fig. 1) se muestra la distribución de tamaño de partícula (DTP) para un OPC típico. [6]

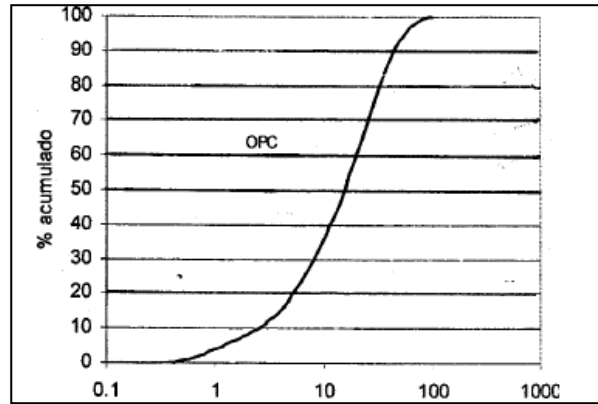


Fig 1. Distribución del tamaño de partícula.

## 2.5 DETERMINACIÓN DEL ÁREA SUPERFICIAL (BLAINE)

Actualmente es de práctica general describir la fineza de un cemento por medio de un solo parámetro, el área superficial específica. Aunque cementos con diferentes distribuciones de tamaños de partícula pueden tener la misma área superficial específica, ésta es todavía considerada como la medida más útil para la fineza de un cemento. Siempre que se dé el valor del área superficial específica debe indicarse también el método usado permitiendo así la comparación entre diferentes cementos.

La ASTM reconoce dos métodos para determinar la fineza de un cemento, el turbidímetro de Wagner y la prueba de permeabilidad de aire. Esta última es la que se describe a continuación por ser la de uso común y la empleada por el Grupo Cementos de Chihuahua (GCC). La primera puede consultarse en [5].

Método de Blaine de permeabilidad de aire:

El método de permeabilidad de aire para la determinación del área específica está basado en la relación entre el área superficial de las partículas en un lecho poroso y la velocidad de flujo a través del mismo. La ecuación básica desarrollada por Carman, es:

$$S = \frac{14\sqrt{\varepsilon^3 A} i}{D(1 - \varepsilon)vQ}$$

Donde S es el área específica (cm<sup>2</sup>/g), D es la densidad del polvo, E la porosidad del lecho, A es la sección de área transversal del lecho, i el gradiente hidráulico, v es la viscosidad cinemática y Q la tasa de flujo.[5]

De acuerdo al método de Blaine (ASTM C 204) en lugar de pasar aire a través del lecho a velocidad constante, un volumen conocido de aire es pasado a través del lecho de porosidad estándar a una razón decreciente estable. Y el tiempo (t) es medido. El área superficial específica es entonces calculada por medio de la relación:

$$S = K\sqrt{t}$$

Donde K es una constante que puede ser obtenida por medio de una muestra patrón. [5]

## 2.6 CALOR DE HIDRATACIÓN

El calor de hidratación varía marcadamente con la composición del cemento ya que el  $C_3A$  y el  $C_3S$  son los principales responsables de una alta evolución de calor. El grado de fineza es importante con relación a la tasa de evolución de calor. Cementos finamente molidos incrementan su velocidad de hidratación.

El calor de hidratación puede ser definido como la cantidad de calor generado durante el fraguado y endurecido de un cemento Portland a una temperatura dada y se mide en J/g de cemento sin hidratar.

Esta prueba es realizada más comúnmente por el método especificado en la norma ASTM C 186, que es el método del calor de solución. Básicamente el calor de solución del cemento seco es comparado con los calores de soluciones de porciones separadas de cemento que han sido parcialmente hidratadas por 7 y 28 días. El calor de hidratación es entonces la diferencia entre los calores de solución del cemento seco y del parcialmente hidratado para el periodo de hidratación apropiado. [7]

## 2.7 PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Dado que el cemento es usado principalmente como un material estructural, la determinación de sus propiedades, principalmente de resistencia, es de máxima importancia. Es por ello que se han desarrollado pruebas de compresión para determinar la resistencia de un concreto hecho con un cemento en particular y establecer la manera de compararlo con otros cementos diferentes.

Desafortunadamente la resistencia no es una propiedad fácil de definir ya que esta medición se puede ver afectada por varios factores tales como la relación w/c usada, la relación cemento/arena, el tipo de tamaño y tamaño de la arena empleada, la manera de mezclar y moldear especímenes, tamaño del espécimen, forma del espécimen, contenido y humedad al momento de la prueba, condiciones de carga y la edad de la probeta. Puede verse que con tantas variables que influencia el resultado, el procedimiento de preparación debe seguirse estrictamente.

Dado que la resistencia del cemento se incrementa con la edad de la probeta, por norma debe especificarse cuando deben realizarse las pruebas correspondientes.

Queda establecido como mínimo a 1, 3, 7 y 28 días para un cemento Portland ordinario. La resistencia puede ser medida a compresión, tensión y/o flexión. Aunque la primera es con mucho la más usada en las especificaciones de un cemento y se describe a continuación.

Resistencia a la compresión. Como ya se mencionó, ésta es la manera más usada de definir las especificaciones para un cemento. La prueba establecida en la norma ASTM C 109 usa un espécimen cúbico de 2 pulg. por lado y una relación arena/cemento de 2.75:1, usando arena estándar Ottawa. La relación w/c puede quedar establecida como 0.485 para todos los cementos Portland ordinarios o bien determinarse por medio de la prueba de fluidez ya descrita. El mortero es mezclado de acuerdo a un procedimiento con tiempos muy precisos. Estando la mezcladora apagada, se vacía primero el agua, después, en aproximadamente 15 segundos se vacía el cemento. En ese instante se activa el cronómetro, se enciende la mezcladora y se procede a mezclar a baja velocidad durante 30 segundos. Sin apagar el equipo, se añade la arena en los siguientes 30 segundos. Una vez completado el primer minuto, se mezcla a velocidad intermedia durante 30 segundos. [2].

Una vez completado el primer minuto, se mezcla a velocidad intermedia durante 30 segundos más, al cabo de los cuales se apaga la mezcladora, se despega el material de las paredes y de las espas como máximo 15 segundos y se deja reposar durante minuto y medio en el recipiente. Cuando se ha completado el tiempo de reposo se mezcla nuevamente a velocidad intermedia durante un minuto más. El material obtenido con este procedimiento se vacía en los moldes para producir probetas cúbicas de 2 pulgadas por lado, donde es compactado de acuerdo a la técnica definida en la norma. Después de compactados, los moldes son colocados en un cuarto húmedo por 24 h.



Los especímenes son entonces removidos de los moldes y sumergidos en agua saturada con CaO a 23 °C hasta que la prueba se realice. Los especímenes deben ser analizados a la compresión estando húmedos en una máquina universal de prueba con base esférica de apoyo para el cubo. La velocidad de carga debe ser tal que el espécimen cúbico falle entre 20 y 80 segundos. Es importante recordar la resistencia de un mortero determinada por el procedimiento anterior no puede ser relacionada directamente con la resistencia del concreto hecho con el mismo cemento. [7]

Estas pruebas son usadas principalmente para control de calidad. Generalmente, el fraguado inicial ocurre entre 2 a 4 horas y el fraguado final entre 5 y 8 horas. Existen dos métodos comúnmente aceptados para la medición de estos tiempos en una pasta de cemento; tiempo de fraguado por medio de la aguja Vicat (ASTM C 191) y tiempo de fraguado por la aguja Gillmore (ASTM C 266). Ambos se realizan en pastas que presentan una consistencia normal. De los métodos, solo se describirá el primero en virtud de que es la técnica empleada en la caracterización del cemento ultrafino utilizado.



## 2.7 FIBRA COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL PARA EL REFUERZO DEL CONCRETO

### 2.7.1 RESEÑA HISTÓRICA

La idea de reforzar con materiales fibrosos manufacturas resistentes pero de elevada fragilidad se remonta a muchos años atrás; en el antiguo Egipto se introducía paja al macizo arcilloso con el cual confeccionaban ladrillos para conferirle una mayor resistencia y por lo tanto una buena manejabilidad después de la cocción al sol.

Existen otros ejemplos históricos: revoques reforzados con crin de caballo, o también con paja en las construcciones más precarias, para evitar fisuras antiestéticas de retiro, contrapisos en yeso armado con esteras de caña, conglomerados de cemento fibroreforzados con amianto etc.

La orientación científica al problema del fibrorefuerzo es indudablemente más reciente. Son de los años '50 los primeros estudios sobre la utilización de fibras en acero y en vidrio en el hormigón; en los años '60 en cambio aparecen los primeros estudios sobre hormigones fibroreforzados con fibras sintéticas.

La utilización de fibras en el interior de la matriz del hormigón tiene como finalidad la formación de un material diverso en el cual el conglomerado, que ya puede ser considerado un material diferente constituido por un esqueleto lítico dispersado en una matriz de pasta de cemento hidratada, está unido a un agente reforzante formado por un material fibroso de distinta naturaleza. [8]

### 2.7.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ACTUALES FIBRAS EN EL MERCADO EN FUNCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMA

Existen diferentes tipos de fibras para el hormigón en función de la materia prima por la cual ellas están producidas:

- a. Metálicas: aceros de carbono y ligados, aluminio.
- b. Naturales: amianto (asbesto), celulosa, carbón.
- c. Sintéticas: nylon, polipropileno, poliacrilo nitrilo, polivinil alcohol.

En la tabla 4 podemos encontrar las características mecánicas mas representativas de las fibras existentes comercialmente.

Tabla 4. Características mecánicas de las fibras.[9]

Fibras	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	Densidad ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ )	Modulo elástico ( $\text{kN/mn}^2$ )	Resistencia a tracción ( $\text{kN/mn}^2$ )	Elongación a ruptura (%)
Acero	5 - 500	7,84	200	0,5 - 2	0,5 - 3,5
Vidrio	9 - 15	2,60	70 - 80	2-4	2 - 3,5
Amianto	0,02 - 0,04	3,00	180	3,30	2 - 3
Polipropileno	20 - 200	0,90	5 - 7	0,5 - 0,75	8
Nylon	-	1,10	4	0,90	13 - 15
Poliétileno	-	0,95	0,30	0,0007	10
Carbono	9	1,90	230	2,60	1
Kevlar	10	1,45	65 - 133	3,60	2,1 - 4
Acrílico	18	1,18	14 - 19,5	0,4 - 1	3

Por lo general las fibras han sido clasificadas por el Buro Internacional para la Estandarización de las fibras hechas por el hombre B.I.S.F.A. (por sus siglas en inglés).

En la Fig. 2. se explica la clasificación de las fibras según la BISFA.

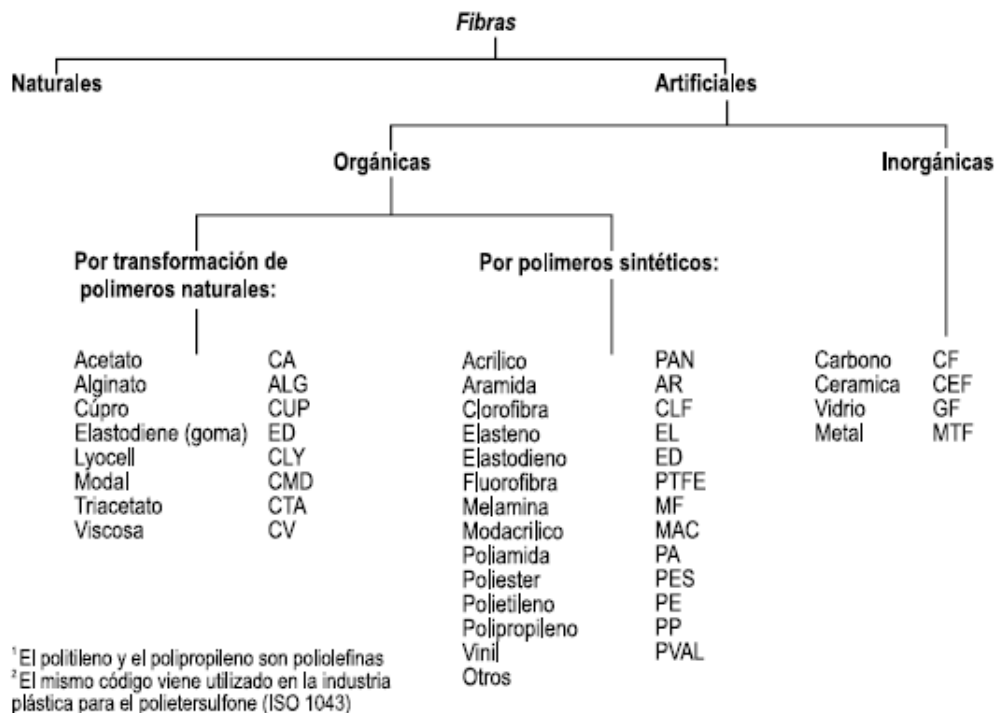


Figura 2. Clasificación de las fibras acorde a la BISFA.[9]

A continuación en la figura 3 podemos observar las imágenes de algunas de las fibras existentes en el mercado que son utilizadas para la fabricación de concreto fibra reforzado.

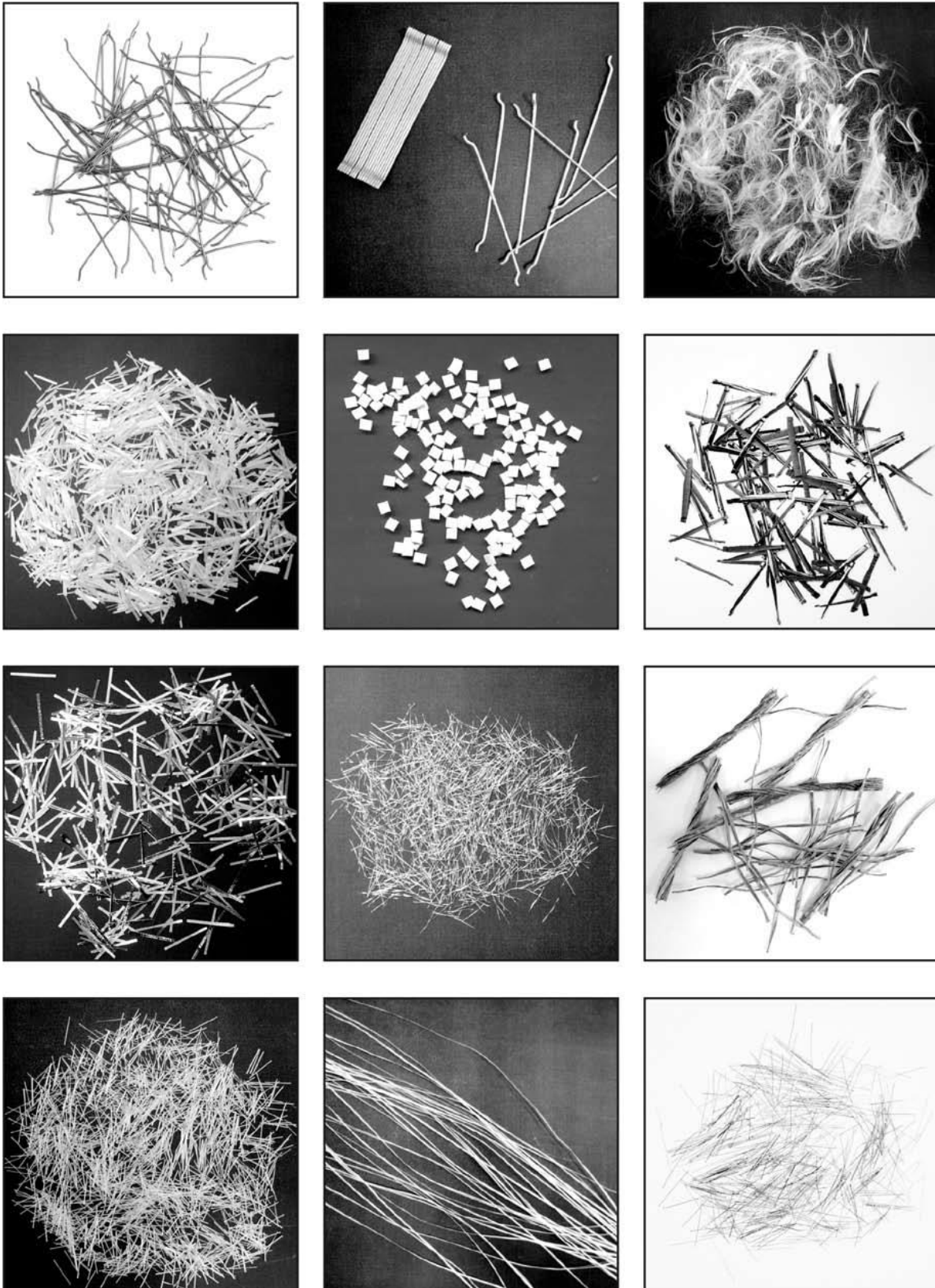


Fig 3. Fibras utilizadas para la fabricación de concreto fibra reforzado. [9]

### 2.7.3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL HORMIGÓN FIBROREFORZADO

Debido a que las fibras funcionan como el material de carga en el compuesto, se seleccionan preferentemente fibras fuertes, pero la reacción entre la resistencia de la fibra y la resistencia del compuesto no es simple. La matriz debe ser capaz de transferir la carga mecánica a la fibra a través del enlace covalente entre la fibra y la matriz. Muchos factores (incluyendo el tamaño y la orientación de la fibra, la química de la superficie de la fibra, la cantidad de cavidades presentes y el grado de curado) influyen en estos enlaces. Sin embargo, el grado y la calidad del enlace entre la fibra y la matriz es el factor más relevante en la resistencia del compuesto.

Los compuestos reforzados con fibra son anisotrópicos con muy diferentes propiedades en la dirección de la alineación de la fibra (dirección longitudinal) desde la dirección perpendicular a la fibra (dirección transversal). Cuando las fibras están alineadas, todas contribuyen al manejo de una carga longitudinal pero casi no proporcionan reforzamiento a una carga transversal. [9]

Diversos factores importantes influyen en el desempeño de las fibras, incluyendo la longitud y el diámetro, la fracción de fibra y la orientación.

Mediante la adición al hormigón de fibras de diferente naturaleza, sean estas micro o macro fibras, se obtiene un nuevo material con características mecánicas diferentes de un hormigón normal. Tal compuesto es llamado Hormigón Fibroreforzado (Fiber Reinforced Concrete).

En caso que se trate de un refuerzo constituido por fibras metálicas se habla de Steel Fiber Reinforced Concrete.

La evaluación de las diferentes propiedades del FRC se efectúan mediante ensayos normados, algunos son típicos del hormigón ordinario y otros creados expresamente para el hormigón fibroreforzado.

#### 2.7.3.1 COMPRESIÓN

La resistencia a compresión del hormigón no viene substancialmente modificada por la adición de fibras. Puede observarse un modesto incremento por relevantes porcentajes de fibras metálicas (no menos de 1.5% en volumen, aproximadamente).

Una vez alcanzado el pico, el material muestra una marcada ductilidad, influenciada fuertemente por el contenido de fibras. En la figura 4 se muestra un ejemplo de gráfica de carga por deformación para concretos con diferentes cantidades fibra. [9]

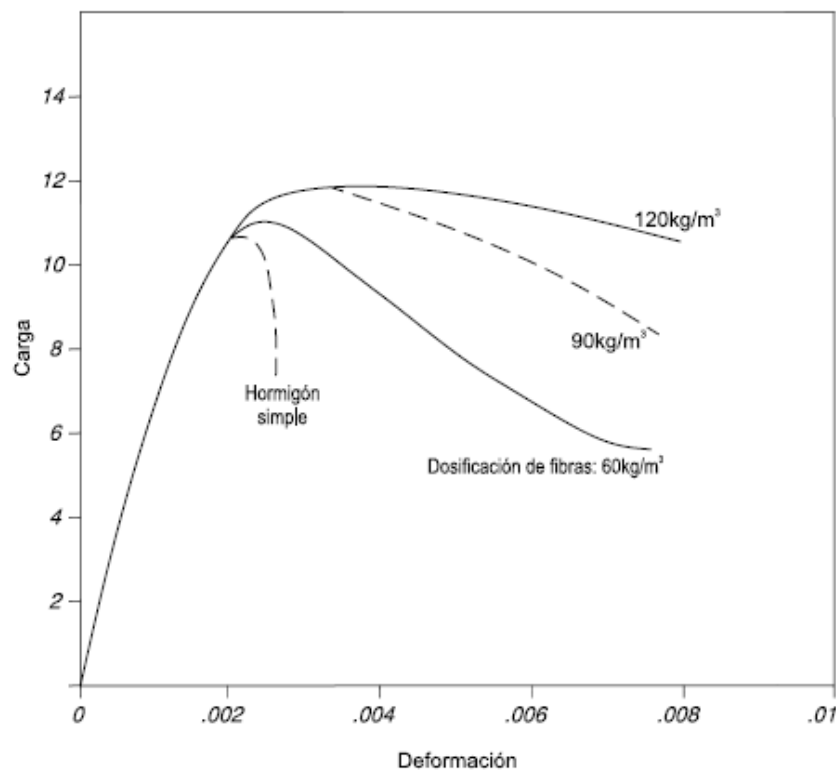


Fig. 4. Ejemplo de gráfica de carga por deformación para concretos con diferentes cantidades de refuerzo con fibras. [9]

Siempre sobre el comportamiento del hormigón fibroreforzado a compresión, el módulo elástico y el coeficiente de Poisson resultan substancialmente invariados para porcentajes de fibras menores del 2% en volumen. Los ensayos de resistencia vienen efectuados en probetas cilíndricas (diámetro 150mm, altura 300mm) o cúbicos (lado 100 de otra manera 150mm) Las normas de referencia son las mismas que se aplican al hormigón ordinario (ASTM C39, EN12390-3, etc.).

#### 2.7.3.2 IMPACTO

El comportamiento del hormigón fibroreforzado puede ser estudiado con varios métodos de ensayo (ACI Committee: Report 544.2R – Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete):

1. Weighted Pendulum Charpy-type impact test.
2. Drop-weight test (single or repeated impact).
3. Constant strain-rate test.
4. **Projectile impact test.**
5. Split-Hopkinson bar test.
6. Explosive test.
7. Instrumented pendulum impact test.

Como ejemplo, en el caso 2 el ensayo mide el número de caídas necesario para producir un cierto nivel de daños en la probeta.

Este tipo de ensayos permite comparar:

1. Diferencia de comportamiento entre hormigones fibroreforzados y ordinarios;
2. Diferencia de comportamiento entre hormigones fibroreforzados sometidos a impacto y a carga estática.

Experiencias realizadas por varios investigadores demostraron que, utilizando el método drop weight, se registra un incremento muy fuerte de la resistencia de hormigones de normal resistencia, de aproximadamente 6-7 veces en comparación con hormigones no reforzados, con dosificaciones en volumen en la orden de 0,5 % de fibras metálicas. [9]

## 2.8 SISMO-RESISTENCIA

Las fibras metálicas mejoran de forma significativa el comportamiento de deformación y ductilidad. El comportamiento de fricción del hormigón puede ser mejorado de forma significativa con el desarrollo de nuevos materiales de construcción. La atenuación de la frecuencia del hormigón reforzado puede ser aumentada hasta 10 veces con la agregación de fibras metálicas.- La capacidad de disipación bajo impacto y carga cíclico estacionario pueden claramente será aumentados.- La resistencia al impacto puede ser aumentada hasta el 2000% con fibras metálicas. Estos efectos benéficos de las fibras metálicas sobre el factor fricción y deterioro pueden mejorar de forma significativa la estabilidad de las estructuras sujetas a cargas dinámicas durante terremotos. El ejemplo de una investigación para medir la ductilidad en la Columna – viga unidas demuestra que el Método de diseño ACI unidamente a SFRC, pueden aumentar el rendimiento de la unión(columna-viga), lo cual abre la oportunidad de reevaluar la ductilidad global de la estructura. En la figura 4 se ejemplifica el efecto creado por distintas dosificaciones de fibras de acero en el concreto. [9]

Si partimos del hecho que dicho elemento estructural visiblemente aumenta su capacidad para disipar energía, es posible utilizar el mismo principio (resiliencia) para la disipación de energía producto del impacto de arma de fuego, como se analizará en capítulos posteriores. (Fig. 5).

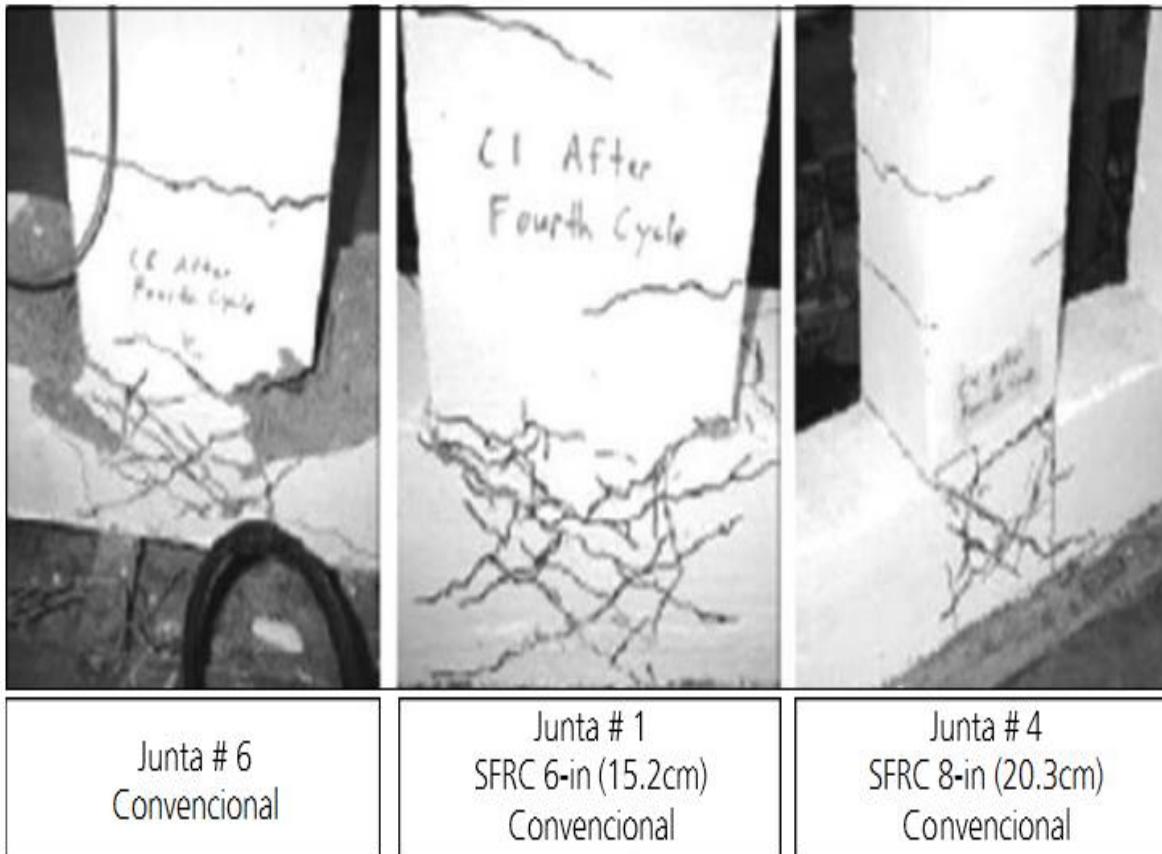


Fig. 5. Aplicación del hormigón reforzado con fibra en uniones viga-columna. Tesis presentada a la Facultad de la Universidad de San Diego, por Michael Gebman Año 2002.

[9]

Es intuitivo que estos posibles comportamientos, o grados de ductilidad y tenacidad adquiridos por el hormigón, dependen ya sea de la cantidad de fibras presentes como de sus características mecánicas y geométricas.

En cuanto a la influencia de la geometría de las fibras (formas y dimensiones longitudinales y transversales) sobre el comportamiento del FRC, aunque cada aspecto es importante, la relación longitud – diámetro equivalente ( $L/D$  denominada relación de aspecto o de esbeltez) es el parámetro más característico, ya que de su valor dependen en buena medida la ductilidad y la tenacidad del hormigón fibroreforzado (Fig. 6).



