

1.- INTRODUCCIÓN:

1.1.- EL CONCRETO:

El Concreto es un material que se fabrica a base de conglomerantes hidráulicos, hasta la fecha sus principales componentes son el cemento Pórtland y los agregados.

Desde una perspectiva histórica, probablemente Feret fue el primero en intentar correlacionar la resistencia del material con su composición al relacionar la resistencia con el grado de densificación alcanzado en morteros [1], Zielinski a principios del siglo XX estudio de manera sistemática el efecto de la relación A/CM en la resistencia de morteros [2,3].

Desde principios del siglo XX se han hecho intentos por obtener correlaciones que sirvan como herramienta para el diseño y la producción del concreto, el mas conocido es la relación entre la resistencia del concreto y la relación A/CM a la que comúnmente se le refiere como la Ley de Abrams, o mas precisamente la regla de Abrams, la cual establece que concretos *comparables* proporcionan [4]:

1. Resistencias mas bajas para relaciones A/CM mas altas
2. Resistencias mas altas para relaciones A/CM mas bajas
3. La misma resistencia para relaciones A/CM idénticas

Para que se pueda decir que dos o mas *concretos* son *comparables*, estos deben estar hechos con materiales de calidades similares, deben ser mezclados, moldeados, curados y ensayados bajo condiciones idénticas y compactados para un mismo contenido de aire. En resumen la Regla de Abrams se puede establecer de tres formas [5]:

1ra: La resistencia de concretos comparables depende solamente de sus relaciones A/CM en lugar de su composición.

- 2da:** La resistencia del concreto esta controlada solamente por la resistencia de la matriz.
- 3ra:** La adición de agregado no influye en la resistencia de la matriz, por lo que siempre y cuando los concretos permanezcan comparables, la resistencia del concreto depende de su composición.

Desafortunadamente en la Tecnología del Concreto o lo que en el futuro tiende a llamarse la Ciencia del Concreto, a la fecha se concibe al concreto como un material de tal complejidad para el que la teoría no ha alcanzado un nivel en el que siempre se pudiesen producir formulas en base a la experimentación adecuada. Por otro lado el numero de variables que afectan de manera significativa el comportamiento del concreto es tan grande, y algunas de estas variables son tan imponderables, que las matemáticas exactas dan pie en muchos casos a estadísticas aproximadas [6].

Hoy en día la Mecánica de la Fractura no proporciona buenos estimados de la resistencia del concreto a partir de su composición, que sean mejores que la mas o menos Regla empírica de Abrams. Hasta que la Ciencia del Concreto no arroje una formula para estimar la resistencia del concreto, la Regla de Abrams o cualquier otra curva apropiada proporcionara los mejores estimados de la resistencia del concreto [6].

Las fortalezas del material de construcción mas usado en el mundo, *El Concreto*, son la resistencia a la compresión y la facilidad que ofrece para fabricar elementos de diferente geometría. Desde principios del siglo pasado se desarrollaron diversos trabajos encaminados a mejorar la resistencia a la compresión, sin embargo para algunas aplicaciones el mejoramiento logrado ha resultado insuficiente, por lo que su uso ha tenido que ser descartado, principalmente por ser un material rígido y que por su resistencia el diseño demandaría elementos estructurales que resultarían muy voluminosos y por consiguiente pesados. Para contrarrestar esta deficiencia y así poder usar el concreto en aplicaciones que hasta la fecha han sido exclusivas de materiales como el acero, la madera, etc., desde hace aproximadamente 20 años se han iniciado

diversas investigaciones relacionadas con el tema de la presente investigación, los cuales se describen mas adelante en la sección de antecedentes.

El concreto es un material compuesto conformado por cemento Pórtland, agua, agregados y en ocasiones ingredientes especiales tales como aditivos para modificar alguna o algunas de sus propiedades, fibras, etc. Las características propias de cada uno de estos ingredientes y las de los productos de hidratación repercuten de manera determinante en las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto. Por ello es conveniente conocer los aspectos relevantes de los ingredientes que constituirán el concreto y sus repercusiones en las propiedades del mismo.

1.2.- CEMENTO:

1.2.1.- ORIGEN DEL CEMENTO PORTLAND:

En 1756, John Smeaton[7] fue comisionado para reconstruir el faro de Eddystone en la costa de Inglaterra, y encontró que el mejor mortero era el que se producía cuando se mezclaba puzolana con caliza que contenía una considerable cantidad de material arcilloso. Al reconocer la importancia que tenía la arcilla, Smeaton fue el primero en comprender las propiedades químicas de la cal hidráulica que resulta de la quema de cal y arcilla.

El cemento Pórtland fue patentado en 1824 por un fabricante de ladrillos y constructor de Leeds llamado Joseph Aspdin[7], el cemento que el produjo resultaba de calentar una mezcla de arcilla finamente dividida y caliza dura en un horno hasta que el CO₂ fuera liberado; esta temperatura era mucho mas baja que la requerida para la clinkerización. El prototipo del cemento moderno fue hecho en 1845 por Isaac Jonson[7].

Originalmente a este material se le dio el nombre de *Cemento Pórtland* debido a la similitud en color y calidad del cemento endurecido con la roca de Pórtland – una caliza extraída en Dorset Inglaterra.

1.2.2.- FABRICACION DEL CEMENTO PORTLAND:

El proceso de fabricación del cemento Pórtland consiste esencialmente en la molienda y el mezclado en ciertas proporciones, de la materia prima que posteriormente es quemada en hornos rotatorios industriales a una temperatura aproximada de 1400°C, a esta temperatura, el material se sinteriza y se fusiona parcialmente en partículas redondas conocidas como clínker, entonces el clínker es enfriado y molido a polvo fino con algo de yeso (sulfato de calcio). El producto resultante es el cemento Pórtland comercial tan ampliamente usado alrededor de mundo [7].

1.2.3.- COMPOSICION QUIMICA DEL CEMENTO PORTLAND:

Los materiales empleados como materia prima en la fabricación del cemento Pórtland consisten principalmente de caliza, sílice, alúmina y óxido de hierro. Durante la calcinación, estos óxidos interactúan dentro del horno para formar una serie de productos complejos.

Para el cemento Pórtland el resultado de los análisis químicos de rutina se reportan en óxidos de los compuestos presentes. Una determinación directa de la composición de los compuestos es complicada. Para expresar los óxidos individuales y los compuestos del clínker habitualmente se utilizan las siguientes abreviaciones [8]:

Oxido	Abreviación	Compuesto	Abreviación
CaO	C	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
SiO_2	S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Al_2O_3	A	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Fe_2O_3	F	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
MgO	M	$4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$	$\text{C}_4\text{A}_3\hat{\text{S}}$
SO_3	$\hat{\text{S}}$	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
H_2O	H	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}\hat{\text{S}}\text{H}_2$

Son cuatro los compuestos que constituyen los componentes mayoritarios del Cemento Pórtland, el C_3S o Alita, el C_2S o Belita, el C_3A o Aluminato y el C_4AF o Ferrita. El calculo de estos compuestos a partir de los óxidos, esta basado en el trabajo de R. H Bogue y colaboradores y a menudo se les refiere como “Compuestos Potenciales de Bogue” [9]. A continuación se presentan las ecuaciones que Bogue estableció para el calculo de estos compuestos. Los óxidos que aparecen entre paréntesis representan el porcentaje en peso que ocupa ese oxido en el peso total de cemento.

$$\text{C}_3\text{S} = 4.07(\text{CaO}) - 7.60(\text{SiO}_2) - 6.72(\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.43(\text{Fe}_2\text{O}_3) - 2.85(\text{SO}_3)$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2.87(\text{SiO}_2) - 0.75(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$$

$$\text{C}_3\text{A} = 2.65(\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.69(\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 3.04(\text{Fe}_2\text{O}_3).$$

Estas ecuaciones, suponen que las reacciones químicas para la formación de los compuestos del clinker, se dan en un estado de equilibrio que conduce a una completa cristalización de los productos [7], y que la presencia de impurezas tales como el MgO y los álcalis puede ser ignorada. Ambas suposiciones no son validas, ya que se sabe que

en algunos casos, la composición calculada del compuesto, especialmente las cantidades de C_3A y C_4AF en los cementos, se desvían considerablemente de la composición real del compuesto determinada directamente. Esta es la razón de que la composición calculada del compuesto sea también llamada la composición potencial del compuesto [8].

1.2.4.- EL PAPEL DEL SULFATO DE CALCIO:

El sulfato de calcio se añade al clinker de cemento Pórtland para controlar los tiempos de fraguado del Cemento Pórtland. En presencia del Sulfato de Calcio el C_3A se transforma en Etringita ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$), formando una capa sobre la superficie del C_3A . Esta capa de Etringita aparentemente impermeable impide la hidratación completa del C_3A , de tal manera que durante el periodo de letargo (dormant) el concreto puede ser transportado y colocado sin pérdida de consistencia significativa [10].

Hace años, el yeso ($CaSO_4$) era casi la única fase de sulfato de calcio utilizada en la fabricación de los cementos Pórtland, pero por diversas razones los cementos Pórtland modernos pueden también contener otras formas de sulfato de calcio que pueden interferir con el control de la hidratación del C_3A , tales como [10]:

- | | |
|---|--------------------------------|
| • Anhidrita natural cristalizada | $CaSO_4$ |
| • Yeso | $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ |
| • Hemihidrato | $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ |
| • Yeso deshidratado (también llamado anhidrita soluble) | $CaSO_4$ |
| • Sulfato de calcio sintético | $CaSO_4$ |

1.3.- ADITIVO SUPERFLUIDIFICANTE:

Desde la década de los 30 en el siglo pasado, se empezaron a utilizar algunos aditivos para modificar algunas propiedades del concreto, los que han tenido mas impacto y que vinieron a revolucionar la tecnología del concreto son los súperfluidificantes (SF) también conocidos como reductores de agua de alto rango o súper reductores de agua.

El ACI 116R-00 define un súperfluidificante como un Aditivo Reductor de Agua de Alto Rango capaz de producir grandes cantidades de reducción de agua o gran fluidez sin causar retardo en el fraguado o inclusión de aire excesivos en mortero o concreto [11].

Los primeros reductores de agua poliméricos adoptados por la industria del concreto en 1935 fueron los dispersantes poliméricos derivados de lignina conocidos como lignosulfonatos, estos polímeros son un subproducto relativamente barato de la industria del papel, cuyas propiedades reductoras de agua pueden explotarse a un costo mínimo. Sin embargo, con el uso se descubrió que variaciones en la composición de estos productos, especialmente en su contenido de azúcar puede inducir problemas significativos en cuanto a retardo de fraguado e inclusión de aire [12].

Un importante tipo de polímeros designados como reductores de agua de alto rango o SF son los sulfonatos de polinaftaleno que desde 1938 han sido conocidos como agentes dispersantes del cemento. Sin embargo, en ese entonces hubo poco interés en estos polímeros, ya que las resistencias de diseño del concreto eran bajas y las relaciones A/CM podían ser fácilmente ajustadas para lograr la trabajabilidad deseada modificando los contenidos de agua. También debido al relativo bajo costo del cemento, no existía incentivo económico para reducir los contenidos de cemento [12].

Los beneficios de los polímeros sintéticos tales como los sulfonatos de polinaftaleno fueron re-estudiados y mejorados, principalmente en Japón a principios de

los 60s. Los sulfonatos de polimelamina son otra familia de polímeros sintéticos que también fueron desarrollados varios años después como SF para el concreto y patentados en Alemania [12].

La comercialización de los SF se inició en Japón en 1970 y posteriormente en Alemania, esto represento un avance significativo que en Europa, Norteamérica y Japón condujo al desarrollo de una nueva manera de producir concreto de alta calidad y fácil colocación [13].

En 1993 y 1997 aparecieron respectivamente los aditivos SF a base de poliacrilato y a base de policarboxilato, los cuales son considerados como aditivos de la ultima generación. Con relación a sus antecesores, a estos aditivos se les atribuye mayores periodos de retención de consistencia y un mejor control de parámetros clave tales como resistencia a la compresión y relación A/CM [14].

Los SF son aditivos para concreto capaces de mejorar la calidad del concreto. Por otro lado, estos aditivos actúan como surfactantes debido a que sus moléculas son adsorbidas en las interfaces agua-cemento o agua-aire al cambiar la microestructura de la pasta de cemento que encapsula las partículas de agregado en el concreto endurecido. Los súperfluidificantes pueden ser usados con tres diferentes propósitos o con una combinación de ellos [13]:

1. Para incrementar o mejorar la trabajabilidad sin cambiar la composición de la mezcla
2. Para reducir el agua de mezclado y en consecuencia la relación A/CM con el fin de incrementar la resistencia y mejorar la durabilidad
3. Para reducir tanto el agua como el cemento con el fin de reducir el flujo, los esfuerzos por retracción y térmicos, este ultimo causado por el calor que se genera durante la hidratación del cemento.

Si la viscosidad aparente de una pasta con relación A/CM dada se puede medir por ejemplo con el cono Marsh y los resultados se grafican en función de la dosificación de SF, se observara que la viscosidad disminuye conforme la dosificación de SF aumenta hasta que se alcanza una cierta dosificación, después de la cual cualquier adición posterior no reduce significativamente la viscosidad de la pasta. A este punto se le ha llamado **Punto de Saturación** [12].

En algunos casos, en concretos sin aire incluido fabricados con relaciones A/CM bajas, se presenta un comportamiento inusual que ha sido referido como “burbujeo (bubbling)” o el “efecto champaña”. A tales bajas relaciones A/CM, las mezclas de concreto son cohesivas de tal forma que algunas burbujas de aire grandes pueden permanecer atrapadas en el concreto endurecido, aun hasta con un vibrado extenso resultando en un concreto tipo queso suizo [12].

1.4.- AGREGADO:

1.4.1.- GRANULOMETRIA TAMAÑO Y FORMA DE LAS PARTICULAS:

Los concretos de alta resistencia típicamente contienen tan altos consumos de materiales cementantes finos que la granulometría de los agregados no es un factor tan importante como en los concretos convencionales [15].

Por otro lado diversos estudios han mostrado que para lograr una resistencia a la compresión óptima en concretos con altos contenidos de cemento y bajas relaciones A/CM el tamaño máximo del agregado debe mantenerse lo mas pequeño posible. En relación a esto coincidimos en la hipótesis de Córdón y Gillespie, quienes atribuyen el incremento en la resistencia a la reducción en el esfuerzo de adherencia promedio debido al incremento en la área superficial del agregado que se da conforme disminuye su tamaño máximo [16,17,18].

Son diversos los estudios que han mostrado que el agregado de roca triturada arroja mayores resistencias que la grava redondeada, y se dice que la razón mas probable para esto es la gran adherencia o trabazón mecánica que se puede desarrollar entre la pasta y las partículas angulosas. Ya que el factor limitante en el desarrollo de concreto de alta resistencia es la resistencia a la adherencia en la interfase entre pasta y agregado [18,19], El agregado ideal para la producción de concreto de alta resistencia debe ser limpio, poliédrico, 100 % triturado y con el mínimo de partícula planas y/o alargadas [20].

1.4.2.- RESISTENCIA INTRINSECA:

Parece obvio que para producir un concreto de alta resistencia se requiere un agregado de alta resistencia, lo cual de cierta manera es verdad. Sin embargo, diversas investigaciones han mostrado que para algunos agregados en el concreto, se llega a un punto mas allá del cual un incremento en el contenido de cemento no se traduce en un incremento en la resistencia a la compresión del concreto. Esto aparentemente no se debe a que se haya dado por completo el desarrollo de la resistencia a la compresión en el concreto, sino que se ha alcanzado el limite del potencial de adherencia en la interfase pasta – agregado [21,22].

1.5.- FIBRAS:

Los concretos reforzados con fibras son aquellos a los que se les añaden fibras que pueden ser de diferentes formas y tamaños con propósitos ya sean estructurales o no estructurales, en ambos casos la función principal de las fibras es prevenir o disminuir los agrietamientos. De todas las fibras existentes las de acero son las más comúnmente usadas para concretos de alta resistencia.

1.5.1.- MECANISMO DEL AGRIETAMIENTO EN EL CONCRETO A TENSION Y A COMPRESION:

1.5.1.1.- AGRIETAMIENTO DEL CONCRETO A TENSION :

En términos simplificados, cuando un volumen de concreto es sometido a esfuerzos microscópicos de tensión, el proceso de agrietamiento ocurre en tres etapas [23]:

Etapa I: Microagrietamientos distribuidos a través de todo el volumen de concreto.

Etapa II: Las microgrietas se unen entre ellas para originar la formación de una o más macrogrietas, esta es la fase en la cual el agrietamiento se torna localizado. La formación de macrogrietas define el fin de la segunda etapa y el inicio de la tercera; y

Etapa III: Una o más macrogrietas se propagan causando la fractura del concreto.

1.5.1.2.- AGRIETAMIENTO DEL CONCRETO A COMPRESION:

El mecanismo de estos agrietamientos también puede ser dividido en tres etapas [23]:

Etapa I: Las microgrietas se presentan en direcciones aleatorias dentro del espécimen, con una orientación preferencial paralela a los esfuerzos macroscópicos. La aleatoriedad está asociada a la naturaleza heterogénea del material y a la existencia de puntos débiles y puntos resistentes dentro de él. La orientación de las grietas está gobernada por el hecho de que las dos fases sólidas en el concreto (la pasta del cemento y las partículas de agregado) no tienen la misma rigidez y a que cuando el concreto se somete a compresión longitudinal se desarrollan esfuerzos de tensión perpendiculares a la dirección de la compresión (se asume que estas grietas son creadas por tensiones).

Etapa II: Las microgrietas se presentan paralelas a la dirección del esfuerzo predominante. Estas microgrietas dividen al espécimen de concreto en pequeñas columnas o conos con forma y tamaños variados; y

Etapa III: Aparecen macrogrietas oblicuas dentro de las pequeñas columnas. Estas macrogrietas oblicuas entonces se juntan entre si, para originar un plano de deslizamiento oblicuo en el espécimen.

En las etapas I y II las microgrietas no son activas por lo que se les asocia con el comportamiento del material. Las macrogrietas son activas en la etapa III y a estas se les asocia con el comportamiento de la estructura.

1.5.2.- PAPEL DE LAS FIBRAS EN EL PROCESO DE AGRIETAMIENTO DEL CONCRETO:

P. Rossi, Promulgo la idea de que las fibras actúan de dos maneras en el proceso de agrietamiento del concreto [24]:

1. **Al nivel del material:** Si se usa un porcentaje alto de fibras con diámetro pequeño, las fibras pueden mejorar la resistencia y la ductilidad del concreto ,considerando el problema de trabajabilidad asociada con la longitud de la fibra, una fibra con un diámetro pequeño deberá preferentemente ser corta.
2. **A nivel estructural:** Usando un porcentaje bajo de fibras con longitud apropiada como para permitir un anclaje adecuado para que las fuerzas sean transferidas a través de las macrogrietas, las fibras pueden mejorar la capacidad de carga y la ductilidad de las estructuras.

La longitud de las fibras a utilizar depende en gran medida de las características mecánicas de la matriz. Si la matriz es muy compacta y presenta buena adherencia con las fibras, una fibra corta puede funcionar efectivamente para microgrietas [25] .

1.5.3.- TIPOS DE GRIETAS:

Para describir el papel que juegan las fibras metálicas en el concreto, necesitamos distinguir las condiciones que rigen el agrietamiento, ya sea por tensión microscópica o por compresión. Para ello es conveniente iniciar con algunas definiciones [26]:

- Una **microgrieta** es una grieta con longitud muy pequeña en relación al tamaño del espécimen o estructura.
- Una **macrogrieta** es una grieta para la cual su longitud no se puede considerar que sea muy pequeña en relación al tamaño del espécimen o estructura.
- Una **grieta activa** es una grieta en cuyos extremos se presentan desplazamientos normales o tangenciales, y
- Una **grieta activa crítica** es una grieta que conduce a una concentración de esfuerzos y a la localización de deformaciones en un volumen de concreto.

La transición del comportamiento del material al comportamiento de la estructura corresponde a la transición del microagrietamiento activo al macroagrietamiento activo.

1.5.4.- CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DE LA FIBRA:

En cualquier caso en particular, el comportamiento del concreto reforzado con fibras dependerá de la fracción volumétrica de fibra y de las características intrínsecas de la fibra, entre las que destacan [27]:

- **Resistencia a la tensión:** Partiendo de que el área disponible de fibra para tomar los esfuerzos es mucho menor que el área del concreto, la fibra debe ser mas resistente. De cualquier manera, la resistencia a la tensión del concreto es tan baja que esto no es problema para las fibras de acero.

- **Elongación a la falla:** La fibra debe tener la capacidad de resistir deformaciones mayores a la deformación para la cual la matriz se agrieta. El concreto es tan rígido que esto comúnmente no es problema.
- **Módulo de elasticidad:** Entre mayor sea el modulo de elasticidad, mayor será la proporción de la carga que tomen las fibras en el ensaye de un compuesto antes de que se agriete. Por otro lado, entre mayor sea el módulo de la fibra menor será la deformación posterior al agrietamiento del compuesto.
- **Resistencia al cortante por adherencia interfacial:** La transferencia de carga de la matriz a las fibras depende del cortante por adherencia en la interfase.
- **Relación de Poisson:** La diferencia en la relación de Poisson, entre las fibras y la matriz origina esfuerzos en el sentido transversal de la fibra a lo largo de la interfase fibra-matriz. Si la relación de Poisson de las fibras es mayor que la de la matriz, como es el caso de la fibra de acero este esfuerzo transversal será de tensión y la fibra tenderá a desprenderse de la matriz afectando de manera adversa la adherencia .
- **Elasticidad:** si la fibra no es elástica y se somete a flujo bajo carga, sufrirá relajamiento de esfuerzo, y el nivel de reforzamiento disminuirá con el tiempo .La fibra de acero presenta bajo flujo.

1.5.5.- RELACION ASPECTO DE LA FIBRA:

En resumen el mecanismo de reforzamiento que proporcionan las fibras, involucra la transferencia de esfuerzo de la matriz a la fibra por cortante interfacial, o por la trabazón entre las fibras y la matriz. Si la superficie de la fibra es deformada, entonces el esfuerzo es compartido por la fibra y la matriz en tensión hasta que la matriz se agrieta, entonces el esfuerzo total es transferido progresivamente a las fibras [28].

Diversas investigaciones han demostrado que el uso de fibras con una relación aspecto mayor a 100, normalmente originan una trabajabilidad inadecuada, una distribución no uniforme de las fibras o ambas cosas si para el mezclado se emplean técnicas convencionales [28].

La falla en concretos con fibras con relación aspecto menor de 100 se presenta primeramente con la extracción de las fibras, la ventaja de este tipo de falla es que se presenta de manera gradual y con un comportamiento dúctil a comparación de una falla más rápida y probablemente brusca que puede ocurrir si las fibras fallan por tensión [29].

1.5.6.- DURABILIDAD DE LAS FIBRAS DE ACERO EMBEBIDAS EN CONCRETO:

Una de las mayores preocupaciones del uso de fibras de acero concerniente al aspecto durabilidad es el problema de corrosión [30]:

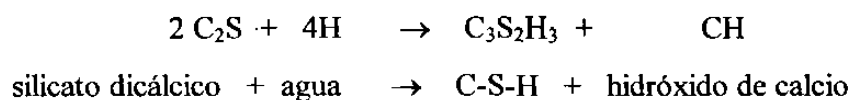
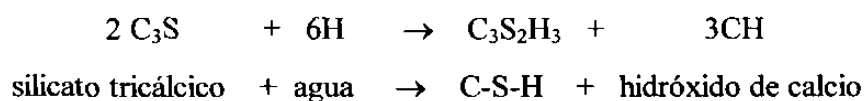
Corrosión de las fibras en concreto sin grietas: En estos concretos la experiencia actual ha demostrado que un concreto con resistencia superior a 21Mpa a los 28 días, que haya sido bien compactado y que cumpla con las recomendaciones para la relación A/CM del ACI 318, presentará una corrosión de las fibras limitada a la capa superficial del concreto. Una vez que las fibras superficiales se empiecen a corroer, al parecer la corrosión no se propaga más allá de 2.5mm bajo la superficie.

Corrosión de las fibras en concreto agrietado: Pruebas de laboratorio y de campo en concreto agrietado reforzado con fibras han demostrado que las grietas en el concreto pueden conducir a corrosión de las fibras que pasan através de la grieta. Sin embargo, anchos de grietas superficiales menores a 0.1mm no permiten la corrosión de las fibras que pasan através de las grietas. Si la grieta tiene un ancho mayor a 0.1mm está limitada en profundidad, las consecuencias de esta corrosión localizada no siempre será estructuralmente significativa. Sin embargo, si el agrietamiento por flexión o tensión del concreto reforzado con fibras puede conducir a una condición estructural crítica, se le debe dar importancia a la posibilidad de la corrosión en las grietas.