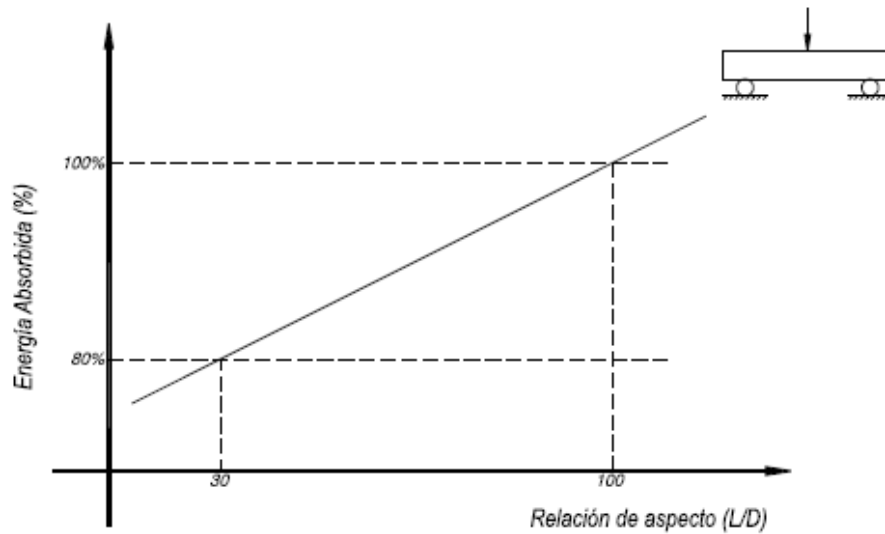


Fig. 6. Energía absorbida Vs. relación de aspecto.

Obviamente las características mecánicas de las fibras, esencialmente con su resistencia a la tracción, juegan un rol fundamental en el comportamiento del FRC ya que, al no producirse la extracción (pull out) impedida por la adherencia real e impuesta entre fibra-hormigón (Fig. 7), puede llevar la ruptura de la fibra debido a la insuficiencia de su resistencia a la tracción (Fig. 8). [9]

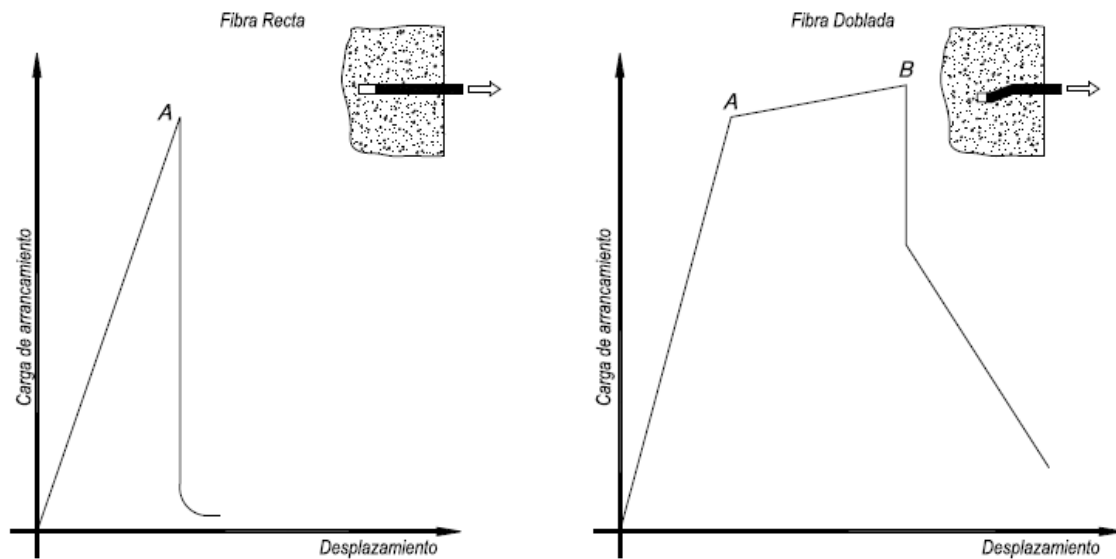


Fig. 7. Incremento de la adherencia fibra-hormigón con la forma de la fibra.

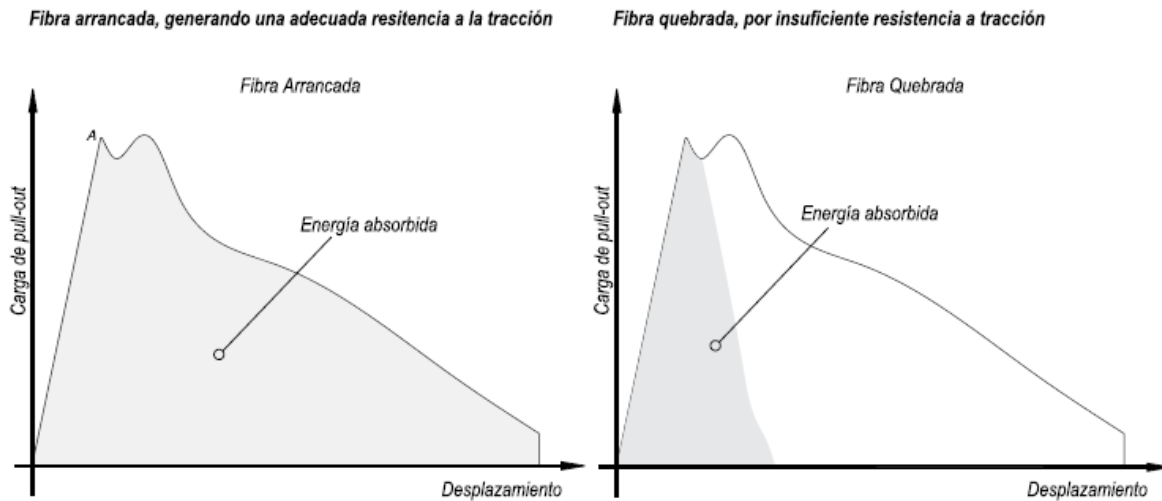


Fig. 8. Importancia de la resistencia a tracción de la fibra. Energía absorbida.

Finalmente la dosificación, o sea la efectiva cantidad de fibras englobadas en el hormigón ( $\text{kg}/\text{m}^3$ , o  $\%V_f$ , ciertamente incide notablemente, junto con las ya comentadas características geométricas y mecánicas de las fibras, sobre el grado de ductilidad y tenacidad que adquiere el hormigón fibroreforzado (Fig. 8).

Es interesante observar como, con el incremento de la relación de aspecto ( $L/D$ ) disminuye, dentro de ciertos límites, la cantidad de fibras (dosificación) necesaria para alcanzar un determinado resultado (Fig. 9), debido a que estadísticamente se incrementa la resistencia a la tracción, como directa consecuencia del incremento estadístico de la longitud de fibra a extraer.

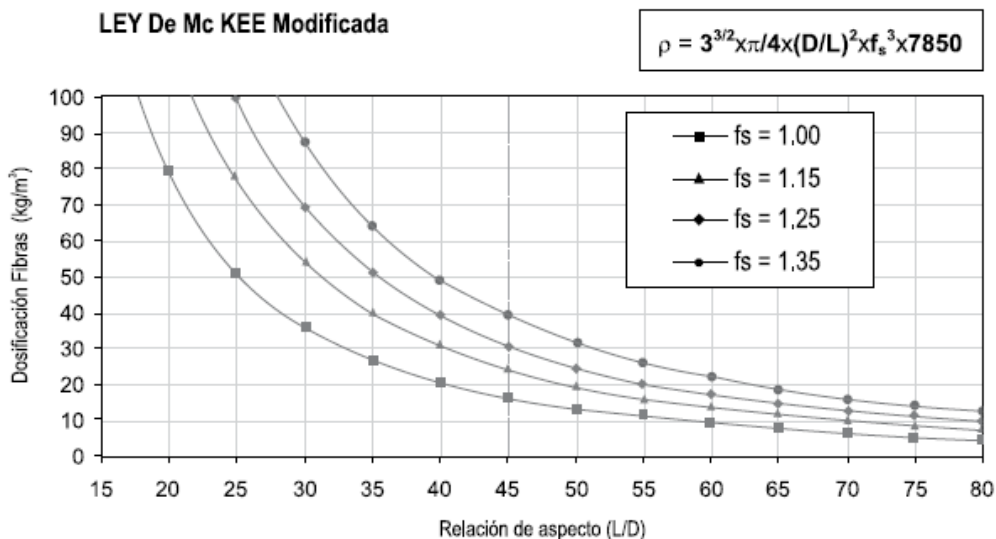


Fig.9. Dosificación X l/d para una misma efectividad.

## 2.9 FUNDAMENTOS BALÍSTICOS

A continuación, se realiza una exposición de los principios balísticos que fueron utilizados en la realización de la presente investigación, en la fase de ensayos balísticos, los resultados de dichas pruebas se encuentran en el capítulo 3.5 de la presente tesis.

### 2.9.1 BALÍSTICA TERMINAL

Es la parte de la ciencia de la balística que se relaciona con la interacción entre un proyectil y un objetivo. En general, el proyectil es el "paquete" que vuela por el aire. El penetrador es la parte del proyectil que "cava" en el objetivo, infligiendo un daño.

La medida primaria de la efectividad de un penetrador atacando un objetivo específico es velocidad límite balística. La velocidad del límite balístico es la velocidad de impacto requerida para atravesar el objetivo colocado en el ángulo de oblicuidad especificado. [10]

### 2.9.2 FRAGMENTACIÓN

Las balas fragmentadas se comportan generalmente como los proyectiles de punto hueco. También pueden tener chaquetas de cobre más delgadas con el fin de reducir su integridad general. Para fines de eficiencia aerodinámica, la punta del punto hueco a menudo se inclina con un "nariz" de polímero puntiagudo. Estas ojivas se disparan típicamente a altas velocidades (superiores a 600 m/s) para maximizar su fragmentación tras el impacto. En contraste con un punto hueco que intenta permanecer en una pieza grande reteniendo tanto peso como sea posible mientras que presenta la mayor superficie al blanco, o una de fragmentación que está destinada a romperse en muchas piezas pequeñas casi instantáneamente.

Esto significa que toda la energía cinética de la ojiva se transfiere al objetivo en un período de tiempo muy corto. El efecto de una ojiva por encima de los 600 m/s es bastante dramático. En la figura 10, se muestra el criterio de perforación de un proyectil en contra de un objetivo fijo. [10]

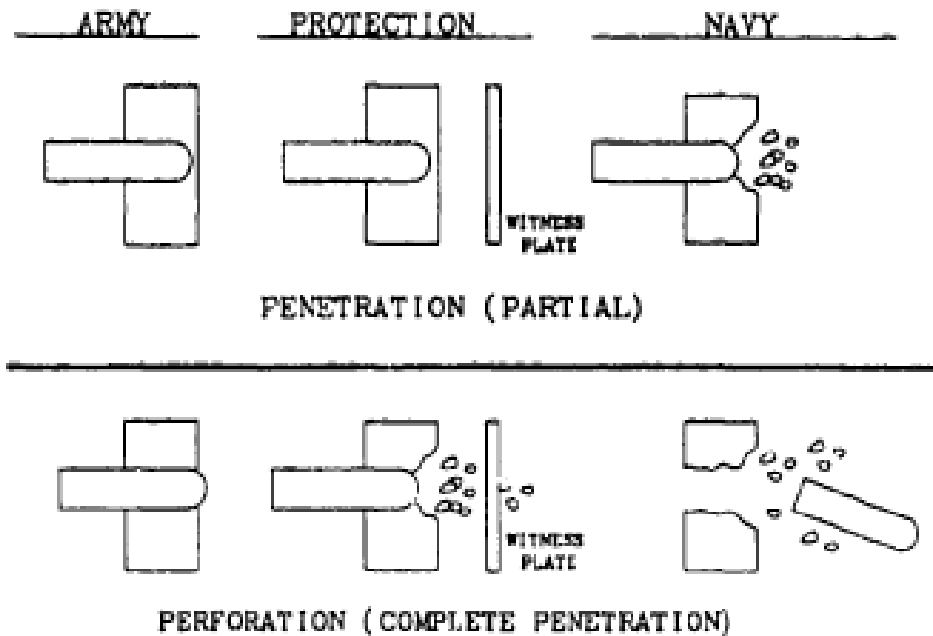


Fig. 10. Criterio de perforación y penetración de un proyectil.

### 2.9.3 HISTORIA DEL CAL. 50

El .50 BMG (Browning Machine Gun) o 12.7 × 99 mm OTAN es un cartucho desarrollado para la ametralladora Browning Calibre .50 a finales de los años 1910. Entrando oficialmente en servicio en 1921, el cartucho es básicamente un .30-06 Springfield sobredimensionado. Ha sido fabricado en muchas variantes: bala simple, trazadora, antiblindaje, incendiaria y sub-calibre. Los cartuchos para ametralladoras son encintados con ayuda de eslabones metálicos. [11]

El cartucho fue ideado durante la Primera Guerra Mundial por John Browning como respuesta al pedido de un arma antiaérea. Básicamente era una versión sobredimensionada del .30-06 Springfield, empleado en una ametralladora de igual tamaño que estaba basada en el diseño de la M1919/M1917, que había sido desarrollado por Browning hacia 1900 (aunque no fue adoptada por el Ejército estadounidense sino hasta 1917, de allí su denominación). La nueva ametralladora pesada, la Browning M2, fue ampliamente utilizada a bordo de aviones, especialmente durante la Segunda Guerra Mundial, aunque hoy su empleo aéreo está limitado a helicópteros. Aún es empleada en tierra, tanto a bordo de vehículos como en fortificaciones fijas y a veces por la infantería. Las balas antiblindaje, antiblindaje incendiaria y antiblindaje incendiaria trazadora eran especialmente efectivas contra aviones, mientras que las balas antiblindaje y las antiblindaje incendiarias eran excelentes para destruir búnkeres de cemento, fortificaciones ligeras y vehículos ligeramente blindados. Las balas antiblindaje incendiaria y antiblindaje incendiaria trazadora emiten un ruidoso destello y humean al impactar, facilitando la confirmación del impacto. [11]

El desarrollo del cartucho .50 BMG se confunde a veces con el del cartucho alemán 13,2 mm TuF, que había sido desarrollado en Alemania para el fusil antitanque Mauser 1918 T-Gewehr con el cual se pretendía detener a los tanques británicos en la Primera Guerra Mundial. A pesar de esto, el desarrollo del cartucho estadounidense calibre 12,7 mm se había iniciado antes que el proyecto alemán fuese terminado o incluso que los Aliados supiesen algo sobre este. Cuando se esparció la información sobre el cartucho antitanque alemán, hubo cierto debate sobre si debía ser copiado y empleado como base para el cartucho de la nueva ametralladora. Sin embargo, tras unas cuantas pruebas, la munición alemana fue descartada debido a que su desempeño era inferior al .30-06 Springfield sobredimensionado y porque era un cartucho con semi-pestaña, lo cual lo hacía poco apropiado para un arma automática. En cambio, la Browning M2HB con sus cartuchos antiblindaje de 12,7 mm podía servir como una ametralladora antiaérea y antivehicular, con capacidad de perforar 22.2 mm de blindaje en acero templado a 91 m y 19 mm a 500 metros.

Décadas más tarde, el .50 BMG también sería empleado en fusiles de gran potencia. El concepto de una ametralladora calibre 12.7 mm no era una idea de aquella época; este calibre ya había sido empleado en ametralladoras Maxim y en algunas ametralladoras accionadas manualmente, como la Gatling.

Durante la Segunda Guerra Mundial, el cartucho .50 BMG fue principalmente empleado por la ametralladora "Browning M2" en los papeles de arma antiaérea y antivehicular. Una variante mejorada de la ametralladora Browning M2 empleada durante la Segunda Guerra Mundial todavía es usada con la denominación de M2. Desde mediados de la década de 1950, los vehículos de infantería blindados, camiones y todo-terrenos han sido construidos para resistir los disparos de una ametralladora calibre 12,7 mm, haciéndola un arma menos flexible. Todavía tiene un mayor poder de penetración que una ametralladora media, pero es mucho más pesada y difícil de transportar. Sin embargo, su alcance y precisión son superiores a las ametralladoras ligeras cuando es montada sobre un trípode y no ha sido reemplazada como la ametralladora estándar montada en los vehículos occidentales (los vehículos blindados soviéticos y rusos tienen ametralladoras DShK y NSV calibre 12.7 mm, cuyo cartucho es balísticamente muy similar al .50 BMG, o KPV calibre 14.5 mm, que tiene una superior capacidad de penetrar blindajes en comparación con cualquier cartucho 12,7 mm).

El fusil calibre 12,7 mm Barrett M82 y sus variantes posteriores surgieron durante la década de 1980 y aumentaron la capacidad antimaterial del francotirador militar. Un francotirador experimentado puede neutralizar toda una unidad de Infantería al eliminar varios blancos (soldados o pertrechos) sin revelar su ubicación exacta. La gran distancia (más de 1600 m) entre

la posición desde donde se efectuó el disparo y el blanco, le permite al francotirador evitar la respuesta del enemigo tanto mediante reubicación como retirada.

El .50 BMG también es empleado en fusiles de largo alcance y fusiles de francotirador, así como en otras ametralladoras calibre 12.7 mm. Su empleo en fusiles monotiro y semiautomáticos ha dado origen a varios cartuchos de alto desempeño especializados, que no se emplean en ametralladoras. Un fusil de francotirador McMillan Tac-50 calibre 12.7 mm fue empleado por el Cabo Rob Furlong del Ejército canadiense para lograr la baja confirmada a mayor distancia de la historia, al abatir a un rebelde Talibán a 2430 metros durante la campaña del 2002 en Afganistán. [12]

El récord anterior para una baja confirmada a gran distancia fue logrado por el francotirador de los Marines Carlos Hathcock en 1967, a una distancia de 2286 m. Hathcock empleó este cartucho en una ametralladora Browning M2 equipada con una mira telescópica. Esta arma fue empleada por otros francotiradores, lo cual condujo al desarrollo de fusiles de francotirador que empleaban este cartucho. El anterior cartucho estándar para los fusiles de francotirador era el .30-06 Springfield, pero el .50 BMG es más preciso a gran distancia.

#### 2.9.4 DATOS CARACTERÍSTICOS DEL CAL. 50

En la Tabla 6 podemos observar los datos característicos del cartucho Cal. .50 Bala Perforante (B.P.) de fabricación mexicana. Dicha información fue obtenida utilizando los equipos de laboratorio con los que cuenta la Fábrica de Cartuchos previa autorización de la SEDENA.

Tabla 5. Datos característicos del cartucho 12.7 x 99 m B.P.

MÁX. PRESIÓN PROMEDIO	VELOCIDAD	ENERGÍA	PRESIÓN
4,241 kg/cm <sup>2</sup>	914 m/s	16,750 Joules	3,161 kg/cm <sup>2</sup>

En la figura 11 podemos observar las dimensiones del cartucho 12.7 x 99 mm B.P. La ojiva de mencionado cartucho cuenta con un núcleo de acero y un encamisado de latón (fig.12).

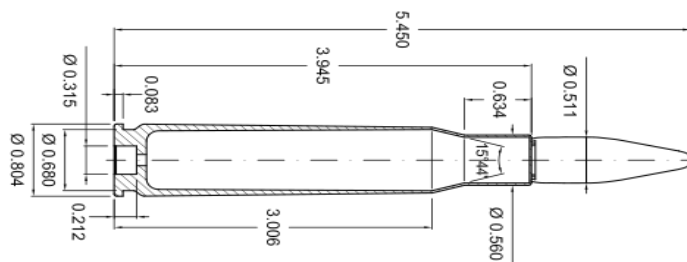


Fig. 11. Dimensiones en pulgadas de cart. Cal. 50. B.P. [12]



Fig. 12. Ojiva de Cal. 50 B.P. [13]



## 2.10 ESTADO DEL ARTE EN MATERIA DE COMPÓSITOS BLINDADOS

Existen claros antecedentes a nivel internacional en el desarrollo y uso de materiales compósitos que cuentan con una alta capacidad para disipar energía, en la tabla 6 se muestran los datos generales de algunas de estas patentes, tanto a nivel nacional como internacional. De igual manera, la figura 13 se muestra la distinta variedad de calibres utilizados por las Fuerzas Armadas alrededor del mundo.

Tabla 6. Patentes relacionadas al uso de concretos blindados.

No. Patente	País	Fecha de registro	Título	Autor(es).
PCT/MX2005/000081 (Solicitud)	México	07-09-2005	Cement composite impact bullet resistant [14]	Alanis Ortega; Javier Isaías
2,637,585	Francia	23-06-1988	Concrete for bulletproof protection and structures thus produced [15]	Stival Jacques
2'662,156	Francia	21-05-1990	Concrete composition based on Wood granulates stabilised by silification [16]	Stival Jacques
8'551,243	Estados Unidos	08-10-2013	Concrete reinforced with hybrid nanomaterials [17]	José A. Soto Montoya, Mauricio Martínez Alanís
85'307,854	Estados Unidos	21-05-1986	Settable cementious compositions [18]	Peter Shelley Mills
6'080,234	Estados Unidos	27-06-2000	Composite concrete [19]	Bernard Clavaud
91'300,598	Estados Unidos	25-01-1991	Photoresist containing aliphatic [20]	Michael J. Farland
4'780,141	Estados Unidos	25-08-1988	Cementitious composite material containing metal fiber [21]	David D. Double
3'663,287	Estados Unidos	26-05-1972	Cement additive comprising calcium sulfo-aluminate, an organic adhesive, a foaming agent, and a dispersing agent [22]	Tsutomo Mizunumo; Tsukuru Azumi
2'139,547	Reino Unido	07-05-1983	Method for making concrete blocks [23]	William L. Harbaugh; Raymond S. Smetan





Fig. 13. Fotografía que muestra la variedad de calibres usados por las fuerzas armadas alrededor del mundo, de izquierda a derecha: calibre 9 mm, 9 mm expansivo, .45, 5.56, 7.62 x 39 mm, .308 Winchester, 7.62 x 51 mm y 12.7 x 99 mm. [Imagen cortesía de la Fábrica de Cartuchos del Ejército Mexicano, Campo Mil. No. 1-F Santa Fe, Cd. Méx. 2016]



### CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 3.1 INFRAESTRUCTURA (APARATOS) DE LABORATORIO UTILIZADOS

A continuación se hace una descripción del equipo de laboratorio utilizado durante la realización de la presente investigación.

#### 3.1.1 CARACTERIZACIÓN Y OBTENCIÓN DE CONCRETO CPC ULTRAFINO

##### A. MOLIENDA DE ALTA ENERGÍA.

La Figura 14 muestra una fotografía del equipo de molienda de alta energía (HEM) usado en la presente investigación. El CM01 es usado para fines de laboratorio (aunque en algunos casos especiales se puede utilizar como unidad de producción). Las unidades de trituración son cambiables rápidamente, la capacidad de la cámara de procesamiento está entre 0.5 y 2 litros. Esto se refiere a una carga de polvo de 40-250 gr.

Como medios de molienda recomendamos para la mayoría de las aplicaciones las bolas de acero. Se utilizan cada vez más materiales cerámicos y otros materiales.

Este dispositivo se utiliza principalmente para I + D en universidades e institutos, pero también en Zoz GmbH. [24].

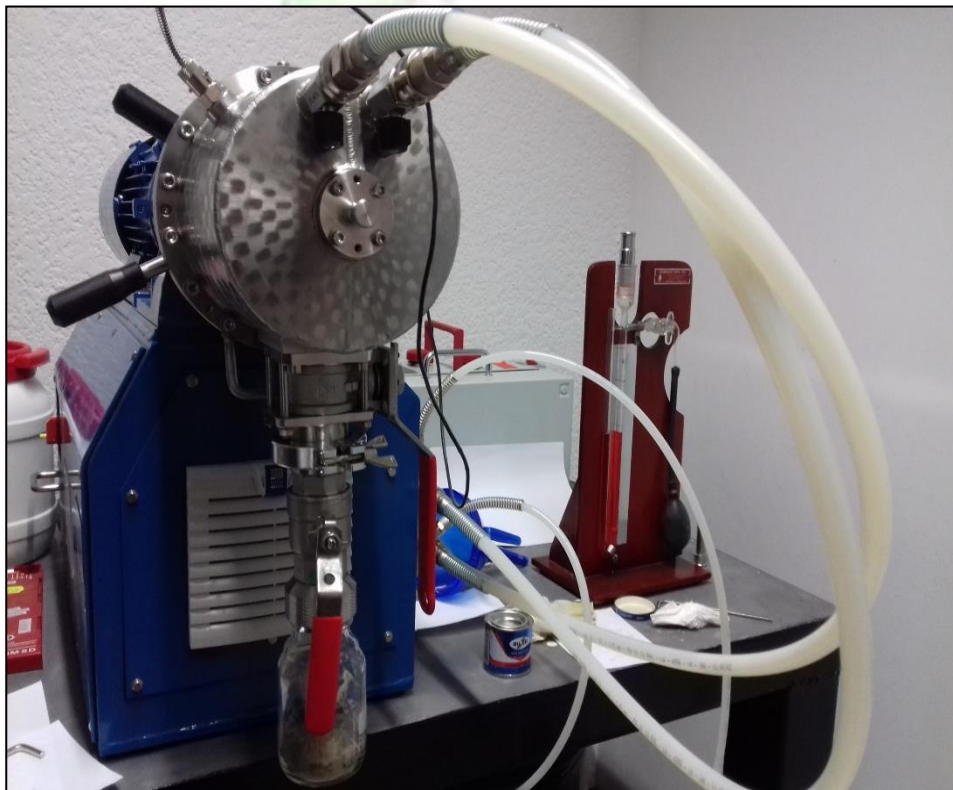


Fig. 14. Molino de alta energía utilizado durante la investigación. [Imagen cortesía de la Escuela Militar de Ingenieros, Campo Mil. No. 1-B, Popotla Cd. Méx. 2016]

## B. DETERMINACIÓN DEL ÁREA SUPERFICIAL (BLAINE)

Aparato de fineza BLAINE, diseñado para el ensayo de finura del cemento por determinación de la superficie específica por permeametría. Trabaja en relación con NORMAS ASTM C-204 / AASHTO T-153 – MERCOSUR 76/98. El procedimiento del ensayo consiste en pasar una determinada cantidad de aire a través de una capa de cemento de una porosidad definida. El número y tamaño de los poros de la mencionada capa de cemento está en función del tamaño de las partículas y determina la proporción del flujo del aire que pasa a través del colchón de cemento. El aparato consiste en un manómetro de vidrio en "U", una celda de acero inoxidable, una llave de paso, bulbo de goma y papel de filtro. Todo montado sobre soporte de madera en estuche protector del equipo. (Fig. 15).



Fig. 15. Aparato de fineza BLAINE. [25]

## C. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA

La figura 16 muestra el equipo Sympatec's Laser Diffraction, Sensor HELOS el cual cuenta con las siguientes especificaciones técnicas HELOS, es el primer sistema que utiliza un principio de

medición (difracción láser en paralelo) para todo el rango de medición de 0,1  $\mu\text{m}$  a 8750  $\mu\text{m}$ . Cuenta dos modos de evaluación: FREE: una solución libre de parámetros basada en la difracción de Fraunhofer y MIEE: basándose en la teoría de Mie de precisión extendida al rango de tamaño completo, como una opción. La combinación de rangos de medición está disponible para ambos, permitiendo el análisis de distribuciones de tamaños extremadamente grandes con la más alta precisión.

Es el instrumento clásico para el análisis del tamaño de partícula de muestras secas y húmedas, es decir, de polvos, suspensiones, emulsiones o pulverizaciones. Está totalmente construido según las especificaciones de la ISO 13320 "Análisis de tamaño de partículas - métodos de difracción láser" - y diseñado para mediciones de precisión absoluta a una desviación típica de  $\pm 1\%$  con respecto al medidor estándar. [26]



Fig. 16. Equipo Sympatec's Laser Diffraction, Sensor HELOS. Utilizado para la obtención de Distribución de Tamaño de Partícula en polvos.

#### D. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

El HITACHI TM3000 es portátil y es ligero por diseño, utilizando una bomba de diafragma en lugar de una bomba rotativa y una bomba turbomolecular en lugar de una bomba de difusión para lograr un vacío útil para la observación. También el vacío está en el lado bajo, por lo que es un semi-medioambiental SEM y bastante tolerante de la humedad (a diferencia de otros microscopios electrónicos). Las funciones de SEM por una pantalla táctil y características automatizadas astigmatism, enfoque, arranque y alineación. El TM3000 es un SEM serio pero con una interfaz bastante simple para permitir su uso en el aula. El HITACHI TM3000 se utiliza para especímenes de tamaño normal. No hay ninguna esclusa. Los especímenes se montan en un soporte especializado ajustado en altura para optimizar el funcionamiento y el SEM se bombea hacia abajo hasta que la barra de progreso verde indique que el microscopio está listo. Un uso serio para este instrumento es el cribado de plantas y mutantes de insectos en estudios genéticos donde la rapidez de intercambio de muestras es necesaria y de alta resolución no lo es. Se requiere una preparación mínima de la muestra porque el modo de obtención de imágenes utilizado es tolerante a la humedad y a la carga. (Fig. 17).



Fig. 17. MEB Hitachi TM-3000. [27]

#### E. DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

El equipo de laboratorio utilizado para la obtención de DRX fue un D8 ADVANCE, dicho equipo puede configurarse para realizar una sola tarea analítica con un gran enfoque y componentes

dedicados, o una solución multifuncional completamente diseñada capaz de manejar necesidades analíticas muy diversas con la más alta competencia .

Dynamic Beam Optimization (DBO) proporciona los mejores datos de difracción en polvo de la clase mediante el establecimiento de nuevos puntos de referencia en términos de estadísticas de conteo y la relación de pico a fondo, todo sin la necesidad de reconfiguración manual del instrumento.