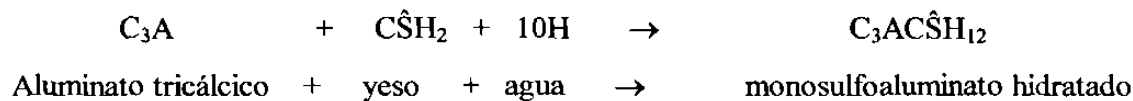
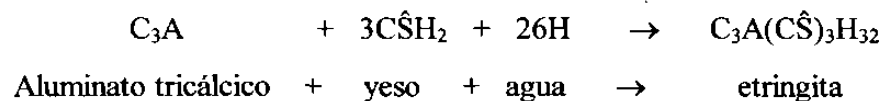
1.6.- REACCIONES DE HIDRATACION Y ACTIVIDAD PUZOLANICA:

1.6.1.- HIDRATACION DEL CEMENTO PORTLAND:

El fraguado y endurecimiento del cemento Pórtland se presenta como resultado de la reacción de los componentes del cemento y el agua. Los componentes mayoritarios del cemento que reaccionan con el agua para producir los productos de reacción son el Silicato Tricálcico (C_3S), el Silicato Dicálcico (C_2S), el Aluminato Tricálcico (C_3A), y el Aluminato Ferrito Tetracálcico (C_4AF). Los productos de hidratación de los dos silicatos de calcio son similares y difieren solo en la cantidad del hidróxido de calcio que se forma como se muestra a continuación [31]:



La reacción del C_3A con el agua es muy rápida e involucra reacciones con los iones sulfato suministrados por la disolución del yeso. La reacción puede ser presentada de la siguientes dos maneras:



El C_4AF forma productos de hidratación similares a los del C_3A , con hierro substituyendo parcialmente a la alúmina en la estructura cristalina de la etringita y del monosulfato hidratado.

Debe admitirse que en el presente, los detalles del proceso químico que transforma a la pasta de cemento Pórtland en una masa sólida endurecida no ha sido completamente entendida a detalle en sus diferentes etapas. Diversos investigadores coinciden en que los detalles de las reacciones químicas que tienen lugar en una reacción de hidratación del cemento Pórtland son muy complejos [32,33].

Otro enfoque sobre el mecanismo de las reacciones de hidratación entre los diferentes compuestos mineralógicos del cemento Pórtland con el agua es el sugerido por Vernet [34], quien describe el proceso en cinco etapas:

Etapas I; Periodo de Mezclado:

Durante esta etapa, los diferentes iones liberados por las diferentes fases entran en solución. Esta disolución es muy rápida y de naturaleza exotérmica y germinan dos hidratos de rápida reacción. La superficie de las partículas de cemento quedan parcialmente cubiertas con silicato de calcio hidratado (C-S-H) que se forma de los iones Ca^{+2} , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{-2}$ y OH^- liberados de las fases silicosas del clínker, y con Etringita (una sal hidratada de trisulfoaluminato de calcio) que se forma por la combinación de los iones Ca^{+2} , AlO_2^- , SiO_4^{-2} y OH^- originados de la fase intersticial y de las diferentes formas de sulfato de calcio presentes en el cemento.

Etapas II; Periodo de Letargo:

El rápido incremento tanto del pH como del contenido de iones Ca^{+2} en el agua de mezclado disminuye la disolución del cemento. El flujo térmico disminuye considerablemente, pero nunca se detiene. Durante este periodo se forma una pequeña cantidad de C-S-H, y si existe la proporción correcta entre los iones aluminio y sulfato, también se forman cantidades reducidas de etringita e hidrogranates. Durante este periodo, la fase acuosa se satura de iones Ca^{+2} , pero no hay precipitación de cal

(Ca(OH)₂), muy probablemente debido a su lenta velocidad de generación en comparación con la del hidrato de C-S-H con el que compite. Durante este periodo también se presenta algo de floculación de los granos de cemento.

Etapa III; Fraguado Inicial:

La reacción de hidratación se activa repentinamente cuando la cal comienza a precipitar. Esto ocurre cuando prácticamente en la fase acuosa no hay más silicato. Este repentino consumo de iones Ca⁺² y OH⁻ aceleran la disolución de todos los componentes del cemento Pórtland. Al principio, el flujo térmico se incrementa lentamente (debido a que la precipitación del CH es endotérmica y consume algo de calor) y se torna más rápida en una etapa posterior.

Normalmente, el fraguado inicial se da en este periodo, excepto cuando se presenta algo de rigidizamiento del mortero debido al desarrollo de agujas de etringita y algo de C-S-H. Las fases de silicato y aluminato hidratados originan el comienzo de adherencia entre partículas, resultando en un progresivo rigidizamiento de la pasta.

Etapa IV; Endurecimiento:

En la mayoría de los cementos Pórtland, hay menos sulfato de calcio que la cantidad necesaria para reaccionar con la fase aluminato, de tal forma que durante el fraguado los iones SO₄⁻² son inicialmente consumidos en su totalidad por la formación de etringita. Esto normalmente ocurre entre 9 y 15 horas después del mezclado inicial. En ese momento, la etringita viene a ser la fuente de sulfato para formar monosulfoaluminato con la fase aluminato restante. Esta reacción genera calor y da como resultado un aceleramiento en la hidratación de las fases silicosas.

Nota: A los productos de hidratación que se forman durante estas primeras etapas, a menudo se les refiere como productos externos debido a que crecen en la superficie de los granos de cemento dentro de la fase acuosa intersticial. Aparecen como una red porosa de C-S-H fibroso, agujas de etringita, plaquetas de monosulfoaluminato y cristales hexagonales apilados de portlandita.

Etapa V; Retardo:

En esta etapa de la hidratación, los granos de cemento son cubiertos por una capa de hidratos que conforme pasa el tiempo se torna mas gruesa, y progresivamente le es mas difícil a las moléculas de agua alcanzar a través de esta capa gruesa la fracción no hidratada de las partículas de cemento. El proceso de hidratación disminuye debido a que está principalmente controlado por la velocidad con la que las moléculas de agua se difunden a través de las capas de hidratos, y la pasta de cemento hidratada queda como una pasta amorfa, masiva y compacta.

La hidratación del Cemento Pórtland se detiene ya sea cuando ya no hay mas fase anhidra (concreto con alta relación agua/cementante bien curado), o cuando el agua ya no puede alcanzar las fases no hidratadas (sistemas muy densos y altamente defloculados) o cuando no hay mas agua disponible, si esto sucede (relación agua/cementante muy baja).

El progreso de la hidratación y la cinética de la hidratación del cemento estará influenciado por diferentes factores, entre los que se podrían destacar:

- Por la composición mineralógica del cemento y la presencia de iones dopantes dentro de la red cristalina de cada una de las fases del clínker.
- Por la fineza del cemento, en particular por su distribución de tamaños de partículas y por su superficie específica.
- Por la relación Agua/Cemento empleada.

- Por la temperatura de curado.
- Por la presencia de aditivos químicos que se añaden para modificar la velocidad de hidratación y las propiedades de la pasta de cemento.
- Por la presencia de cementantes complementarios como la microsilica, la ceniza volante, la escoria de alto horno, etc.

1.6.2.- ACTIVIDAD PUZOLANICA DE LOS CEMENTANTES COMPLEMENTARIOS:

La actividad puzolánica es un indicador de la reacción cal-puzolana pero no está bien entendida [35]. Esta mayoritariamente relacionada con la reacción entre la sílica reactiva y el hidróxido de calcio, produciendo silicato de calcio hidratado.

La hidratación y los mecanismos de reacción de la puzolana con los compuestos del cemento, tales como el C_3S y el C_3A , son más complicados que las reacciones en el sistema puzolana-cal. Para explicar la actividad puzolánica Takemoto y Uchikawa propusieron un mecanismo que la describe como una disolución controlada por difusión como se expone a continuación [36]:

En un sistema C_3S -puzolana, los iones calcio disueltos del C_3S se mueven libremente en la solución líquida y son adsorbidos sobre su superficie por las partículas de puzolana. El C-S-H que se forma por la hidratación del C_3S se precipita como hidratos con una relación alta de Ca/Si sobre la superficie de los granos de C_3S y como hidratos en los poros con baja relación Ca/Si sobre la superficie de las partículas de puzolana. El ataque de la puzolana en agua conduce a una disolución gradual de Na^+ y K^+ , originando una capa superficial amorfa rica en Si y Al. El Na^+ y el K^+ disueltos incrementan la concentración de OH^- y acelera la disolución de SiO_4^{4-} y de AlO_2^- , que se combina con Ca^{+2} para incrementar el espesor de la capa. Debido a la presión osmótica, la capa se dilata gradualmente y se forma un vacío entre la capa y la partícula de puzolana. Cuando la presión dentro del vacío rompe la capa, el SiO_4^{4-} y el AlO_2^- se

difunden en la solución rica en Ca^{+2} . Adicionalmente los hidratos de C-S-H y Ca-Al se precipitan sobre la superficie de los hidratos exteriores de las partículas de C_3S y en menor cantidad sobre la capa rota. El espacio vacante permanece dentro de la capa mientras los hidratos no precipiten ahí debido a la alta concentración de álcalis. Para puzolanas con bajo contenido de álcalis, la destrucción de la capa rica en Si y Al, permite al Ca^{+2} moverse hacia el interior de la capa y precipitar hidratos de silicato de calcio y aluminato de calcio sobre la superficie de la partícula de puzolana. Debido a ello no se observan espacios entre las partículas de puzolana y los hidratos (ver **Figura 1**).

Uchikawa y Uchida [37] estudiaron la hidratación del sistema C_3A -Puzolana en presencia de hidróxido de calcio y yeso y encontraron que la presencia de puzolana acelera la hidratación del C_3A al adsorber el Ca^{+2} de la fase líquida y al proveer espacios para la precipitación de etringita y otros hidratos. La reacción del sistema C_3A -Puzolana es similar a la reacción del sistema C_3S -Puzolana. Dependiendo de la concentración de Ca^{+2} y SO_4^{-2} en solución, producto de esta reacción en la capa superficial exterior de las partículas de puzolana o en la capa superficial hidratada del C_3A se forma etringita, hidratos de monosulfoaluminato, hidratos de aluminato de calcio e hidratos de silicato de calcio (ver **Figura 2**).

Diversas investigaciones han encontrado que la finura, la composición química y la concentración y estructura química de algunos de los componentes mineralógicos del cemento Portland tienen gran influencia en el comportamiento reológico y en la resistencia a la compresión en estado endurecido de sistemas cementantes fluidificados [38,39,40,41,42,43,44,45,46,47].

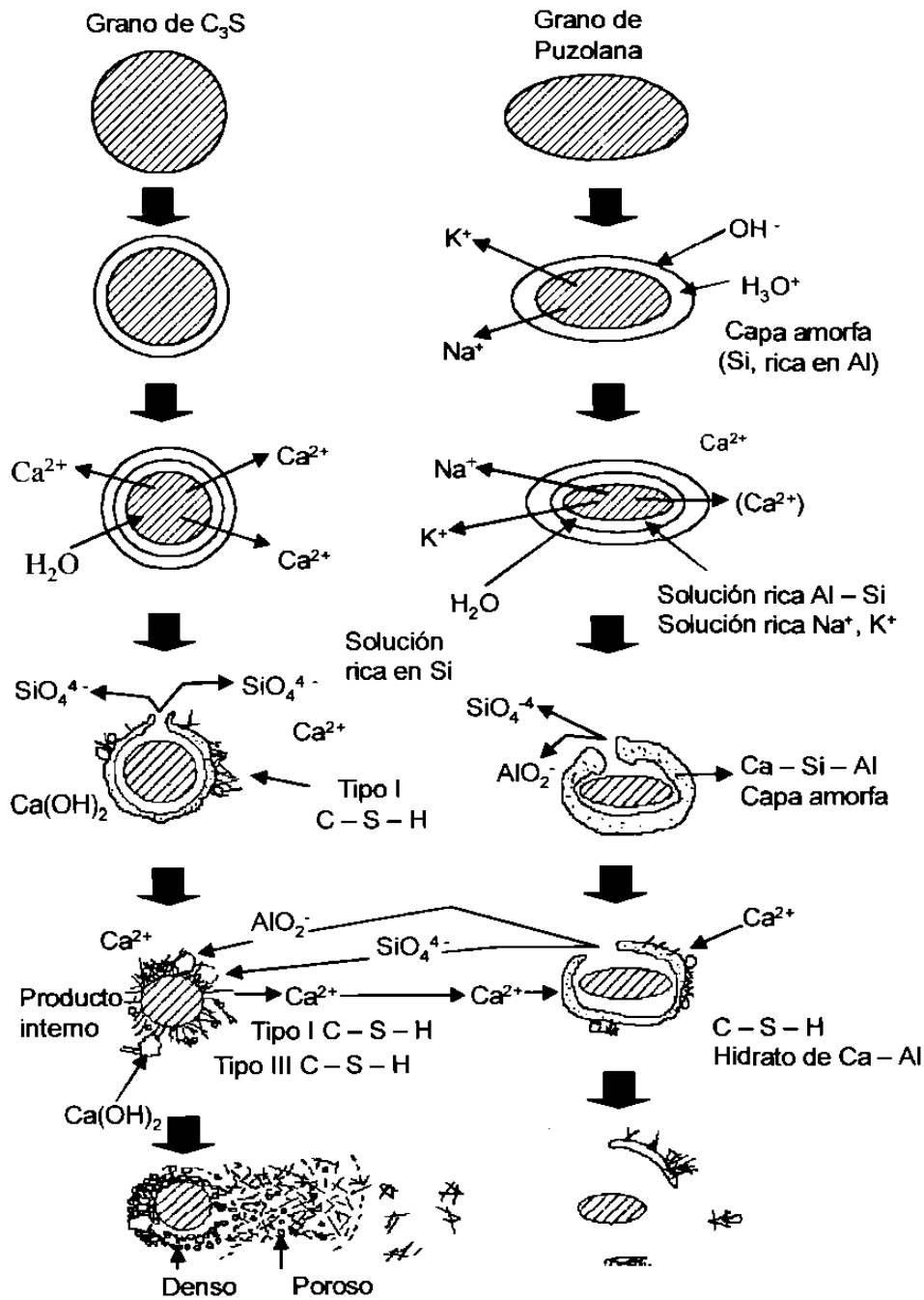


Figura 1.- Representación esquemática del mecanismo de hidratación en sistemas C_3S -puzolanas [31].

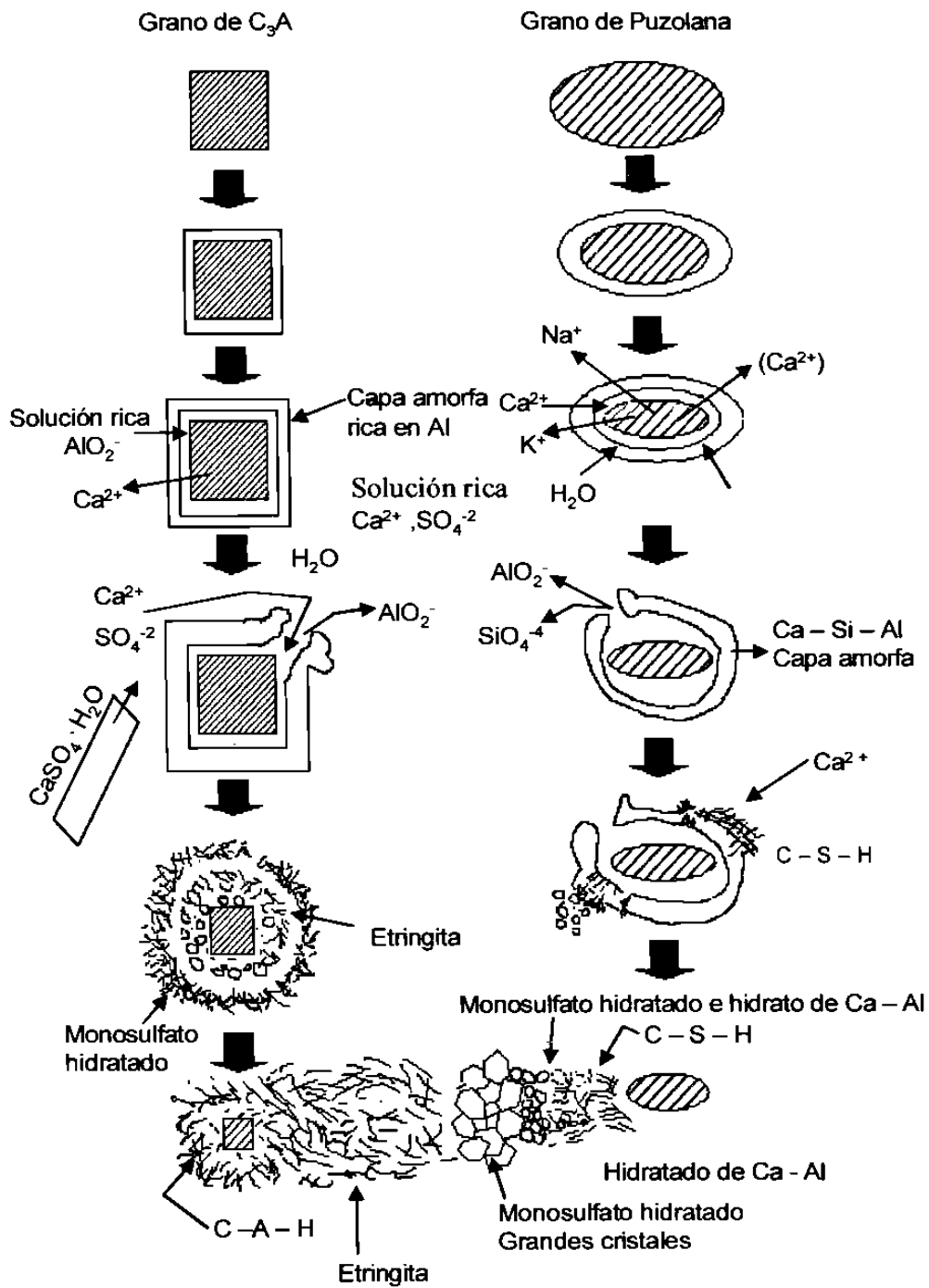


Figura 2.- Representación esquemática del mecanismo de hidratación en sistemas C_3A -puzolanas, en presencia de yeso y portlandita [31].

2.- ANTECEDENTES:

Lo que conocemos actualmente como Concretos reforzados con fibras de Ultra Alto Comportamiento (Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete, UHPFRC) son el resultado de investigaciones encaminadas a encontrar la manera de incrementar la resistencia mecánica del concreto, en particular la resistencia a la compresión. Se podría considerar que los primeros trabajos encaminados en este sentido se dieron hace aproximadamente 70 años, cuando con el fin de expulsar la mayor cantidad de aire atrapado y algo de agua para eliminar parcialmente algo de la contracción química temprana, Eugene Freyssinet demostró que prensando el concreto durante el fraguado se podía incrementar su resistencia a la compresión [48]. Posteriormente, en la década de los sesentas, mediante investigaciones encaminadas en el mismo sentido, D.M. Roy y G.R. Gouda obtuvieron resistencias a compresión hasta de 650 Mpa en especímenes pequeños de mortero y de concreto fabricados con prensado y calentamiento simultáneos en una atmósfera saturada [49]. Para 1997, las resistencias a la compresión del concreto en aplicaciones prácticas se habían incrementado considerablemente, para ese entonces ya se habían usado concretos de alto comportamiento con resistencias entre 50 y 120 Mpa [50].

2.1.- CONCRETO DE ALTO COMPORTAMIENTO:

El *Concreto de Alto Comportamiento* (HPC, High Performance Concrete), es el concreto predecesor de los Concretos de Ultra Alto Comportamiento, y se define como el concreto que conjunta combinaciones especiales de comportamiento y requerimientos de uniformidad que no siempre pueden ser alcanzadas de manera rutinaria usando ingredientes convencionales y prácticas normales para el mezclado, la colocación y el curado, por lo que un Concreto de Alto comportamiento es aquel en el cual se desarrollan ciertas características para aplicaciones y entornos de servicio particulares. Ejemplos de características que pueden ser consideradas críticas para ciertas aplicaciones son: Facilidad en la colocación, compactación sin segregación, resistencia

temprana, propiedades mecánicas a largo plazo, permeabilidad, densidad, calor de hidratación, tenacidad, estabilidad volumétrica y larga vida útil en ambientes severos [51].

2.2.- CONCRETO DE ULTRA ALTO COMPORTAMIENTO:

Para los franceses, un *Concreto de Ultra Alto Comportamiento* es aquel que combina [51]:

- Altas resistencias a compresión ($f_c \geq 150$ Mpa).
- Una Trabajabilidad adecuada para la colocación.
- Menor requerimiento de mano de obra para la colocación.
- Ahorros económicos a largo plazo.
- Producto terminado con acabado estético y en sintonía con el ambiente.

Las primeras mejoras en las características del concreto se dieron en la década de los ochentas y se relacionaban con la comparación que se hacía con las altas resistencias a compresión y a flexión de materiales como el acero y la alúmina sinterizada [52].

Los trabajos desarrollados para incrementar la resistencia a la compresión del concreto atribuyen la debilidad del concreto a la porosidad capilar y al exceso de agua requerida para dar la trabajabilidad a la pasta en estado fresco [52,53], lo cual es característico en concretos con relaciones A/CM altas.

Con el fin de densificar la pasta de cemento y la zona de transición interna entre la matriz y el agregado en el mortero, así como para contrarrestar la fragilidad resultante en los morteros mediante la adición de fibras de acero. A la fecha el desarrollo de los denominados Concretos Reforzados con Fibras de Ultra Alto Comportamiento ha estado dado por tres vertientes que se enlistan a continuación en orden cronológico:

2.2.1.- SISTEMAS DENSIFICADOS CONTENIENDO PARTICULAS ULTRAFINAS HOMOGENEAMENTE DISTRIBUIDAS (DSP-Densified with Small Particles):

Con el fin de disminuir la porosidad en los morteros, en Dinamarca, H.H.Bache aprovecho las ventajas de la acción combinada de la microsilica y el súperplastificante, también hizo la observación de que el agregado grueso era el ingrediente más débil, por lo que con el fin de incrementar la resistencia a compresión usó agregados muy resistentes, por otro lado también observó que entre mas pequeño era el tamaño máximo del agregado grueso más resistentes eran los morteros [54]. Adicionándole altos porcentajes de fibras metálicas de 6 mm de longitud y 0.15 mm de diámetro a los morteros, fabricó lo que denominó Compuesto Compacto Reforzado (Compact Reinforced Composite) [55].

2.2.2.- CONCRETOS DE POLVOS REACTIVOS (RPC –Reactive Powder Concretes):

Desarrollados en Francia por P. Richard es un material considerado de ultra alta resistencia fabricado a base de cemento Pórtland con el cual bajo condiciones muy especiales y con agregado metálico se han podido obtener resistencias hasta de 800 MPa [56].

Los desarrolladores de estos compuestos, atribuyen que el impresionante comportamiento mecánico que presentan se obtiene:

- ❖ Limitando el tamaño máximo de partícula a 300um, se logra una mejor homogenización de los ingredientes en la matriz en comparación a los concretos de alto comportamiento .

- ❖ Incrementando la densidad (empaquetamiento) de la mezcla granular usando proporciones óptimas de partículas con diámetros promedio bien distribuidos en la granulometría compuesta.
- ❖ Un mejoramiento de la microestructura a través de un tratamiento térmico apropiado.
- ❖ Un mejoramiento de la ductilidad a través de la incorporación de microfibras de acero.

S. Collepari, et.al., reprodujeron los RPC desarrollados por Richard empleando tres arenas con diferente tamaño máximo y granulometría, una arena sílica con tamaño máximo de 8.0 mm, una caliza con tamaño máximo de 8.0 mm y una mezcla de ambas. Sus resultados mostraron que para la misma relación A/CM la resistencia a la compresión no se veía afectada por el tamaño máximo de la arena, lo cual se contrapone a la aseveración que Richard hace en relación a que en la ausencia de agregado grueso en la mezcla conduce a una mayor resistencia a la compresión y a una mejor homogeneidad de la mezcla [57], o en otras palabras se podría decir que para tales tamaños máximos no afecto la calidad de tales agregados.

En la **Imagen 1** aparecen las macrofotografías de un RPC, un Concreto Convencional (CC) y un Concreto de Alto Comportamiento (HPC).

El precio de 1 m³ de concretos RPC les ocasiona pavor a algunos ingenieros al compararlo con el costo por m³ del concreto convencional o del concreto de alto comportamiento. Sin embargo, el costo unitario de este concreto no debe calcularse por m³, si no por tonelada de material, ya que este material por sus propiedades se debe comparar contra el acero y no contra el concreto convencional o el concreto de alto comportamiento [58].