El detector LYNXEYE XE-T de alta energía y dispersión de energía combina de forma única la rápida recolección de datos con un filtro sin precedentes de fluorescencia y radiación  $K\beta$ . Su ventana propietaria Variable Active Detector Window y la pantalla anti-dispersión motorizada (MASS) permiten la recolección de datos desde los ángulos  $2\theta$  más bajos sin dispersión parásita de fondo de ángulo bajo, en particular dispersión de aire. La retracción MASS totalmente automatizada evita el recorte de vigas, incluso en combinación con ranuras de variación continua que proporcionan estadísticas excelentes de conteo en todo el rango angular.

Las estadísticas de conteo excelentes permiten una recopilación de datos más rápida y un mayor rendimiento de la muestra. (Fig. 18).



Fig. 18. Equipo de DRX D8 Advance. [28]

## F. PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Para la determinación de la resistencia a la compresión de los concretos se utilizó el equipo ACCUTEK de la serie 500 con capacidad de carga extensa mediante la combinación de la tecnología de

microprocesador con la construcción de bastidor robusto de acero sólido para probar concreto de alta resistencia. El diseño de una sola unidad, que ahorra espacio, consiste en una carga pesada de 500.000 lbf. (2.224 kN), la bomba hidráulica y el sistema de visualización digital.

El gran bloque inferior del cojinete, elimina las fugas hidráulicas evitando que el polvo y los desechos entren en el área del sello del pistón / cilindro del bastidor de carga. La abertura horizontal de 14 "(355 mm) de ancho proporciona una accesibilidad completa para cargar ejemplares.

Con el sistema de platina de cambio rápido, el operador puede montar de forma rápida y sencilla una amplia gama de accesorios a la cabeza cruzada superior para pruebas de cilindros, cubos, vigas y bloques de muestras: desde cubos de 2 "(50 mm) hasta 12" (305 mm ) Bloques de mampostería. (Fig. 19).



Fig. 19. Equipo ACCUTEK de la serie 500 para ensayos a compresión. [29]

### 3.1.2 PRUEBAS BALÍSTICAS

#### A. VELOCIDAD DEL PROYECTIL

Durante la presente investigación se utilizaron pantallas balísticas del Modelo 57 marca Oehler citadas pantallas detectan el paso del proyectil a través de un plano de referencia, cuenta con fuente de luz infrarroja en la parte superior de la pantalla y múltiples fotodetectores en la base.



Este tipo de pantalla detecta proyectiles tan pequeños como calibre .17 a velocidades tan bajas como 250 fps. Su sensibilidad mejora con un proyectil más grande y velocidades más altas. El control de ganancia automático se incluye para compensar los efectos como el polvo en el trayecto de la luz.

Las pantallas Modelo 57 funcionan en condiciones razonables de luz ambiental. La carcasa protege a los fotodetectores de las luces fluorescentes externas, pero las pantallas pueden ser activadas por flashes anormalmente brillantes o marcadores encendidos. Pueden ser necesarias precauciones especiales para el funcionamiento en ambientes adversos.

La pantalla proporciona un impulso nominal de +12 voltios de aproximadamente 2 ms de duración desde un conector BNC montado en panel. La salida se puede aproximar de 50 ohmios a + 12v en el estado alto y por 10K ohmios a tierra en el estado bajo. El tiempo de subida es aproximadamente 0,1 microsegundo. Puede ocurrir más de un pulso para el paso de un solo proyectil. (Fig. 20).



Fig. 20. Cronógrafo Modelo 57 marca Oehler. [30]

## B. ARMA DE FUEGO

Para la realización de los disparos se utilizó un fusil Barret modelo 82A1 el cual cuenta con las siguientes especificaciones (Tabla 7 y Fig. 21).

Tabla 7. Especificaciones técnicas del fusil Barret 82A1

Modelo: 82A1.	Peso: 14 kg.
Calibre: .50 BMG.	Longitud del cañón: 50.8 cm.
Operación: Semi-automática.	Long. de giro: 38.1 cm
Longitud: 1.22 m	Capacidad del cargador: 10 tiros.



Fig. 21. Fusil Barret Modelo 82A1. [31]

### 3.2 MARCHA EXPERIMENTAL PARA PREPARACIÓN DE MEZCLAS COMPÓSITOS

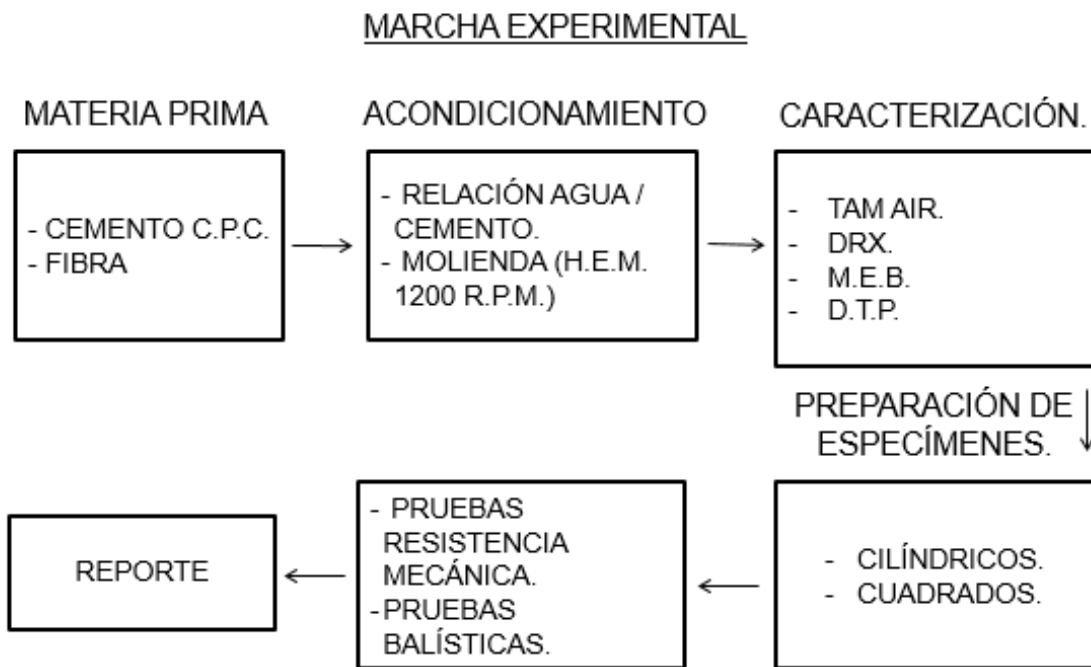


Fig. 22. Marcha Experimental para concreto blindado.

En la figura anterior, (Fig. 22) podemos apreciar la Marcha Experimental que sirvió de guía para la obtención de un concreto blindado acorde a la norma UL-752. Como primer punto, para la realización del refinamiento del CPC se utilizó un molino comercial Simoloyer de alta energía de la marca Zoz, con capacidad de 1.5 litros, Alemán. Uno de los factores que se cuidaron al momento de realizar dicha molienda fue el hecho de evitar, de todas las formas posible el no refinamiento del polvo del cemento debido a aglomeraciones en las paredes del molino, por ello fue necesario realizar una variación periódica en los patrones de molienda, buscando con ello remover partículas que quedaran atrapadas en las paredes o esquinas del contenedor, ajustando con ello los siguientes parámetros de molienda para la obtención de los polvos (Tabla 8).

Tabla 8. Clasificación de muestras y condiciones de molienda del CPC.

No.	DESCRIPCIÓN Muestra	PERIODO 1		PERIODO 2		NÚMERO DE CICLOS	TIEMPO TOTAL min
		TIEMPO min	R.P.M.	TIEMPO min	R.P.M.		
1	CPC 01	10	600	5	900	1	15
2	CPC 02	10	600	5	900	2	30
3	CPC 03	10	600	5	900	3	45
4	CPC 04	10	600	5	900	4	60
5	CPC 05	10	600	5	900	5	75
6	CPC 06	10	600	5	900	6	90
7	CPC 07	10	600	5	900	7	105
8	CPC 08	10	600	5	900	8	120
9	CPC 09	10	600	5	900	9	135
10	CPC 10	10	600	5	900	10	150
11	CPC 11	10	600	5	900	11	165
12	CPC 12	10	600	5	900	12	180
13	CPC 13	10	600	5	900	24	360
14	CPC 14	10	600	5	900	48	720

La relación de material utilizado para el ajuste de los parámetros de molienda fue de 3 kg de bolas de acero inoxidable de 5 mm diámetro por 300 gramos de polvo de cemento CPC; es decir, la relación bolas:polvo establecida fue de 10:1.

### 3.3 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

#### A. DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DTP DEL CEMENTO CPC ACTIVADO

Uno de los parámetros dentro de la caracterización de los cementos, es el área superficial específica mediante la técnica de permeabilidad del aire Blaine. La tabla 9 muestra los resultados obtenidos mediante esta técnica.

Tabla 9. Área superficial específica mediante Blaine.

MUESTRA	BLAINE ( $\text{g}^{-1}\text{cm}^2$ )
CPC	3219
CPC 15 min.	5324
CPC 30 min.	6123
CPC 45 min.	6762
CPC 60 min.	6230
CPC 75 min.	6334
CPC 90 min.	6160

El área superficial del material es una variable de importancia, debido a que se ha reportado que las áreas más altas incrementan la reactividad de las partículas, en el caso de los cementos existe una relación entre las propiedades de las mezclas como la fluidez y las propiedades mecánicas debido a que área superficial grande ( $\text{mayor a } 3818 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ) la fluidez disminuye pero aumenta la resistencia a la compresión.

De la tabla 9 se deduce que el CPC sometido a HME tiene una mayor área que el CPC utilizado como referencia. Es decir, se observa que el CPC molido exhibe una mayor área superficial. Un punto importante es el indicar que durante el proceso de molienda no fueron utilizados aditivos que facilitaran mencionado proceso, por lo cual es posible que mediante la inclusión de dicha sustancia sería posible aumentar en un grado mayor el área superficial del CPC, pero al mismo tiempo su costo de elaboración.

## B. DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA (DTP)

Se realizó el análisis de distribución de tamaño de partícula a la totalidad de los cementos molidos mediante HME con el objeto de identificar las diferencias de tamaños entre el CPC obtenido de manera comercial y la manera en que existe una variación de las propiedades, respecto a las distintas técnicas de caracterización.

En la tabla 10 y figura 23, el CPC y el CPC sometido a HME es posible apreciar que se tienen variaciones, respecto al tiempo de molienda se tiene mayor cantidad de finos, pudiendo estos últimos favorecer la velocidad de reacción. En el Anexo C de este trabajo es posible encontrar el resto de figuras que muestran la variación de la DTP para cada parámetro específico de molienda.

Tabla 10. Distribución del tamaño de partícula (en micras) del cemento CPC refinado en función del tiempo de molienda.

<b>Tiempo de molienda del Cemento CPC (min)</b>	<b>X (10%)</b>	<b>X (50%)</b>	<b>X (90%)</b>
0	1.04	8.33	26.68
15	0.80	6.95	26.33
30	0.84	7.49	27.05
45	0.85	7.86	28.12
60	0.97	9.07	28.92
75	0.77	6.67	26.43
105	0.86	6.85	27.16
120	0.90	7.16	27.52
135	0.82	6.65	26.61
150	0.71	3.82	21.74
165	0.67	3.41	20.87
180	0.73	3.78	22.07

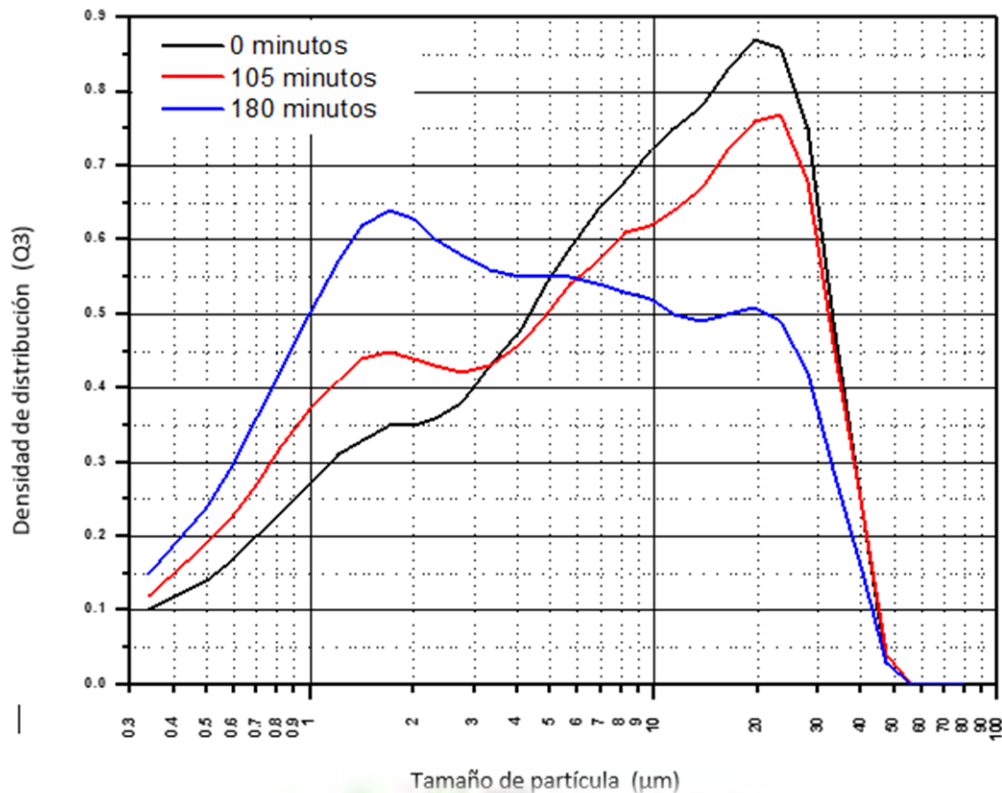


Fig. 23. Distribución de tamaño de partícula para un CPC sometido a HME.

A partir de la figura 23, se puede observar que la combinación de los parámetros de molienda produjo un menor valor para el diámetro de partícula en comparación al CPC sin HME, también se observa que de una distribución trimodal al ser procesada por molienda de alta energía se logró una distribución bimodal, mencionando además que la molienda con bolas tiende a producir una distribución unimodal [32]. Lo anterior, se puede explicar de esta manera: la molienda de alta energía se basa en el llamado procesamiento de alta cinética, en la cual la colisión de los cuerpos de molienda es el evento principal para la transferencia de energía cinética de los medios de molienda hacia el polvo, así como la fractura de las partículas [33]. A mayor R.P.M. bajo una adecuada relación bolas polvo, será mayor la energía suministrada en el polvo, debido a que las bolas se recubren completamente del mismo y existe una mayor probabilidad de impactos entre bolas con las paredes de la cámara del molino.

Otro factor para nuestro caso es el tiempo de procesamiento, es posible que durante este tiempo de molienda existan aglomerados, razón por la cual no se tiene un menor tamaño de partícula al obtenido, ya que en periodos mayores a 15 min las partículas tienden a aglomerarse y producen el efecto de incremento de tamaño de partícula [34].

### C. TRANSFORMACIÓN MICROESTRUCTURAL Y MORFOLÓGICA DEL CEMENTO VERSUS TIEMPO DE MOLIENDA

En la Figura 24 se presenta el patrón de difracción de rayos X correspondiente al polvo de cemento Pórtland CPC sin moler, tal y como se adquirió comercialmente. El análisis revela que este cemento contiene, además de la presencia de yeso ( $\text{CaSO}_4$  hidratado) ciertas trazas de etringita. Esta última fase es producto de la hidratación parcial que el polvo comercial había desarrollado durante su almacenamiento.

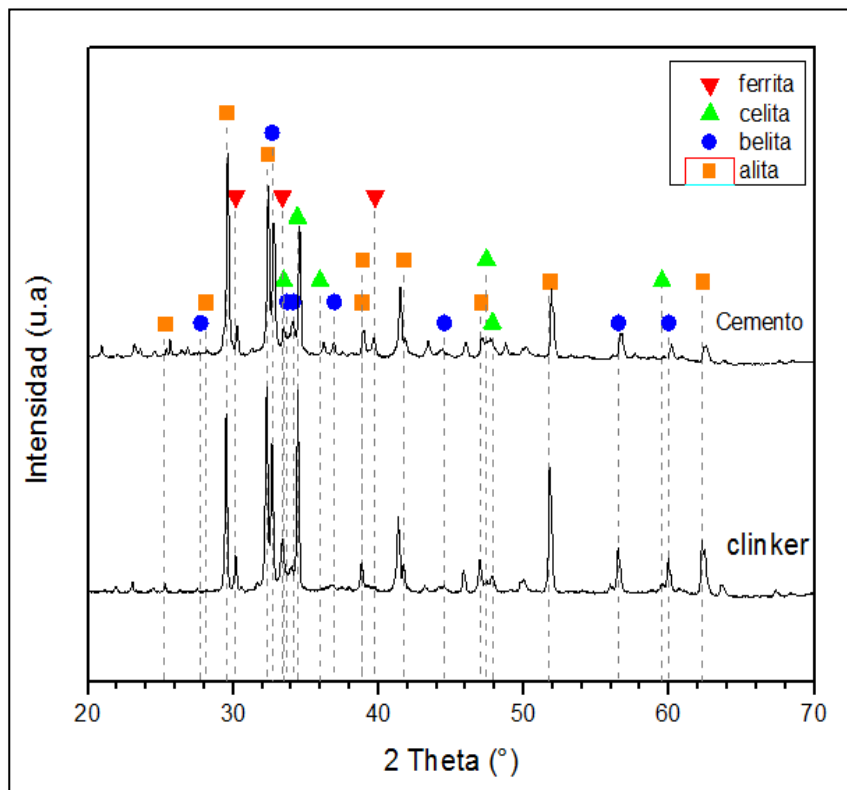


Fig. 24. Diffractogramas comparativos entre el cemento utilizado y Clínker.

En la figura 25 se presentan las micrográficas obtenidas por MEB de un CPC y un CPC sometido a HME (posterior a hidratación), con el objeto de analizar los posibles cambios en la morfología. La micrografía superior (a) se aprecian aglomerados de 5-10  $\mu\text{m}$  debido a la cohesión de aluminosilicatos.

La micrografía inferior (b) corresponde al CPC mecano activado. En dicha imagen, se aprecia que el CPC ha sido modificado en formas angulares similares a agujas de 9-12  $\mu\text{m}$  similares en este caso posiblemente por la formación de etringita.



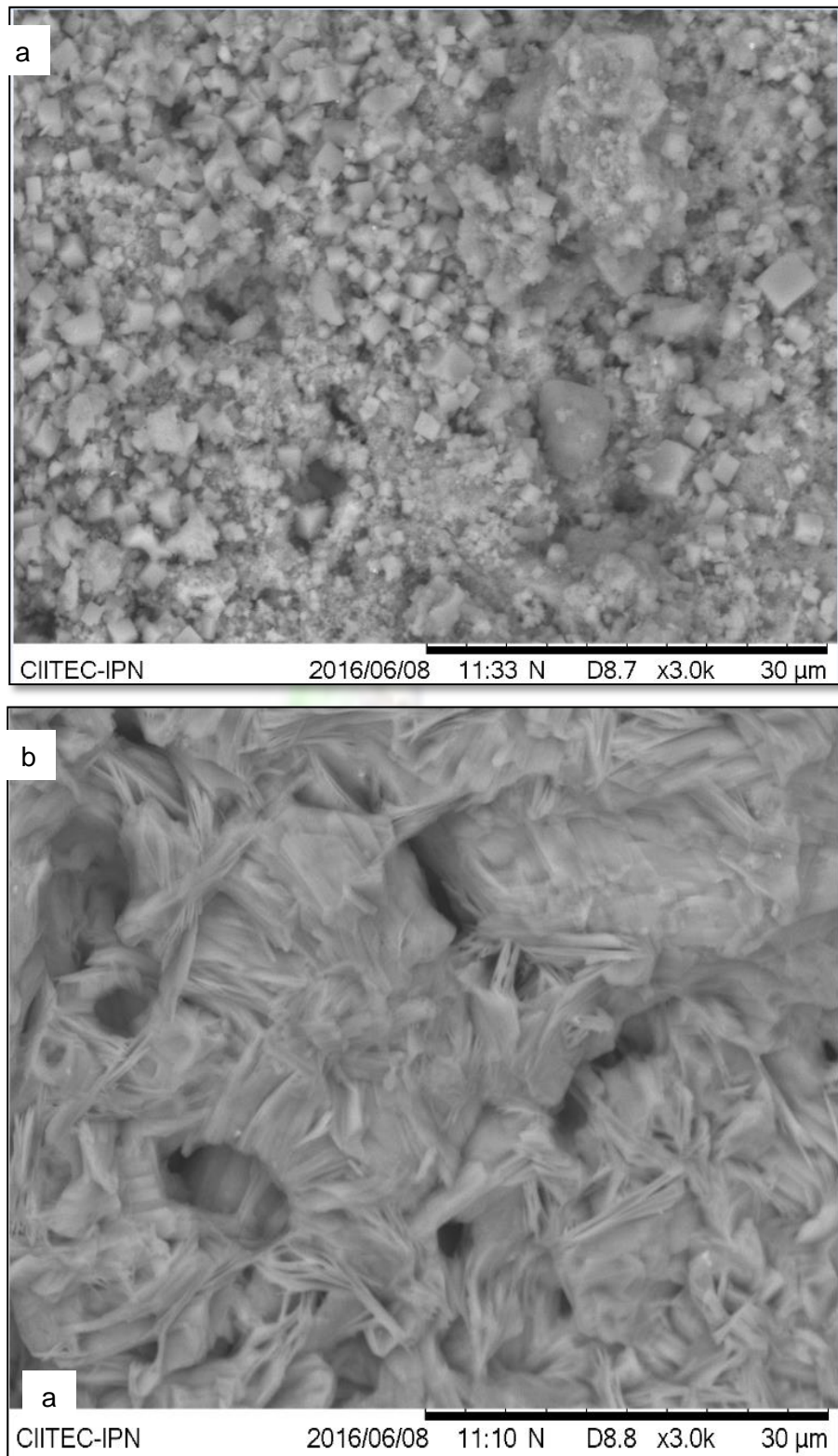


Fig. 25. Micrografías obtenidas por MEB a 3000x de la a) CPC hidratado a 28 días y b) CPC sometido HME y 28 días de hidratación.

En la figura 26 podemos apreciar un difractograma de rayos x con los índices de Miller correspondiente a un CPC sometido a 60 minutos de molienda.

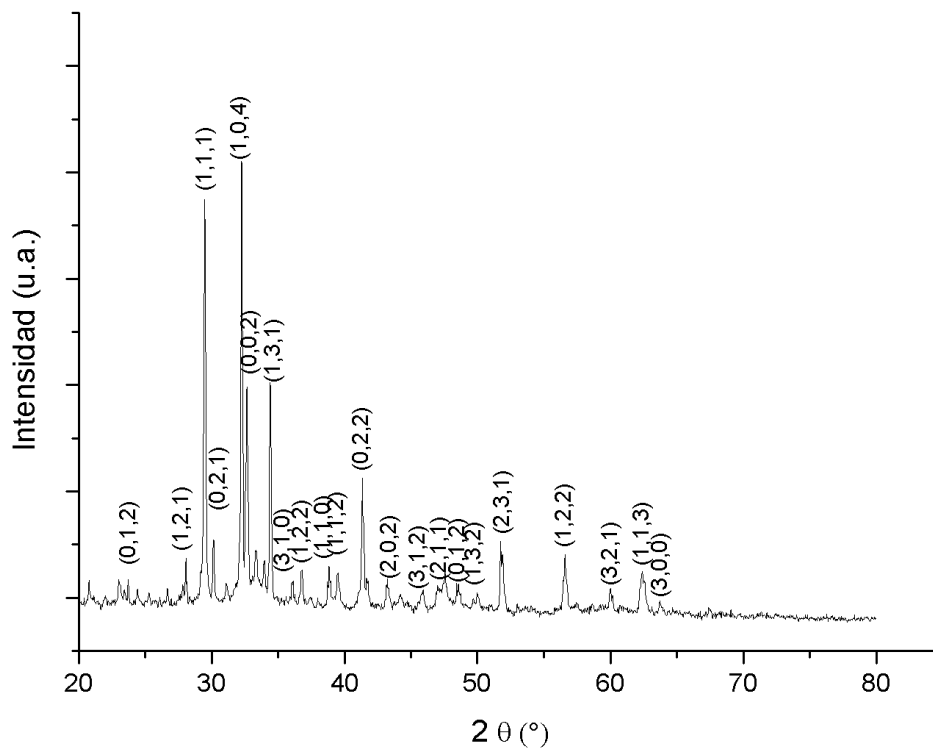


Fig. 26. Patrón de difracción de rayos X del cemento Pórtland CPC después de 60 min. de molienda.

La Figura 27 muestra una colección comparativa de los patrones de difracción de rayos X del cemento CPC sometido a los diferentes tiempos de molienda mecánica por alta energía. A medida que procede la molienda, el mineral sufre de una serie de efectos microestructurales y morfológicos típicamente reportados al usar esta técnica de HEM.

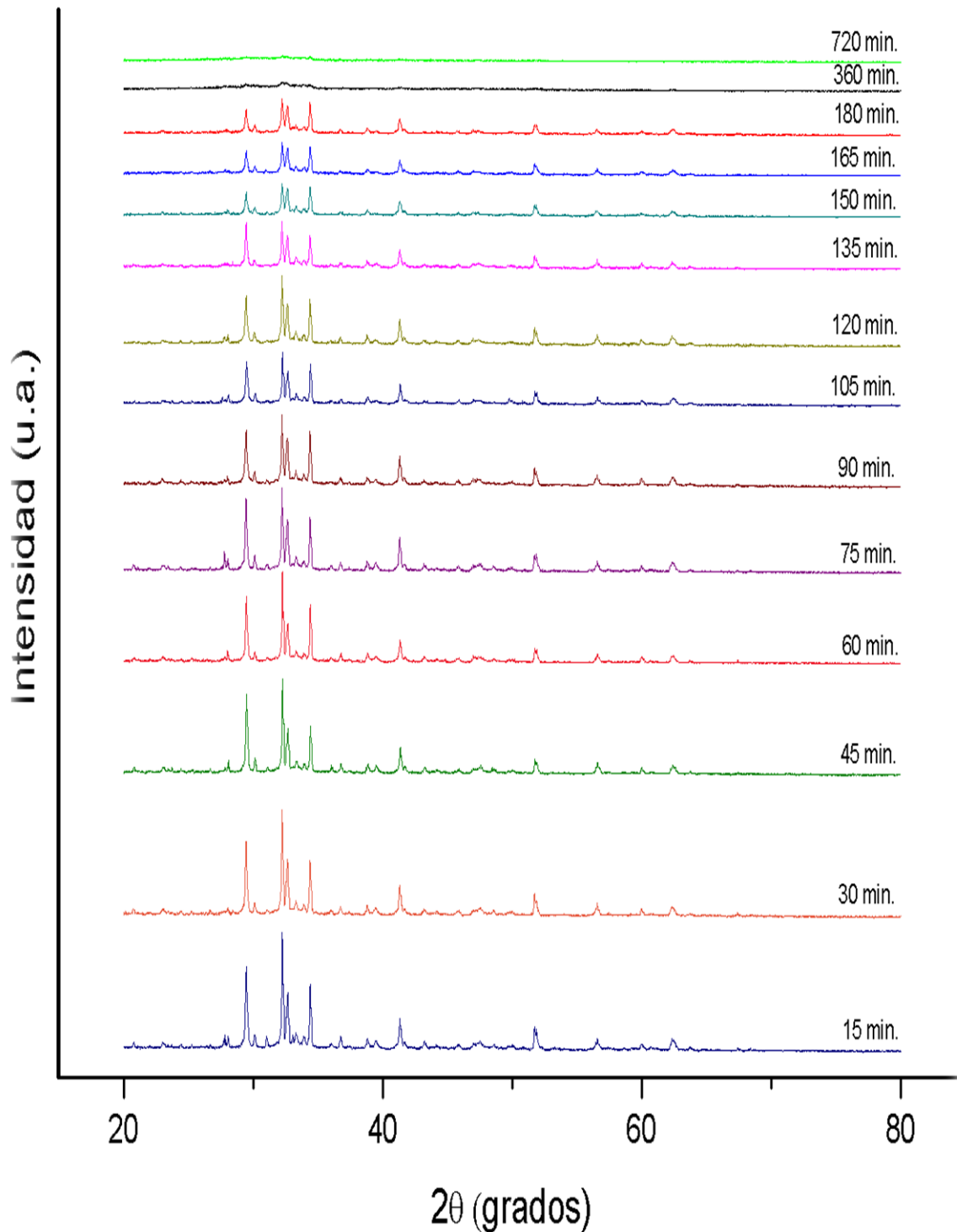


Fig. 27. Patrones de difracción de rayos X del cemento CPC molido por alta energía (HEM) a los tiempos indicados. Se aprecia una disminución importante en la intensidad de los planos de difracción conforme aumenta el tiempo de molienda, es decir, el grado de distorsión cristalina de los óxidos metálicos aumentó sustancialmente.