En 1997 el costo del RPC usado para la construcción del puente peatonal que aparece en la **Imagen 2**, se estimó en \$ 1,000 USD/m³. en 1999 el mismo concreto podía producirse por \$ 750 USD/m³ y en el futuro cercano podría tener un costo de \$ 600 a \$ 650 USD/m³. Un costo de \$ 1,000 USD/m³ equivale a \$ 400 USD/Tonelada, en

aplicaciones en las que la resistencia a la compresión y la durabilidad son factores clave, los RPC pueden competir con el acero estructural que puede costar entre \$ 1200 y \$ 1500USD/Tonelada [58].

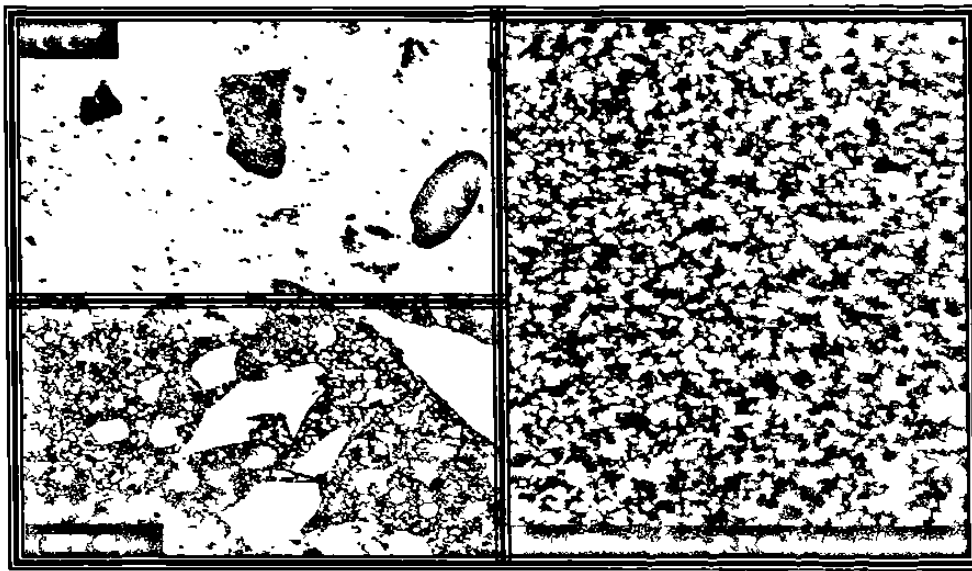


Imagen 1.- Microfotografías de concreto convencional (CC), concreto de alto comportamiento (HPC) y concreto de polvos reactivos (RPC).

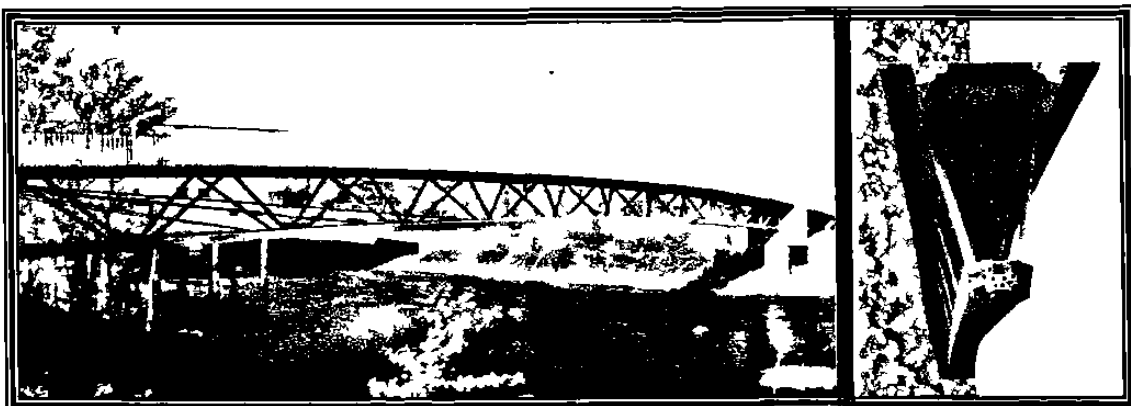


Imagen 2.- Puente peatonal construido sobre el río Magog en la ciudad de Sherbrooke, Québec, Canadá, con concreto RPC de 200 MPa. La construcción termino en 1997.

2.2.3.- CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRAS MULTI-ESCALA (*Multi scale Fibre reinforced Concrete, MSFRC*):

Estos compuestos fueron desarrollados por P. Rossi en la década de los noventas en el Laboratorio Central de Puentes y Canales de Francia (LCPC), partiendo de los modelos teóricos establecidos por De Larrard y Sedran [59], en este trabajo manifiestan que una matriz de Ultra Alta Resistencia puede obtenerse en base a tres principios: La relación A/CM debe ser muy baja; el tamaño máximo del agregado debe ser muy pequeño y que el tamaño mínimo del agregado sea lo suficientemente grande con relación al tamaño máximo de la partícula de cemento. Adoptando estos principios y empleando arena redondeada con un tamaño máximo de 400 μm , Rossi prácticamente reprodujo el RPC reforzándolo con fibras multi-escala. El término multi-escala se refiere a que para reforzarlo se utiliza una mezcla de fibras cortas y largas bajo la premisa de que ambas fibras actúan incrementando la resistencia a la tensión a escala del material e incrementando la capacidad de carga del material a nivel estructural [24].

Solo las compañías serias se involucran en estos mercados, debido a que disponen de tecnología de punta. Al ser capaces de proveer tales concretos de alta tecnología, también son capaces de suministrar las grandes cantidades de concreto convencional que se requerirá para completar la construcción de la infraestructura [58].

3.- **OBJETIVOS:**

Empleando para el desarrollo un cemento cuyas propiedades químicas están bien definidas, el presente trabajo se planteó para desarrollar un compuesto que entre otras propiedades físicas tuviese consistencia adecuada y alta resistencia a la compresión, y con los siguientes objetivos:

- Desarrollar un Cementante Complementario alternativo a los cementantes complementarios tradicionales que se emplean para la producción de estos compuestos.
- Producir una matriz densa de diseño optimizado con la que se mejore la cohesión interna de sus componentes para mínima relación A/CM – máxima fluidez.
- Producir un concreto con cemento Pórtland CPO 40 de CEMEX que sobrepase en gran medida la capacidad de carga a compresión que presentan los concretos convencionales.
- Producir estos compuestos con subproductos industriales que como cementantes complementarios resulten más económicos.
- Desarrollar una propuesta del procedimiento para la producción sistemática de compuestos densificados-reforzados con fibras de acero base cemento Pórtland.

4.- **METAS:**

- Optimizar el diseño del mortero para obtener un compuesto de máxima densidad – mínima porosidad.
- Desarrollar y evaluar un cementante Complementario que proporcione mejor grado de densificación del compuesto en comparación con los cementantes complementarios tradicionales.
- Tener argumentos para definir la viabilidad orientada a utilizar otros cementantes complementarios para la producción de estos compuestos.
- Identificar y definir rangos de operación y control de los parámetros que influyen de manera determinante en la producción exitosa de estos compuestos.

5.- JUSTIFICACION:

El deterioro de un gran numero de elementos estructurales de concreto convencional, como resultado de la incapacidad de la matriz de este material para soportar los ambientes de servicio, ha originado que a nivel internacional se establezca como prioridad el desarrollo de concretos durables, con las consiguientes ventajas económicas. Esto se logra incrementando la densidad de la matriz que conduce a un aumento de la impermeabilidad, además se logra un importante incremento en la resistencia a la compresión de estos concretos.

Sin embargo, estos concretos resultan frágiles, por lo cual es muy conveniente usar fibras que aumenten la tenacidad, para este fin, las mas comúnmente usadas son las de acero. Si además, estos concretos se producen con alta trabajabilidad, se obtiene lo que en la actualidad se conoce como Concretos de Ultra Alto Comportamiento.

Dado su alto costo para aplicarse a elementos estructurales convencionales, y al eficiente control que demanda en su fabricación, este material no tendría éxito para aplicaciones estructurales convencionales, sin embargo con este material es posible construir elementos prefabricados delgados, que por sus propiedades competirían en costo con el acero, por su facilidad en el moldeo y por su peso.

El presente trabajo estuvo encaminado a desarrollar Compuestos Densificados-Reforzados o Concretos de Ultra Alto Comportamiento.

6.- DESARROLLO EXPERIMENTAL Y COMENTARIOS A LOS RESULTADOS:

A continuación se describen los parámetros considerados para el desarrollo del presente proyecto, así como las pruebas, análisis o procedimientos empleados y sus comentarios.

6.1.- INGREDIENTES Y DEFINICION DE CONSTANTES DEL PROYECTO:

6.1.1.- INGREDIENTES SELECCIONADOS:

- CPO 40 marca Monterrey
- CC a estudiar: HSF, M³, CVFM, MK-PP, A069 y MK-CIM.
- Arenas sílicas nacionales: F 20/40, F 40, F 50, F 50/55, F 62 y M 200
- Aditivos súperfluidificantes: FCNS y EPC

6.1.2.- CONSTANTES DEL PROYECTO:

Apoyados en la literatura técnica consultada [23,24,26,54,56,57,60], para definir mediante pruebas de laboratorio tanto las proporciones como el procedimiento de fabricación encaminados a la producción de Compuestos Densificados-Reforzados Base Cemento Pórtland, se fijaron las siguientes constantes:

- Dosificación del SF = 2.5% en peso del CT [60]
- A/CM = 0.16 a 0.22
- % máximo de FA en volumen = 4 %.

6.1.2.1.- DOSIFICACIÓN DE CEMENTANTES:

Siendo la relación A/CM la variable de decisión para una fluidez óptima en morteros con altos contenidos de cementante y basados en tanteos previos realizados en el departamento de Tecnología del Concreto del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL, para este proyecto seleccionamos trabajar con un volumen de pasta del 60 % por metro cúbico de mortero, considerando una relación A/CM promedio de 0.22 y por el tamaño máximo del agregado con el que trabajaríamos un contenido de aire atrapado de 5.0 %. Las proporciones en la pasta del CT, del agua y del aire en volumen corresponden al 56, 36 y 8 %. Considerando el peso de agua como W_a y el peso del cementante total (CT) como W_c , la dosificación de CT se definió de la siguiente manera:

$$\text{Volumen de pasta sin aire} = 600 - 50 = 550 \text{ litros}$$

$$\frac{W_a}{W_c} = 0.22 \Rightarrow W_a = 0.22W_c$$

$$\frac{W_c}{2.88} + \frac{W_a}{1} = 550 \Rightarrow 0.35W_c + W_a = 550$$

$$0.35W_c + 0.22W_c = 550 \Rightarrow 0.57W_c = 550$$

$$W_c = \frac{550}{0.57} \Rightarrow W_c = 965 \approx 950 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

6.1.2.2.- PROPORCION DE CEMENTANTES:

Para definir la dosificación de CC en la pasta consideramos que el CT estaría conformado por 75 % de CPO 40 y 25 % de CC en volumen absoluto, lo cual en peso representa 760 kg/m^3 de CPO 40 y 190 kg/m^3 de CC. El porcentaje de CC en peso con relación al peso de CT representa el 20%. Para el HSF este porcentaje esta dentro del rango de dosificación optima para máxima resistencia [61].

6.2.- PROPIEDADES MECANICAS POR DETERMINAR:

Las resistencias mecánicas por determinar a los compuestos en estado endurecido serán: Resistencia a la Compresión, Resistencia a la Tensión Directa, Flexión y Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral para los especimenes fabricados con los morteros definitivos, cuyas proporciones se definieron en base a la experimentación que se detalla en el presente trabajo.

6.3.- CARACTERIZACION DE CEMENTOS PÓRTLAND Y CEMENTANTES COMPLEMENTARIOS:

6.3.1.- COMPOSICION QUIMICA POR FRX:

En la **Tabla 1** aparecen los resultados de los **análisis químicos vía FRX** para el CPO 40, para los CC a estudiar y para cuatro cementos alternativos (CEH, CPO-M1, CPO-M2 y CPO-M3). En la **Imagen 3** aparece el equipo de FRX empleado para el análisis químico, en la **Imagen 4** aparece el equipo empleado para preparar las patillas de vidrio que se utilizan para este análisis.

De acuerdo a ASTM C 618-01, los requerimientos químicos con los que deben cumplir las cenizas volantes de carbón y las puzolanas crudas o calcinadas para emplearse como CC en concreto son los siguientes:

	Clase de CC		
	N	F	C
➤ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (% mínimo)	70	70	50
➤ SO_3 (% máximo)	4	5	5
➤ Pérdida por Ignición (% máximo)	10	6	6

De acuerdo a ASTM C 618-01 por su composición química los CC M^3 , CVFM, MK-PP y MK-CIM pueden clasificarse como complementos cementantes para concreto clases N, F ó C y el A069 por presentar una PPI mayor a 6.0 % pero menor a 10.0 % se puede clasificar solo como clase N.

Por el contenido de SiO_2 y por el color gris del HSF, deducimos que este material proviene de un proceso para la producción de material de metal de silicio.

Tabla 1.- COMPOSICION QUIMICA DE CEMENTOS Y CEMENTANTES COMPLEMENTARIOS DETERMINADA VIA FRX.

Oxido	Contenido, % en peso												
	Cementos Pórtland						Cementantes Complementarios						
	CPO 40	CEH	CIM 121			HSF	M ³	CVFM	MK - PP	MK - CIM	A069-CIM		
		MI	M2	M3									
SiO ₂	19.28	21.80	19.70	19.74	19.60	94.05	48.51	60.42	52.66	78.50	74.53		
Al ₂ O ₃	5.03	3.49	4.56	4.12	4.54	0.13	25.30	27.28	42.29	13.81	13.29		
Fe ₂ O ₃	1.79	3.63	3.45	4.00	2.68	0.09	3.13	4.07	0.68	0.57	0.35		
CaO	64.31	64.83	63.94	62.20	64.36	0.32	14.65	2.47	0.14	2.51	2.32		
MgO	1.68	1.14	1.07	1.95	1.17	0.17	2.56	0.91	0.00	0.16	0.16		
SO ₃	3.07	2.05	2.65	3.07	3.02	0.00	1.07	0.34	0.03	0.69	0.94		
Na ₂ O	0.23	0.84	0.03	0.20	0.10	0.88	0.52	0.62	0.00	1.69	0.01		
K ₂ O	0.95	0.51	0.79	0.64	0.56	0.51	1.01	1.11	0.30	0.56	0.52		
TiO ₂	0.22	0.20	0.23	0.20	0.15	0.01	1.47	1.09	2.07	0.18	0.16		
P ₂ O ₅	0.09	0.26	0.15	0.02	0.05	0.07	0.21	0.09	0.09	0.02	0.03		
Mn ₂ O ₃	0.04	0.04	0.04	0.04	0.13	0.04	0.06	0.02	0.00	0.03	0.00		
SrO	0.07	0.09	0.11	0.07	0.07	0.00	0.30	0.04	0.00	0.00	0.00		
PPI (950°C)	3.24	1.02	2.27	2.26	2.59	2.91	0.69	1.00	1.03	1.03	7.62		



Imagen 3.- Equipo de FRX marca Broker AXS utilizado para la determinación de la composición química de los materiales.

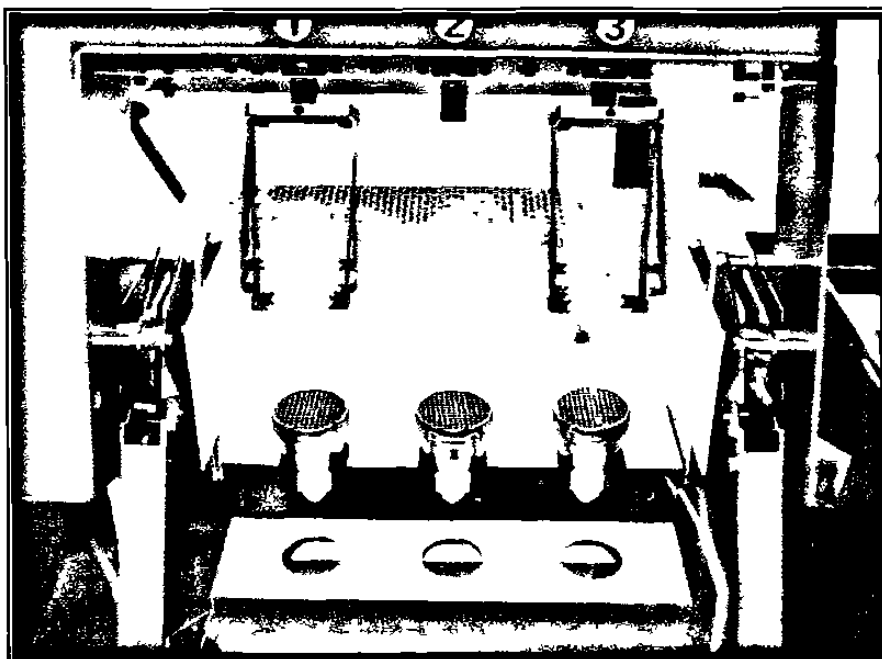


Imagen 4.- Perlicadora utilizada para la fabricación de las pastillas de vidrio que se analizan vía FRX.

6.3.2.- *DISTRIBUCIONES DE TAMAÑOS DE PARTICULAS POR LASER:*

Las **distribuciones de tamaño de partículas** (DTP) para cementos y Cementantes Complementarios se determinaron por láser y los resultados aparecen en la **Tabla 2**. Para cada uno de los materiales en esta tabla la superficie específica y los tamaños en los que se retiene el 10%, el 50% y el 90% del material aparecen como SE, $d(0.1)$, $d(0.5)$ y $d(0.9)$ respectivamente, además aparecen las densidades determinadas de acuerdo a ASTM C 188-95.

En el CPO 40 y los cementos alternativos, se aprecia un comportamiento congruente entre el contenido de Fe_2O_3 y la densidad, ya que conforme aumenta el Fe_2O_3 la densidad también aumenta. Los CC M^3 y CVFM por tener la mayoría de sus partículas una estructura hueca no reflejan esta congruencia.

Los DTP's en formato gráfico para el CPO 40 y los CC HSF, M^3 , CVFM Y MK-PP, aparecen en la **Gráfica 1** y para las arenas sílicas en la **Gráfica 2**.

De los análisis de DTP's que fueron realizados en el CIM-CEMEx por su personal, el CC que resultó con el menor tamaño promedio de partícula fue el M^3 con $2.95 \mu m$ y el que resultó con mayor tamaño promedio de partícula fue el HSF con $59.43 \mu m$, mucho mayor al promedio típico de $0.1 \mu m$ que para este material reporta el fabricante, esto se debe a que este producto se adquirió densificado para facilitar su manejo.

Los CC M^3 y CVFM, son subproductos industriales obtenidos con materia prima de distinto origen. Son dos las características que pueden arrojar una diferencia marcada entre ellos en relación a la potencial actividad puzolánica, estos son el contenido de CaO (14.65% para el M^3 y 2.47% para el CVFM) y el tamaño promedio de partícula ($2.95 \mu m$ para el M^3 y $11.04 \mu m$ para el CVFM) ya que conforme el contenido de CaO es mayor y el tamaño de partícula disminuye, la reacción puzolánica tiende a aumentar [62].

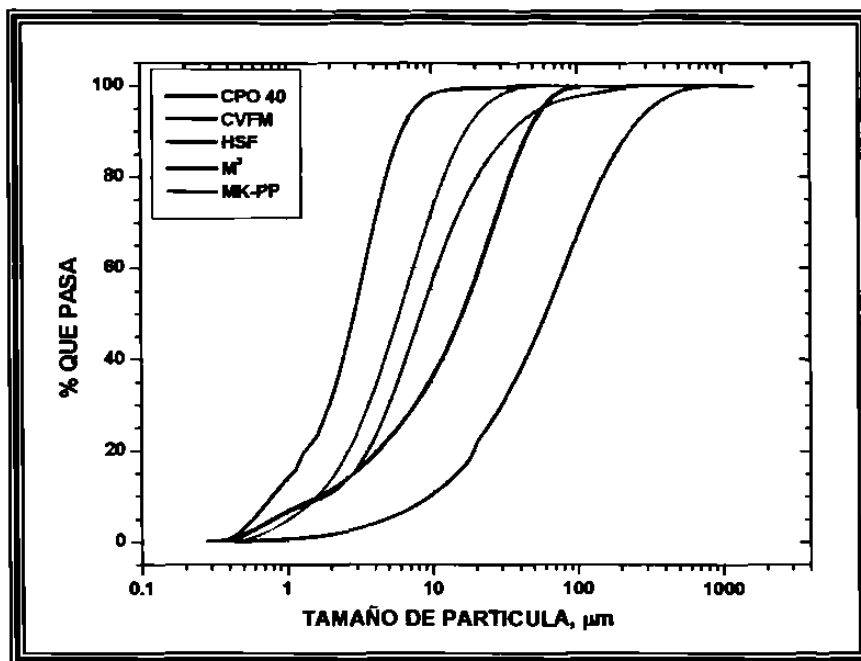
Tabla 2.- SE, TAMAÑOS EN LOS QUE SE RETIENE EL 10, EL 50 Y EL 90 % DEL MATERIAL OBTENIDOS POR MEDIO DE LASER Y DENSIDADES PARA CEMENTANTES Y ARENAS SILICAS.

MATERIAL	SE m²/g	d(0.1) µm	d(0.5) µm	d(0.9) µm	Densidad* g/cm³
CPO 40	1.37	1.63	16.03	46.78	3.06
CEH	1.11	2.37	13.31	37.41	3.05
HSF	----	37.80	11.04	1.60	2.18
M³	----	6.53	2.95	0.85	2.56
CVFM	----	186.02	59.43	9.92	2.27
MK-PP	1.70	1.58	5.89	16.95	2.50
CIM 121-M1	0.35	2.24	14.07	39.32	3.11
CIM 121-M2	0.33	2.62	14.18	40.21	3.15
CIM 121-M3	0.37	2.14	13.54	39.99	3.08
HARINA M200	862.12	2.69	19.55	60.10	2.90
ARENA F 20/40	9.55	425.72	669.73	1016.92	2.65
ARENA F 40	14.50	287.24	436.35	654.86	2.63
ARENA F 50	18.76	201.81	350.03	592.72	2.64
ARENA F 50/55	19.99	205.26	317.31	489.32	2.65
ARENA F 62	20.70	195.58	308.39	482.39	2.64

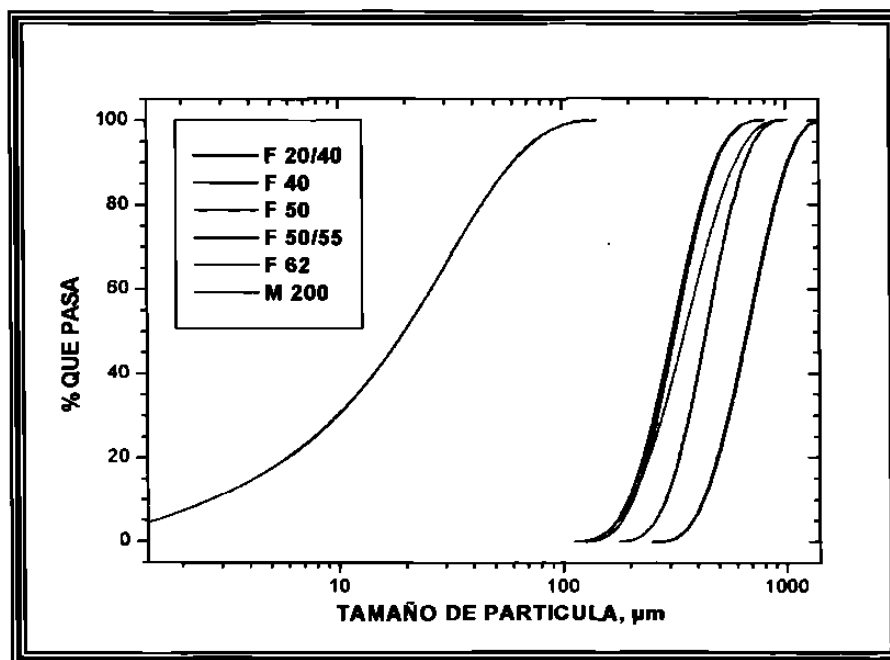
SE = Superficie Especifica.

d(0.1), d(0.5) y d(0.9) = Tamaños en los que se retiene el 10, 50 y 90% del material respectivamente.

* Determinadas con el frasco de Lechatelier descrito en el Método Estándar ASTM C 188-95.



Grafica 1.- Distribuciones de Tamaños de Partículas (DTP's) para el CPO 40 y cementantes complementarios (CC).



Grafica 2.- Distribuciones de Tamaños de Partículas (DTP's) de Arenas Silicas y Harina Silica M 200.

6.3.3.- CARACTERISTICAS DE FINURA Y POROSIDAD BET:

En la **Tabla 3** aparecen para el CPO 40 la **finiza Blaine ASTM C 204-00**, para el CPO 40 y el CC CVFM la **finiza malla #325 (45 μ m)** y para el CPO 40 y los CC HSF, M³, CVFM y MK-PP la **superficie especifica (SE)** y la **porosidad** determinados por la **técnica de Adsorción de Nitrógeno BET** (Brunauer, Emmet y Taylor). En las **Imágenes 5 y 6** aparece el aparato Blaine y el equipo de adsorción de nitrógeno BET respectivamente.

Tabla 3.- CARACTERISTICAS DE FINURA Y POROSIDAD BET.

CARACTERISTICA		MATERIAL				
		CPO 40	HSF	M ³	CVFM	MK-PP
Fineza Blaine, m ² /kg		385	-----	-----	-----	-----
Fineza por Malla #325 (45 μ m) % que pasa		92.2	-----	-----	64.8	-----
BET	SE, m ² /g	3.8	25.8	2.5	3.2	21.0
	Porosidad, %	4.1	35.7	2.8	1.6	35.2

SE = Superficie Especifica

Los DTP's determinados vía láser que aparecen en la **Gráfica 1**, para los CC HSF, y MK-PP muestran que ambos materiales son mas gruesos que el M³, sin embargo las correspondientes SE determinadas por la técnica BET reportadas en la **Tabla 3** muestran que son mucho mas finos que el M³. En este sentido consideramos que los resultados de los análisis BET reflejan con más certidumbre la finiza real de estos materiales, ya que los DTPs de estos CC incluyen los tamaños de grumos y no de partículas.

El método de permeabilidad del aire descrito en ASTM C 204-00 se emplea comúnmente en la industria del cemento como un indicador de la distribución de tamaños de partículas, sin embargo este método para materiales muy finos y/o microporosos como los CC HSF, M³ y MK-PP no es aplicable [62]. Por lo anterior este parámetro no fue determinado para ninguno de los CC reportados en la **Tabla 3**. La fineza Blaine obtenida para el CPO 40 cae dentro del rango de fineza que normalmente tiene el Cemento Pórtland ASTM C 150-00 Tipo I de 330 a 400 m²/kg.

Los resultados de los análisis de Adsorción de Nitrógeno BET, son un claro reflejo de las diferencias muy significativas entre los CC HSF y MK-PP con el CPO 40 ya que la SE y la porosidad del HSF son 6.8 y 8.7 veces mayores, y la SE y la porosidad del MK-PP son 5.5 y 8.6 veces mayores.

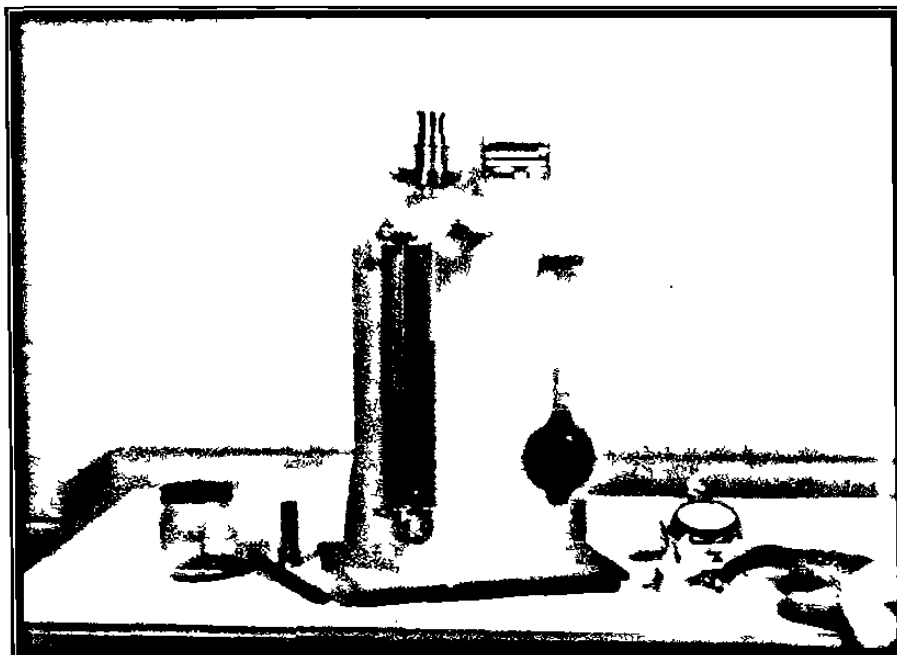


Imagen 5.- Equipo de permeabilidad al aire Blaine requerido para determinar el área superficial a cementos de acuerdo a ASTM C 204-00.

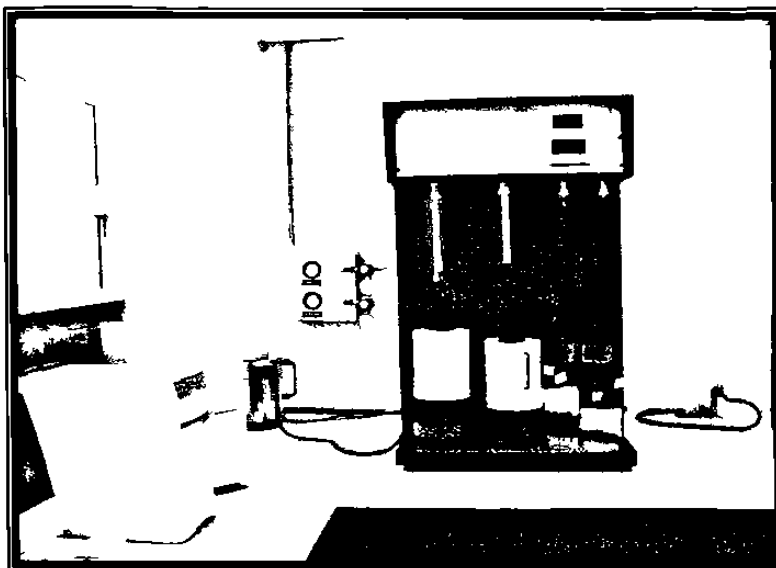


Imagen 6.- Equipo de adsorción de nitrógeno utilizado para determinar áreas superficiales y porosidad por BET.

6.3.4.- FASES MINERALES POR DRX:

En las Gráficas 3, 4, 5, 6 y 7 aparecen los espectros de **difracción DRX** que se obtuvieron con el equipo que aparece en la **Imagen 7** para el CPO 40 HSF, M³, CVFM y el MK-PP. Las fases minerales que presentaron cada uno de estos materiales fueron:

Tabla 4.- FASES MINERALES OBTENIDAS POR DRX PARA EL CPO 40, HSF, M³, CVFM, Y EL MK-PP.

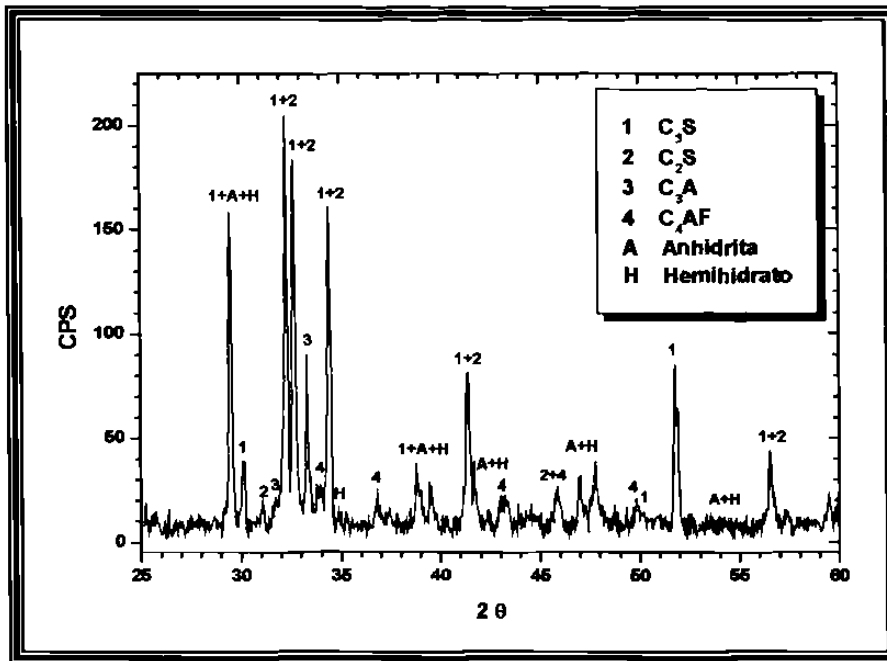
Ingrediente	Fase mineral
CPO 40	<ul style="list-style-type: none"> • C₃S (Alita) • C₂S (Belita) • C₃A (Aluminato) • C₄AF (Ferrita) • Sulfato de calcio en las formas de hemihidrato (CaSO₄·1/2H₂O) y anhidrita (CaSO₄).
Continuación Tabla 4.	

Ingrediente	Fase mineral
HSF	<ul style="list-style-type: none"> • Cuarzo • Cristobalita
M ³	<ul style="list-style-type: none"> • Cuarzo • Mulita • Hematita • Magnetita
CVFM	<ul style="list-style-type: none"> • Cuarzo • Mulita • Hematita • Magnetita
MK-PP	<ul style="list-style-type: none"> • Cuarzo • Caolinita • Metacaolín

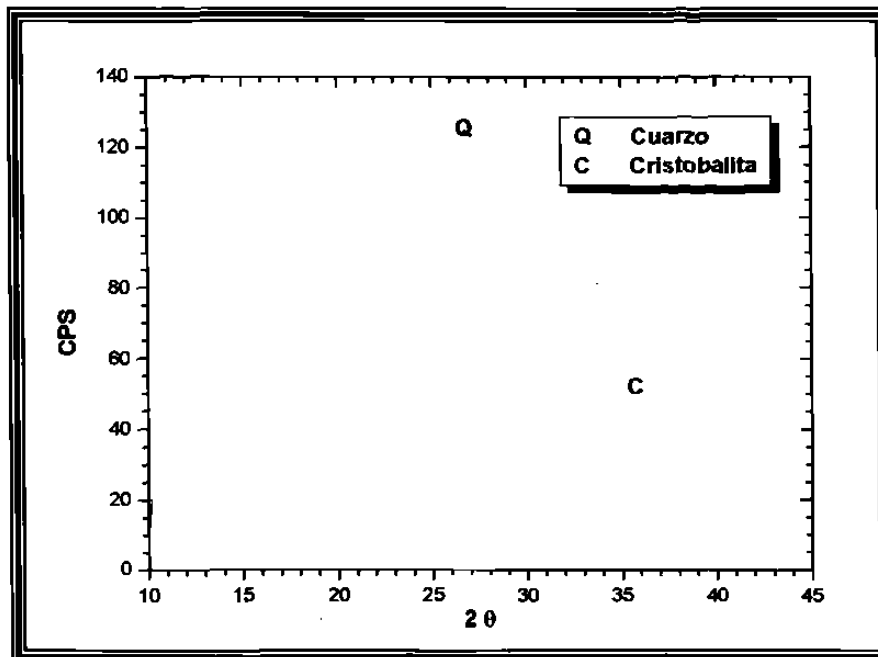
Los espectros de difracción obtenidos para los CC, HSF, M³, CVFM y MK-PP muestran una joroba a la que también se le refiere como banda difusa; entre mayor sea la intensidad de esta joroba mayor será la presencia de material con estructura no cristalina o amorfa. De los cuatro CC el más amorfo es el HSF seguido por el MK-PP, M³ y CVFM en el orden que aparecen. El espectro de las arenas sílicas no muestra joroba, este material es 100% cristalino.

El HSF presenta dos fases cristalinas, el cuarzo y la cristobalita, el cuarzo no es reactivo, y la cristobalita ya sea que se encuentre con una estructura desordenada o en un estado metaestable y en función de la cantidad de iones en disolución en su red atómica puede presentar algo de actividad puzolánica [63].

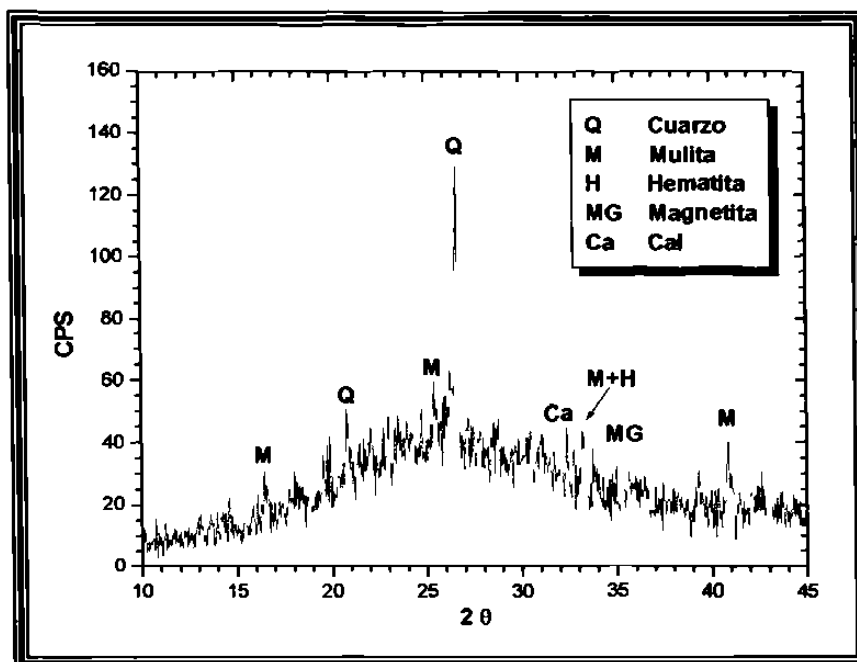
El M³ y el CVFM presentan las fases cristalinas de Cuarzo, Mulita, Hematita y Magnetita, las cuales no poseen actividad puzolánica alguna [62].



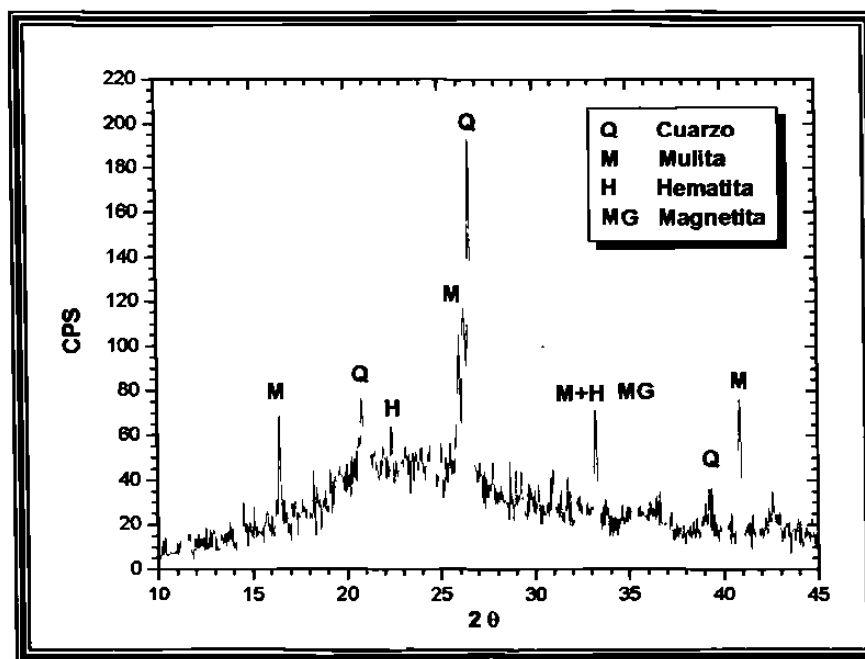
Grafica 3.- Espectro de Difracción de Rayos X del CPO 40.



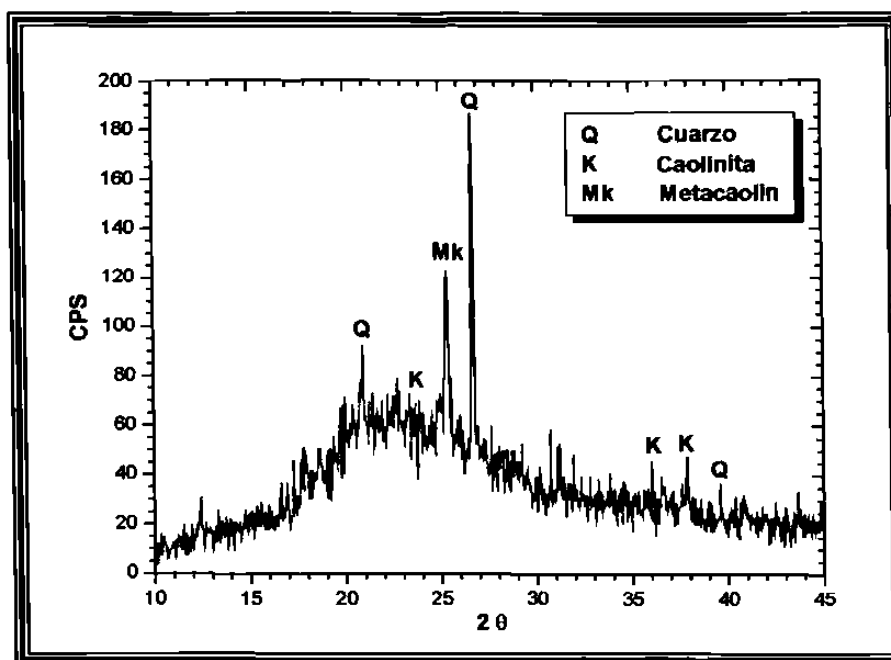
Grafica 4.- Espectro de Difracción de Rayos X del CC HSF.



Grafica 5.- Espectro de Difracción de Rayos X del CC M³.



Grafica 6.- Espectro de Difracción de Rayos X del CC CVFM.



Grafica 7.- Espectro de Difracción de Rayos X del CC MK -PP.

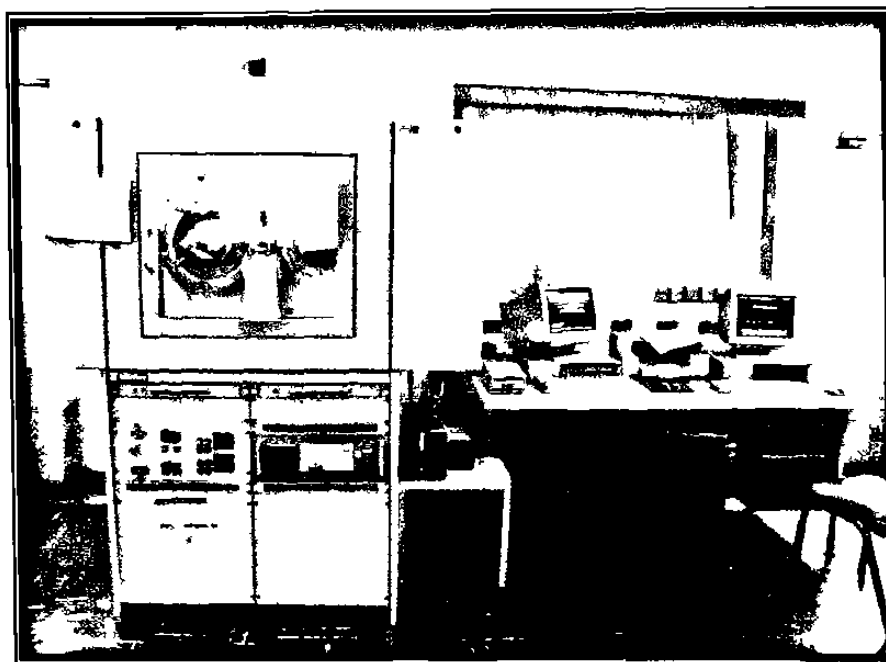


Imagen 7.- Equipo para análisis de Difracción de Rayos X marca Siemens modelo 5000.



Imagen 8.- Microscopio Electrónico de Barrido marca Leica, utilizado para determinar la morfología de los materiales y la microestructura de los morteros definitivos en estado endurecido.

6.3.5.- MORFOLOGIA POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO:

En la **Imagen 8** aparece el equipo de **Microscopía Electrónica de Barrido** que se empleó para obtener las microfotografías del CPO 40 y de los CC HSF, M³, CVFM y MK-PP que aparecen en las **Imágenes de la 9 a la 13**, en las cuáles se puede observar la morfología y el rango de tamaños de partículas como se describen a continuación.

Tabla 5.- MORFOLOGÍA Y RANGOS DE TAMAÑOS OBTENIDOS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO PARA EL CPO 40, EL HSF, EL M³, EL CVFM Y EL MK-PP.

Imagen	Material	Morfología	Rango de tamaños μm
9	CPO 40	partículas de aristas angulosas	2 - 45
10	HSF	Aglomerados de partículas esféricas. La aglomeración se debe a que el material viene en forma condensada.	3 - 40
11	M ³	partículas esféricas	1 - 8
12	CVFM	partículas esféricas	1 - 14
13	MK	partículas planas como hojuelas de maíz	2 - 20

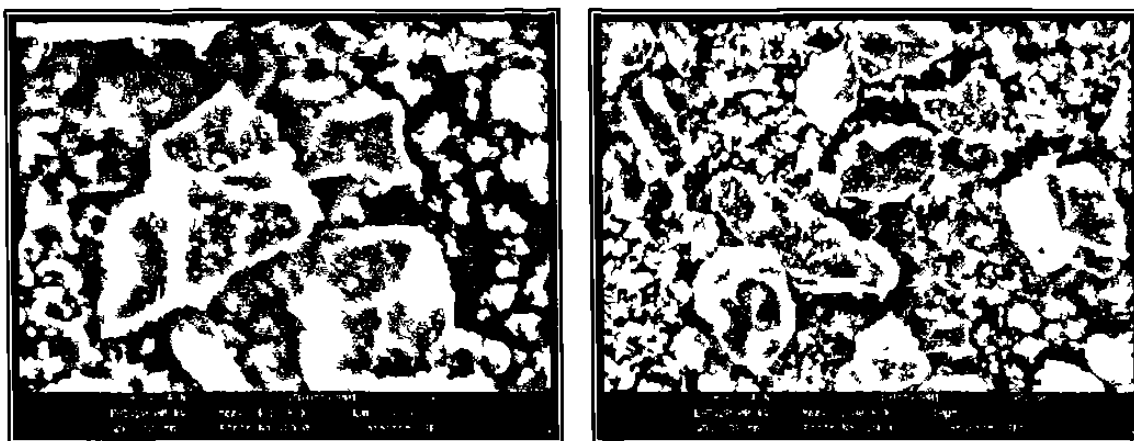


Imagen 9.- Microfotografías del CPO 40 obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM); a) 4,150 X y b) 1,800 X.

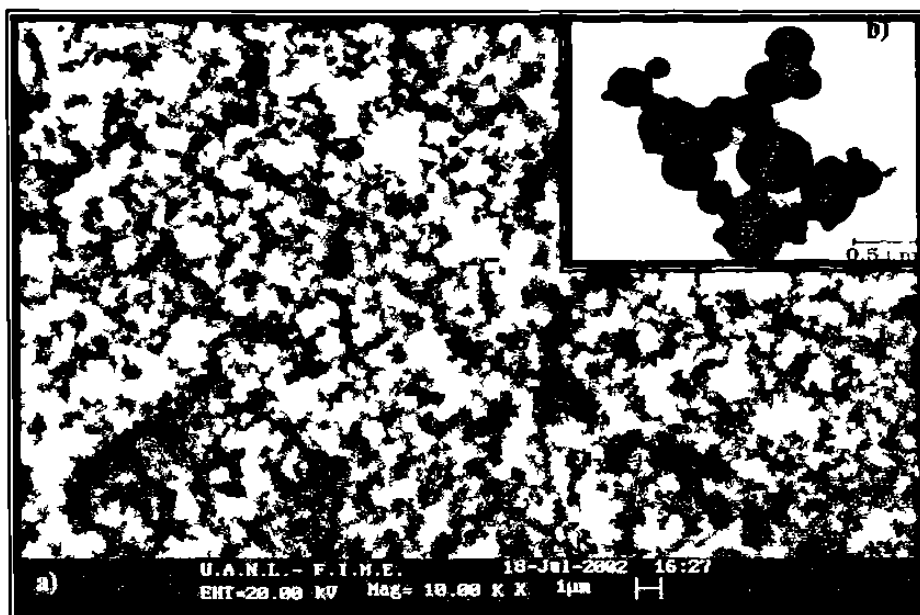


Imagen 10.- a) Microfotografía del CC HSF obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con una amplificación de 10,000 X. b) Imagen obtenida por Microscopía Electrónica de Transmisión (Sílica Fume in Concrete, CD de la Sílica fume Association; www.silicafume.org).