Durante la molienda del mineral cerámico se presenta la disminución del tamaño de partícula, ocasionado por la fractura repetitiva e incesante del polvo. Eventualmente y una vez que el polvo no puede reducir más su tamaño (debido a la relación de masa bolas/polvo) así como al tamaño de bolas usado, la energía mecánica suministrada se acumula en la microestructura del polvo ocasionando la distorsión de la red cristalina de los óxidos metálicos que constituyen a la mezcla de minerales (CPC). Esta distorsión de la red cristalina se aprecia claramente en la Figura 27, que muestra los patrones de difracción de rayos X del cemento Pórtland compuesto CPC en su estado tal como se adquiere comercialmente y su contraparte una vez molido mecánicamente por alta energía (HEM) hasta 720 min. Resulta evidente que los principales planos de difracción del CPC han reducido sustancialmente su intensidad e inclusive algunos desaparecieron.

En la Figura 28, se presenta el patrón de difracción de rayos X del polvo CPC sometido a 920 min de intensa molienda mecánica. La finalidad de mostrarlo aisladamente es para evidenciar el grado de distorsión microestructural alcanzado. Nótese que para poder revelar la presencia de ciertos picos de difracción fue necesario aumentar la resolución del fondo del patrón DRX, es decir que el ruido o dispersión de la línea de patrón fue aumentada.

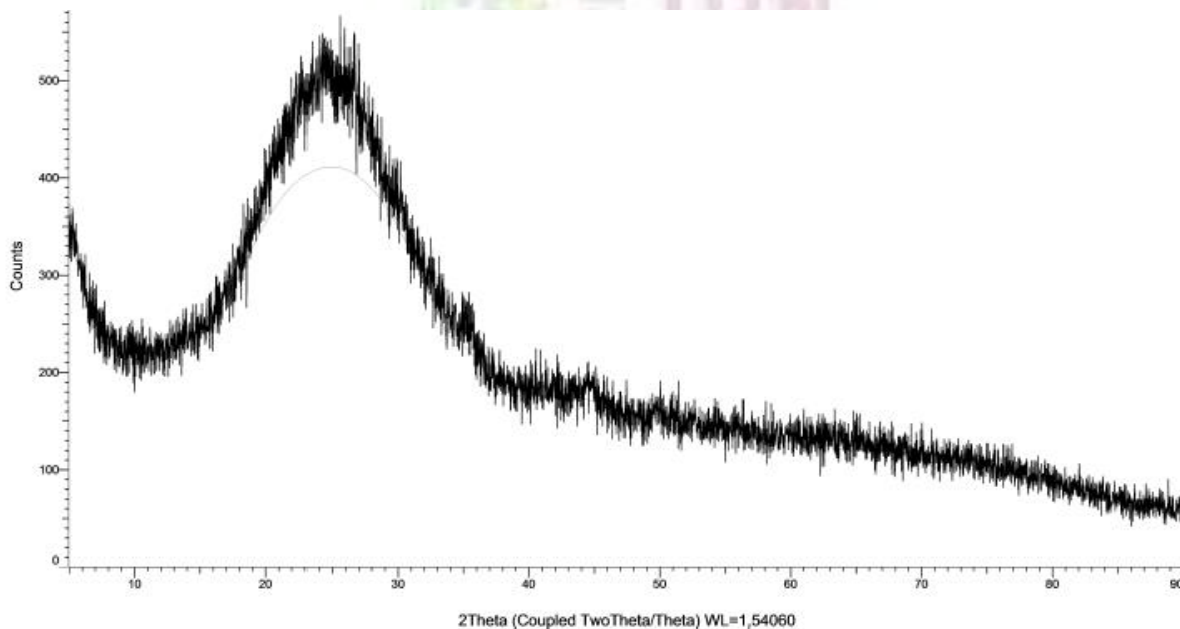


Fig. 28. Patrón de difracción de rayos X del cemento CPC molido por HME durante 920 min.

#### D. EFECTO DEL TIEMPO DE MOLIENDA (MECANO-ACTIVACIÓN) EN LAS CURVAS DE HIDRATACIÓN DE LAS MEZCLAS COMPÓSITOS

La figura 29 y la tabla 11 muestran las curvas de hidratación contra tiempo, así como los datos numéricos de los diferentes productos obtenidos a partir de la mecano activación (HEM). Es posible apreciar una alta reactividad del producto obtenido durante el mayor tiempo de molienda, la muestra "D-A" revela un rápido incremento del flujo de calor, cuando se compara contra los productos obtenidos en tiempos de molienda inferiores. Es interesante mencionar que dicho efecto parte de un CPC, con un bajo contenido de CaO libre o cal viva que típicamente al combinarse con agua reacciona rápidamente para formar hidróxido de calcio, produciéndose una reacción exotérmica. Las curvas de hidratación mostradas a pesar de llevar un proceso de hidratación mas lento en comparación con el CaO, debido a su alto porcentaje de alita y belita, muestran un considerable aumento en su flujo de calor que no puede ser omitido y en base a los resultados experimentales correspondientes a las pruebas de compresión, una relación directa en la resistencia mecánica del concreto.

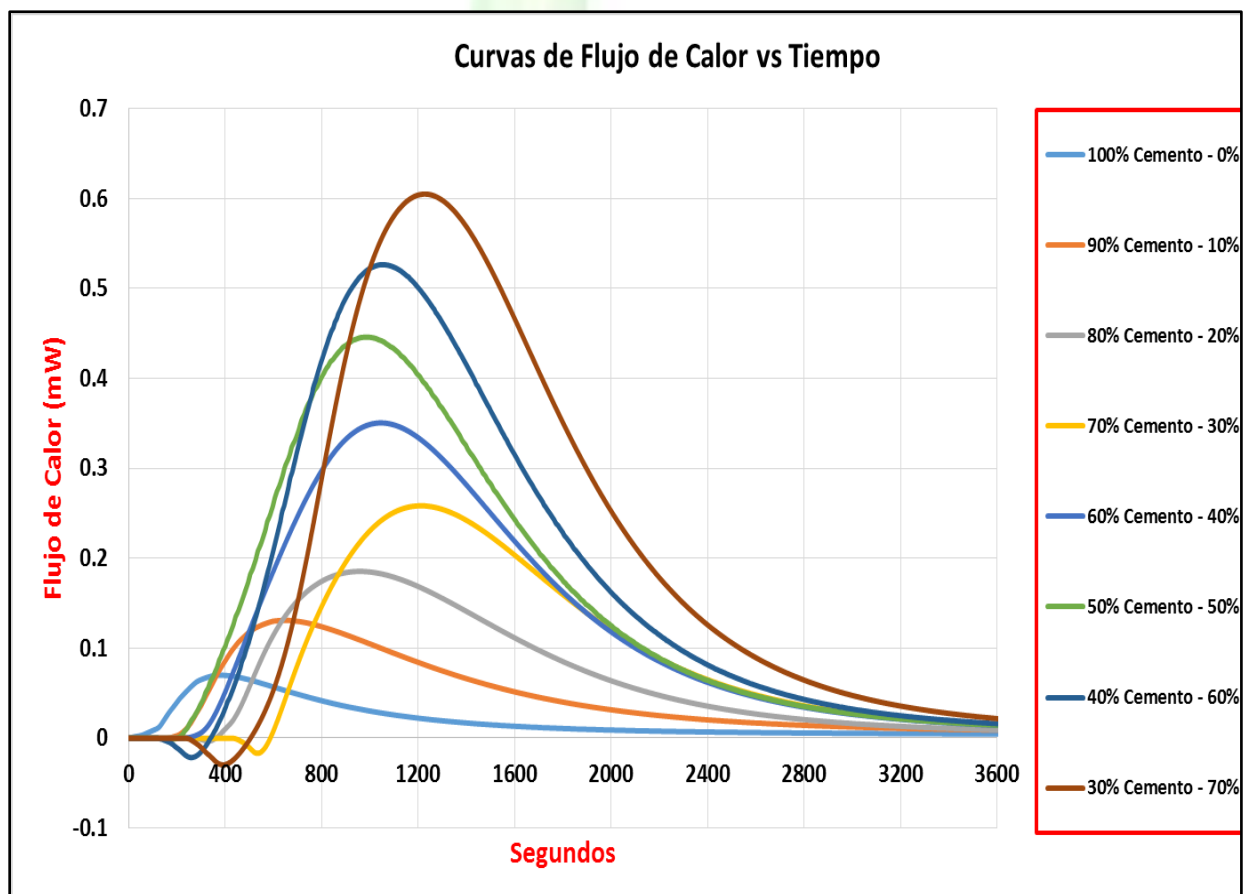


Fig. 29. Curvas de hidratación de los productos obtenidos después de aplicar HME al cemento CPC. El aumento de la reactividad del cemento guarda una estrecha relación con los tiempos y los parámetros de molienda.

<b>RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS PARA MEDIR EL FLUJO DE CALOR CON MUESTRAS DE 10 grs.</b>				
<b>% CPC</b>	<b>%CPC HME</b>	<b>VALOR DE FLUJO DE CALOR ALCANZADO (mW)</b>	<b>TIEMPO (seg.)</b>	<b>ÁREA BAJO LA CURVA</b>
100	0	0.06993	390.16	70.78
90	10	0.13098	639.59	167.23
80	20	0.18538	958.25	246.12
70	30	0.25830	1211.969	339.16
60	40	0.39044	1047.49	459.25
50	50	0.44581	975.62	559.25
40	60	0.52636	1049.65	640.19
30	70	0.60485	1226.47	746.23

Tabla11. Valores de flujo de calor alcanzados mediante la combinación de CPC y CPC HME.

#### E. EFECTO DE LA MOLIENDA DE ALTA ENERGÍA EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO

Una vez que fue realizada la caracterización del polvo de cemento CPC y en base a la marcha experimental se realizó la construcción de probetas para el ensaye de resistencia a la compresión.

#### NORMA MEXICANAS QUE CONSIDERADAS EN LA FABRICACIÓN DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO

1. Construcción de concreto hidráulico para uso estructural (NMX-C-403-ONNCCE-1999)  
Esta norma mexicana establece las especificaciones y métodos de prueba que debe cumplir el concreto hidráulico para su uso estructural utilizado como material de construcción en la edificación de estructuras, por lo tanto, dicha norma es aplicable para que el concreto hidráulico sea industrializado o hecho en obra con medios mecánicos.
2. Concreto fresco – muestreo (NMX-C-161-1997-ONNCCE)  
Esta norma mexicana establece el método para obtener muestras representativas de concreto fresco, tal como se entrega en el sitio de la obra y con las cuales se realizan las pruebas para determinar el cumplimiento de los requisitos de la calidad convenidos.
3. Determinación del revenimiento del concreto fresco (NMX-C-156-ONNCCE-2010)  
Esta norma establece los procedimientos para determinar la consistencia del concreto hidráulico en estado fresco mediante el método conocido como revenimiento.

En éste se obtienen valores confiables de revenimiento en el intervalo de 2 cm a 20 cm, es aplicable al concreto fresco industrializado o hecho en obra con tamaño máximo nominal del agregado menor de 50 mm

El revenimiento o asentamiento es uno de los factores que influyen en la trabajabilidad del concreto, medido este mediante el cono de Abrams.

4. Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio (NMX-C-159-ONNCCE-2004).

Esta norma establece los procedimientos para elaborar y curar en el laboratorio, los especímenes de concreto utilizados para las pruebas de resistencia a la compresión, a la flexión y a la tensión diametral.

5. Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por método gravimétrico (NMX-C-162-ONNCCE-2010).

Esta Norma ofrece el procedimiento para la determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire por el método gravimétrico, es aplicable al concreto fresco industrializado o hecho en obra.

Sin embargo, no debe aplicarse a los concretos secos o de bajo revenimiento, como los que se usan en la fabricación de elementos precolados.

6. Agua para el concreto (NMX-C-ONNCCE-2004).

Esta norma establece los requisitos para las aguas naturales o contaminadas, diferentes de las potables que se pretendan emplear en la elaboración o curado del concreto hidráulico. Así mismo, se da a conocer la acción agresiva de diferentes tipos de agua.

7. Determinación de la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto (NMX-C-083-ONNCCE-2002).

Esta norma establece los métodos de prueba para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en especímenes cilíndricos moldeados y corazones de concreto con masa volumétrica mayor a  $900 \text{ kg/m}^3$ .

8. Concreto hidráulico - determinación del cabeceo de especímenes (NMX-C-109-ONNCCE-2010).

Esta norma determina los procedimientos de cabeceo en especímenes con el fin de obtener planicidad y perpendicularidad en sus bases para su ensayo y es aplicable al concreto hidráulico endurecido. En la preparación se puede utilizar cemento puro o mortero de azufre. Los morteros de azufre comerciales o preparados en laboratorio deben alcanzar su resistencia en 2 horas para resistencias hasta de  $350 \text{ kg/cm}^2$ .

9. Concreto – terminología (NMX-C-251-1997-ONNCCE).

Esta norma establece las definiciones de los términos utilizados en la industria del concreto.

10. Norma Mexicana NMX-C-414 ONNCCE (Cementos hidráulicos-especificaciones y métodos de prueba).

De acuerdo a esta norma el cemento Portland compuesto (CPC) presenta excelente durabilidad en prefabricados para alcantarillados y a los concretos les proporciona una mayor resistencia química y menor desprendimiento de calor.

### FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO

Durante el proceso de fabricación de las mezclas de concreto para que desarrollen una resistencia a la compresión a los 28 días de edad, fueron diseñadas mezclas de concreto de  $300 \text{ kg/cm}^2$  así como aquellas mezclas de CPC en distintas relaciones de combinación CPC NORMAL y CPC MECANO - ACTIVADO se incorporaron y mezclaron los componentes completamente hasta que se observó que tuvieran una apariencia uniforme (con todos sus ingredientes igualmente distribuidos).

La mezcladora empleada es del tipo estacionaria con capacidad para un bulto de cemento (50 kg), por lo que, se puso cuidado en no cargarla por arriba de sus capacidades y se operó a una velocidad de mezclado que permitiera que los componentes se mezclaran de manera uniforme. (Fig. 30).



Fig. 30. Incorporación de CPC mecano activado previamente dosificado, al CPC normal

Existen diferentes procedimientos utilizados en campo para llevar a cabo la fabricación de las mezclas de concreto de los componentes en la fabricación del concreto, sin embargo a



continuación de describen los pasos recomendados por la NMX-C-085-1982 (mezclado de pastas y morteros):

1. Se debe colocar aproximadamente el 10% de la cantidad de agua de mezcla en el trompo (tambor) antes que los materiales sólidos sean agregados.
2. El agua restante se debe adicionar uniformemente con los materiales sólidos, dejando cerca de un 10% para ser añadido después que todos los materiales estén en el tambor.
3. El cemento se debe de colocar antes de la arena y después de la grava.
4. Los aditivos retardadores o reductores de agua, se deben adicionar siempre en la misma secuencia en el ciclo de cargamento. De otra manera, pueden ocurrir grandes variaciones en el tiempo de fraguado o en el porcentaje de aire incluido (incorporado).
5. Que el tiempo de mezclado sea de aproximadamente de 2.0 min a 3.0 min.

El concreto recién mezclado debe ser plástico o semifluido y generalmente capaz de ser moldeado a mano. Una mezcla de concreto muy húmeda se puede moldear en el sentido de que puede colarse en el molde o cimbras.

En una mezcla plástica de concreto todos los granos de arena y los trozos de grava o piedra son envueltos y sostenidos en suspensión. Los ingredientes no son propensos a la segregación durante el transporte; y cuando el concreto se endurece, se transforma en una mezcla homogénea de todos los componentes.

Durante la colocación, el concreto de consistencia plástica no se desmorona y fluye lentamente sin segregarse. Es necesaria una mezcla plástica para la resistencia y el mantenimiento de la homogeneidad durante el manejo y la colocación. Como una mezcla plástica es apropiada para la mayoría de las obras en concreto, se pueden usar los aditivos plastificantes (fluidificantes) para que el concreto fluya más fácilmente en elementos delgados y fuertemente reforzados.

La secuencia, sin embargo, puede variar y aún producir un concreto de buena calidad. Las diferentes secuencias requieren ajustes en el momento de la incorporación del agua, el número total de revoluciones del tambor (trompo) de la mezcladora y la velocidad de la revolución.

#### A. PRUEBA DE REVENIMIENTO

Durante el proceso de fabricación de las mezclas de concreto, que de acuerdo a las dosificaciones de cemento cruz azul desarrollaran una resistencia a la compresión ( $f_c$ ) de los 28 días de 150, 200 y 250 kg/cm<sup>2</sup>, así como aquellas mezclas a las que se les agrego la densita (aditivo) dosificado en peso en 2, 4 y 6 kg, se incorporaron y mezclaron los componentes completamente hasta que

se observó que tuvieran una apariencia uniforme (con todos sus ingredientes igualmente distribuidos).

Se tomaron mezclas representativas a las cuales se les aplicó la prueba de revenimiento, la cual es usada extensamente en el campo en todo el mundo, ya que esta prueba es muy útil como una medida de la consistencia.

La varilla para la compactación es una barra de acero de sección circular, recta, lisa, de 16 mm (5/8", aproximadamente) de diámetro y aproximadamente 600 mm., de longitud, con uno o los dos extremos de forma semiesférica del mismo diámetro de la varilla. (Fig. 31).

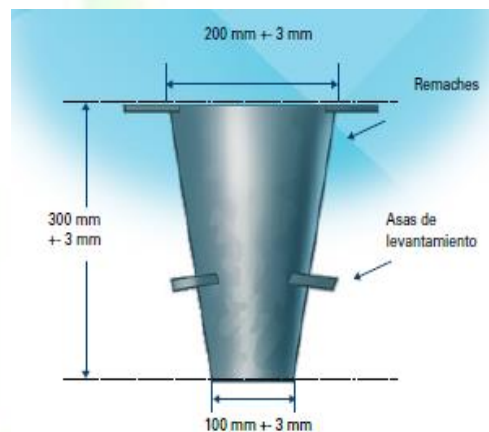


Fig. 31. Cono de Abrams, para aplicar la prueba de revenimiento al concreto fresco.

## B. CURADO

El curado es el nombre que se le da a los procedimientos utilizados para promover la hidratación del cemento; consiste en un control de la temperatura y en el movimiento de humedad, a partir de la superficie, hacia dentro del concreto.

Siempre se debe enfatizar la necesidad de curado pues tiene una fuerte influencia sobre las propiedades del concreto endurecido, o sea, el curado adecuado hace con que el concreto tenga mayor durabilidad, resistencia, impermeabilidad, resistencia a abrasión, estabilidad dimensional, resistencia a congelación-deshielo y a descongelantes.

Cuando el cemento portland se mezcla con el agua, empieza una reacción química, llamada de hidratación. El grado de la hidratación (extensión hasta la cual la reacción se completó) tiene influencia sobre la resistencia y la durabilidad del concreto. El concreto recién mezclado

normalmente contiene más agua que la requerida para la hidratación del cemento, sin embargo la pérdida excesiva de agua por evaporación puede disminuir o prevenir la hidratación adecuada. La superficie es particularmente susceptible a la hidratación insuficiente porque se seca primero. Si la temperatura es favorable, la hidratación es relativamente rápida en los primeros días después de la colocación del concreto. Por lo tanto, es importante que se retenga agua en el concreto durante este periodo, o sea, se debe evitar la evaporación o reducirla considerablemente. Con el curado adecuado, el concreto se vuelve más impermeable y más resistente a esfuerzos, a abrasión y a congelación-deshielo. El desarrollo de las propiedades es muy rápido en los primeros días, pero después continúa más lentamente por un periodo de tiempo indefinido.

A continuación se muestra en la figura 32 que un concreto que está constantemente húmedo todo el tiempo adquiere mayor resistencia a la compresión, en relación a un concreto con diferentes tiempos de curado.

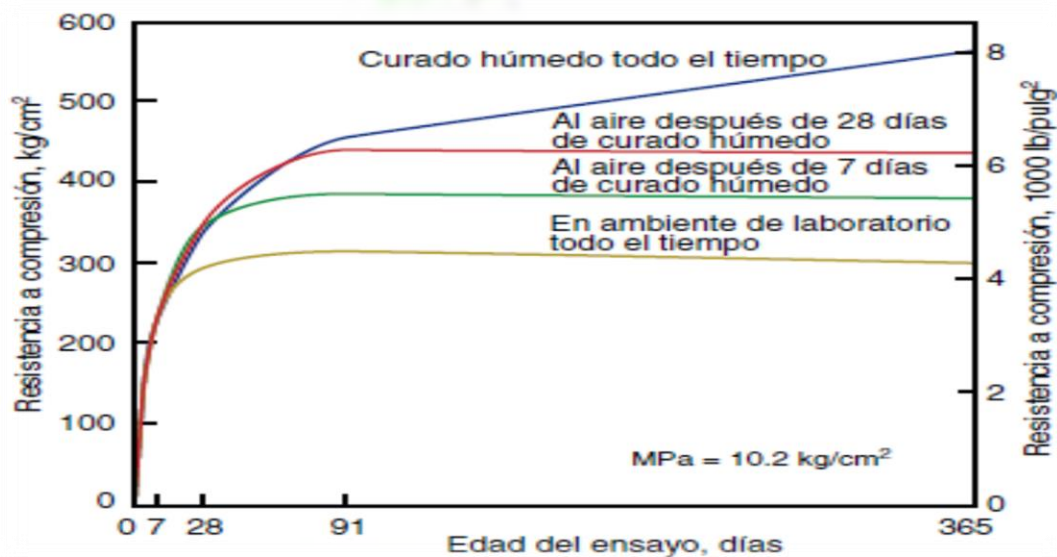


Fig. 32. Efecto del tiempo de curado húmedo sobre el desarrollo de la resistencia del concreto.

De acuerdo a la norma NMX-C-159-ONNCCE-2004 (Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio) para la elaboración de los especímenes cilíndricos de concreto, se descimbraron a las 24 hs después de la fabricación del concreto, procediendo posteriormente a colocarse dentro del tanque de almacenamiento para que estuvieran totalmente sumergidos en agua.

Un tanque de almacenamiento es un recipiente o pileta con agua a temperatura ( $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) controlada y de dimensiones tales que permita el almacenamiento de especímenes totalmente sumergidos en agua.

El tanque debe ser de tal tamaño que los especímenes queden separados entre sí alrededor de 1 cm y entre ellos y las paredes del tanque 3 cms. El tirante de agua debe ser cuando menos 2 cms superior a la superficie libre de los especímenes. El elemento calefactor deberá estar alejado por lo menos 10 cms de los especímenes.

El agua en el tanque de almacenamiento debe estar saturada de cal para prevenir la lixiviación del hidróxido de calcio de los especímenes. El agua no saturada con hidróxido de calcio puede afectar los resultados de la prueba y no deberá utilizarse en ninguna circunstancia.

Para lograr que el agua esté saturada de hidróxido de calcio es necesario añadirle una cantidad de 3 grs de hidróxido de calcio por litro de agua. Los tanques deberán lavarse y cambiarles el agua con cal en periodos no mayores a 24 meses. Cabe decir que el contenido mínimo para asegurar la saturación de cal en el agua es de 1.6 g/L. El agua de los tanques debe mezclarse en intervalos no mayores de un mes lo que permitirá reemplazar la concentración de iones de calcio que haya disminuido. No debe de utilizarse un tanque que contenga un flujo continuo de agua fresca o desmineralizada ya que esto ocasiona una lixiviación muy elevada del hidróxido de calcio que puede afectar los resultados de la prueba. (Fig. 33).



Fig. 33. Colocación de los especímenes de concreto en un tanque de almacenamiento.

### C. CABECEO DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO

El cabeceo es la preparación con cemento puro o mortero de azufre, de las bases de los especímenes cilíndricos para lograr el paralelismo entre las caras para su prueba, en este caso se utilizó el mortero de azufre.

Los platos metálicos para el cabeceo con mortero de azufre se deben emplear platos metálicos cuyo diámetro sea por lo menos 5,0 mm mayor que el del espécimen por cabecear y su superficie de asiento no debe apartarse de un plano en más de 0.05 mm en 150 mm. La superficie de los platos debe estar libre de estrías, ranuras o depresiones mayores de 0.25 mm de profundidad en un área geométrica regular de 32 mm<sup>2</sup> (Fig. 34). El espesor de la placa debe ser: en platos nuevos de 13 mm o más; en platos usados de 11 mm mínimo. En ningún caso la depresión debe reducir el espesor mínimo de 11 mm.

En cuanto al recipiente para fundir el azufre; existen dos tipos: los equipados con dispositivos que controlan automáticamente la temperatura y los sometidos a calor externo. En ambos casos los recipientes deben estar fabricados o forrados de un material que no sea reactivo con el mortero de azufre fundido. Para realizar la operación de fundido se debe contar con una campana de extracción de gases. Cabe decir que calentar el azufre con flama directa es peligroso debido a que el punto de ignición del azufre es de 227°C y el mortero puede encenderse por sobrecalentamiento.

Los morteros de azufre comerciales o preparados en laboratorio deben alcanzar su resistencia en 2 h como máximo para resistencias hasta de 35 MPa (357 kg/cm<sup>2</sup>).



Fig. 34. Plato metálico nivelado para el cabeceo de especímenes cilíndricos con mortero de azufre.

Dispositivos para alineamiento: Deben emplearse dispositivos de alineación tales como barras guía o niveles de "ojo de buey", en unión con las placas de cabeceo, para asegurar que ninguna capa se aparte de la perpendicularidad al eje del espécimen cilíndrico en más de 0,50 (aproximadamente 3 mm en 300 mm). (Fig. 35, 36 y 37) El mismo requisito es aplicable a la relación entre el eje del dispositivo de alineamiento y la superficie de la placa de cabeceo cuando se usen barras guía.



Fig. 35. Cabeceo con mortero de azufre de cilindros de concreto.





Fig. 36. Cabeceo nivelado de un cilindro de concreto.



Fig. 37. Recipiente eléctrico para fundir el azufre.



### 3.4 PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Se pueden usar otras edades para las pruebas, pero es importante saber la relación entre la resistencia a los 28 días y la resistencia en otras edades. La resistencia a los 7 días normalmente se estima como 75% de la resistencia a los 28 días y las resistencias a los 56 y 90 días son aproximadamente 10% y 15% mayores que la resistencia a los 28 días. En este caso particular, debido a la dificultad que representa obtener CPC ultrafino, los especímenes obtenidos han sido ensayados a los 28 días de curado. (Fig. 38).

En el terreno de la Ingeniería Civil es bien conocido que la resistencia a compresión es una propiedad principalmente física y frecuentemente usada en los cálculos para diseño de puentes, edificios y otras estructuras.



Fig. 38. Cilindros de concreto CPC Ultrafino listos para ensayos de resistencia a la compresión.

Para la aplicación de la carga de compresión axial, se contó con una celda de carga con capacidad de 100 ton, con la cual se obtuvo una curva de calibración de la máquina, con lo que fue posible obtener valores más exactos de las pruebas aplicadas a los especímenes de concreto. (Fig. 39 y 40).



Fig. 39. Empleo de una celda de carga para calibración de la máquina de compresión ELE serie CT-7540A.

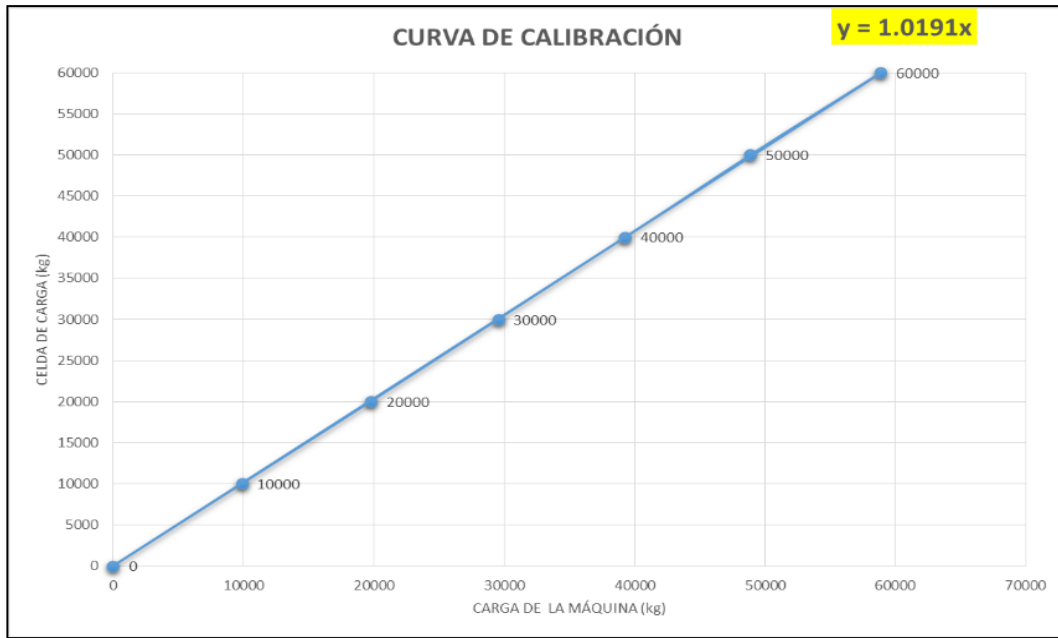


Fig. 40. Curva de calibración de la máquina de compresión ELE serie CT-7540A.

Preparación y acondicionamiento de las muestras para aplicarles la prueba de resistencia a la compresión.

El diámetro y la altura del espécimen de prueba se determinaron promediando las medidas de 2 diámetros perpendiculares entre sí a una altura media del espécimen y 2 alturas opuestas con una aproximación de 1 mm.

En las figuras 41, 42 podemos observar un cilindro de concreto CPC ultrafino previo y posterior ensaye de resistencia a la compresión, así como en la figura 43, los resultados finales de las pruebas realizadas así como la resistencia alcanzada.



Fig. 41. Especimen listo para ser fallado.



Fig. 42 Plano de falla de un espécimen de concreto.

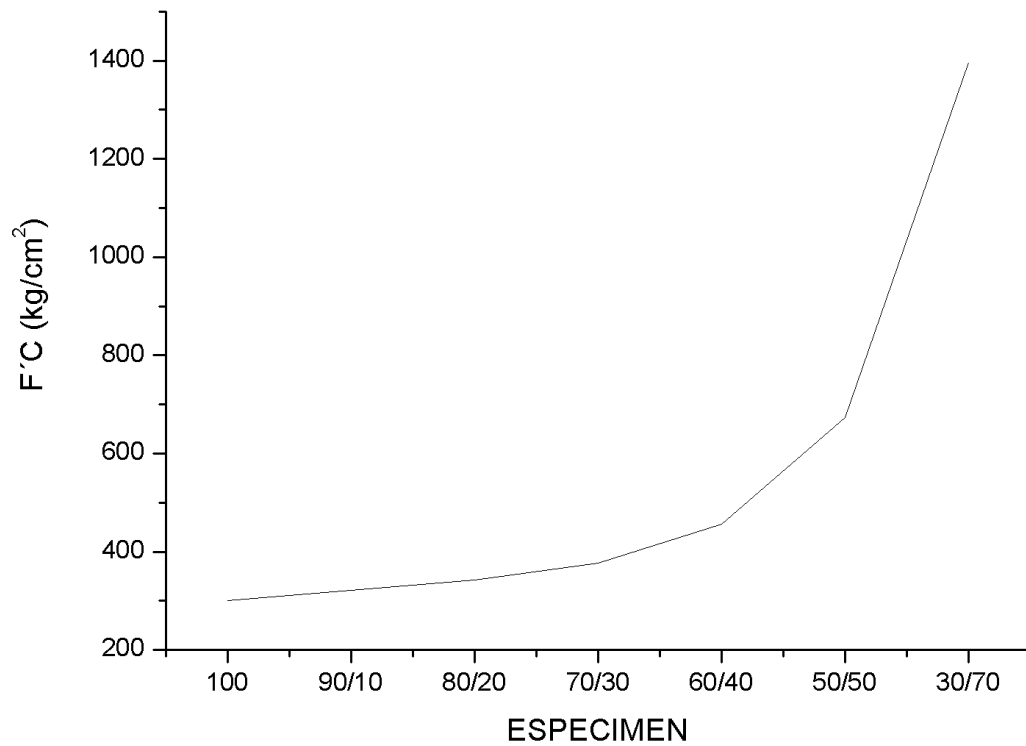


Fig. 43. Resultados de resistencia a la compresión de especímenes de CPC y CPC HME.

### 3.5 REALIZACIÓN DE PRUEBAS BALÍSTICAS

La Figura 44 muestra algunas fotografías de las pruebas balísticas realizadas en el Campo Militar No. 1-F (Santa Fe, Ciudad de México).

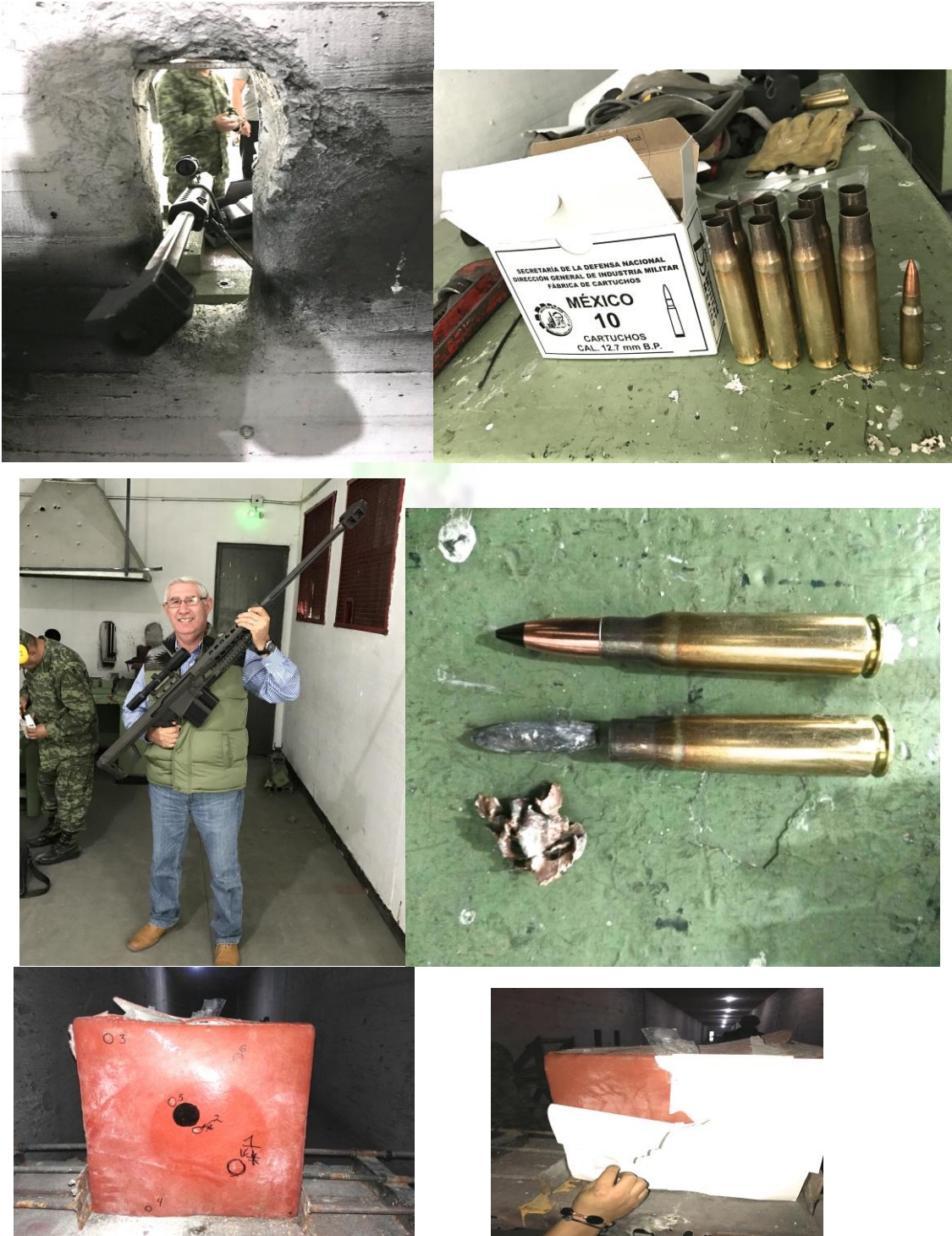


Fig. 44. Probeta compósito de concreto. Resistió 6 (SEIS) impactos Cal. 50 perforante. La norma UL-752, establece que debe resistir para un área equivalente 40 x 40 cm 1 (UN) impacto con núcleo dúctil. [Imágenes cortesía de la Galería de Tiro perteneciente a la Fábrica de Cartuchos del Ejército Mexicano. Campo Militar No. 1-F Santa Fe, Cd. de Méx. 2016.]

## ANÁLISIS DE FRACTURA DEL MURO COMPÓSITO POR IMPACTO DE CALIBRE 50

En la Figura 45, se presenta la probeta experimental CBHME 01 desarrollada en el Laboratorio de Concreto de la Escuela Militar de Ingenieros (Campo Militar No. 1-B Popotla, Cd. Méx) durante la presente investigación en su estado inicial y sin recubrimiento polimérico (PREVIO IMPACTO DE ARMA DE FUEGO).



Fig.45. Probeta CBHME 01 de 40x40x15 cm de dimensión, sin recubrimiento polimérico, previo impacto de arma de fuego. Imagen cortesía de la Fábrica de Cartuchos del Ejército Mexicano, Campo Militar No. 1-F, Santa Fe, Cd. Méx.

A continuación, en la figura 46 podemos observar la Probeta CBHME 01 posterior al impacto del barret Cal. 50.



Fig.46. Probeta CBHME 01 de 40x40x15 cm sin recubrimiento polimérico, posterior a impacto de Barret Cal. 50. Imagen cortesía de la Fábrica de Cartuchos del Ejército Mexicano, (Campo Mil. No. 1-F, Santa Fe, Cd. México).

Respecto a la Fig. No. 46 es posible apreciar una estrella de 10 (DIEZ) aristas formada como consecuencia del corrimiento de las grietas en el monobloque. La manera quasi equitativa con la cual las aristas ha sido formada nos indica un comportamiento isotrópico en la distribución de la energía producto del impacto de arma de fuego en el concreto. Dicho propiedad mecánica, es bastante interesante desde el punto de vista estructural, específicamente sismo - resistencia y será retomada como una nueva línea de investigación en el futuro por el autor del presente trabajo de investigación.

En la Figura 47, se presenta la probeta experimental CBPHME 01 desarrollada en el Laboratorio de Concreto de la Escuela Militar de Ingenieros (Campo Militar No. 1-B Popotla, Cd. Méx) durante

la presente investigación en su estado inicial y sin recubrimiento polimérico (PREVIO IMPACTO DE ARMA DE FUEGO).



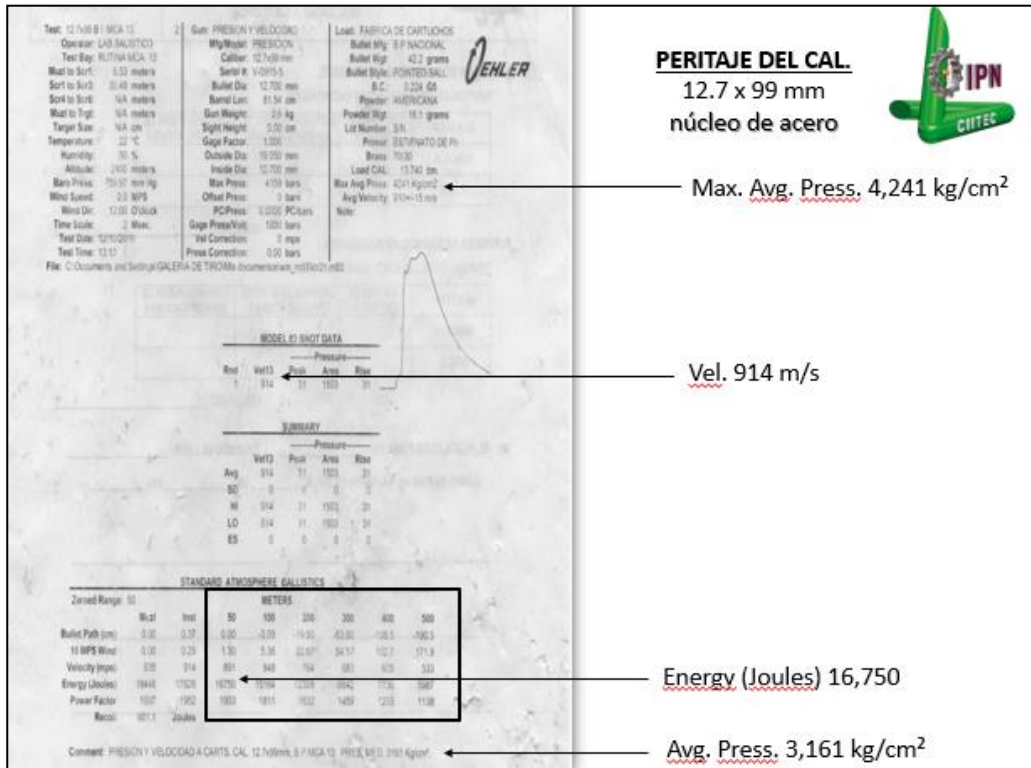
Fig.47. Probeta CBPHME 01 de 40x40x15 cm de dimensión, con recubrimiento polimérico, previo impacto de arma de fuego. Imagen cortesía de la Fábrica de Cartuchos del Ejército Mexicano, Campo Militar No. 1-F, Santa Fe, Cd. Méx.

A continuación, en la figura 48 podemos observar la Probeta CBPHME 01 posterior al impacto del barret Cal. 50.





Fig.48. Probeta CBPHME 01 de 40x40x15 cm con recubrimiento polimérico, posterior a 6 (SEIS) impactos de Barret Cal. 50. Imagen cortesía de la Fabrica de Cartuchos del Ejército Mexicano, (Campo Mil. No. 1-F, Santa Fe, Cd. México).



CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 4.1 CARACTERIZACIÓN

### A. DTP

Shondeep L. Sarkar y John Wheeler en el artículo "IMPORTANT PROPERTIES OF AN ULTRAFINE CEMENT – PART I" reportan: el Cemento Portland Ultrafino (UCP in inglés) es química igual a un Cemento Portland Compuesto (CPC), pero con una distribución de Tamaño de Partícula (DTP) tal que el 95% es menor a 10 micras, a diferencia del CPC que para el mismo porcentaje del 95% del material que requiere que sea menor a 90 micras.

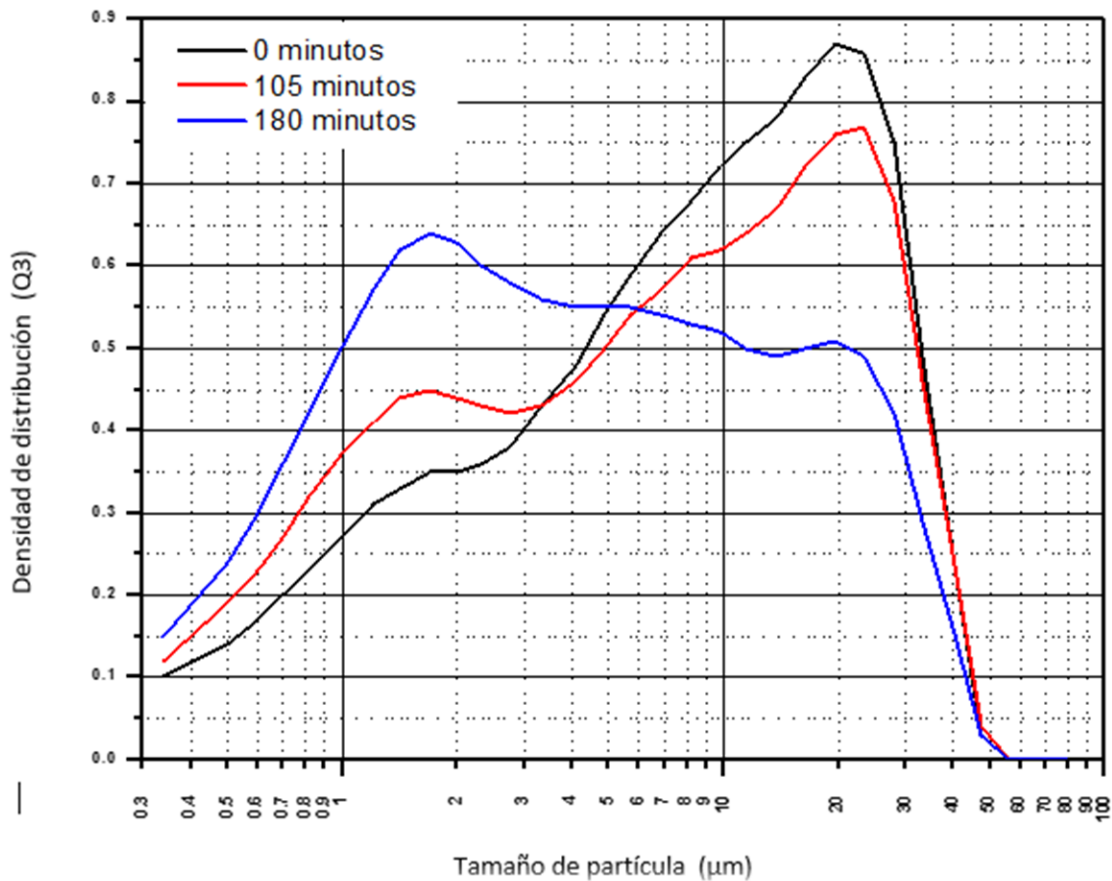


Fig. 49. Resultado de DTP para un CPC normal y CPC sometido a HME.

## B. DRX

Roukaya Mejdoub, Halim Hammi, Mohamed Khitouni, Joan Josep Su y Adel M'nif en el artículo EFFECT OF AMORPHIZATION DEGREE ON MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT PASTE, reportan una amorfización en el CPC mediante 70 horas de molienda.

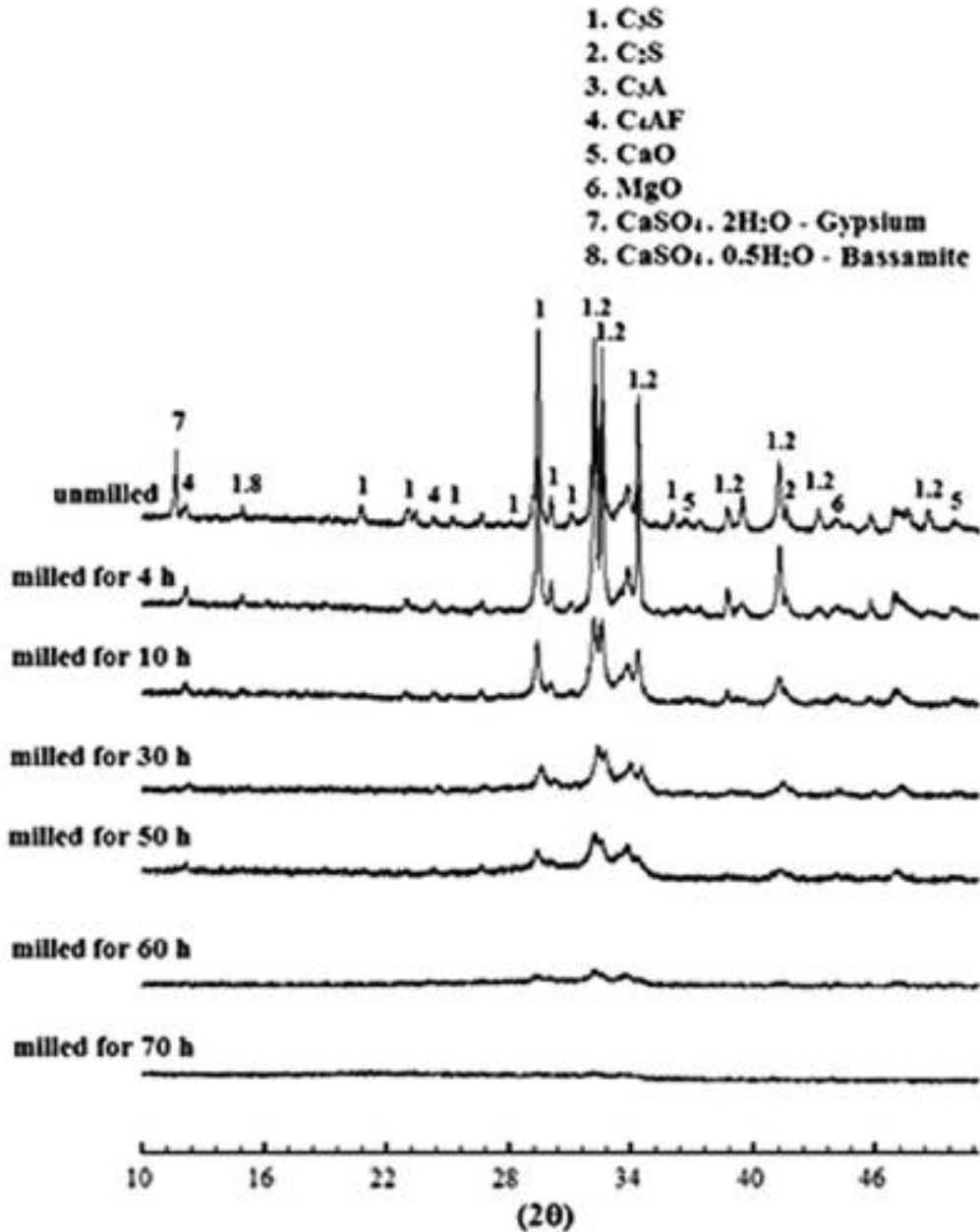


Fig. 50. Patrones de difracción de rayos x de cemento mecano activado en distintos periodos.

En la figura 51 de igual forma, que en la anterior (figura 50) podemos apreciar la evolución de los polvos de CPC sometidos a HME en distintos periodos.

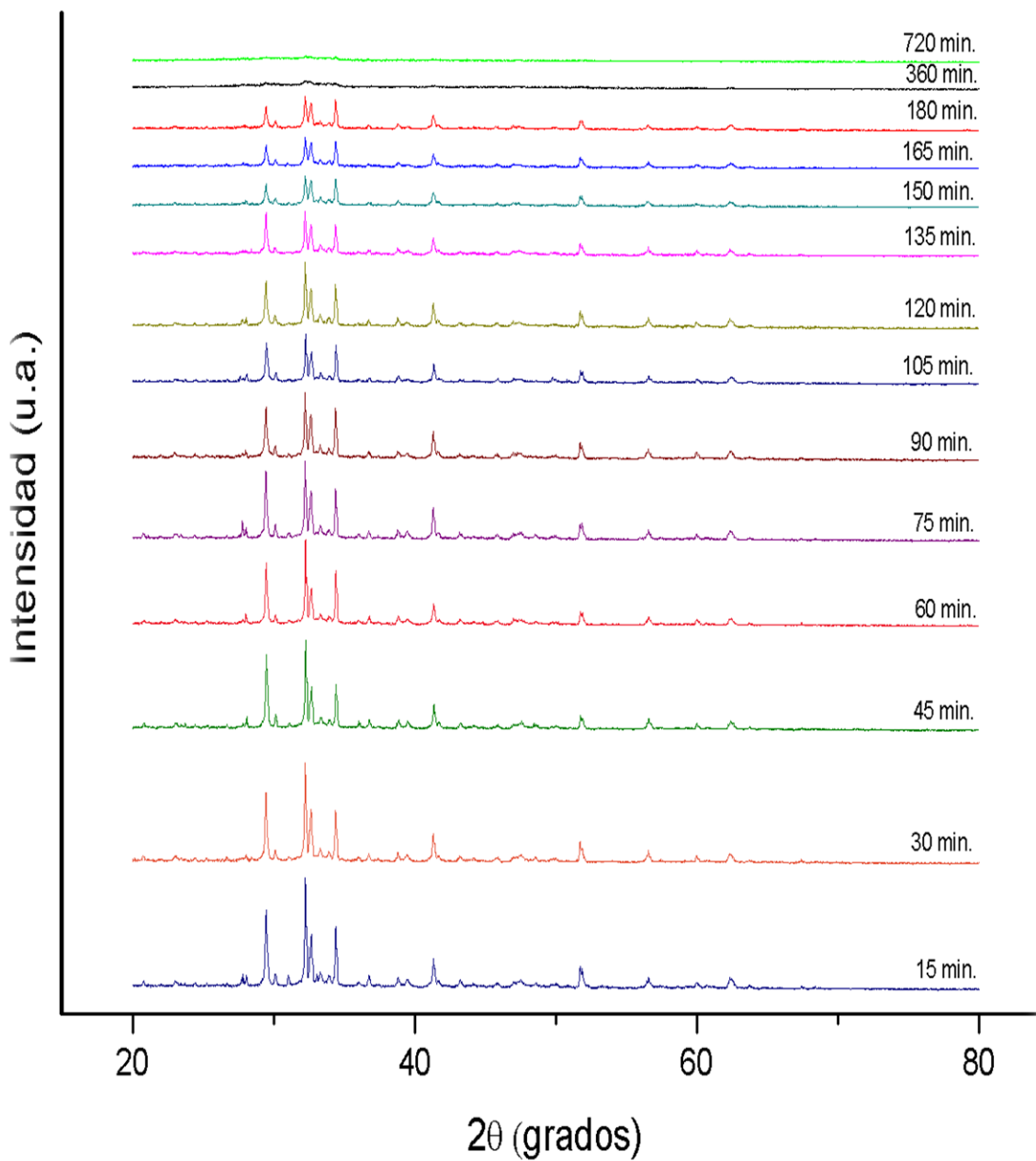


Fig. 51. Resultados de molienda en un CPC normal y un CPC sometido a HEM en distintos periodos.

### C. FLUJO DE CALOR Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Konstantine Sobolev en su artículo "HIGH PERFORMANCE CEMENT FOR HIGH STRENGTH AND EXTREME DURABILITY" reporta una relación directa entre HME, flujo de calor y resistencia a la compresión para un CPC. En la figura 52 podemos apreciar la relación existente en el aumento de flujo de calor y la resistencia a la compresión de un CPC que ha sido sometido a HME.

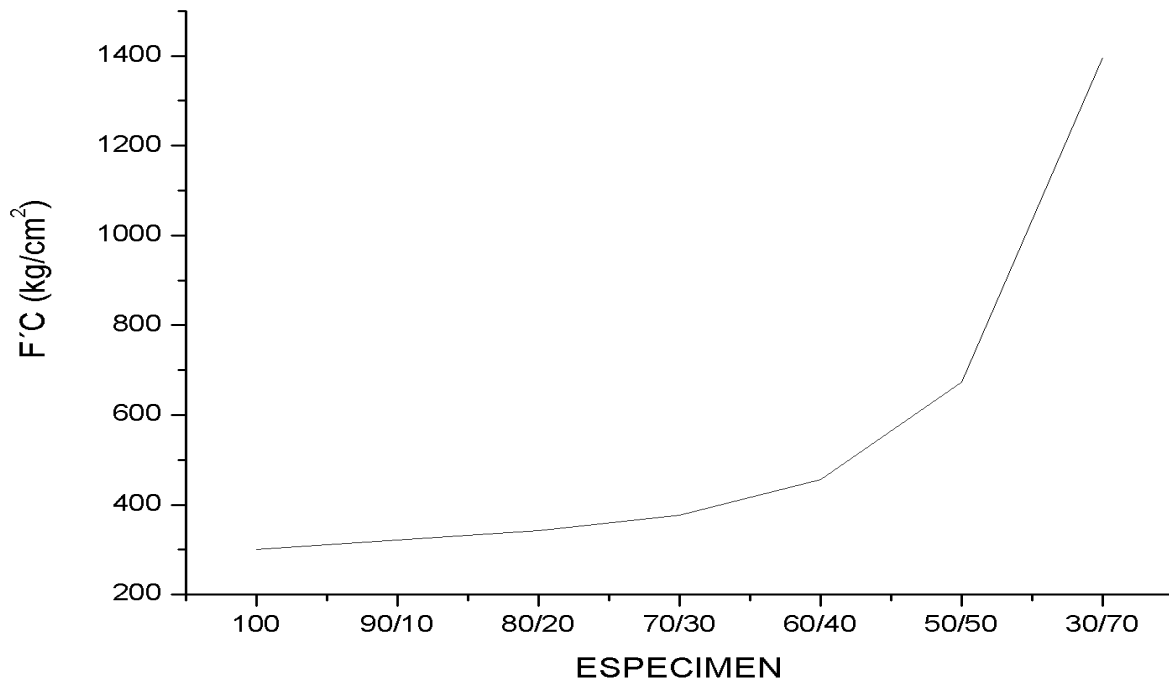
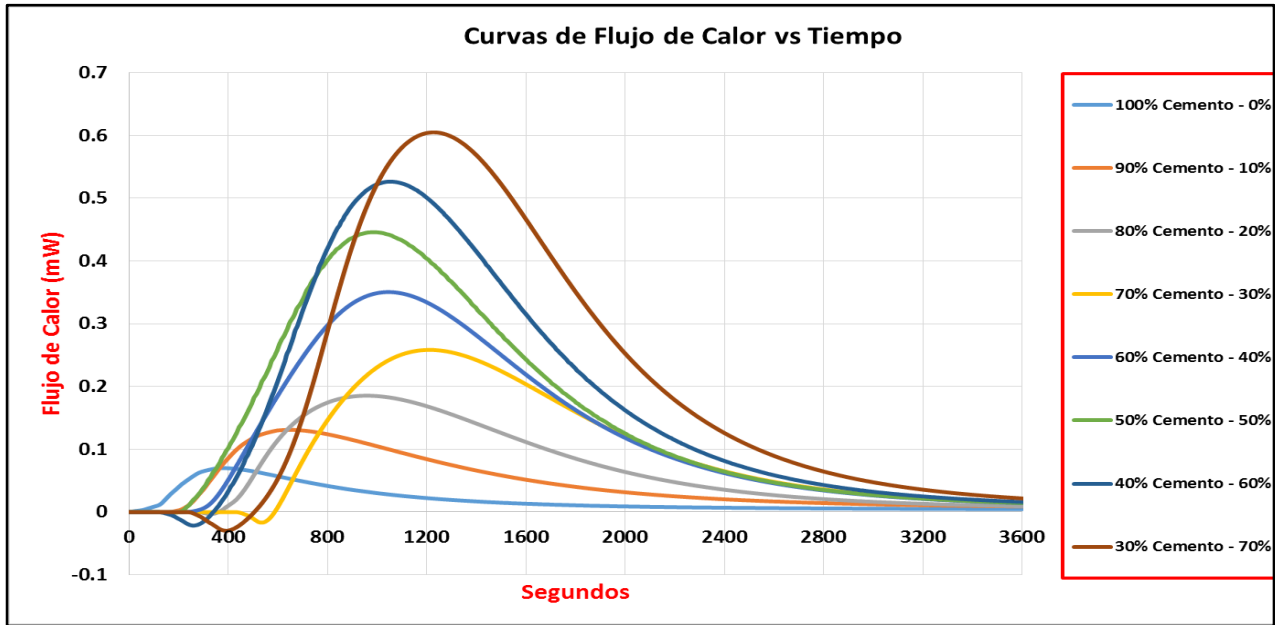


Fig. 52. Resultados comparativos entre el aumento de flujo de calor y aumento en la resistencia mecánica de un CPC que ha sido sometido a HME.