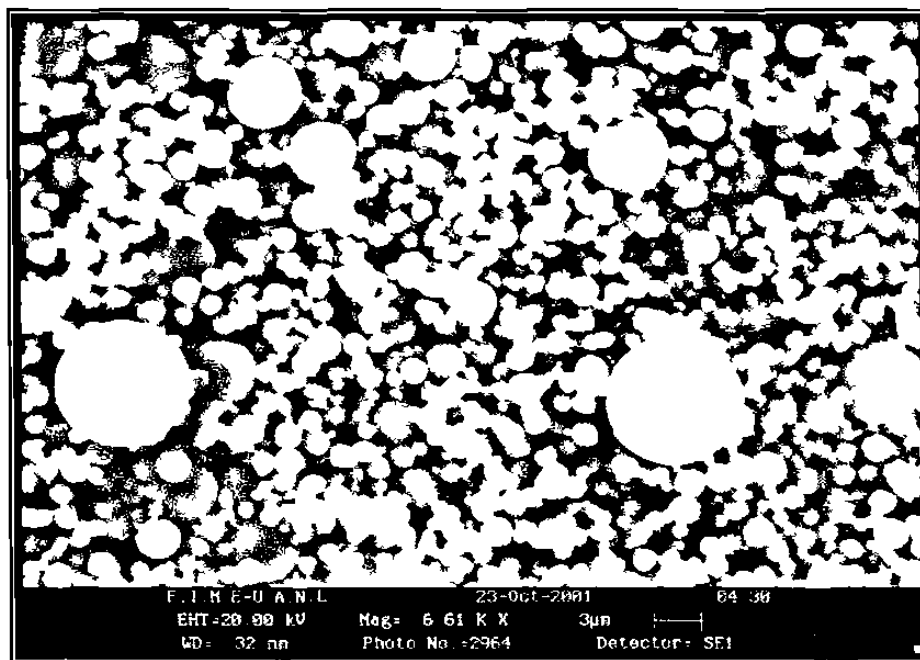


Imagen 11.- Microfotografías del CC M³ obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con una amplificación de 6,610 X.

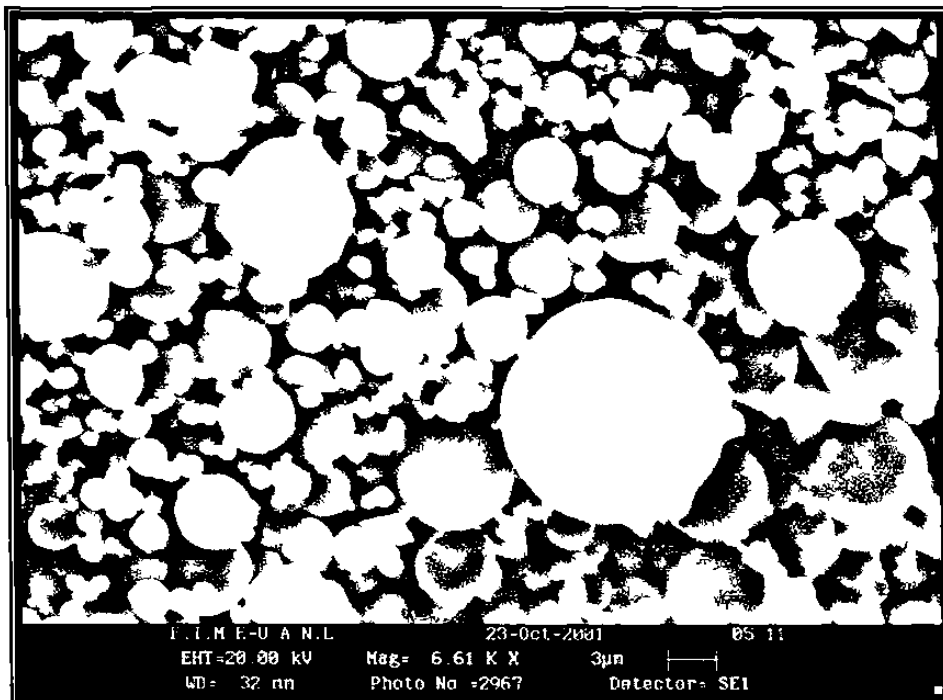


Imagen 12.- Microfotografía del CC CVFM obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con una amplificación de 6,610 X.

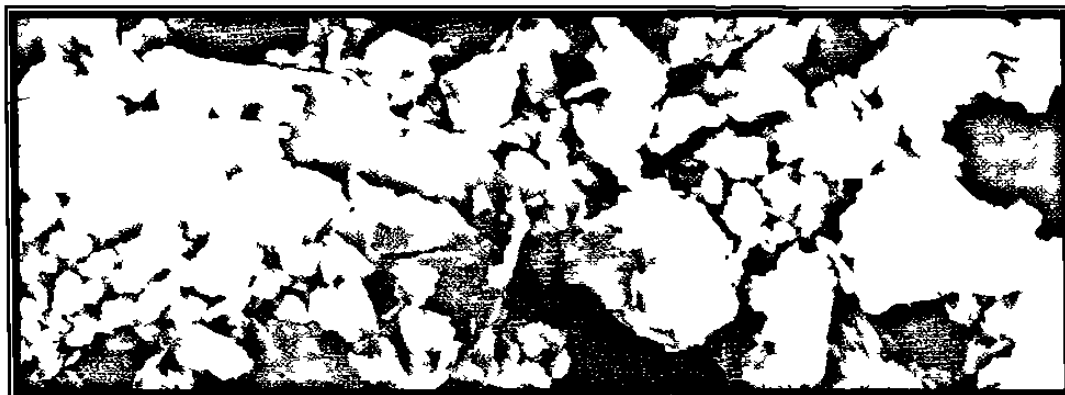


Imagen 13.- Microfotografía del MK - PP obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con una amplificación de 6,610 X.

6.3.6.- AGUA REQUERIDA POR EL CPO 40 Y LOS CC HSF, M³, CVFM Y MK-PP PARA UNA FLUIDEZ ASTM C 109 DE 110 ± 5%:

Para determinar el agua que demanda el CPO 40 y los CC HSF, M³, CVFM y MK-PP para dar una fluidez ASTM C 109/C 109M-99 de 110 ± 5%, con las proporciones establecidas en este método, se fabricaron morteros con la arena F40.

Los resultados de estas pruebas aparecen en la **Tabla 6**, el CC que menos demanda de agua presento fue el M³, y los cementantes MK-PP, HSF, CPO 40 y CVFM presentaron una demanda superior a la que presento el M³ en 135, 105, 30 y 8% respectivamente. Estos resultados básicamente reflejan el efecto de la forma de la partícula y la superficie específica del material en la demanda de agua para una fluidez dada.

Tabla 6.- AGUA REQUERIDA POR EL CPO 40 Y LOS CC HSF, M³, CVFM Y MK - PP PARA DAR UNA FLUIDEZ EN MORTEROS ASTM C 109/C 109M-99 DE 110 ± 5%.

CEMENTANTE	AGUA/CEMENTANTE	AGUA^{*1} REQUERIDA	INCREMENTO^{*2} %
CPO 40	0.48	1.30	30
HSF	0.76	2.05	105
M³	0.37	1.00	—
CVFM	0.40	1.08	8
MK - PP	0.87	2.35	235

*1 Con relación a la requerida por M³.

*2 Incremento en demanda de agua con relación a la requerida por M³.

6.4.- COMPUESTOS POTENCIALES DE BOGUE DE LOS CEMENTOS, ESTRUCTURA QUÍMICA DEL CEMENTO CPO 40 Y SU EFECTO EN LA FLUIDEZ DE LA PASTA DE CEMENTO:

En base a los resultados de FRX de la **Tabla 1** se calcularon por medio de las ecuaciones de Bogue los compuestos potenciales al CPO 40 y a los cementos alternativos CEH y CIM-121 M1, M2 y M3. Por otro lado se hicieron pruebas de fluidez a pastas fabricadas para los cinco cementos, substituyendo el 20 % del cemento por HSF, con una relación A/CM de 0.23 y una dosificación de aditivo de 2.5 % del CT, se midió la fluidez con el cono de Kantro como el de la **Figura 3**. Para el CPO 40 y los cuatro cementos alternativos, los compuestos potenciales de Bogue y las fluideces correspondientes aparecen en la **Tabla 7**.

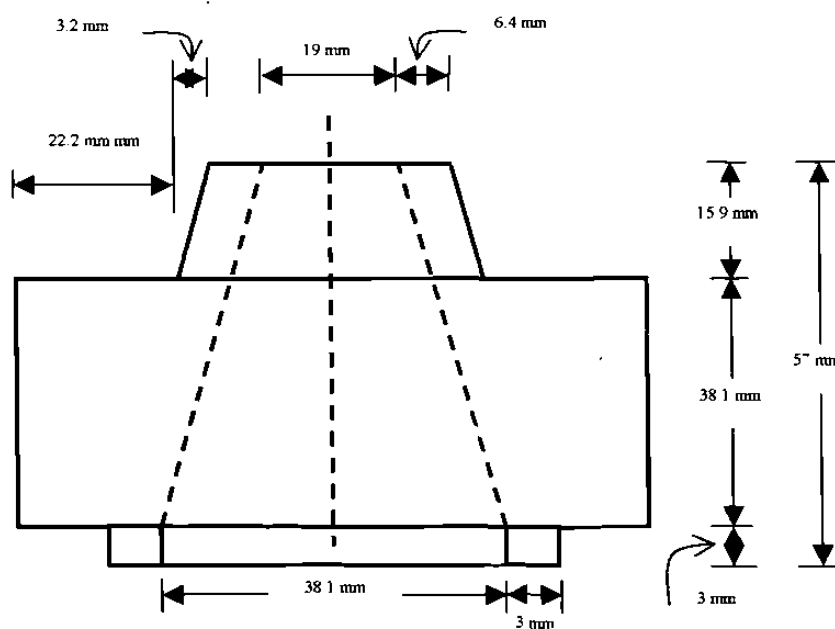


Figura 3.- Cono de Kantro para la prueba de mini-revenimiento en pastas.

TABLA 7.- COMPUESTOS POTENCIALES DE BOGUE PARA EL CPO 40 Y OTROS CEMENTOS PORTLAND.

COMPUESTO	CONTENIDO %				
	CPO 40	CPOHE	CIM 121		
			M1	M2	M3
C₃S	70.17	63.82	67.46	61.01	70.06
C₂S	2.34	14.34	5.58	10.58	3.34
C₃A	10.29	3.12	6.26	4.15	7.50
C₄AF	5.46	11.03	10.50	12.16	8.17
PPI,%	3.24	1.02	2.27	2.26	2.59
FLUIDEZ^{*1}, cm	8.6	11.2	11.7	9.9	10.3
d(0.5)^{*2}, μm	16.03	13.31	14.07	14.18	13.54

*1 Medido con el Minicono de Kantro, A/CPO 40 + HSF = 0.23, SF = 20%, ADITIVO = 2.5%

*2 d(0.5)= Tamaños en el que se retiene el 50 % del material.

El cemento que presento la fluidez mas baja en la prueba de fluidez con el cono de Kantro, fue el CPO 40 con una fluidez de 8.6 cm y el que presento el mejor comportamiento fue el CIM-121-M1 con una fluidez de 11.7 cm. Estas diferencias se le pudiesen atribuir principalmente a la composición química, ya que la distribución de tamaños de partículas para los cementos son prácticamente iguales.

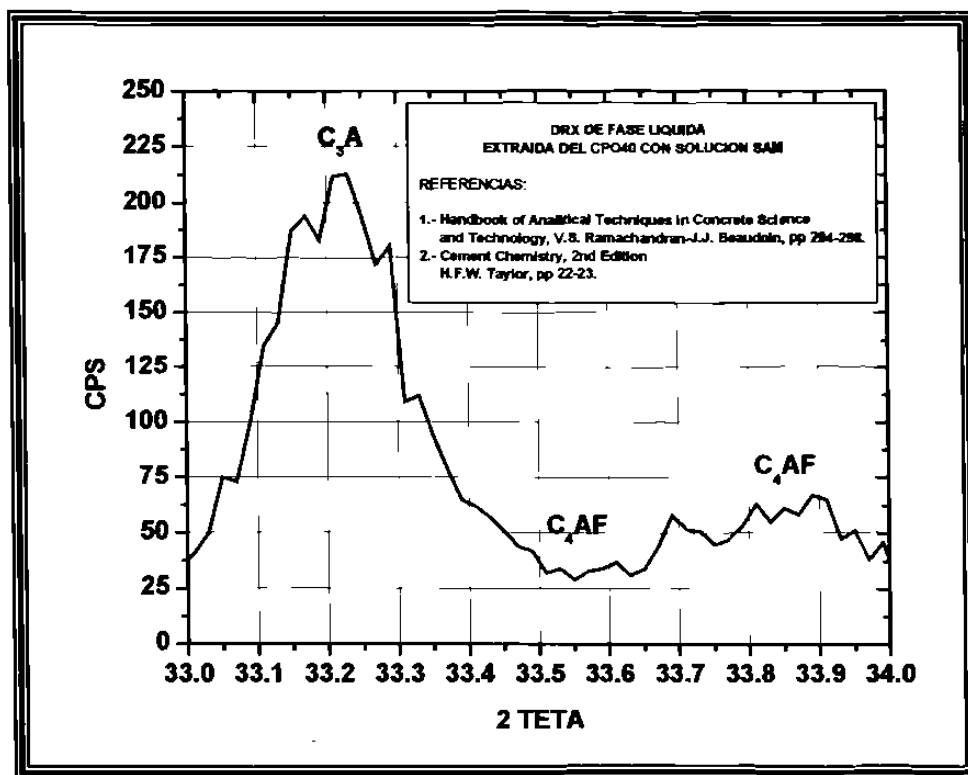
Por la importancia que tiene la estructura química del C₃A en la fluidez de los morteros, se hicieron análisis para determinar la estructura de esta fase en el CPO 40, dado que el CPO 40 es el cemento que se empleará en la fabricación de los morteros.

La estructura química del C_3A se puede determinar en base al espectro de Rayos X (DRX) de la Fase Líquida o Intersticial ($C_3A + C_4AF$) o determinando el contenido de Na_2O por Absorción Atómica o Fotometría de Flama de la Fase Ferrita (C_4AF) con los procedimientos que se detallan a continuación:

Estructura del C_3A en base al espectro DRX: Empleando una solución de Ácido Salicílico/Metanol (SAM), que se deberá preparar con 20 gr. de ácido salicílico en 300 ml de metanol para aproximadamente 5 gr. de cemento pulverizado en mortero de ágata a pasa malla #325 ($45\mu m$) se extrae la Fase Líquida del CPO 40.

El procedimiento consistió en agitar la mezcla SAM-Cemento por aproximadamente 2 horas. Dejar que se sedimente por 15 minutos y filtrar bajo vacío con un embudo bushner y un filtro de $0.45\mu m$ resistente a ácidos. Lavar el residuo con metanol, secarlo a $100\text{ }^\circ C$ y almacenarlo en desecador bajo vacío. Después de extraída la fase líquida, la muestra está lista para analizarla por DRX, la región del espectro que es de interés para definir si el C_3A es cúbico u ortorrómbico se encuentra entre 32.5 y 34.5 2θ [64].

En base al espectro de difracción de la **Grafica 8** que se obtuvo por DRX para la fase que extrajimos del cemento por medio de este procedimiento, y los espectros característicos para clinkers que aparecen en la **Figura 4** definimos que la estructura química del C_3A en el CPO 40 es cúbica.



Grafica 8.- Espectro de Difracción de Rayos X (DRX) para la fase líquida del CPO 40 extraída mediante una solución de ácido salicílico-metanol (SAM).

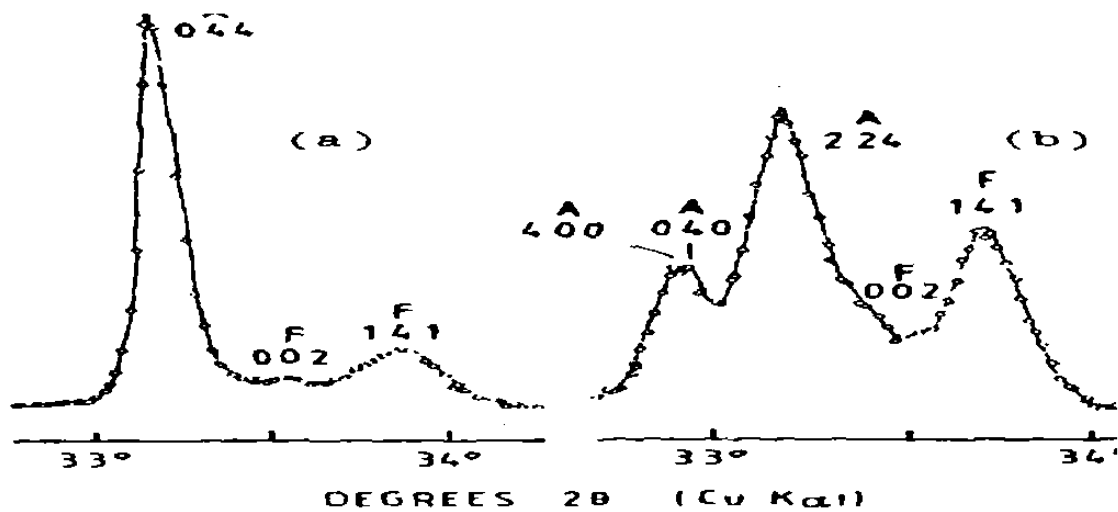


Figura 4.- Espectros característicos en clinker para definir la estructura química del C_3A , (a) Cúbico, (b) Ortorrómbico [64-65].

Estructura química del C_3A en base a la concentración de Na_2O : Para esto, hay que determinar por Absorción Atómica o Fotometría de Flama el contenido de Na_2O en la fase líquida extraída por SAM y en la fase Ferrita (C_4AF) que se tendrá que extraer del cemento con el procedimiento que se describe a continuación: Se prepara una solución al 7% de Ácido Nítrico en Metanol (NAM), se agitan diez gramos de cemento pulverizado en mortero de ágata a pasa malla #325 ($45\mu m$) en 500ml de solución NAM por 30 minutos. El residuo se filtra bajo vacío en un embudo bushner con papel filtro de $0.45\mu m$ resistente a ácidos, se enjuaga con metanol, se seca y se almacena bajo vacío en un desecador.

Por la técnica de Absorción Atómica se determinaron las concentraciones de Na_2O en las fases líquida y ferrita del CPO 40, los resultados fueron de 1.5 y 0.6 % respectivamente. Con estos resultados se calculó la concentración de Na_2O en el C_3A , resultando ser de 0.9 %, la cual es una concentración que en base a los estudios de Regourd nos indica que cuando la concentración es menor a 1.0 % el C_3A en el cemento es cúbico [65].

El que el C_3A , tenga una estructura cúbica resulta ventajoso desde el punto de vista reológico, ya que al reaccionar forma un escudo casi impermeable alrededor del C_3A que evita que se continúe hidratando. Entre más cúbica sea la estructura del C_3A más fácil será controlar la reología de un concreto, sin embargo este parámetro no es el único que influye en esta propiedad, entre mayor sea la concentración del C_3A en el cemento esto repercutirá de manera desfavorable en la reología [47].

Para concreto convencional no existe razón alguna para darle importancia a la morfología que presente el C_3A en la fase intersticial del cemento, sin embargo desde un enfoque reológico del concreto en estado fresco esto sí es muy importante en concretos de alto comportamiento [47].

6.5.- SELECCIÓN DE ARENAS SILICAS:

Las seis arenas sílicas seleccionadas fueron:

- F 20/40
- F 40
- F 50
- F 50/55
- F 62
- M 200

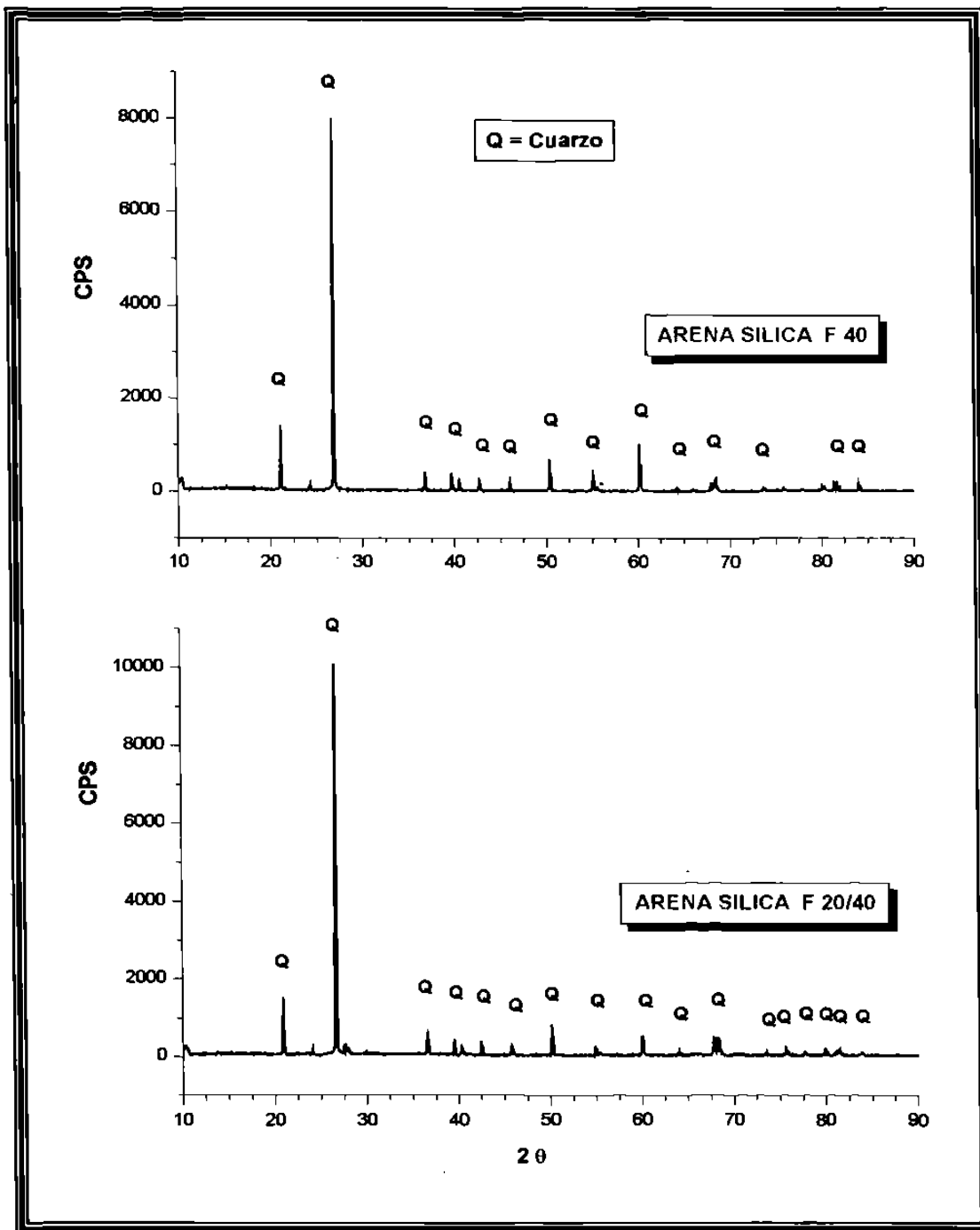
6.5.1.- CARACTERIZACION DE LAS ARENAS SILICAS:

6.5.1.1- DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE PARTICULAS POR LASER:

Las **distribuciones de tamaño de partículas (DTP)** para las seis arenas sílicas se determinaron por láser y los resultados aparecen en la **Tabla 2**. Para cada uno de los materiales en esta tabla la superficie específica y los tamaños en los que se retiene el 10%, el 50% y el 90% del material aparecen como SE, $d(0.1)$, $d(0.5)$ y $d(0.9)$ respectivamente, además aparecen las densidades determinadas de acuerdo a ASTM C 188-95.

6.5.1.2- COMPOSICIÓN MINERALOGICA POR DRX:

En la **Gráfica 9** aparecen los espectros de difracción obtenidos por **DRX** para las arenas sílicas F 20/40 y F 40 obtenidos con el equipo que aparece en la **Imagen 7**, el espectro obtenido muestra que ambos materiales están constituidos por cuarzo cristalino.



Grafica 9.- Espectro de Difracción de Rayos X de las arenas F 20/40 y F 40.

6.5.1.3- MORFOLOGIA DE LAS ARENAS SILICAS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO:

En las Imágenes 14 a la 16 aparecen las microfotografías de las arenas silicas F 20/40, F 40 y de la harina M 200 respectivamente que se obtuvieron vía microscopía electrónica de barrido (SEM). En la siguiente tabla se presentan la forma y el rango de tamaños de partículas:

TABLA 8.- MORFOLOGÍA Y RANGOS DE TAMAÑOS OBTENIDOS POR SEM.

Imagen	Material	Morfología	Rango de tamaños μm
15	AS F 20/40	partículas de aristas redondeadas	360 – 1,120
16	AS F 40	partículas de aristas redondeadas	200 - 620
17	HS M 200	partículas con aristas angulosas	7 - 70



Imagen 14.- Microfotografía de la arena sílica F 20/40 obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con una amplificación de 100X.