## D. RESULTADOS BALÍSTICOS

A continuación se muestran los resultados de las pruebas efectuadas a las probetas de CPC HME respecto a probetas que contaban polímero en su superficie y aquellas que no contaban, podemos apreciar un aumento sustancial en el número de impactos que dichas probetas resistieron. (Tabla 12). Respecto a estos resultados es importante considerar lo siguiente:

- A. La norma UL-752 solo considera 1 (UN) impacto Cal. .50 bala normal (dúctil) por probeta, en este caso, los cartuchos utilizados fueron Cal. 50 bala perforante (núcle de acero).
- B. La norma UL-752 considera una inclinación de 30° en la probeta, durante las pruebas balísticas, las probetas fueron colocadas a 90°.

Tabla 12. Resultados de pruebas balísticas.

PROBETA	CANTIDAD	No. IMPACTOS	DETENCIÓN
<b>CPC/HME</b>	<b>5</b>		
1		1	EFFECTIVA
2		1	EFFECTIVA
3		1	EFFECTIVA
4		1	EFFECTIVA
5		1	EFFECTIVA
<b>CPC/HME/POLÍMERO</b>	<b>5</b>		
1		6	EFFECTIVA
2		6	EFFECTIVA
3		6	EFFECTIVA
4		6	EFFECTIVA
5		6	EFFECTIVA

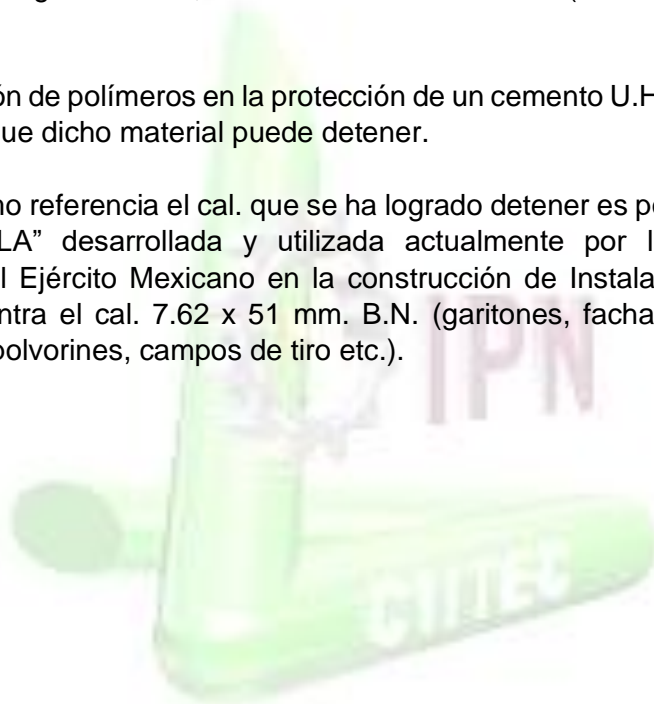


## CONCLUSIONES



## CONCLUSIONES

- A. La molienda de alta energía tiene un efecto en la Distribución del Tamaño de Partículas, el Flujo de Calor, Red Cristalina y Resistencia a la Compresión en el CPC.
- B. Es posible aumentar la resistencia a la compresión ( $f'c$ ) de un cemento a partir de técnicas de molienda de alta energía.
- C. A través de la molienda de alta energía es posible disminuir la intensidad en las fases del polvo de un cemento C.P.C.
- D. Mediante la modificación en la estructura de un cemento es posible realizar la detención de un calibre de grado militar, en este caso 12.7 x 99 mm (cal. .50) en un espesor de muro de 15 cm.
- E. La combinación de polímeros en la protección de un cemento U.H.P.C. optimiza la cantidad de impactos que dicho material puede detener.
- F. Tomando como referencia el cal. que se ha logrado detener es posible reducir costos de la mezcla "PÍPILA" desarrollada y utilizada actualmente por la Dirección General de Ingenieros del Ejército Mexicano en la construcción de Instalaciones Militares para dar protección contra el cal. 7.62 x 51 mm. B.N. (garitones, fachadas principales, entradas municipales, polvorines, campos de tiro etc.).

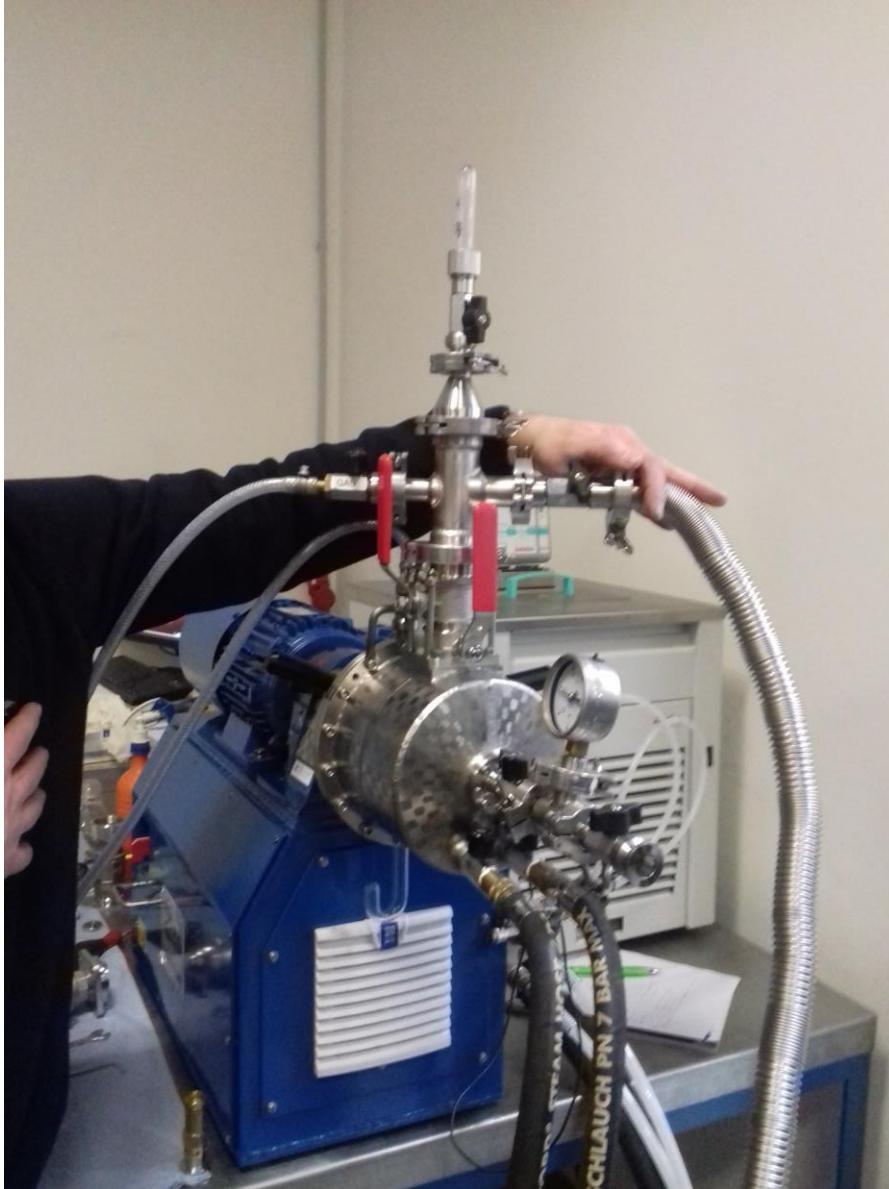


## REFERENCIAS

- [1] Tesis de Doctorado: *Comportamiento mecánico y caracterización de morteros elaborados con cemento Pórtland ultrafino*. Juan Carlos Arteaga Arcos. CIITEC, IPN. México, 2009.
- [2] *Essentials of modern material science and engineering*” John Wiley & Sons, Inc. Jersey, Estados Unidos, 2009.
- [3] *Reaction-diffusion model for the hydration and setting of cement*. F. Tzschichholz, H.J. Herrmann and H. Zanni. *École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle de la Ville du Paris*, 1995.
- [4] *Application of digital-image-based models to microstructure, transport properties, and degradation of cement-based materials. Modelling of Microstructure and its portential for studying transport properties and durability*. Bentz D. P., Garboczi, E.J. and Martys, N.S. Kluwer Academic Publishers, Jennings, Estados Unidos, 1996.
- [5] Tesis de doctorado: *Comportamiento Mecánico y Caracterización de Morteros elaborados con Cemento Pórtland Ultrafino*. Doctorado en Tecnología Avanzada. CIITEC-IPN. 2009.
- [6] Tesis de maestría: *Cemento Portland ultrafino de alta resistencia*. Hernán de la Garza Gutiérrez. CIMAV, México, 2003.
- [7] Tesis de doctorado: *Modelación matemática del cemento Portland ultrafino*. Hernán de la Garza Gutiérrez. CICATA, IPN. México, 2009.
- [8] Definición de hormigón fibroreforzado (Boletín oficial CNR N. 166 parte IV).
- [9] Manual técnico: *Fibras como elemento estructural para refuerzo del concreto*. MACCAFERRI, América Latina. Brasil, 2006.
- [10] *Terminal ballistics test and analysis guidelines for the penetration mechanics branch*. U.S. army laboratory command, *APPROVED FOR PUBLIC RELEASE; DISTRIBUTION IS UNLIMITED*. Estados Unidos, 1992.
- [11] URL: [http://www.municion.org/12\\_7/12\\_70x108.htm](http://www.municion.org/12_7/12_70x108.htm)

- [12] "We were abandoned", Macleans 119 (20). Friscolanti, Michael (5/15/2006).
- [13] URL: <http://www.isbi.us/levels.htm>
- [14] Patente. Cement composite impact bullet resistant. Alanis Ortega. Javier Isaías. México, 2005.
- [15] Patente. Concrete for bulletproof protection and structures thus produced (protecc de 45 a 30 g.) Stival Jacques. Francia, 1988.
- [16] Patente. Concrete Composition based on Wood granulates stabilised by silification. Stival Jacques. Francia, 1990.
- [17] Patente. Concrete reinforced with hybrid nanomaterials. José A. Soto Montoya, Mauricio Martínez Alanís. Estados Unidos, 2013.
- [18] Patente. Composite concrete. Bernard Clavaud. Estados Unidos, 2000.
- [19] Patente. Photoresist containing aliphatic. Michael J. Farland. Estados Unidos, 1991.
- [20] Patente. Cementitious composite material containing metal fiber. Estados Unidos, 1988.
- [21] Patente. Cement additive comprising calcium sulfo-aluminate, an organic adhesive, a foaming agent, and a dispersing agent. Tsutomo Mizunumo; Tsukuru Azumi. Estados Unidos, 1972.
- [22] Patente. Cementitious compositions. Peter Shelley Mills; Rory John Michael Harrys, Estados Unidos, 2010.
- [23] Patente. Method for making concrete blocks. William L. Harbaugh; Raymond S. Smetan. Reino Unido, 1983.
- [24] URL: [http://gmbh.zoz.de/?page\\_id=1262](http://gmbh.zoz.de/?page_id=1262)

- [25] URL: <http://www.heelt.com.ar/Producto.aspx?producto=6>
- [26] URL: <https://www.sympatec.com/EN/LaserDiffraction/HELOS.html>
- [27] URL: <http://www.microscopy.ou.edu/hitachi-3000.shtml>
- [28] URL: <https://www.bruker.com/es/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/x-ray-diffraction/d8-advance/overview.html>
- [29] URL: <http://www.ele.com/Subcategory/1-compression-machines>
- [30] URL: <http://www.oehler-research.com/model57.html>
- [31] URL: <https://barrett.net/firearms/model82a1/#specifications>
- [32] Tesis de Maestría: *Mecano activación de harina para cemento y efecto de la concentración de fluorita en la temperatura de clinkerización*. M.T.A. Ricardo del Ángel Laureano. México, 2015.
- [33] H. Zoz, Mechanical Alloying. Powder Metallurgy in Aerospace, eds P.S. Goodwing, 1995.
- [34] W. Aquin, Z. Chengzhi y Z. Ningsheng: *The theoretical analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement*, Cement and Concrete research, No. 29, pp 1721-1726, 1999.



ANEXOS

## ANEXO A

Acuerdo de confidencialidad formalizado entre el Centro de Investigación e Innovación Tecnológica y la Fundación México – Estados Unidos para la ciencia, con el cual se inicia de manera oficial el proceso de Protección Intelectual (PATENTE) del presente trabajo de investigación.

## ACUERDO DE CONFIDENCIALIDAD

QUE CELEBRAN, POR UNA PARTE, EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, EN LO SUCESIVO "CIITEC", REPRESENTADA POR EL DR. JOSÉ CLAUDIO CENOBIO MÉNDEZ GARCÍA EN SU CARÁCTER DE DIRECTOR GENERAL DEL CENTRO; EL DR. SEBASTIÁN DÍAZ DE LA TORRE EN SU CARÁCTER DE DIRECTOR GENERAL DE TESIS Y EL CAP. 1/o. I.C. ORLANDO GUTIÉRREZ OBESO EN SU CARÁCTER DE ALUMNO DE LA MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA Y POR OTRA, LA FUNDACIÓN MEXICO-ESTADOS UNIDOS PARA LA CIENCIA, A.C., A QUIEN EN LO SUCESIVO SE LE DENOMINARÁ "FUMEC", REPRESENTADA POR EL ING. GUILLERMO RAFAEL FERNÁNDEZ DE LA GARZA, EN SU CARÁCTER DE DIRECTOR EJECUTIVO, A QUIENES CONJUNTAMENTE SE LES DENOMINARÁ "LAS PARTES", AL TENOR DE LAS SIGUIENTES DECLARACIONES.

## ANTECEDENTES

1. EL PLAN NACIONAL DE DESARROLLO 2007-2012 (PND) PREVÉ EN LA ESTRATEGIA 5.5 QUE ES NECESARIO ADOPTAR LÍNEAS DE POLÍTICA QUE FOMENTEN UN MAYOR FINANCIAMIENTO DE LA INNOVACIÓN A TRAVÉS DE MECANISMOS QUE SEAN INDEPENDIENTES DE LA ASIGNACIÓN DIRECTA DE RECURSOS FISCALES QUE AÑO CON AÑO HACE EL EJECUTIVO FEDERAL Y EL CONGRESO DE LA UNIÓN.
2. POR SU PARTE EL PROGRAMA SECTORIAL DE ECONOMÍA 2007-2012 CONTEMPLA COMO LÍNEA ESTRATÉGICA 2.5.3, EL "IMPULSAR LA MEJORA E INCREMENTO DE PROGRAMAS DE FINANCIAMIENTO AL DESARROLLO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO Y A LA INNOVACIÓN" Y ESTABLECE DENTRO DE LAS ACCIONES A TOMAR, EL "GENERAR POLÍTICAS DE APOYO A FAVOR DEL FINANCIAMIENTO DE CAPITAL DE RIESGO".
3. EN EL 2008, LA JUNTA DE GOBIERNO DEL INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL "IMPI", MEDIANTE ACUERDO 22/2008/2º, DETERMINÓ QUE CON FUNDAMENTO EN LOS ARTÍCULOS 58, FRACCIONES I Y II DE LA LEY FEDERAL DE LA ENTIDADES PARAESTATALES; 9,57, 58 Y 59, INCISO D) DE LA LEY FEDERAL DE PRESUPUESTO Y RESPONSABILIDAD HACENDARIA Y 215 DE SU REGLAMENTO, AUTORIZÓ AL DIRECTOR GENERAL DEL INSTITUTO A CONSTITUIR EL INSTRUMENTO JURÍDICO ADECUADO, PARA EFECTO DE APOYAR PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA PATENTABLE Y SE REGISTRE EN EL SISTEMA DE FIDEICOMISOS, MANDATOS Y CONTRATOS ANÁLOGOS DE LA SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO, ASÍ COMO REALIZAR LAS GESTIONES NECESARIAS ANTE DICHA DEPENDENCIA, A TRAVÉS DE LA COORDINADORA DE SECTOR, PARA QUE AUTORICE SU FINANCIAMIENTO.
4. EL "IMPI" MANIFESTÓ LA DISPONIBILIDAD DE COLABORAR CON "FUMEC", A EFECTOS DE PROMOVER Y APOYAR LA CIENCIA, LA TECNOLOGÍA Y LA INVENCION.
5. EL 14 DE SEPTIEMBRE DE 2011, EL COMITÉ TÉCNICO DEL FIDEICOMISO DE CAPITAL EMPRENDEDOR EN SU TERCERA SESIÓN ORDINARIA DEL AÑO 2011, AUTORIZÓ LA PARTICIPACIÓN DEL FIDEICOMISO EN LA INICIATIVA PLANTEADA POR EL "IMPI" Y "FUMEC" PARA PROTEGER LOS DERECHOS DE PROPIEDAD INDUSTRIAL Y PROMOVER LOS BENEFICIOS QUE ÉSTA OFRECE PARA APOYAR LA ACTIVIDAD INVENTIVA, TECNOLÓGICA Y COMERCIAL, IMPULSANDO LA CREACIÓN Y DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN BENEFICIO DE LA SOCIEDAD, POR LO QUE AUTORIZÓ A SU COORDINADORA GENERAL A

CELEBRAR LOS ACTOS O INSTRUMENTOS JURÍDICOS NECESARIOS PARA FORMALIZAR LA PARTICIPACIÓN DEL FIDEICOMISO EN ÉSTA INICIATIVA.

6. EL 26 DE SEPTIEMBRE DE 2011 SE FIRMÓ UN CONVENIO MARCO DE COLABORACIÓN ENTRE **IMPI, FUMEC Y NAFIN**, CON EL OBJETO DE ESTABLECER LAS BASES PARA PROTEGER LOS DERECHOS DE PROPIEDAD INDUSTRIAL Y PROMOVER LOS BENEFICIOS QUE ÉSTA OFRECE PARA APOYAR LA ACTIVIDAD INVENTIVA, TECNOLÓGICA Y COMERCIAL DE MÉXICO, TANTO EN EL ENTORNO NACIONAL COMO EN LA INTERACCIÓN CON LOS ESTADOS UNIDOS.
7. EL 8 DE DICIEMBRE DE 2011 EL SUBCOMITÉ DEL PROGRAMA DE APOYO AL PATENTAMIENTO **IMPI-FUMEC-NAFIN**, APROBÓ LAS REGLAS DE OPERACIÓN DEL PROGRAMA DE APOYO AL PATENTAMIENTO **IMPI-FUMEC-NAFIN**, EN LAS QUE SE ESTABLECEN LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS PROYECTOS QUE PODRÁN SER SUJETOS DE LOS BENEFICIOS DE DICHO PROGRAMA.
8. **"CIITEC"** PRESENTÓ EL PROYECTO **"COMPÓSITO CEMENTOSO MECANO ACTIVADO PARA LA DETECCIÓN DE IMPACTO DE ARMA DE FUEGO"**, EL CUAL CUMPLE CON LOS LINEAMIENTOS QUE ESTABLECEN LAS REGLAS DE OPERACIÓN DEL PROGRAMA APOYO AL PATENTAMIENTO **IMPI-FUMEC-NAFIN**, POR LO QUE A TRAVÉS DE **"FUMEC"**, **"CIITEC"** RECIBIRÁ APOYO PARA PRESENTAR ANTE EL IMPI LA SOLICITUD DE REGISTRO DE PROPIEDAD INDUSTRIAL QUE CORRESPONDA.

#### DECLARACIONES:

##### 1. DECLARA "FUMEC":

- I. QUE ES UNA PERSONA MORAL LEGALMENTE CONSTITUIDA COMO FUNDACIÓN MÉXICO-ESTADOS UNIDOS PARA LA CIENCIA, A.C. CONFORME A LAS LEYES DE LA REPÚBLICA MEXICANA SEGÚN LO ACREDITA CON EL TESTIMONIO DE LA ESCRITURA PÚBLICA No. 25,510, DE FECHA 19 DE MAYO DE 1993, OTORGADA POR EL LIC. JOSÉ LUIS LATAPI FOX, NOTARIO PÚBLICO No. 120, DE LA CIUDAD DE MÉXICO, DISTRITO FEDERAL.
- II. QUE SU OBJETO SOCIAL ES ENTRE OTROS: CONTRIBUIR AL FORTALECIMIENTO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO DE LOS DOS PAÍSES, MEDIANTE EL IMPULSO A LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DESARROLLADA EN FORMA CONJUNTA POR INVESTIGADORES MEXICANOS Y ESTADOUNIDENSES, A LA FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS DE ALTO NIVEL Y AL DESARROLLO TECNOLÓGICO EN PROYECTOS DE INTERÉS PARA AMBOS PAÍSES, Y QUE SE ENCUENTRA SUSCRITO EN EL REGISTRO NACIONAL DE INSTITUCIONES Y EMPRESAS CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS RENIECYT BAJO EL NÚMERO 439 CON VIGENCIA INDEFINIDA.
- III. QUE EL ING. GUILLERMO RAFAEL FERNÁNDEZ DE LA GARZA, ACREDITA SU PERSONALIDAD COMO DIRECTOR EJECUTIVO DE LA FUNDACIÓN MÉXICO-ESTADOS UNIDOS PARA LA CIENCIA, A.C. CON EL TESTIMONIO DE LA ESCRITURA PÚBLICA NO. 91,019 DE FECHA 21 DE SEPTIEMBRE DE 2007, OTORGADA ANTE FE DEL NOTARIO PÚBLICO NO. 145 LIC. JOSÉ VISOSO DEL VALLE E INSCRITA EN EL REGISTRO PÚBLICO DE COMERCIO BAJO EL NO. 30692 DE FECHA 22 DE OCTUBRE DE 2007 Y QUE A LA FECHA CUENTA CON LAS

FACULTADES AMPLIAS Y SUFICIENTES PARA ESTABLECER TODO TIPO DE CONTRATOS Y CONVENIOS.

- IV. QUE SU REGISTRO FEDERAL DE CONTRIBUYENTES ES EL NÚMERO FME-930615-1D5.
- V. QUE PARA LOS EFECTOS DEL PRESENTE INSTRUMENTO LEGAL, SEÑALA COMO SU DOMICILIO EL UBICADO EN CALLE SAN FRANCISCO 1626, DESPACHO 205, COLONIA DEL VALLE, DELEGACIÓN BENITO JUÁREZ, CODIGO POSTAL 03100, MÉXICO, DISTRITO FEDERAL.

**2. DECLARA "CIITEC":**

- I. SER UN CENTRO DE INVESTIGACIÓN CONSTITUIDO DE CONFORMIDAD CON LAS LEYES DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS ("MÉXICO"), FACULTADA CONFORME A SU OBJETO SOCIAL PARA CELEBRAR EL PRESENTE CONVENIO Y PARA ASUMIR LAS OBLIGACIONES QUE EN ÉL SE ESTABLECEN.
- II. QUE SU OBJETO ES: DESARROLLAR, ADAPTAR, INNOVAR Y APLICAR CONOCIMIENTOS EN EL CAMPO DE LAS CIENCIAS TECNOLÓGICAS Y LA INGENIERÍA CON LA FINALIDAD DE OPTIMIZAR DE MANERA SUSTENTABLE LOS PROCESOS TECNOLÓGICOS QUE INVOLUCREN LA TRANSFORMACIÓN DE LOS MATERIALES, LOS SISTEMAS MECÁNICOS, ELECTROMECÁNICOS Y DE LÁSER, QUE PERMITAN EL USO EFICIENTE, LA CALIDAD Y MEJORA DEL SERVICIO.
- III. QUE SU REGISTRO FEDERAL DE CONTRIBUYENTES ES EL NÚMERO **IPN811229H26**
- IV. QUE PARA LOS EFECTOS DEL PRESENTE INSTRUMENTO LEGAL, SEÑALA QUE TIENE UBICADO SU DOMICILIO EN: **CERRADA DE CECATI S/N, COLONIA: SANTA CATARINA, DELEGACIÓN: AZCAPOTZALCO, C.P. 02250. CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO.**

LAS PARTES SE RECONOCEN LA CAPACIDAD LEGAL NECESARIA PARA SUSCRIBIR EL PRESENTE ACUERDO Y, A TAL EFECTO

**MANIFIESTAN**

- 1. QUE PARA APOYAR A "CIITEC" EN LAS ACCIONES QUE SE REQUIERAN PARA EL REGISTRO DE PROPIEDAD INDUSTRIAL DEL PROYECTO "**COMPÓSITO CEMENTOSO MECANO ACTIVADO PARA LA DETENCIÓN DE IMPACTO DE ARMA DE FUEGO**", "FUMEC" REQUIERE CONOCER LA INFORMACIÓN RELATIVA AL MISMO, CONSIDERADA COMO CONFIDENCIAL.
- 2. QUE "CIITEC" ENTREGARÁ A "FUMEC" LA INFORMACIÓN RELATIVA AL PROYECTO "**COMPÓSITO CEMENTOSO MECANO ACTIVADO PARA LA DETENCIÓN DE IMPACTO DE ARMA DE FUEGO**", QUE CONSIDERA INFORMACIÓN CONFIDENCIAL (COMO SE DEFINE ABAJO).
- 3. QUE LAS PARTES, HABIENDO ALCANZADO UN ACUERDO EN CUANTO A LO ANTERIOR, DE SUS LIBRES Y ESPONTÁNEAS VOLUNTADES, HAN CONVENIDO EN EL INTERÉS DE OTORGAR EL



PRESENTE ACUERDO DE CONFIDENCIALIDAD (EN ADELANTE, EL "**ACUERDO**"), EL CUAL SE REGISTRARÁ POR LA LEGISLACIÓN QUE RESULTE DE APLICACIÓN Y, EN PARTICULAR, POR LAS SIGUIENTES

### CLÁUSULAS

#### 1. DEFINICIÓN DE INFORMACIÓN CONFIDENCIAL.

"INFORMACIÓN CONFIDENCIAL" SIGNIFICA CUALQUIER INFORMACIÓN CIENTÍFICA, TÉCNICA, MERCANTIL O DE NEGOCIO POSEÍDA, OBTENIDA, DESARROLLADA O DE TITULARIDAD DE "**CIITEC**" INCLUIDA POR EJEMPLO EN: FORMULARIOS, TÉCNICAS, METODOLOGÍA, ENSAYOS, FÓRMULAS, PROCEDIMIENTOS, TESTS, EQUIPOS, PROTOCOLOS, DATOS, INFORMES, ARCHIVOS, PROGRAMAS INFORMÁTICOS, MANUALES, PLANES, ESQUEMAS, DISEÑOS, ESPECIFICACIONES, LISTAS, QUE CONTENGAN INFORMACIÓN SOBRE KNOW-HOW, FUENTES DE SUMINISTRO, PATENTES, RELACIONES CON ASESORES Y EMPLEADOS, INFORMACIÓN PERTENECIENTE A SUMINISTRADORES, LICENCIANTES, LICENCIATARIOS, AGENTES, FILIALES, CLIENTES, CLIENTES POTENCIALES U OTROS DE "**CIITEC**", PLANES DE NEGOCIO O DE DESARROLLO DE NEGOCIO, INFORMACIÓN RELATIVA A LA EXISTENCIA DE INVESTIGACIONES O SU ALCANCE, DESARROLLO, ENSAYOS PRE-CLÍNICOS O CLÍNICOS, FABRICACIÓN, CUMPLIMIENTO CON LAS NORMATIVA DE COMERCIALIZACIÓN U OTROS PROYECTOS O MATERIAL DE "**CIITEC**" IDENTIFICADA O NO COMO "CONFIDENCIAL" Y TRANSMITIDA DE FORMA VERBAL, ESCRITA, O POR CUALQUIER MEDIO ELECTRÓNICO VISUAL O DE AUDIO, O EN CUALQUIER OTRO TIPO DE SOPORTE.

LA EXISTENCIA DE ESTE ACUERDO, SUS TÉRMINOS Y CONDICIONES Y LA EXISTENCIA Y CONTENIDO DE LAS REUNIONES, COMUNICACIONES Y ACTIVIDADES ENTRE LAS PARTES EN RELACIÓN CON LA FINALIDAD TAMBIÉN DEBEN SER TRATADAS COMO INFORMACIÓN CONFIDENCIAL.

LA "INFORMACIÓN CONFIDENCIAL" NO INCLUYE INFORMACIÓN QUE:

- a) ERA CONOCIDA POR "**FUMEC**" ANTERIORMENTE A QUE FUERA DIVULGADA BAJO EL PRESENTE ACUERDO Y ELLO PUEDE SER PROBADO DOCUMENTALMENTE POR "**FUMEC**", A MENOS QUE HAYA SIDO TRANSMITIDA BAJO CONDICIONES DE CONFIDENCIALIDAD.
- b) ES O PASA A SER DE DOMINIO PÚBLICO EN CONDICIONES QUE NO IMPLIQUEN UN INCUMPLIMIENTO DEL PRESENTE ACUERDO, TALES COMO LA INFORMACIÓN QUE SE REQUIERE PARA FINES ESTADÍSTICOS.
- c) ES PROPORCIONADA LEGALMENTE Y DE BUENA FE A "**FUMEC**" POR UNA TERCERA PARTE, QUE NO LA HA OBTENIDO DE "**CIITEC**" DE MODO ILEGAL O INCUMPLIENDO CUALQUIER OBLIGACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD.
- d) HAYA SIDO LIBERADA POR ESCRITO DE SU CARÁCTER CONFIDENCIAL.

#### 2. CONFIDENCIALIDAD Y NO USO.

- 2.1 "**FUMEC**" ÚNICAMENTE, TRANSMITIRÁ DE ALGÚN MODO, REMITIRÁ O FACILITARÁ AL INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL INFORMACIÓN CONFIDENCIAL

PARA FINES DEL DESARROLLO DEL **PROGRAMA DE APOYO AL PATENTAMIENTO IMPI-FUMEC-NAFIN**. "FUMEC" SE OBLIGA EXPRESAMENTE A MANTENER A "CIITEC" INDEMNEMENTE DE CUALQUIER DAÑO O PERJUICIO DERIVADO DEL INCUMPLIMIENTO DE SUS OBLIGACIONES DERIVADAS DEL PRESENTE ACUERDO Y DE CUALQUIER CONDUCTA INCORRECTA, NEGLIGENTE O CULPABLE EN RELACIÓN CON LA INFORMACIÓN CONFIDENCIAL LLEVADA A CABO POR CUALQUIERA DE SUS EMPLEADOS.

- 2.2 EN EL CASO DE QUE "FUMEC" DEBA SUMINISTRAR INFORMACIÓN CONFIDENCIAL A CUALQUIER AUTORIDAD PÚBLICA O DEBIDO A UNA ORDEN JUDICIAL, "FUMEC" INFORMARÁ A "CIITEC" POR ESCRITO TAN PRONTO COMO SEA POSIBLE SOBRE LOS DETALLES, PARA QUE "CIITEC" ADOpte LAS ACCIONES POSIBLES PARA DISMINUIR LAS CONSECUENCIAS QUE PUEDAN DERIVARSE DE DICHA DIVULGACIÓN. EN CUALQUIER CASO, "FUMEC" DEBE ADOPTAR TODAS LAS MEDIDAS POSIBLES PARA LIMITAR EL ALCANCE DE LA DIVULGACIÓN.
- 2.3 "FUMEC" DEBE UTILIZAR LA INFORMACIÓN CONFIDENCIAL SÓLO EN RELACIÓN CON LA FINALIDAD DEL PRESENTE ACUERDO Y/O LAS QUE SE DERIVEN DE LAS ACCIONES QUE SE DESARROLLEN PARA EL REGISTRO DE PROPIEDAD INDUSTRIAL DEL PROYECTO Y ACORDADAS CON "CIITEC".
- 2.4 "FUMEC" DEBE ADOPTAR TODAS LAS MEDIDAS QUE SEAN RAZONABLES PARA PROTEGER LA INTEGRIDAD FÍSICA DE LA INFORMACIÓN CONFIDENCIAL DEL PROYECTO, APLICANDO COMO MÍNIMO LAS MISMAS MEDIDAS DE SEGURIDAD QUE UTILIZA PARA EL MANEJO DE SU PROPIA INFORMACIÓN CONFIDENCIAL.

### 3. TERMINACIÓN Y DEVOLUCIÓN DE LA INFORMACIÓN CONFIDENCIAL.

- 3.1 EL PRESENTE INSTRUMENTO TIENE VIGENCIA DE 30 (TREINTA) MESES CONTADOS A PARTIR DE LA FECHA DE FIRMA, MISMO QUE PODRÁ SER RENOVADO AUTOMÁTICAMENTE POR PERIODOS IGUALES Y SUCESIVOS DE 1 (UN) AÑO, SALVO MANIFESTACIÓN EN CONTRARIO POR CUALQUIERA DE LAS PARTES CON TREINTA (30) DÍAS DE ANTICIPACIÓN. LAS PARTES SEGUIRÁN SIENDO RESPONSABLES POR LAS OBLIGACIONES ACORDADAS.
- 3.2 ANTES DE LA TERMINACIÓN, SIN EMBARGO, "CIITEC" PODRÁ DISOLVER INMEDIATAMENTE ESTE ACUERDO MEDIANTE NOTIFICACIÓN POR ESCRITO A "FUMEC" EN CASO DE QUE "FUMEC" HAYA INCUMPLIDO SUS OBLIGACIONES DE CONFIDENCIALIDAD.
- 3.3 BAJO TERMINACIÓN O RESOLUCIÓN POR CUALQUIER CAUSA, "FUMEC" DEBE INMEDIATAMENTE DEVOLVER A "CIITEC" LA INFORMACIÓN CONFIDENCIAL, INCLUYENDO TODAS LAS COPIAS DE LA MISMA.

### 4. PENALIZACIÓN POR PROYECTO ABANDONADO

- 4.1 AQUEL PROYECTO QUE HAYA RECIBIDO LOS SERVICIOS DE "ANÁLISIS DE PATENTABILIDAD", "ASESORÍA PARA LA REDACCIÓN DE SOLICITUD DE PATENTE Y/O MODELO DE UTILIDAD" Y, EN SU CASO, EL SERVICIO DE "VIGILANCIA ESTRATÉGICA", Y;

- A. NO INGRESEN SU SOLICITUD AL INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL; O
- B. SI POR CONVENIR A LOS INTERESES DEL TITULAR DEL PROYECTO, EL PROYECTO ES ABANDONADO O DESISTIDO UNA VEZ QUE YA FUE INGRESADA LA SOLICITUD AL INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL;
- C. SI POR CONVENIR A LOS INTERESES DEL TITULAR DEL PROYECTO, EL PROYECTO ES ABANDONADO O DESISTIDO UNA VEZ QUE YA COMENZO EL ESTUDIO DE VIGILANCIA ESTRATEGICA;

EL TITULAR DEL PROYECTO, PARA EL CASO "CIITEC", SE OBLIGA A REINTEGRAR POR EL CONCEPTO DE DONATIVO A "FUMEC", EL 15% DEL MONTO TOTAL DEL COSTO DE LOS SERVICIOS, SIENDO ÉSTOS:

SERVICIOS OTORGADOS POR BENEFICIARIO DEL PROGRAMA DE APOYO AL PATENTAMIENTO IMPI-FUMEC-NAFIN, CICLO -2016- (*)	
Tipo de Servicio	Costo Unitario
Análisis de Patentabilidad	\$ 4,500 pesos
Redacción de Patente y/o Modelo de Utilidad	\$ 23,200 pesos
Vigilancia Estratégica	\$ 60,000 pesos

\* DICHOS COSTOS SE ESTABLECEN BAJO EL PRESUPUESTO DE OPERACIÓN DEL PROGRAMA CORRESPONDIENTE AL CICLO DE ATENCIÓN POR BENEFICIARIO. CUALQUIER CAMBIO SERÁ NOTIFICADO CON ANTELACIÓN.

CONSIDERANDO ÚNICAMENTE LOS SERVICIOS LLEVADOS A CABO DURANTE LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO Y HACIENDO DE SU CONOCIMIENTO AL TITULAR DEL PROYECTO EL INICIO, PORCENTAJE DE AVANCE Y FINALIZACIÓN DE CADA UNO DE ELLOS.

##### 5. MISCELANEA

- 5.1 ESTE ACUERDO NO IMPLICA NINGUNA TRANSFERENCIA A "FUMEC" DE LA PROPIEDAD O DE CUALQUIER OTRO DERECHO, TÍTULO, INTERÉS O LICENCIA SOBRE LA INFORMACIÓN CONFIDENCIAL DIFERENTE DE LO ESPECÍFICAMENTE ESTABLECIDO EN EL PRESENTE ACUERDO.
- 5.2 NO SE OTORGA A "FUMEC" NINGÚN OTRO DERECHO U OBLIGACIÓN DIFERENTE DE LOS ESTABLECIDOS EN EL PRESENTE ACUERDO. "CIITEC" ESTARÁ OBLIGADA A NO DISCUTIR Y NEGOCIAR CON TERCERAS PARTES CUALQUIER TIPO DE ACUERDO QUE ALTERE O AFECTE LO NEGOCIADO CON "FUMEC" EN ESTE CONVENIO.
- 5.3 A MENOS QUE SE ESTABLEZCA EXPRESAMENTE, "FUMEC" NO PODRÁ CEDER O TRANSMITIR EL PRESENTE ACUERDO, O LOS DERECHOS O OBLIGACIONES DERIVADOS DEL PRESENTE A TERCERAS PARTES SIN HABER OBTENIDO EL CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE "CIITEC". NO SERÁ PRECISO CONSENTIMIENTO EN CASO DE CESIÓN O TRANSFERENCIA POR PARTE DE "CIITEC" A SUS FILIALES U OTRAS SOCIEDADES DE SU GRUPO, FUSIÓN, CESIÓN DE ACTIVOS, CAMBIO DE FORMA SOCIETARIA, DISOLUCIÓN O

CUALQUIER OTRO PROCEDIMIENTO DE REESTRUCTURACIÓN CAUSADO POR LA TRANSFERENCIA DE TODO O PARTE DEL CAPITAL O ACTIVOS DE LA MISMA.

- 5.4 TODAS LAS NOTIFICACIONES, SOLICITUDES, PETICIONES U OTRAS COMUNICACIONES QUE LAS PARTES PRECISEN EN CONEXIÓN CON EL PRESENTE ACUERDO DEBEN SER HECHAS POR ESCRITO Y REMITIDAS POR CUALQUIER MEDIO QUE POSIBILITE RECIBIR UN ACUSE DE RECIBO O MEDIANTE ENTREGA EN MANO A LAS DIRECCIONES QUE FIGURAN EN EL INICIO DEL PRESENTE ACUERDO, O A CUALQUIER OTRA DIRECCIÓN QUE LAS PARTES PUEDAN NOTIFICARSE.

**6. DERECHO APLICABLE Y JURISDICCIÓN**

EL PRESENTE ACUERDO, SE REGISTRARÁ E INTERPRETARÁ DE ACUERDO CON LAS LEYES DE MÉXICO.

PARA LA RESOLUCIÓN DE CUALQUIER DIFERENCIA O DISPUTA QUE PUDIERA SURGIR ENTRE "LAS PARTES" EN RELACIÓN CON LA EXISTENCIA, CONTENIDO O INCUMPLIMIENTO DEL PRESENTE ACUERDO, "LAS PARTES" SE SOMETERÁN A LA JURISDICCIÓN DE LOS TRIBUNALES EN MATERIA CIVIL DE LA CIUDAD DE MÉXICO, RENUNCIANDO A CUALQUIER COMPETENCIA QUE, POR EL DOMICILIO PRESENTE O FUTURO DE LOS COMPARECIENTES, LES LLEGARE A CORRESPONDER.

PARA CONSTANCIA DE LO CUAL, REPRESENTANTES DEBIDAMENTE AUTORIZADOS DE AMBAS PARTES, FIRMAN EL PRESENTE ACUERDO, A LOS 16 DÍAS DEL MES DE DICIEMBRE DE 2016, EN LA CIUDAD DE MÉXICO.

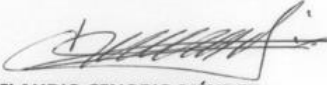
**FUNDACIÓN MÉXICO ESTADOS UNIDOS  
PARA LA CIENCIA**

  
**ING. GUILLERMO RAFAEL FERNÁNDEZ DE  
LA GARZA**  
DIRECTOR EJECUTIVO

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN E  
INNOVACIÓN TECNOLÓGICA, CIITEC-IPN**

  
**DR. SEBASTIÁN DÍAZ DE LA TORRE**  
DIRECTOR DE TESIS

  
**I.C. ORLANDO GUTIÉRREZ OBESO**  
ALUMNO M.T.A.

  
**DR. JOSÉ CLAUDIO CENOBIO MÉNDEZ  
GARCÍA**  
DIRECTOR GENERAL

## ANEXO B

A continuación se muestran los distintos difractogramas obtenidos producto del análisis de difracción de rayos X, variando en cada muestra la cantidad del tiempo de molienda de alta energía.

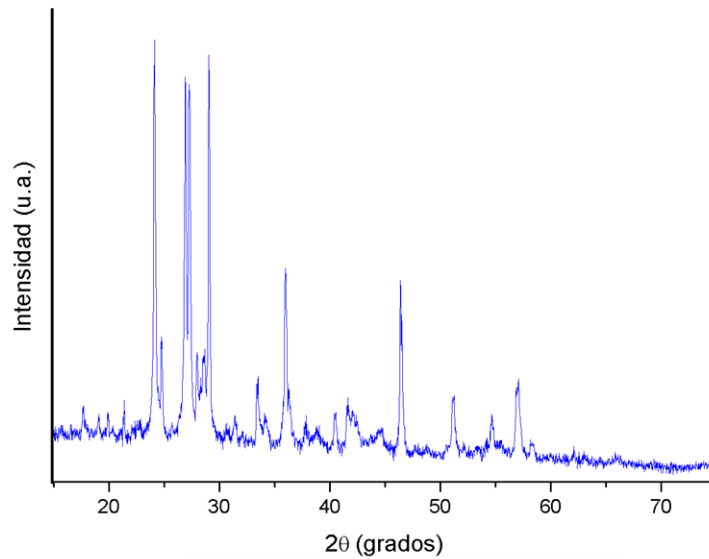


Fig. B1. Difractograma correspondiente a CPC normal.

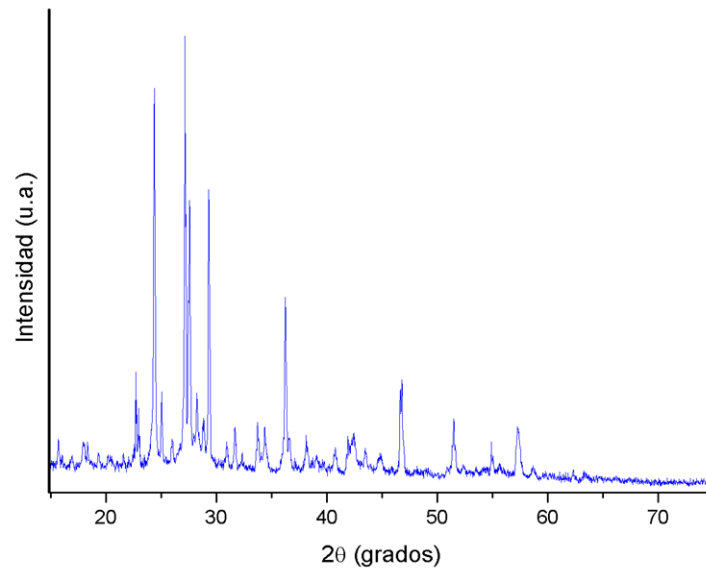


Fig. B2. Difractograma correspondiente a 15 min. de molienda HME.

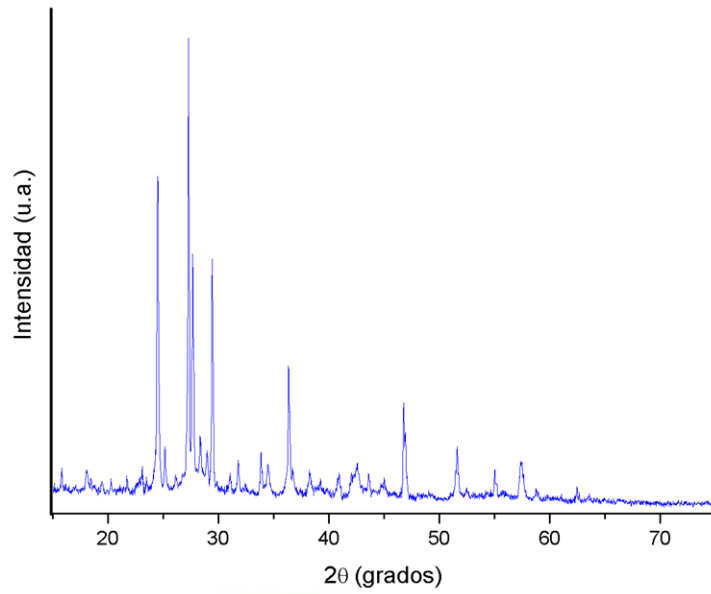


Fig. B3. Difractograma correspondiente a 30 min. de molienda HME.

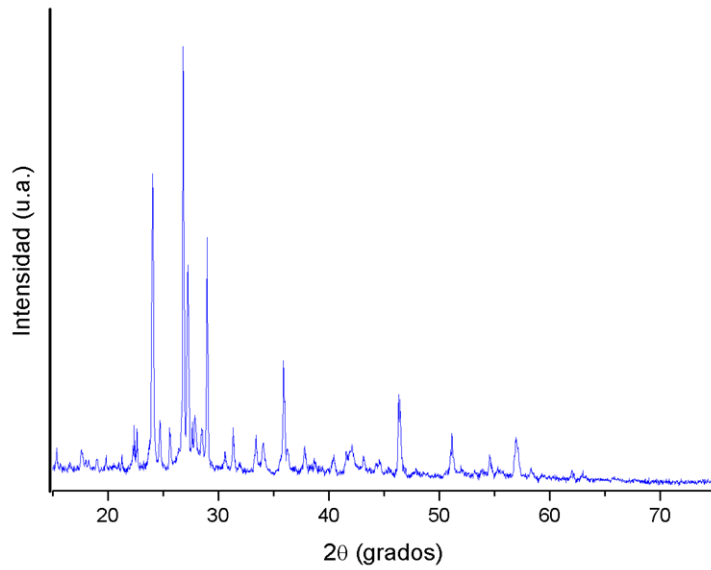


Fig. B4. Difractograma correspondiente a 45 min. de molienda HME.

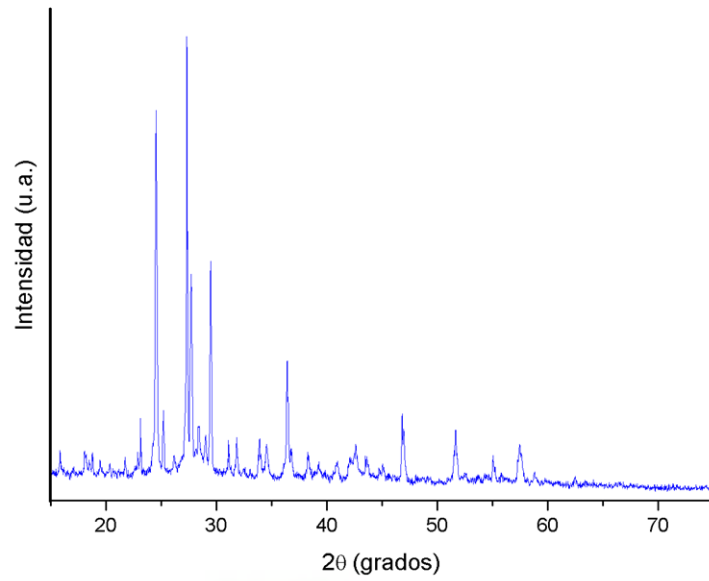


Fig. B.5 Difractograma correspondiente a 60 min. de molienda HME.

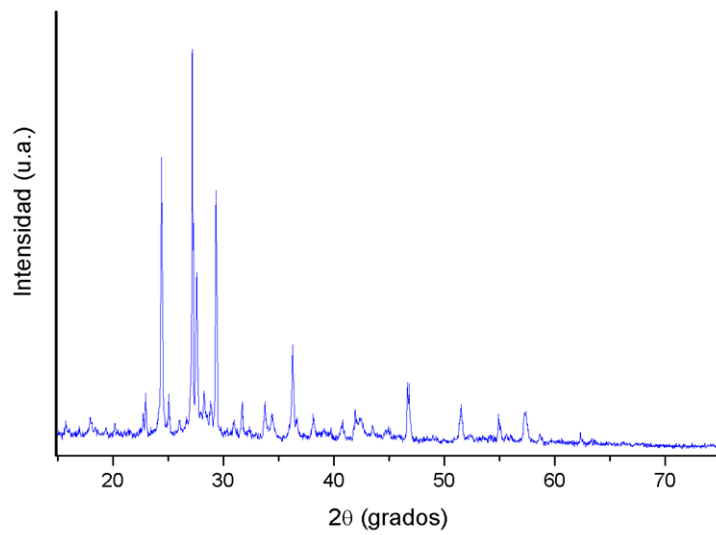


Fig. B6. Difractograma correspondiente a 75 min. de molienda HME.

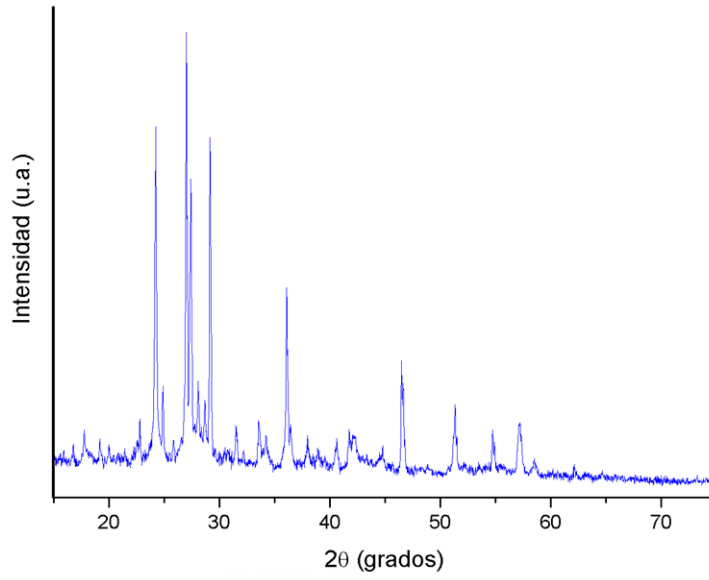


Fig. B7. Difractograma correspondiente a 90 min. de molienda HME.

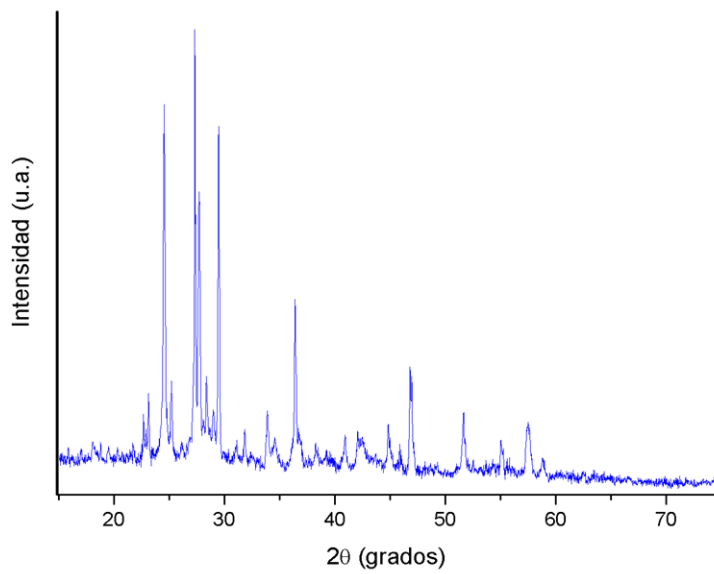


Fig. B8. Difractograma correspondiente a 105 min. de molienda HME.



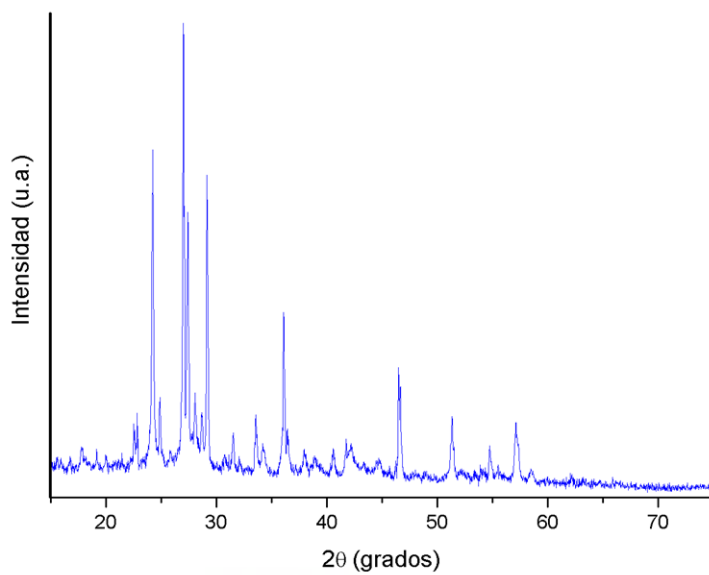


Fig. B9. Difractograma correspondiente a 120 min. de molienda HME.

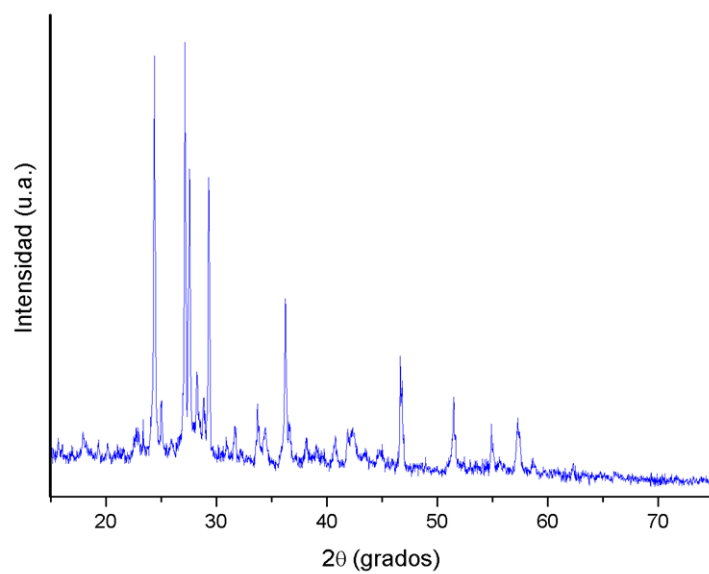


Fig. B10. Difractograma correspondiente a 135 min. de molienda HME.

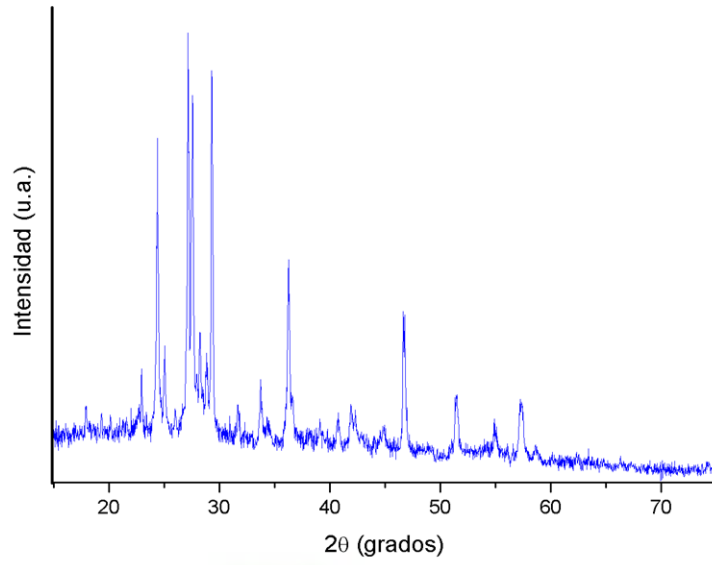


Fig. B11. Difractograma correspondiente a 150 min. de molienda HME.