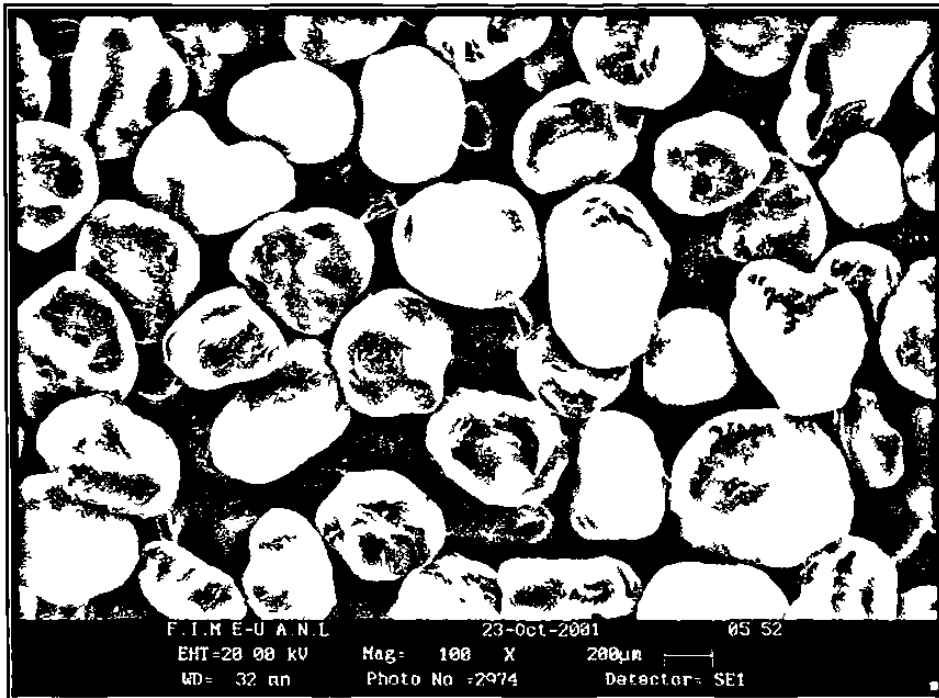


Imagen 15.- Microfotografía de la arena sílica F 40 obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con una amplificación de 100 X.

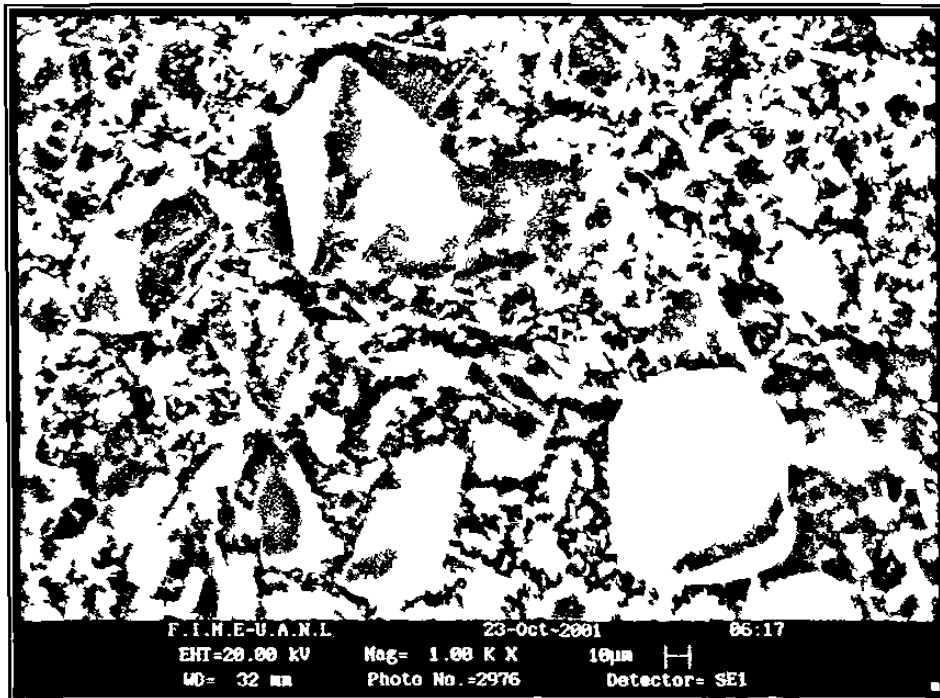


Imagen 16.- Microfotografía de la harina sílica M 200 obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con una amplificación de 1000 X.

6.5.2.- COMBINACION DE ARENAS POR EL CRITERIO DE MAXIMO PESO VOLUMETRICO COMPACTADO (PVC):

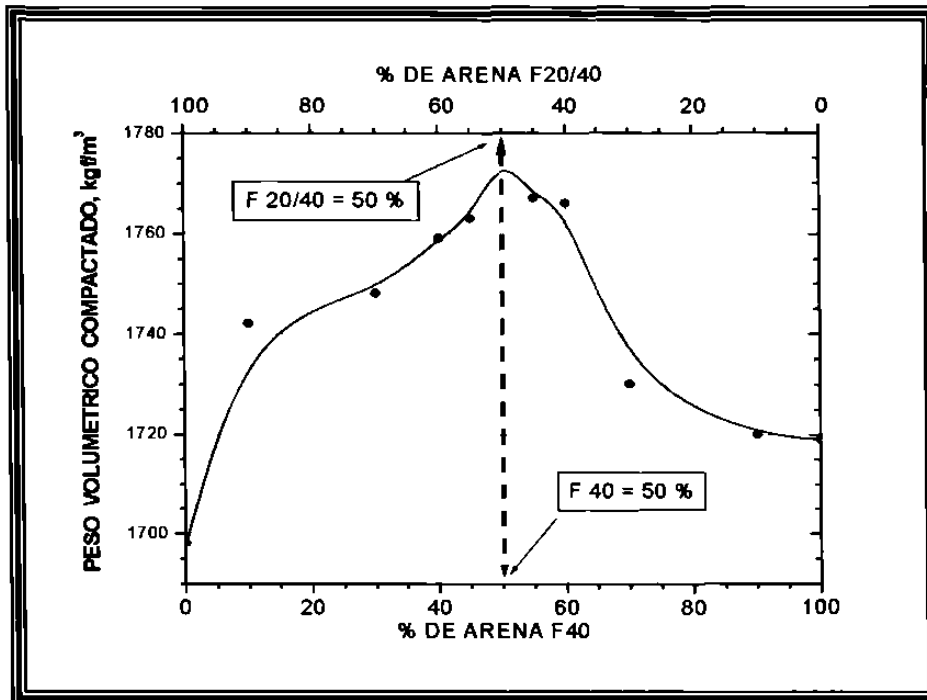
De entre seis arenas silicas se busco establecer la mezcla de arenas que arrojara la distribución granulométrica mas cerrada con menos volumen de vacíos, para este fin utilizamos el criterio de máximo PVC. Para la obtención de la mezcla óptima de estas arenas, después de innumerables tanteos, la combinación de las arenas F 20/40, F 40 y Harina M 200 fue la que arrojó mayor peso volumétrico, esta combinación se obtuvo de las **Graficas 10 y 11**.

El procedimiento empleado para esta determinación es el que se describe a continuación:

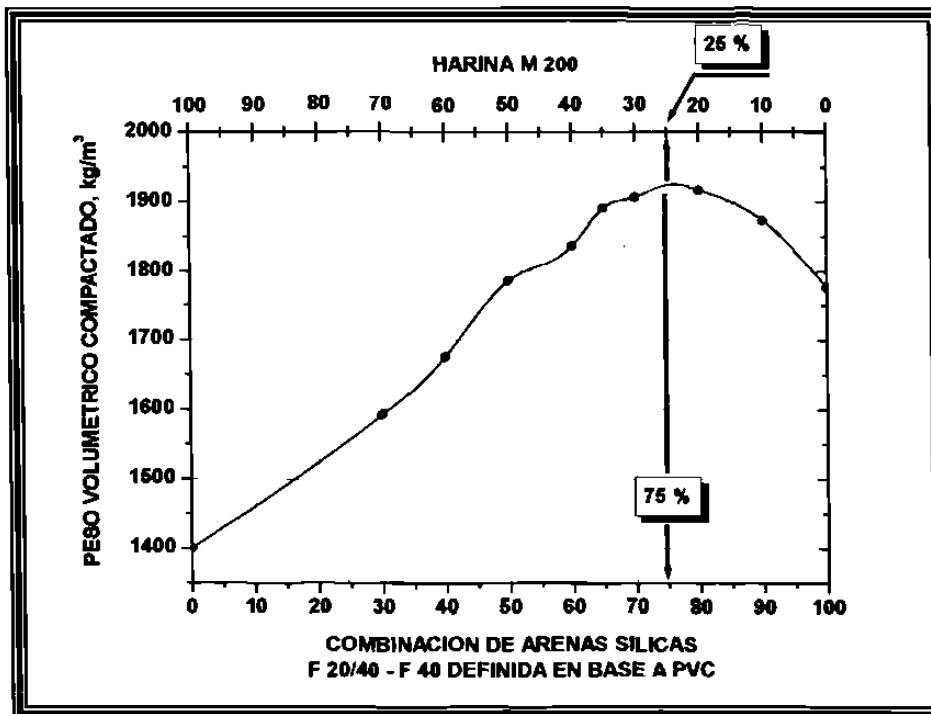
Las combinaciones se hicieron con 10, 30, 50, 70 y 90 % de la arena A y el % complementario con la arena B, una vez visualizada la zona de PVC máximo se hicieron tanteos con porcentajes intermedios.

Para dos arenas por combinar, por tanteos se definieron las proporciones en peso con las que cada una participaría en la combinación, en la siguiente forma: .

- 1.- Verter las dos arenas previamente pesadas dentro de una bolsa de plástico para proceder a homogenizarlas.
- 2.- Verter la mezcla dentro de un recipiente cilindrico de volumen y peso conocidos, el cual deberá estar sobre una mesa vibratoria. Para las diferentes combinaciones, todas las pruebas se hicieron con la misma intensidad de vibrado y un tiempo de dos minutos.
- 3.- Enrasar el material con una espátula apoyándola sobre el borde del recipiente con movimiento de aserrado lento.
- 4.- Determinar el peso del material contenido en el recipiente.
- 5.- Con el peso del material y el volumen del recipiente se calcula el PVC por vibrado para cada una de las combinaciones de arenas tanteadas.



Gráfica 10.- Combinación de arenas sílicas F 20/40 y F 40 Vs Peso Volumétrico Compactado (PVC).



Gráfica 11.- Combinación de arenas sílicas F 20/40 - F 40 y harina M 200 Vs Peso Volumétrico Compactado (PVC).

6.5.3.- *USO DEL SOFTWARE LISA PARA OPTIMIZAR LA COMBINACIÓN DE ARENAS:*

Las proporciones que nos arrojó el criterio de PVC, se afinaron mediante un software llamado LISA, el cual en base al modelo de Andreasen optimiza la combinación de los ingredientes para maximizar el grado de densificación de la mezcla de los ingredientes particulados por medio de un ajuste de la distribución granulométrica de la mezcla de ingredientes.

El software LISA, fue desarrollado por la división de Materiales de Elkem para diseñar compuestos fluidos para el colado de refractarios. Este software ha resultado exitoso en la densificación de compuestos con ingredientes muy finos [66,67,68], por lo que fue seleccionado para optimizar la combinación determinada por PVC.

Conociendo la DTP de los ingredientes elegidos, con LISA el usuario puede encontrar la combinación de ingredientes que arroje la mayor densidad. Este software trabaja mediante iteraciones del modelo de Andreasen quien en 1931 sugirió que el empaquetamiento óptimo de un sistema de partículas se da cuando la distribución de tamaños de estas partículas es descrita por la ecuación:

$$CPFT = \left(\frac{d}{D} \right)^q \times 100$$

Donde para cada ingrediente de la mezcla:

CPFT; es el % que pasa en volumen absoluto con tamaños inferiores a *d*.

d = Tamaño de partícula.

D = Tamaño máximo de partícula en el ingrediente

q = Exponente característico de la distribución.

Para este modelo en 1992 Dinger y Funte encontraron que un empaquetamiento del 100 % (0% vacíos) era posible si $q = 0.37$.

Los cálculos que LISA ejecuta son los siguientes: Cuando se dispone de las DTP's y las densidades de los ingredientes con los que se fabricará el compuesto, el primer paso es calcular el volumen de cada ingrediente $i(v_i)$, con la masa N_i y la densidad D_i . Debido a que N_i se convierte a volumen absoluto, N_i puede introducirse al software en porcentaje o peso. Las unidades con que se introduzca el peso deben ser iguales a las unidades de la densidad.

$$V_i = \frac{N_i}{D_i}$$

La fracción de volumen X_i de un ingrediente en una combinación de n ingredientes, puede entonces calcularse.

$$X_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

Entonces para cada ingrediente, se multiplica el CPFT para cada tamaño de partícula por su fracción de volumen correspondiente. Este cálculo nos arrojará para cada ingrediente la contribución de cada uno de sus tamaños a la DTP de la mezcla de ingredientes.

$$CPFT_i^{mezcla} = X_i * CPFT_i$$

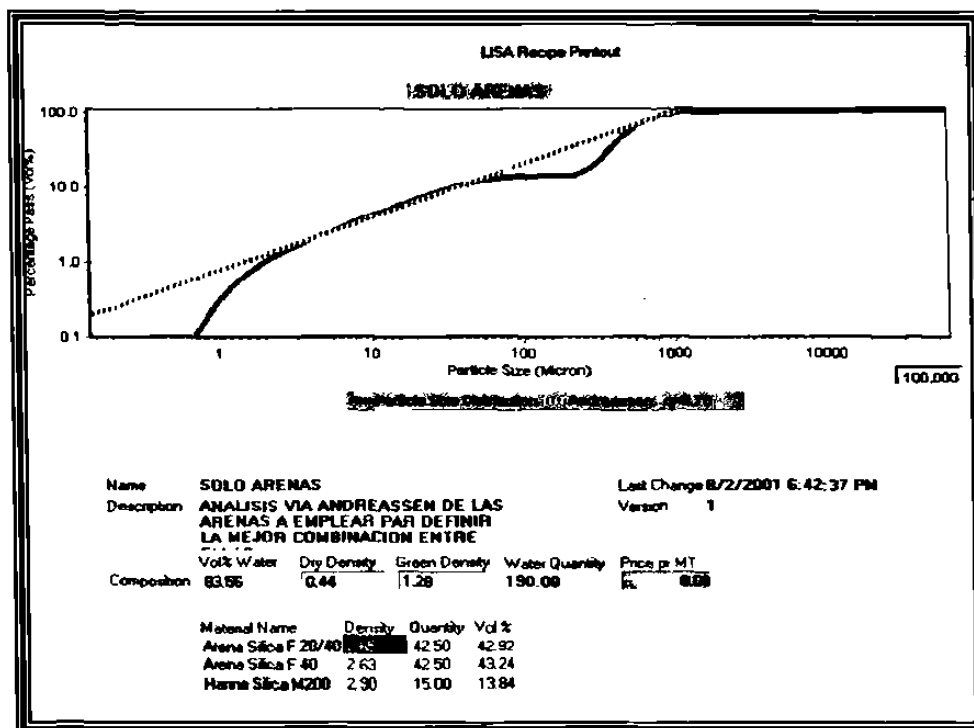
Entonces para todos los ingredientes se suman los $CPFT_i^{mezcla}$ para cada tamaño de partícula, con esto obtendremos el CPFT compuesto para este tamaño de partícula.

$$CPFT^{MEZCLA} = \sum_{i=1}^n CPFT_i^{mezcla}$$

La DPT compuesta de la combinación de ingredientes esta dada por la gráfica que nos arroja LISA, **Grafica 12** .

En la **Tabla 9** aparecen el Tamaño máximo y el Tamaño promedio de partícula para las seis arenas seleccionadas inicialmente, así como las combinaciones de las arenas para los dos criterios empleados. En esta tabla la granulometría de las arenas se presenta con las aberturas de malla especificadas en ASTM C 33, en la **Tabla 10** aparecen las granulometrías de las arenas F 20/40, F 40 y Harina M 200, así como la combinación definida por PVC y el ajuste logrado con LISA .

En la **Imagen 17** aparecen las arenas sílicas con las que se obtuvo el PVC máximo, así como el CPO 40, y la CC HSF, M³, CVFM y MK-PP, en ella se observa el aspecto fisico a nivel macro de estos ingredientes.



Grafica 12.- Tamaño de partícula Vs por ciento que pasa. Grafico del software LISA para optimizar por medio del modelo de Andreasen la densificación de la combinación de arenas F 20/40 – F 40 y harina M 200.

Tabla 9.- COMBINACION DE ARENAS SILICAS DEFINIDA POR PESOS VOLUMETRICOS COMPACTADOS MAXIMOS (PVC) Y OPTIMIZADA POR EL SOFTWARE LISA.

ARENA	T _{máx} μm	T _{prom} μm	CRITERIO DE SELECCION	
			PVC, %	LISA, %
F 20/40	1534	670	37.5	42.5
F 40	893	436	37.5	42.5
F 50	893	350	----	---
50/55	710	317	---	----
F 62	710	308	----	----
M 200	126	20	25.0	15.0

Tabla 10.- GRANULOMETRÍAS DE LAS ARENAS SILICAS F 20/40, F 40 Y HARINA M 200, ASI COMO DE LA COMBINACION OPTIMIZADA POR LISA CON Y SIN LA HARINA M 200.

MALLA #	ABERTURA mm	PORCIENTOS QUE PASAN				
		ARENA F 20/40	ARENA F 40	ARENA M 200	ARENA AJUSTADA POR LISA	
					CON M 200	SIN M 200
8	2.36	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
16	1.18	96.79	100.00	100.00	98.64	98.40
30	0.60	38.05	83.25	100.00	66.55	60.65
50	0.30	0.39	12.95	100.00	20.67	6.67
100	0.15	0.00	0.00	100.00	15.00	0.00
200	0.075	0.00	0.00	94.91	14.24	0.00

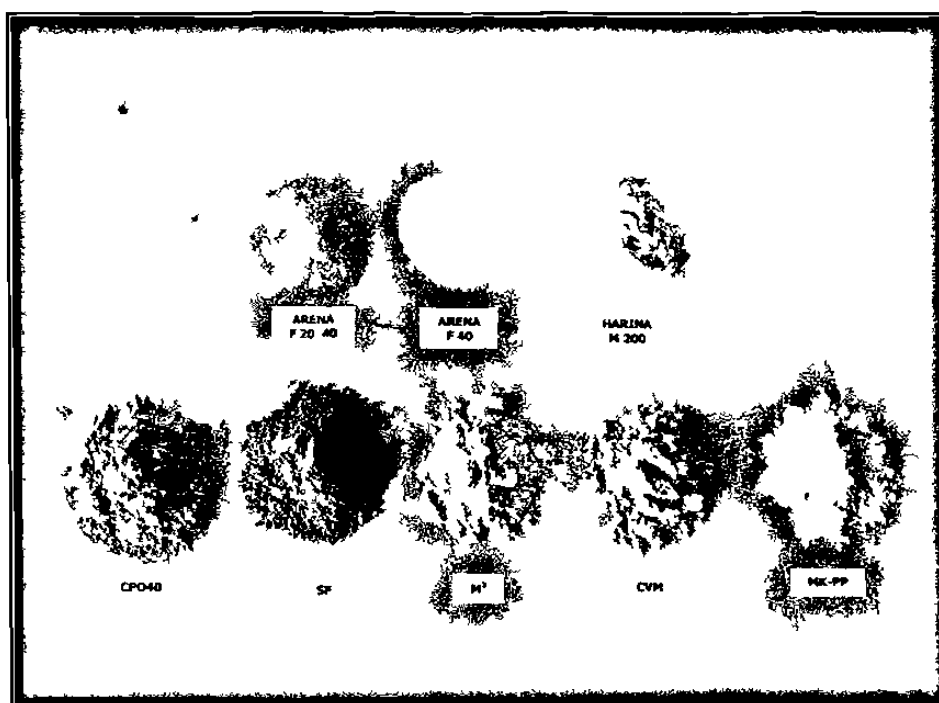


Imagen 17.- Cemento CPO40 cementantes complementarios, arenas sílicas y harina sílica definidas por PVC y LISA.

6.6.- SELECCIÓN DEL ADITIVO SUPERFLUIDIFICANTE:

Debido a las muy bajas relaciones A/CM con que deben producirse estos compuestos, es imprescindible el uso de un aditivo Superfluidificante/Super-Reductor de Agua. Para seleccionar el aditivo que emplearíamos de entre dos opciones disponibles en polvo, un formaldehído condensado de naftaleno sulfonatado (FCNS) y un éter de policarboxilato (EPC), fabricamos morteros con relación A/CM de 0.25 y con arena de caliza de Monterrey con granulometría ASTM C 33 promedio.

Para determinar la consistencia, de entre varios métodos que podíamos utilizar seleccionamos la meza de fluidez DIN para la cual fijamos una consistencia objetivo de 55.0 cm. Además al mortero en estado fresco se le hicieron pruebas de tiempos de fraguado por penetración en base a ASTM C 403/C 403 M-99 y en estado endurecido de

Resistencia a la Compresión en base a ASTM C 109/C 109-99. La dosificación de aditivo en % requerida para dar la fluidez, los tiempos de fraguado y las resistencias a la compresión aparecen en la **Tabla 11**.

Los morteros se fabricaron para una dosificación de cemento de 950 Kg/m^3 , el agua correspondiente para una relación A/CM de 0.25 y considerando un contenido de aire promedio de 2.0%. Para el mortero fabricado con el aditivo FCNS el volumen absoluto de la arena resulto ser de 396.1 litros los cuales para una densidad_{sss} de 2.63 equivalen a 1,041.8 kg de arena_{sss} y para el mortero fabricado con el aditivo EPC el volumen absoluto de la arena resulto ser de 417.7 litros los cuales para una densidad_{sss} de 2.63 equivalen a 1,098.6 kg de arena_{sss}. Para definir el volumen absoluto de arena y ajustar la dosificación de aditivo hasta obtener la consistencia establecida de 55cm DIN, las mezclas de tanteo se fabricaron en bachadas de 10 litros.

Tabla 11.- RESISTENCIA A COMPESION, TIEMPOS DE FRAGUADO Y DOSIFICACIÓN DE ADITIVO, PARA MORTEROS CON UNA FLUIDEZ DE 55.0 cm DIN Y A/CPO 40 = 0.25.

ADITIVO		fc 7 días* MPa	TIEMPOS DE FRAGUADO ASTM C 403 (horas:minutos)	
BASE	DOSIFICACION N %		INICIAL	FINAL
FCNS	3.0	65	2:00	3:10
EPC	0.5	73	4:00	5:03

* promedio de 3 cubos de 5 cm.

Para los dos aditivos, los proporcionamientos resultantes de los tanteos en kg/m^3 quedaron de la siguiente manera:

Tabla 12.- PROPORCIONES EMPLEADAS PARA DEFINIR EL ADITIVO SÚPERFLUIDIFICANTE.

Ingrediente	Aditivo	
	FCNS	EPC
Cemento	950	950
Agua	237.5	237.5
Aditivo	28.5	4.8
Arena*	1,041.8	1,098.6

* En condición SSS; Densidad SSS = 2.63; Absorción = 1.98%; Granulometría media ASTM C 33; T.máx. = 5.0mm.

La selección del aditivo a utilizar en etapas posteriores se hizo en base a la mínima dosificación para la consistencia establecida. El uso de un reómetro hubiese sido de gran utilidad debido a que la cohesividad entre los dos morteros era muy diferente y conforme pasaba el tiempo esta diferencia se acentuaba ya que el mortero fabricado con FCNS tendía a rigidizarse con mayor rapidez que el mortero con EPC.

En base a los resultados de la **Tabla 11** observamos que el FCNS acelera el fraguado, para ambos aditivos las resistencias a la compresión son prácticamente iguales, sin embargo los consumos de aditivo si presentan una diferencia significativa, 3.0% para el FCNS y 0.5% para el EPC en relación al peso del CT. Como en los proporcionamientos para los dos morteros, los ingredientes participan aproximadamente en la misma proporción, excepto el aditivo, el costo del mortero resultará mayor para el que se fluidifico con el aditivo FCNS por requerirse mayor cantidad y por que el costo del aditivo FCNS es similar al del EPC. En la **Imagen 18** se puede observar la apariencia del aditivo EPC en polvo.

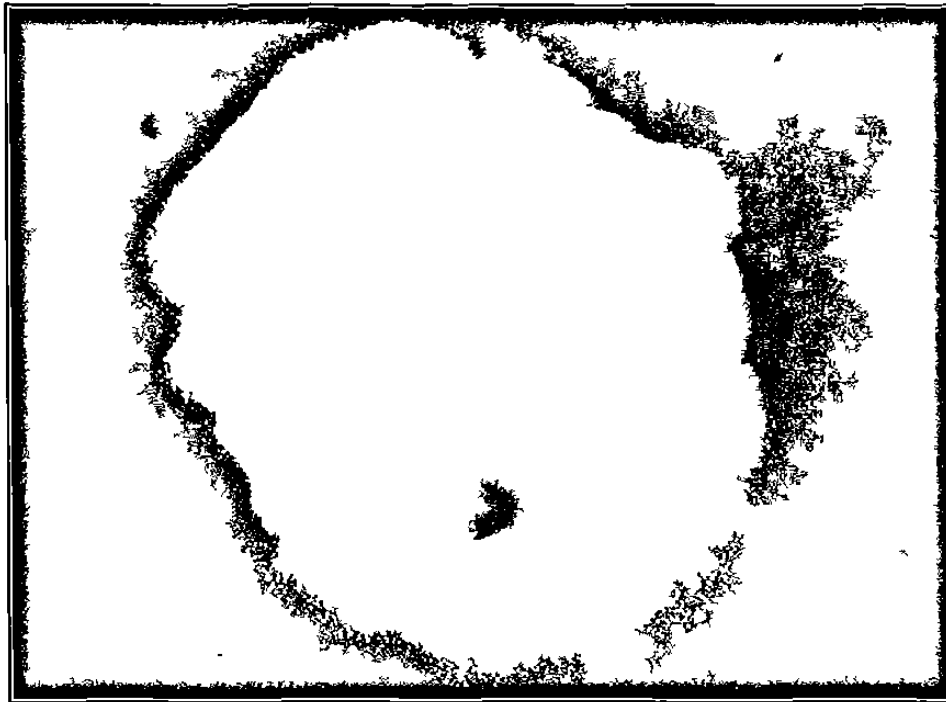


Imagen 18.- Aditivo súperfluidificante – súperreductor de agua de alto rango base éter de polycarboxilato en polvo.

6.7.- PUZOLANICIDAD DE LA ARCILLA A069:

Existen arcillas que por su composición química y mineralógica ofrecen un alto potencial puzolánico, ya que generalmente al destruir la estructura cristalina de sus minerales por medio de un tratamiento térmico se obtiene una estructura amorfa o desordenada de aluminosilicatos [69]. El uso de estas arcillas podría resultar económicamente más atractivo que los CC comercialmente disponibles.

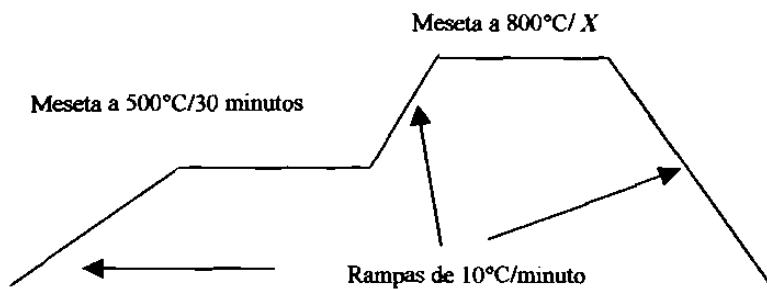
Logramos obtener una arcilla del centro de la República que se etiquetó como A069. Con el fin de caracterizar el potencial puzolánico que puede ofrecer esta arcilla, se hicieron pruebas siguiendo dos procedimientos que se describen más adelante en esta sección.

Por otro lado con la intención de mejorar el potencial puzolánico que pudiese ofrecer esta arcilla, se sometió a un proceso térmico y al producto resultante lo identificamos como MK-CIM, a este material también se le hicieron las pruebas para determinar su potencial puzolánico siguiendo los procedimientos que se describen mas adelante.

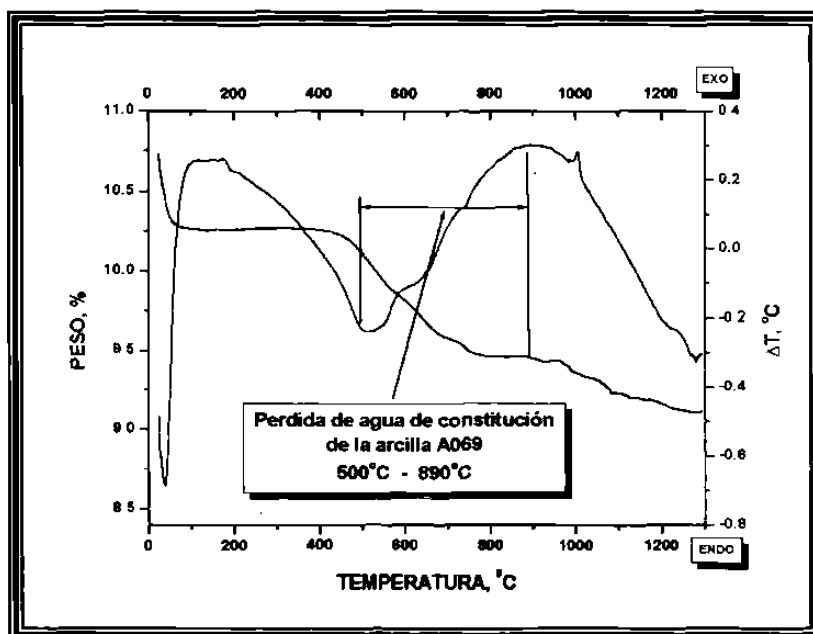
6.7.1.- ACTIVACION DE LA ARCILLA A069:

El procedimiento que seguimos para activar térmicamente esta arcilla fue el siguiente:

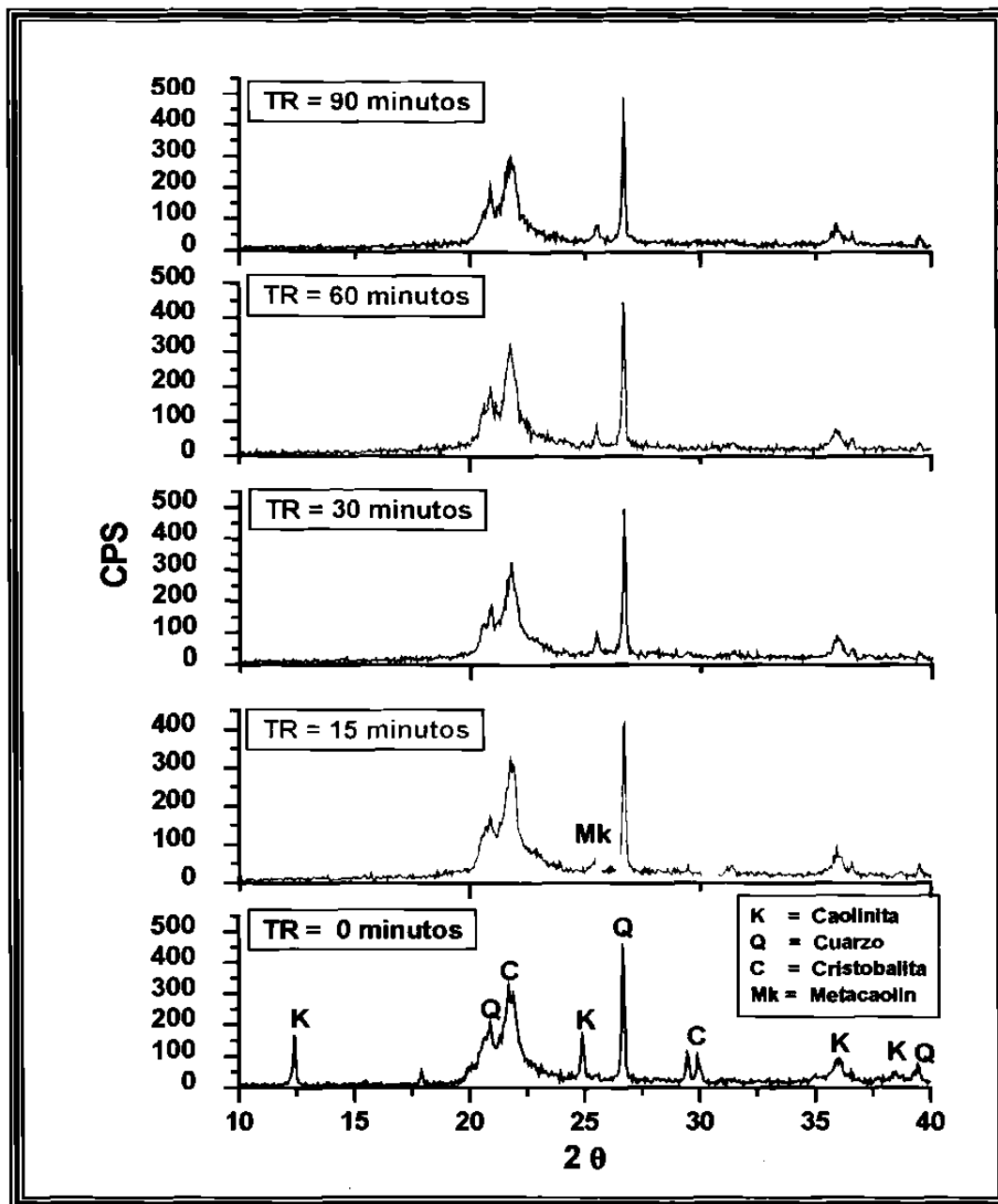
- Análisis de DTA-TGA para definir temperatura de horneado a la cual el material perdiese el agua de constitución. El análisis se corrió en una atmósfera de aire con una rampa de calentamiento de 10 °C/minuto hasta una temperatura máxima de 1,300 °C. En la **Gráfica 13** aparece el termograma correspondiente. La pérdida de agua de constitución, se dio de los 500 a los 890 °C, para las quemas en el horno rotatorio de la **Imagen 19** se seleccionó una temperatura de 800°C. Las arcillas en general, cuando se calcinan pierden el agua adsorbida entre sus capas y la de constitución (agua químicamente ligada) [70].
- Pulverización para que el 80% del material pasara la malla #200.
- Se fabricaron pellets (esferas de aproximadamente 4cm de diámetro con consistencia similar a la de una plastilina seca) en una revolvedora para concreto tipo trompo con capacidad de 20 litros, para ello se mezcló el material pulverizado con la cantidad necesaria de agua destilada para obtener los Pellets.
- Después de secar los pellets, en una mufla a 50°C por 24 horas se hicieron cuatro quemas de Pellets para tiempos de residencia(X) de 15, 30, 60 y 90 minutos en la meseta a 800°C con el siguiente programa de calentamiento-enfriamiento.



- El tiempo de residencia (TR) en el horno que deberíamos utilizar para solo lograr la pérdida de agua de constitución de la arcilla se definió en base a análisis de DRX al material horneado en la mufla. Habiendo sido la variable de decisión la deshidratación del caolín que se manifiesta en los espectros DRX con una desaparición total de los picos en 12.5 , 25 y 37.5 2θ y de la desaparición de los picos de cristobalita en 28 y 30 2θ , así como del surgimiento de un pico de metacaolín en 26 2θ , de la **Grafica 14** se seleccionó el TR de 15 minutos, por que con este TR ya se ha logrado la pérdida del agua de constitución.



Grafica 13.- Termograma de la arcilla A069.
 DTA = Análisis Térmico Diferencial;
 TG = Análisis Termogravimétrico



Grafica 14.- Espectros de Difracción de Rayos X para la arcilla A069 – CIM, horneada a una temperatura de 800 °C para diferentes tiempos de residencia (TR), con el objeto de determinar el tiempo de residencia óptimo para la producción del MK - CIM.

- Habiendo definido el TR se procedió a hacer una quema en el horno rotatorio piloto que aparece en la **Imagen 19**.
- Después de horneado el material se pulverizó a 100% pasa malla #325 (45 μ m).

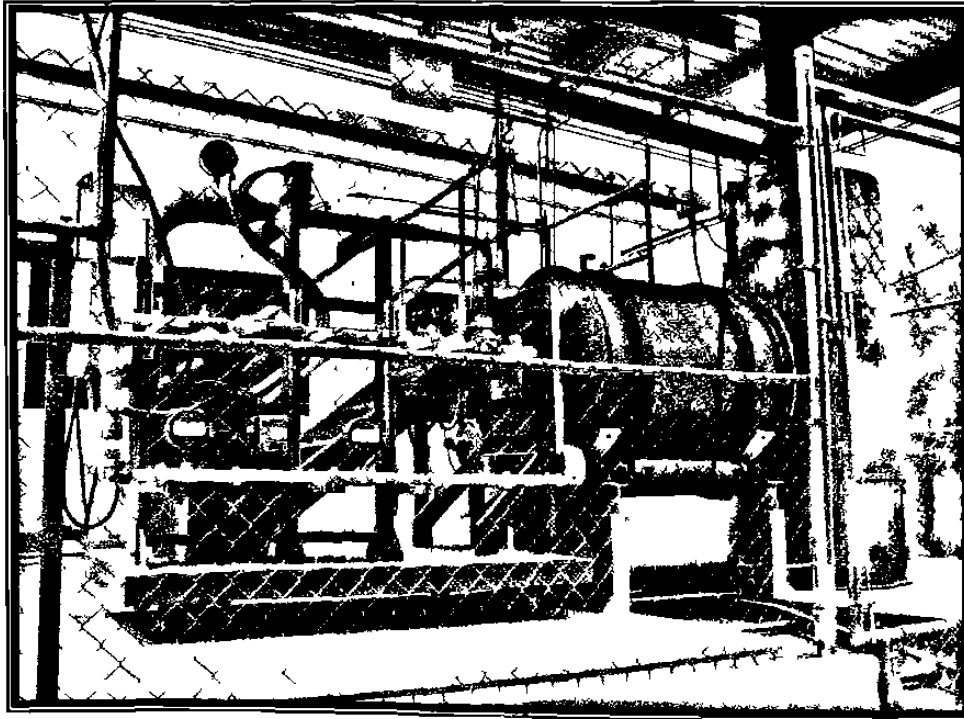


Imagen 19.- Horno piloto utilizado para la obtención de clinker (CIM-CEMEX).

6.7.2.- PUZOLANICIDAD DEL DE LOS CC Y DE LA ARCILLA A069:

Con el objeto de caracterizar el potencial Puzolánico de los diferentes CC seleccionados, se fabricaron series de cubos para determinar el desarrollo de la resistencia a la compresión a las edades de 1, 3, 7, 28 y 56 días. Para esto se siguieron los dos procedimientos que se describen a continuación:

6.7.2.1.- EL PRIMER PROCEDIMIENTO UTILIZADO FUE EL DESCRITO EN ASTM C 311-00^{e1}; “STANDARD TEST METHODS FOR SAMPLING AND TESTING FLY ASH OR NATURAL POZZOLANS FOR USE AS A MINERAL ADMIXTURE IN PORTLAND-CEMENT CONCRETE”:

Este procedimiento se adoptó para hacer un análisis comparativo del potencial Puzolánico de los diferentes CC, en este procedimiento el potencial puzolánico de los CC se identifica como Índice de Actividad a la Resistencia, para determinarlo, se fabricaron 7 series de 15 cubos cada una, lo cual nos arroja un total de 105 cubos. Se ensayaron tres cubos compañeros por edad a las edades de 1, 3, 7, 28 y 56 días. La serie de referencia se fabricó con 100% de CPO 40, el CT en las seis series restantes consistió en 80% en peso del CPO 40 y 20% en peso del CC correspondiente. Las proporciones en peso empleadas para los siete morteros fueron: CPO 40 = 4.00, CC = 1.00 y Arena Estándar = 13.75. La fluidez obtenida para la serie de referencia con una relación A/CPO 40 = 0.485 fue de 77.5%(18.0cm), por lo que para todos los morteros fabricados con los diferentes CC la condición de fluidez quedo en el rango de 72.5 a 82.5%. En la **Tabla 13** y en la **Grafica 15** aparecen las relaciones A/CM y el desarrollo de la resistencia a compresión para cada una de las 7 series.

Siguiendo el procedimiento descrito en ASTM C 109/C 109M-99, para la fabricación de los morteros se utilizó la mezcladora especificada en ASTM C 305-99 como la que aparece en la **Imagen 20** y para la medición de fluidez, la mesa de fluidez de ASTM C 230/C 230-98^{e2} como la que aparece en la **Imagen 21**.

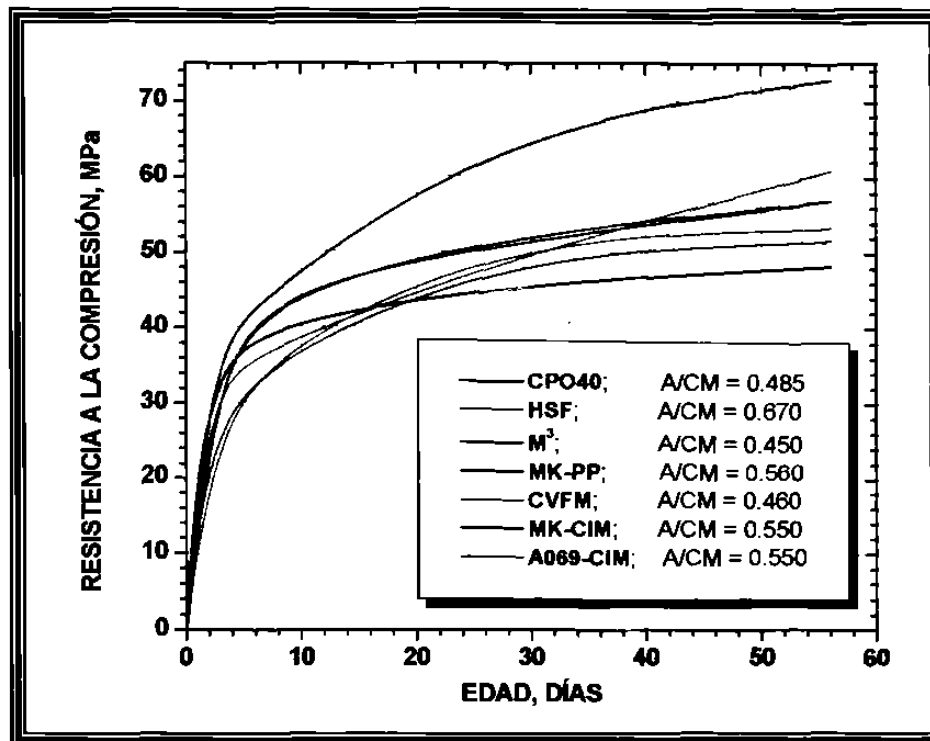
La especificación estándar para ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para usarse como aditivo mineral en el concreto ASTM C 618-01, requiere un índice de actividad a la resistencia mínimo de 75% a las edades de 7 ó 28 días. Todos los CC seleccionados inicialmente para este proyecto, que por su origen se pueden caracterizar con esta especificación (M³, CVFM, MK-PP, MK-CIM y A069), cumplen holgadamente con este requerimiento, como se puede observar en la **Tabla 13**.

Tabla 13.- DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION EN CUBOS DE MORTERO DE 5 cm FABRICADOS DE ACUERDO A ASTM C 311-00*¹. FLUIDEZ = 100 ± 5% LA DEL CPO 40, CURADO ESTANDAR A 23 ± 2°C.

EDAD (DÍAS)	ESFUERZO PROMEDIO* ¹ , MPa (%)* ²						
	CPO40	HSF	M3	MK-PP	CVFM	MK-CIM	A069-CIM
1	22.3(100)	11.7(53)	18.9(85)	14.0(63)	18.3(82)	15.7(70)	15.1(68)
3	34.5(100)	25.2(73)	38.0(110)	32.9(95)	32.9(95)	32.7(95)	26.9(78)
7	40.2(100)	36.4(90)	44.4(110)	44.7(111)	37.1(92)	44.0(109)	35.5(88)
28	45.8(100)	52.0(113)	66.6(146)	51.4(112)	49.3(108)	52.3(114)	49.8(109)
56	48.4(100)	53.3(110)	72.8(150)	56.9(118)	60.9(116)	57.0(118)	51.7(107)
A/CM	0.485	0.67	0.45	0.56	0.46	0.55	0.55

*1 Promedio de tres cubos de 5 cm.

*2 % en relación a la resistencia obtenida para el mortero de referencia fabricado con puro CPO40.



Gráfica 15.- Desarrollo de resistencia en cubos de 5 cm de los morteros fabricados de acuerdo a ASTM C 311.

Los CC M³, CVFM, MK-PP, MK-CIM y A069 presentaron demandas de agua equivalentes al 93, 95, 115, 113 y 113% respectivamente para dar una fluidez de $100 \pm 5\%$ en relación a la que arrojó la referencia con CPO 40. Comparando estos porcentajes con la especificación ASTM C 618-01, los CC M³ y CVFM cumplen con lo especificado para las clases N, F y C, y los CC MK-PP, MK-CIM y A069 cumplen con la clase N.

De las curvas que aparecen en la **Grafica 15** podemos comentar que el M³ es el CC que a partir de los tres días de edad presenta un comportamiento que conforme pasa el tiempo tiende a ser significativamente superior al que presentan el resto de los CC estudiados, por otro lado, los CC HSF y A069 básicamente presentaron el mismo desarrollo de resistencia, con resistencias ligeramente superiores a las que arrojó el mortero de referencia con CPO 40. Cabe mencionar que todos los trabajos que consultamos encaminados al desarrollo de productos similares, emplearon como CC un producto igual al HSF. En la sección 6.7.2.1, este material se incluyó para fines comparativos ya que existe otro método estándar ASTM para caracterizar su potencial Puzolánico.

Con una demanda de agua de 138 %, con relación a la demanda que presento el CPO 40 para una fluidez de $100 \pm 5\%$, el HSF fue el CC que mas agua demando.

Se observa que los resultados para los CC M³, CVFM, MK-PP y MK-CIM, presentan una pendiente que describe un potencial de incremento en la resistencia a edades mayores a los 56 días.

El mortero de referencia presenta resistencias superiores a las de los morteros con los diferentes CC a edades tempranas. En el caso de los morteros con los CC HSF, CVFM y A069, las resistencias se igualan con la del mortero de referencia a la edad de 20 días aproximadamente. La superioridad en resistencia a edades tempranas del mortero de referencia con relación al resto de los morteros la atribuimos al alto

contenido de C_3S (70.2%; **Tabla 7**) ya que a los tres días los cubos arrojaron una resistencia equivalente al 71% de la obtenida a los 28 días.

El MK-CIM presentó prácticamente el mismo desarrollo de resistencia que el producto comercial MK-PP. Por otro lado los morteros con MK-PP y MK-CIM demandaron mas agua que el mortero de referencia para dar la fluidez requerida. A pesar de resultar con una mayor relación A/CM, estos dos morteros arrojaron resistencias superiores al mortero de referencia a partir de los 5 días, y a edades mayores a los 20 días los morteros con HSF, CVFM y A069. El M^3 prácticamente mostró el mismo desarrollo de resistencia que el mortero de referencia hasta la edad de 3 días, de ahí en adelante las resistencias empezaron a ser muy superiores al grado de que a los 56 días de edad este mortero arrojó un índice de actividad a la resistencia de 150%.

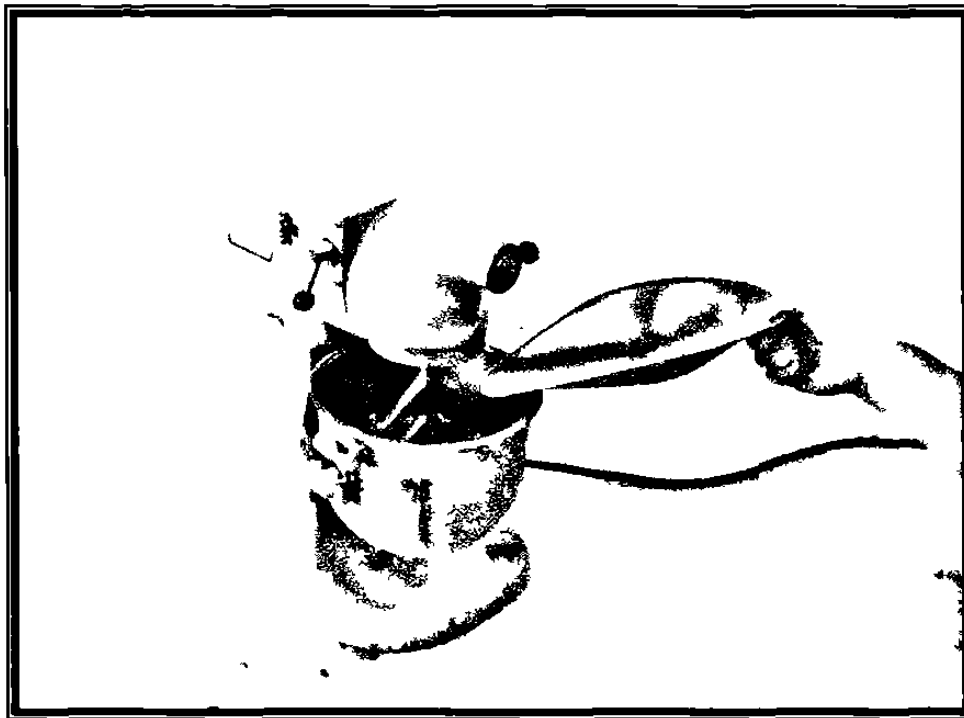


Imagen 20.- Mezcladora estándar necesaria para el mezclado de pastas y morteros ASTM C 305.