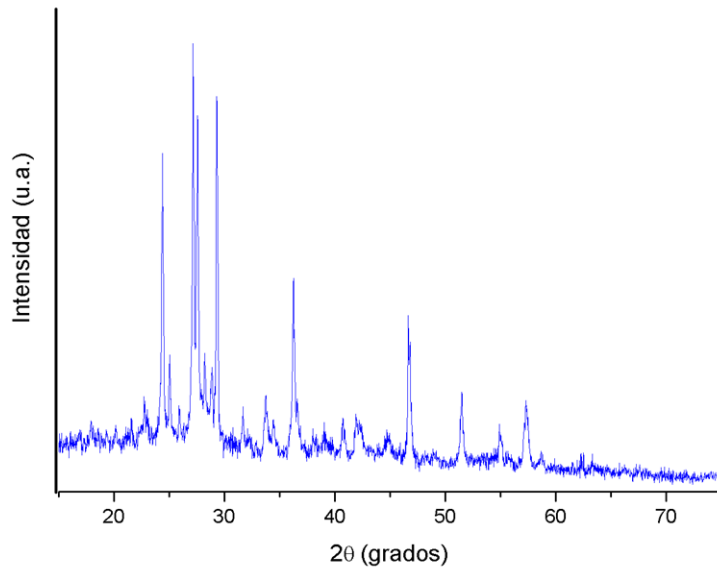


Fig. B12. Difractograma correspondiente a 165 min. de molienda HME.

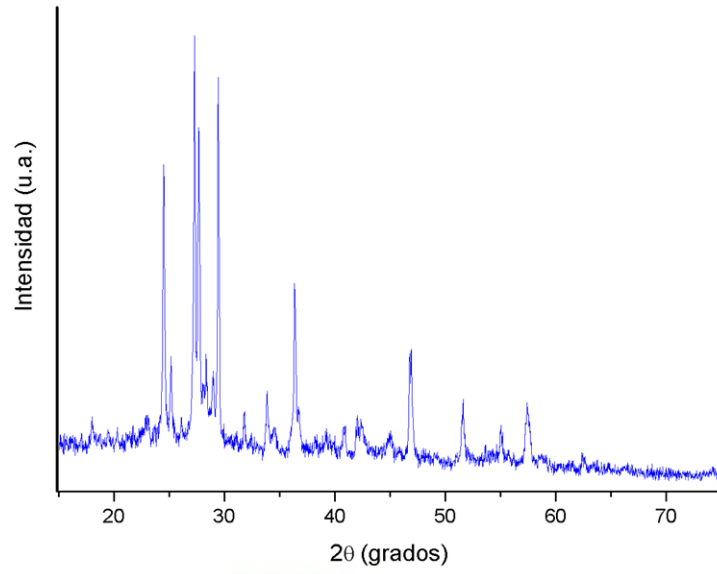


Fig. B13. Difractograma correspondiente a 180 min. de molienda HME.

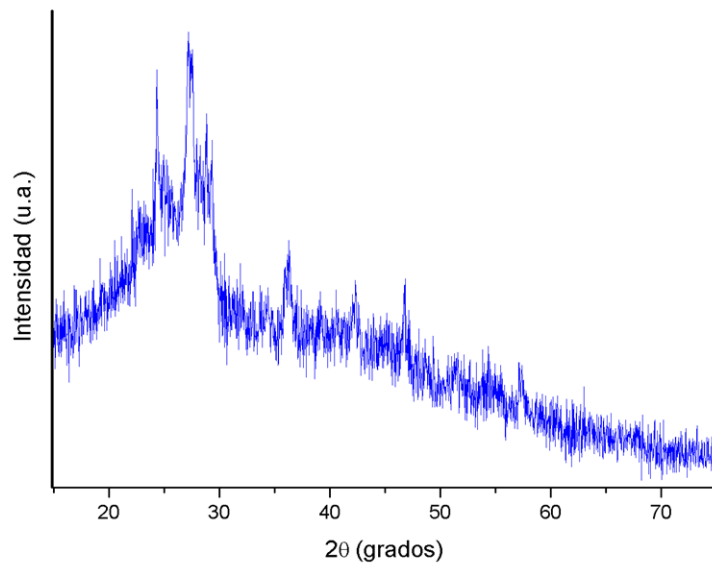


Fig. B14. Difractograma correspondiente a 360 min. de molienda HME.

## ANEXO C

A continuación, se muestran los valores de la DTP correspondientes a distintos parámetros de HME utilizados en el presente trabajo de investigación.

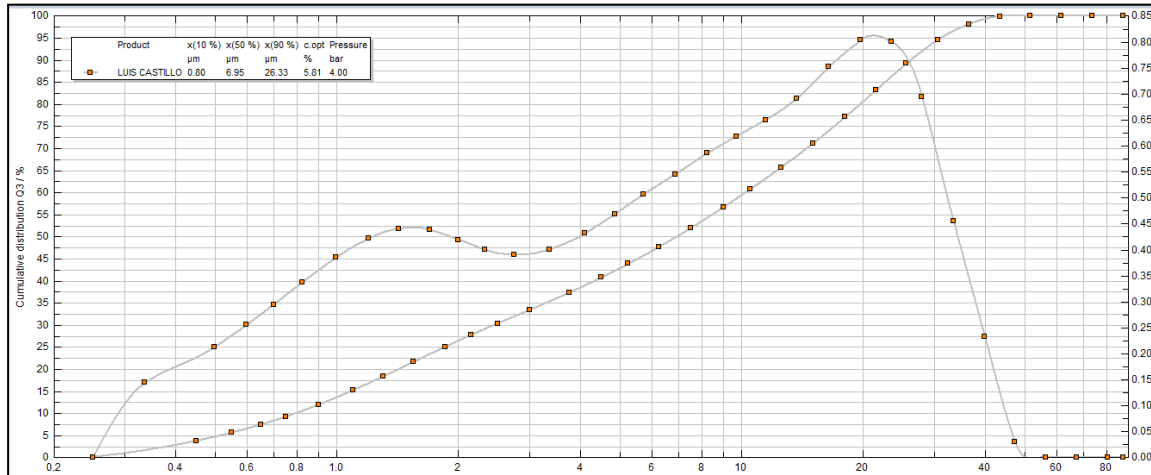


Fig. C1. Distribución del tamaño de partícula para 15 min de molienda (HME).

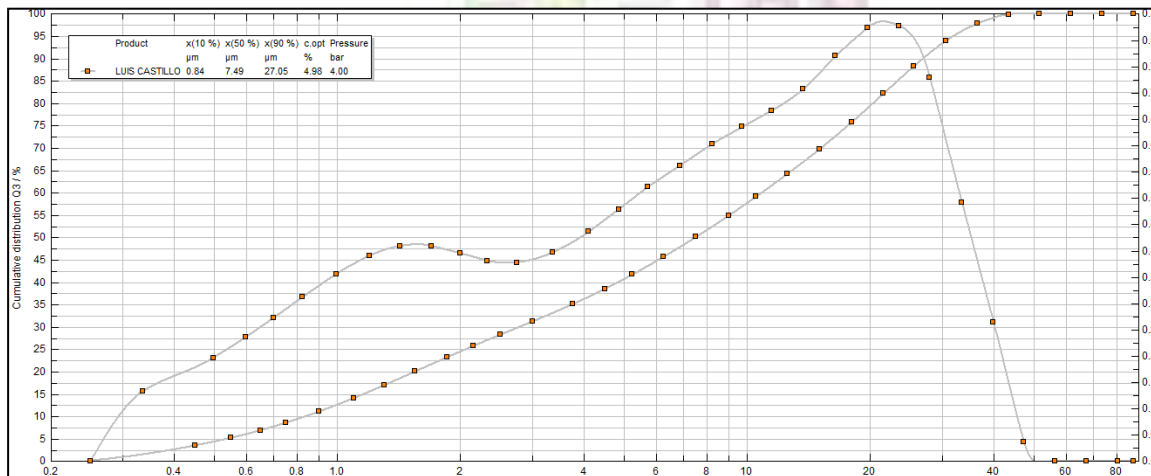


Fig. C2. Distribución del tamaño de partícula para 30 min. de molienda (HME).

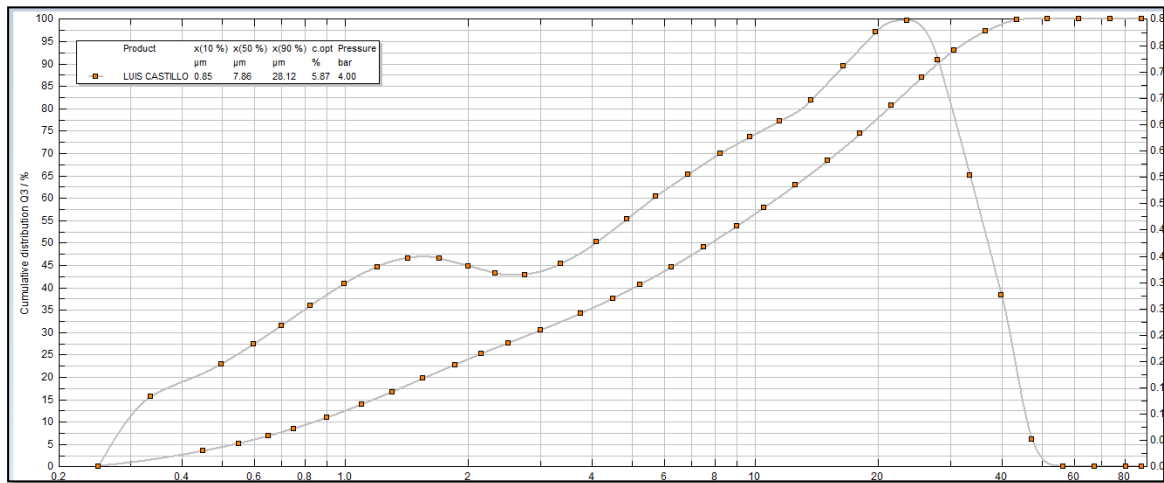


Fig. C3. Distribución del tamaño de partícula para 45 min. de molienda (HME).

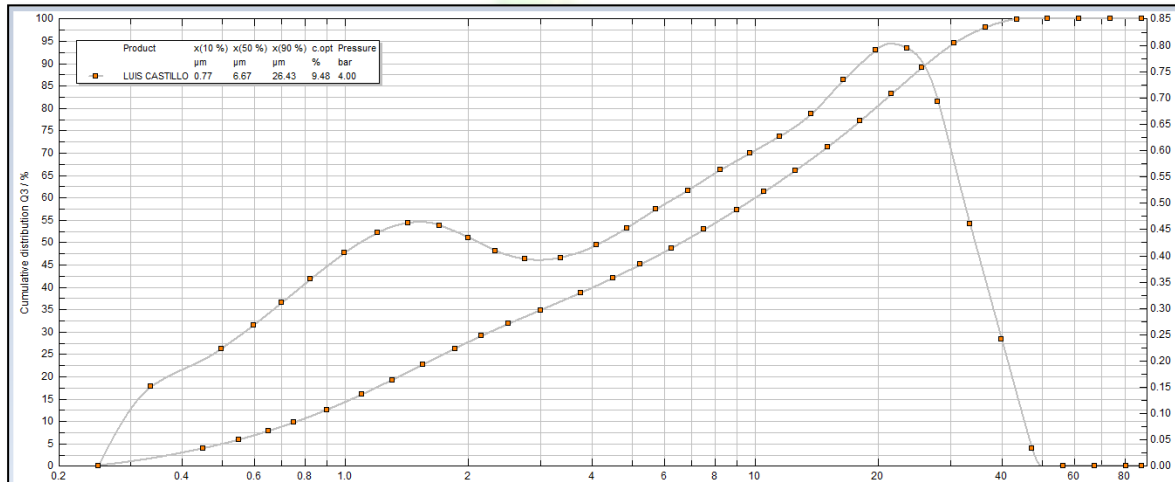


Fig. C4. Distribución del tamaño de partícula para 60 min. de molienda (HME).

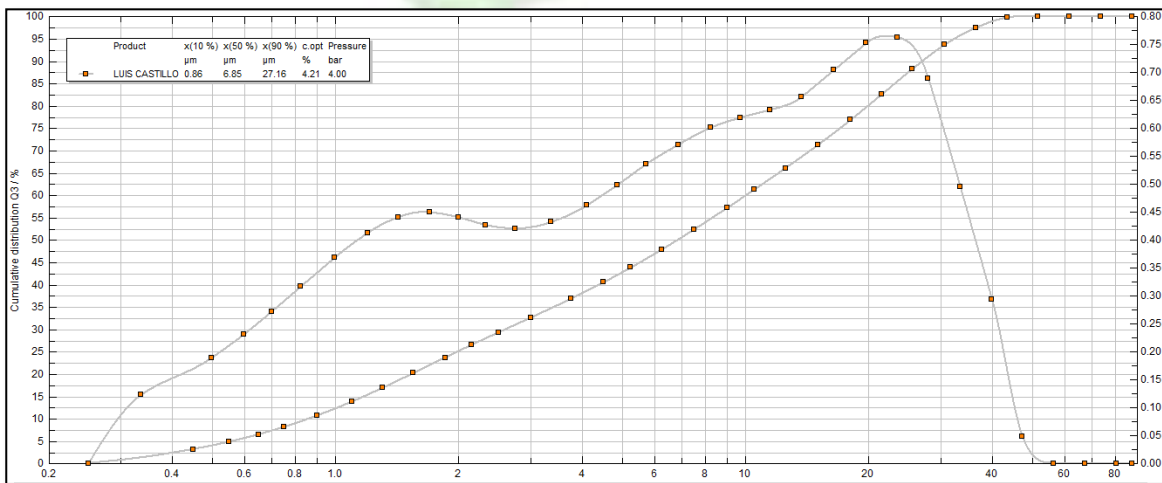


Fig. C5. Distribución del tamaño de partícula para 75 min. de molienda (HME).

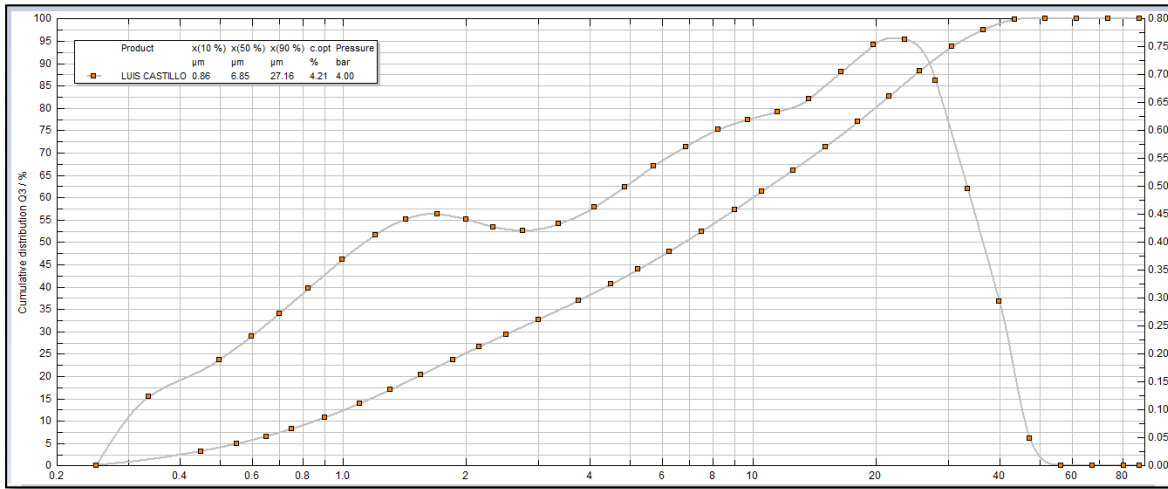


Fig. C6. Distribución del tamaño de partícula para 90 min. de molienda (HME).

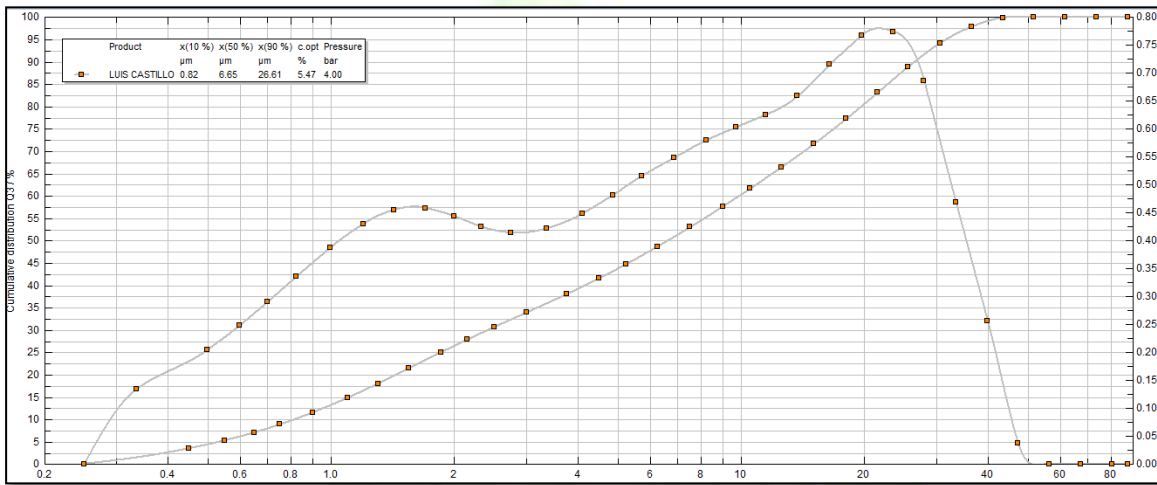


Fig. C7. Distribución del tamaño de partícula para 105 min. de molienda (HME).

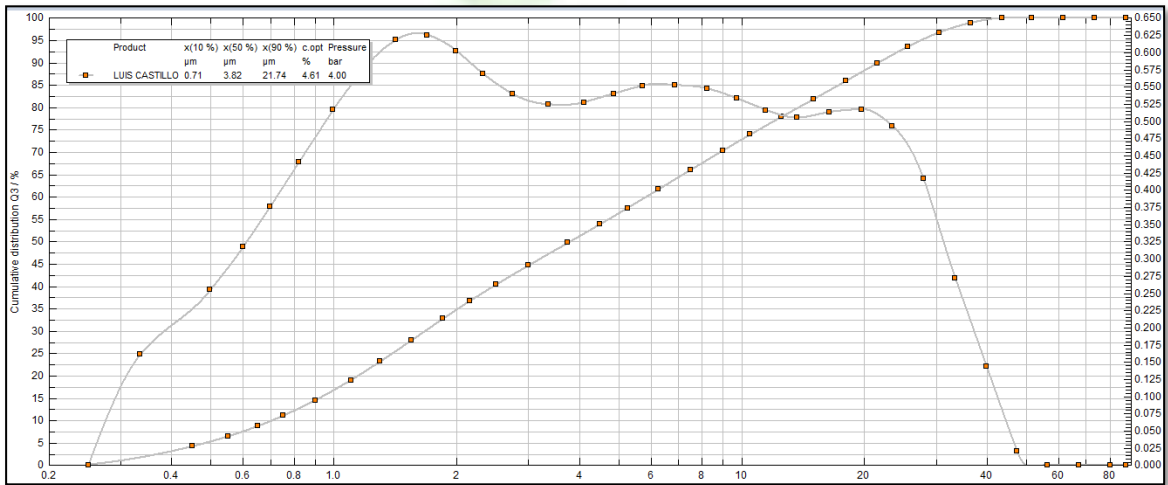


Fig. C8. Distribución del tamaño de partícula para 120 min. de molienda (HME).

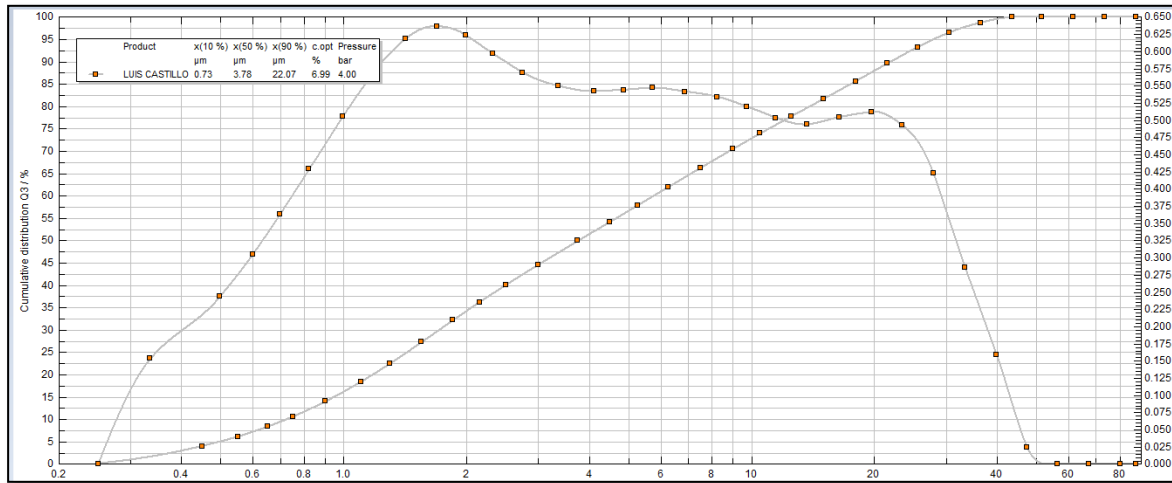


Fig. C9. Distribución del tamaño de partícula para 135 min. de molienda (HME).

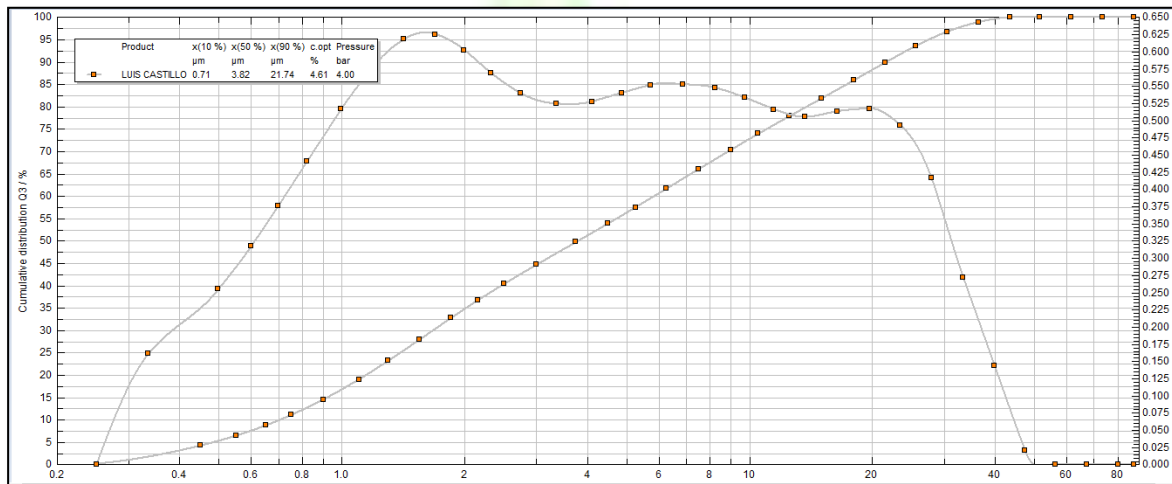


Fig. C10. Distribución del tamaño de partícula para 150 min. de molienda (HME).

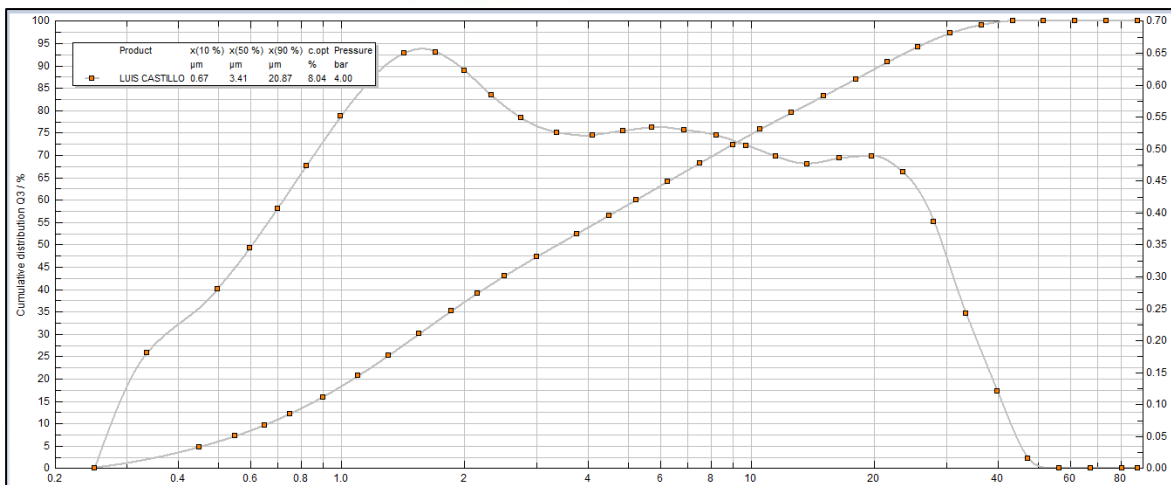
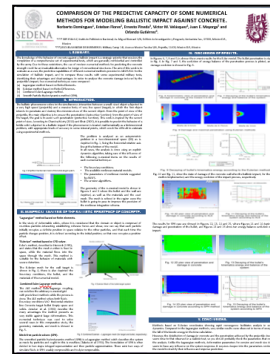


Fig. C11. Distribución del tamaño de partícula para 165 min. de molienda (HME).

## ANEXO D

Como resultado de este trabajo de investigación se obtuvieron los siguientes productos:

XXIV International Material Research Congress Poster. Comparison of the predictive capacity of some numerical methods for modeling ballistic impact against concrete. 2015.



XXIV International Material Research Congress. Ponencia. Development of composite concrete walls for the physical protection (SHIELDING) of military buildings.



Session Chair: **HENNING ZOZ (ZOZ GROUP, GERMANY)**  
**12:30 - 12:45 S4E-0010 DEVELOPMENT OF COMPOSITE CONCRETE WALLS FOR THE PHYSICAL PROTECTION (SHIELDING) OF MILITARY BUILDINGS.**  
 Orlando Gutiérrez Obeso.<sup>1</sup>

9th International simposium on nanostructures. Ponencia. Composite concrete wall panels for shielding military buildings. 2016.

Monday, March 07  
 Session 05 | 17:45 - 18:30

V10 Escuela Militar de Ingenieros - EMI  
 Mexico D. F., Mexico

Capt.  
**Orlando Gutiérrez Obeso**  
 Head of Research Military  
 Engineering School

**Composite concrete wall panels for shielding military buildings**

The issues of human and/or building security have always been of great interest for military applications worldwide. Valuable technical information derived from the practical experience on security and safeguarding recently developed by the Mexican Army, focusing building and ballistic guard (constructive shield) is briefly introduced in this talk, following the next order:

(a) The mechanical behavior of traditional building materials when impacted with a firearm and how these materials lack the necessary elements as to provide ballistic protection in case of attack.

(b) A descriptive presentation is given on various mechanical properties of building materials to be impacted by a firearm. From a mechanical viewpoint the speaker will focus on the real-life concept of composite concrete wall panels, and will discuss how it influences the optimal performance design of the concrete shield when exposed to the heavy weapons attack.

The performance of cost effective composite concrete wall panels for shielding military buildings is introduced in this talk. Keywords: ballistic impact, projectile's impact, constructive-shield, ballistic protection, construction, Mexican army, security, high performance cement.

V11 Continental Reifen Deutschland GmbH  
 Hannover, Germany

Dr. Carla Recker  
 Head of Expertfield  
 Materials Chemistry



## ANEXO E

Presentación de avances en materia de investigación en cementos avanzados realizada al C. Secretario de la Defensa Nacional, General Salvador Cienfuegos Zepeda.



Fig. E1. Imagen de una garita modelo construida con el cemento compósito propuesta en la presente investigación. [Imagen cortesía de la SEDENA, Campo Mil. No. 1-B, Popotla Cd. Méx. 2015]



Fig. E2. Fotografías tomadas en el segundo semestre del 2015 en el Campo Militar No.1-B Popotla, Cd. de México. El C. Capitán 1/o. I.C. Orlando Gutiérrez Obeso explica al Gral. Srio. Def. Nac. Salvador Cienfuegos Zepeda el garitón móvil construido con el cemento compósito propuesto en la presente investigación. [Imagen cortesía de la SEDENA, Campo Mil. No. 1-B Popotla, Cd. Méx. 2015]