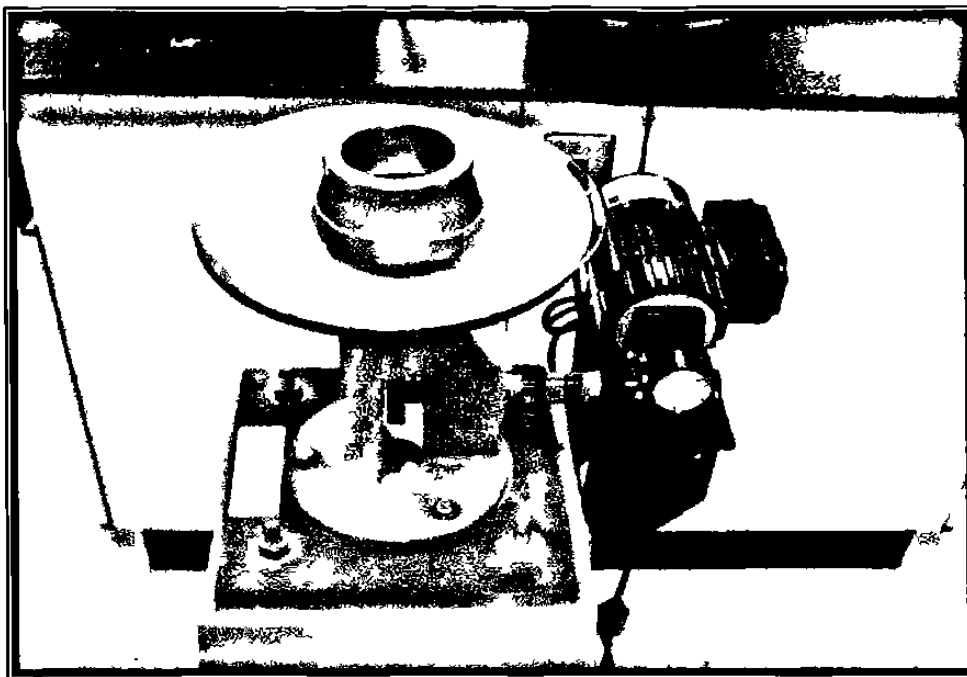


Imagen 21.- Mesa estándar para pruebas de fluidez a morteros ASTM C 230.

6.7.2.2- EL SEGUNDO PROCEDIMIENTO UTILIZADO FUE EL METODO DE VOLUMENES DE PASTA CONSTANTES:

Como resultado de los requerimientos de fluidez de ASTM C 311-00^{e1}, las relaciones A/CM resultaron ser muy diferentes entre los Sistemas Cementantes estudiados (**Tabla 13**), esto es atribuible al tamaño de partícula, a la distribución de tamaños de partículas, a su morfología, a su densidad y a la superficie específica del material entre otras.

Pensando en obtener resultados que nos ayudaran a hacer un análisis comparativo más confiable que el que podíamos hacer con los resultados obtenidos en 6.7.2.1, diseñamos una metodología basada en las siguientes consideraciones y fijando para ello los siguientes parámetros:

- El CC de referencia para esta serie fue el M³, ya que para la fluidez requerida en la sección 6.7.2.1, este CC fue el que demando la menor cantidad de agua.
- Relación A/CM = Constante = 0.485
- El % de M³ en sustitución del CT se fijo en 20%. Los volúmenes absolutos correspondientes de CC y CPO 40 se fijaron como constantes para definir las proporciones de los seis morteros restantes, originando esto una variación en la dosificación en peso de CC para los diferentes morteros por tener diferentes densidades.
- Fluidez ASTM C 109/C 109M-99 = 110 ± 5%; para dar esta fluidez a los morteros que lo requiriesen, se utilizo el aditivo seleccionado en la sección 6.6.
- Volumen de Pasta = Constante = 0.44 litros de pasta/litro de mortero (44%). Este volumen es el que resulto de los tanteos para la serie con el CC de referencia (M³) y se mantuvo constante para los siete morteros. En el cálculo de este volumen no se consideró el volumen de aire atrapado.

Con las constantes anteriores se fabricaron 7 series de 15 cubos para ensayar grupos de tres cubos compañeros a las edades de 1, 3, 7, 28 y 56 días, lo cual nos arroja un total de 105 cubos fabricados para las siete series. El mezclado del mortero, la fabricación de los cubos, el curado y el ensaye a la compresión se hizo de acuerdo al procedimiento descrito en ASTM C 109/C 109-99. Las proporciones resultantes de los tanteos para los siete morteros quedaron de la siguiente manera:

Tabla 14.- PROPORCIONES EN RELACION AL PESO DEL CEMENTO OBTENIDAS POR EL METODO DE VOLÚMENES DE PASTA CONSTANTES.

INGREDIENTE	CEMENTANTE						
	CPO 40	HSF	M ³	CVFM	MK-PP	MK-CIM	A069
CPO 40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
CC	0.30	0.21	0.25	0.22	0.25	0.24	0.22
EPC	7 X 10 ⁻⁴	29 X 10 ⁻⁴	0.00	0.00	36 X 10 ⁻⁴	24 X 10 ⁻⁴	60 X 10 ⁻⁴
ARENA F 40	3.54	3.38	3.40	3.39	3.42	3.41	3.38

A diferencia de los morteros de la sección 6.7.2.1, en este procedimiento, la diferencia en las densidades entre los diferentes CC, originó que las cantidades dosificadas en peso fueran diferentes, y por consiguiente el CC en peso no se mantuvo en 20% en relación al peso del CT para los morteros con HSF, CVFM, MK-PP, MK-CIM y A069.

De Los resultados de los ensayos a compresión que aparecen en la **Tabla 15** y en la **Grafica 16.**, se desprenden los siguientes comentarios:

Todos los morteros excepto el fabricado con A069 presentaron resistencias mayores que el mortero de referencia con CPO 40 a partir de los tres días de edad.

El mortero con MK-PP resulto el mas resistente hasta aproximadamente los 28 días de edad y el mortero con M³ resulto el mas resistente después de esta edad. El mortero con A069 fue el único que resulto con un desarrollo de resistencia por debajo del de referencia, pero a los 56 días la diferencia no fue significativa, solo 6% por abajo de la referencia y la pendiente de la curva proyecta un comportamiento ascendente que para edades mayores a los 56 días promete resistencias superiores a las del mortero de referencia.

De las siete series de morteros que se fabricaron, las series con CPO 40, HSF y MK-PP al final de las curvas correspondientes no presentan un comportamiento que indique un potencial incremento en resistencia a edades superiores a los 56 días, a diferencia de las series fabricadas con los CC M³, CVFM, MK-CIM y A069.

El desarrollo de resistencia del CC que produjimos (MK-CIM) se mantuvo por arriba del mortero de referencia con CPO 40 registrando un 23% de incremento en resistencia y solo un 9% menor con relación al mortero fabricado con MK-PP, pero con una pendiente que promete un incremento en resistencia a edades mayores a los 56 días de edad.

El clinker de cemento Pórtland con puzolana ya sea natural o artificial, generalmente contiene mayores cantidades de SiO_2 que el cemento Pórtland puro, lo cual da como resultado una red de hidratos con mas C-S-H y menos CH. Las puzolanas tienen menor densidad que el cemento Pórtland puro, al mezclarlos, el cemento mezclado resultante tendrá menor densidad, y al hidratarse, la red de hidratos del primero resultara con una porosidad capilar mas baja para la misma relación A/CM inicial [71]. Por lo anterior consideramos que de entre los dos métodos empleados el de volúmenes constantes es el mas confiable para comparar el incremento en resistencia que pudiesen ofrecer los diferentes CC, ya que para la misma relación A/CM y la misma fluidez la resistencia adicional que presenten los CC con respecto al CPO 40 se deberá a la formación adicional de C-S-H por efecto de la reacción puzolánica.

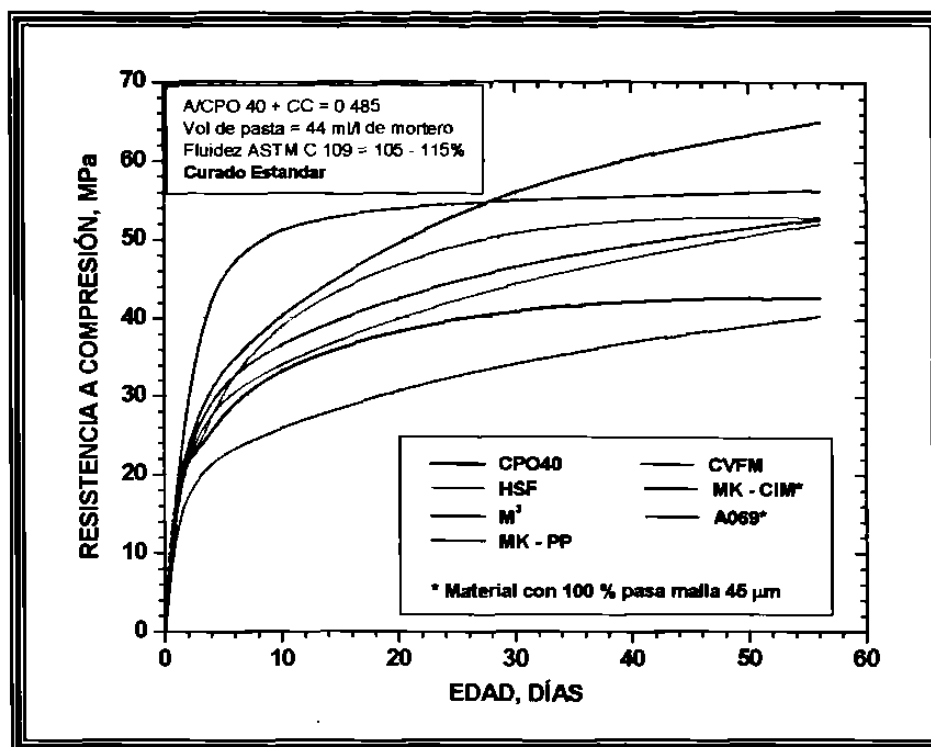
Tabla 15.- DESARROLLO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION EN CUBOS DE 5 cm FABRICADOS DE ACUERDO AL METODO DE VOLUMENES DE PASTA CONSTANTES. CURADOS ESTANDAR A $23 \pm 2^\circ\text{C}$. A/CM = 0.485, VOLUMEN DE PASTA = CONSTANTE = 44% Y FLUIDEZ = $110 \pm 5\%$.

EDAD (DÍAS)	ESFUERZO PROMEDIO ^{*1} , MPa (%) ^{*2}						
	CPO40	HSF	M3	MK-PP	CVFM	MK-CIM ^{*3}	069-CIM ^{*3}
1	22.1(100)	20.6(93)	19.5(89)	19.8(90)	17.9(81)	18.8(86)	14.8(67)
3	25.7(100)	22.6(88)	28.5(111)	40.1(156)	26.1(101)	27.1(105)	20.4(79)
7	33.5(100)	39.2(117)	38.5(115)	52.6(157)	33.1(99)	36.0(108)	24.8(74)
28	41.9(100)	52.6(126)	57.2(137)	54.9(131)	44.5(106)	46.9(112)	34.5(82)
56	42.9(100)	53.0(124)	65.1(152)	56.4(132)	52.2(122)	52.8(123)	40.5(94)

*1 Promedio de tres cubos de 5 cm.

*2 % en relación a la resistencia obtenida para el mortero de referencia fabricado con puro CPO40.

*3 Material pulverizado a 100% pasa malla #325.



Grafica 16.- Desarrollo de resistencia en cubos de 5 cm de los morteros fabricados para determinar la reactividad puzolánica de los CC de acuerdo al Método de Volúmenes de Pasta Constantes.

6.8.- FLUIDEZ EN MORTEROS CON ARENAS SILICAS:

El trabajar con relaciones A/CM tan bajas como las que hemos propuesto, representa un obstáculo para fabricar morteros o concretos sin el uso de un aditivo superfluidificante ya que la consistencia sería la de un compuesto muy rígido y seco. Mediante el uso de uno de estos aditivos, como el seleccionado en la sección 6.6, se puede resolver este problema, sin embargo la mezcla resultante tendrá una consistencia fluida pero cohesiva al mismo tiempo por la escasa presencia de agua, lo cual repercute directamente en la energía de compactación requerida para mínimos vacíos.

En estos compuestos la fluidez requerida será la que permita colocar el compuesto en estado fresco dentro de un molde con un contenido de aire atrapado mínimo en el compuesto. Con este fin el objetivo en esta etapa es obtener una fluidez alta que cumpla con lo anteriormente expuesto para la serie HSF que inicialmente se tomara como referencia.

Una vez definida la combinación de arenas y el aditivo por utilizar, procedimos entonces con las primeras pruebas de tanteo encaminadas a obtener la fluidez inicial de referencia para el mortero con HSF. El mezclado y la determinación de la fluidez se hicieron tomando como base los procedimientos descritos en ASTM C 305-99 y ASTM C 109/C 109M-99 respectivamente, este ultimo lo modificamos por tratarse de morteros muy fluidos. Estos procedimientos se describen a continuación:

6.8.1.- MEZCLADO:

La secuencia empleada para el mezclado se estableció en base a experiencias previas en trabajos con morteros fabricados con relaciones A/CM muy bajas y aditivo superfluidificante FCNS, en el Departamento de Tecnología del Concreto del Instituto de Ingeniería Civil, de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Con el objeto de tantear para dar la fluidez adecuada, se fabricaron morteros con HSF en una mezcladora como la descrita en ASTM C 305-99. El volumen que se mezcló para los tanteos fue de un litro por bachada, y la secuencia en el mezclado fue la siguiente.

1. Colocar la paleta y el tazón en la posición de mezclado dentro de la mezcladora.
2. Verter todos los ingredientes sólidos (Cemento + Cementante Complementario + Aditivo + Arena) secos que previamente debieron ser homogeneizados en un bolsa de plástico.

3. Mezclar a velocidad baja por 30 segundos.
4. Añadir toda el agua de tanteo para el mezclado dentro del tazón, y continuar el mezclado a velocidad baja por 2 minutos, en este instante se inicia la formación de pellets de mortero.
5. Apagar la mezcladora y cambiar a velocidad media, mantener apagada la mezcladora por 15 segundos y durante este tiempo, raspe el fondo y las paredes del tazón.
6. Encender la mezcladora y mezclar hasta completar un tiempo acumulado de 5 minutos, durante esta etapa se da un cambio en la consistencia, de una consistencia inicial de pellets pasa a una consistencia similar a la de una plastilina fluida.
7. Apagar la mezcladora y cambiar a velocidad alta.
8. Inmediatamente encender la mezcladora y mezclar hasta completar un tiempo acumulado de 8 minutos, al final de este periodo la consistencia del mortero tendrá la apariencia de un betún fluido.
9. La fluidez deberá determinarse a mas tardar 30 segundos después de terminado el mezclado.

6.8.2.- DETERMINACION DE LA FLUIDEZ:

La modificación del procedimiento empleado para determinar la fluidez inicial de los morteros de tanteo en relación al procedimiento estándar descrito en ASTM C 109/C 109M-99, consiste en que en el procedimiento que seguimos, el mortero por ser mas fluido no requirió ser compactado, por lo que la determinación de la fluidez se hizo siguiendo el procedimiento que se describe a continuación:

1. Previo a la ejecución de la prueba, con una franela húmeda se debe limpiar la superficie de la mesa y el cono, el cual posteriormente se debe colocar centrado sobre la mesa.
2. Mediante un chorro continuo, se introduce el mortero dentro del cono, de tal forma que quede ligeramente por encima del borde.

3. Con una espátula y con movimiento de serruchado sobre el borde del cono, se debe retirar el excedente de mortero.
4. Limpie el mortero que haya caído sobre la mesa alrededor de la base del cono.
5. Con movimiento vertical retire el cono a mas tardar un minuto después de terminada la operación de mezclado.
6. Inmediatamente accione la mesa para proporcionar 25 impactos por caída libre en un tiempo de 15 segundos. En respuesta a los impactos el mortero se esparcirá en forma de tortilla sobre la superficie de la mesa.
7. Usando un fluxómetro haga 4 mediciones diametrales a cada 45°. La mesa de fluidez, para este fin tiene cuatro líneas marcadas sobre su superficie.
8. Calcule el promedio de las cuatro mediciones y reporte la fluidez como el incremento en % del diámetro del mortero esparcido sobre la mesa con relación al diámetro inferior de la base del cono de fluidez (10.16 cm).

Variando la relación A/CM y la dosificación de aditivo para los morteros con HSF, la fluidez del mortero resultó de 21.1 cm = 109 % para el consumo máximo de aditivo que se fijó en 2.5%, y observamos que para esa fluidez el mortero presentaba mucha cohesión. Se decidió tantear omitiendo en la combinación de arenas sílicas la arena que definimos como harina M 200, lo cual resulto favorable ya que la fluidez promedio obtenida se incremento a 133 %.

Con estos resultados, se decidió eliminar para etapas posteriores la harina M 200 de la combinación de arenas sílicas seleccionadas en la sección 6.5.2 quedando solo las arenas F 20/40 y F 40 en proporción 50-50 % en peso, para abreviar a esta combinación la identificaremos como combinación "AS".

Para una relación A/CM de 0.23, considerada como mínima para el mortero con HSF y una dosificación de aditivo máxima de 2.5%, para los morteros con los CC M³, CVFM, MK-PP y MK-CIM se hicieron pruebas de tanteo de fluidez encaminadas a obtener la fluidez que compararíamos con la del mortero con HSF. En estas pruebas los

morteros con los CC MK-PP y MK-CIM arrojaron fluideces muy inferiores a la que buscábamos, aun agregando cantidades prohibitivas de aditivo, por lo que tuvieron que ser descartados para etapas posteriores.

Con la relación A/CM de 0.23 que fue la mas baja que pudimos lograr con el CC HSF, fijándola como máxima para los CC M³ y CVFM, se hicieron tanteos para definir la cantidad de aditivo necesaria para dar la fluidez obtenida para el mortero con HSF.

Las proporciones para los morteros con los CC HSF, M³ y CVFM en kg/m³ con fluideces promedio de 133, 137 y 133 % respectivamente, aparecen en la **Tabla 16**. En esta tabla, se aprecia que los CC M³ y CVFM arrojaron prácticamente la misma fluidez que el CC HSF pero con consumos de aditivo mucho menores.

Tabla 16.- PROPORCIONAMIENTO EN kg/m³, PARA LOS MORTEROS FABRICADOS CON LA COMBINACION DE ARENAS SILICAS "AS" EN CONDICION SECA.

INGREDIENTES ^{*1}	CEMENTANTE COMPLEMENTARIO(CC)		
	HSF	M ³	CVFM
A/CM	0.23	0.23	0.23
AGUA	218.5	220.1	218.5
CPO40	760	765.6	760
CC	190	191.5	190
ADITIVO ^{*2}	23.75(2.50%)	25.2(0.42%)	6.94(0.73%)
ARENA	997.7	1,086.9	1,047.0
AIRE ^{*3} , %	4.5	3.8	4.5
FLUIDEZ ^{*4} , %	133%	137%	133%

*1 Densidades: CPO 40 = 3.06; HSF = 2.18; M³ = 2.56; CVFM = 2.27; Aditivo = 1.1; Arena = 2.63.

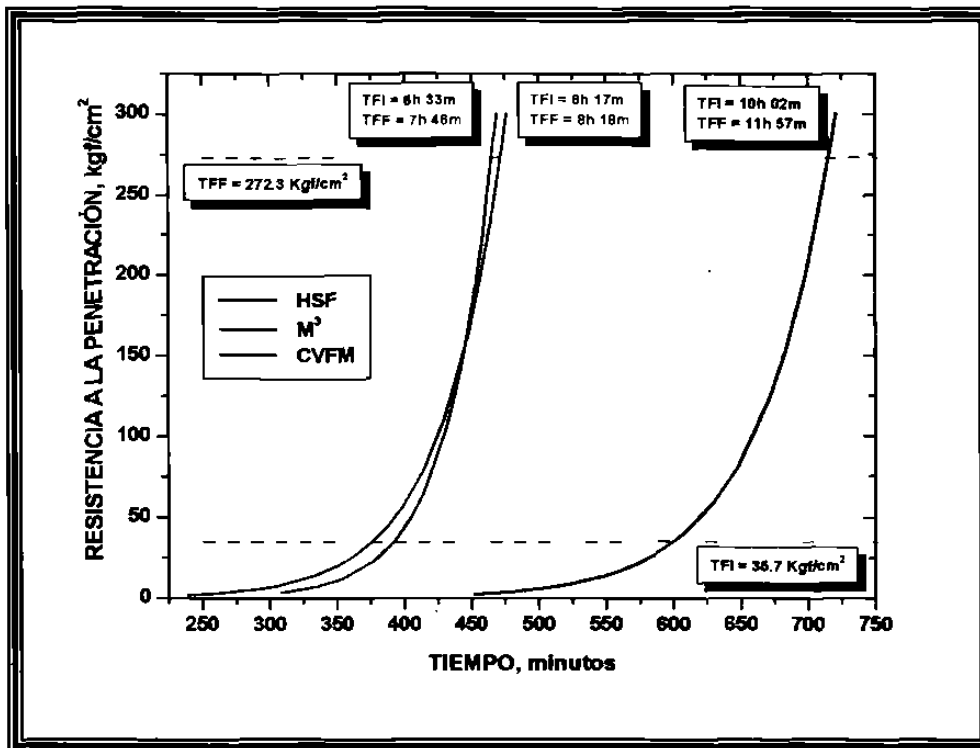
*2 Aditivo en % del peso del Cementante Total

*3 Aire atrapado promedio medido de acuerdo a ASTM C 231 - 97^{e1}.

*4 Promedio, medida con el procedimiento descrito en la sección 6.8.2 del Desarrollo Experimental.

6.9.- TIEMPOS DE FRAGUADO DE LOS MORTEROS CON LA COMBINACION DE ARENAS SILICAS SELECCIONADAS:

Empleando para el mezclado la revoladora de contracorriente con el procedimiento de mezclado que aparece en la sección 6.18.1, a los morteros con los tres CC seleccionados y con las proporciones definidas en la sección 7, se les determinaron los tiempos de fraguado por penetración en base a ASTM C 403/C 403M-99. Los resultados de estas pruebas aparecen en la Grafica 17 y en la Tabla 17. En base a los resultados obtenidos Para fines prácticos del proyecto se acordó desmoldar los especímenes 24 horas después de fabricado el mortero.



Grafica 17.- Tiempos de fraguado ASTM C 403 para los morteros con combinación de Arenas Silicas "AS".

Tabla 17.- TIEMPOS DE FRAGUADO POR PENETRACION ASTM C 403/C 403-99, PARA LOS MORTEROS FABRICADOS CON LA ARENA "AS".

CC ^{*1}	A/CM	ADITIVO(%) ^{*2}	TIEMPOS DE FRAGUADO (horas:minutos)	
			INICAL	FINAL
HSF	0.23	2.50	10:02	11:57
M ³	0.23	0.42	6:33	7:46
CVFM	0.23	0.73	6:17	8:18

*1 En todos los casos el % en substitución de Cementante Complementario(CC) fue de 20 % en masa.

*2 El aditivo se dosifico en % en masa del Cementante Total(CT).

6.10.- TIEMPOS DE CURADO ACELERADO DE LOS MORTEROS CON LA COMBINACION DE ARENAS SILICAS SELECCIONADAS:

Ya que se ha demostrado que el curado acelerado a 90°C posterior al fraguado mejora la microestructura del mortero [72,73], para determinar que tan significativo resultaba ser el incremento en la resistencia a la compresión que podríamos lograr al curar de forma acelerada los morteros, para los tres sistemas cementantes seleccionados (HSF, M³ Y CVFM), se elaboraron alrededor de 200 especímenes cilíndricos de 7.5 cm de diámetro por 15.0 cm de altura, que se sometieron a diferentes tiempos de curado acelerado con humedad a 90°C. Todos los especímenes fueron mantenidos inicialmente bajo condiciones estándar por un periodo de 24 horas, seguido por un periodo de curado acelerado para diferentes tiempos en la meseta a 90 °C en un horno con humedad y finalizando con un curado estándar hasta su ensaye a compresión a las edades de 7 o 28 días. Una fotografía del horno empleado para el curado acelerado aparece en la **Imagen 22**.

Para evitar el choque térmico en el curado acelerado, los especímenes se sometieron a una rampa no mayor de 22 °C/hora tanto en el calentamiento como en el enfriamiento. Estas rampas estuvieron dadas por el tiempo que le tomaba al horno pasar de temperatura ambiente a 90 °C y viceversa. Lo que varió fue la duración de la meseta a 90 °C. De acuerdo a los diferentes tiempos de residencia estudiados, los diferentes curados se etiquetaron con las letras CA que significa curado acelerado y un número que indica el tiempo que duró la meseta a 90 °C. A continuación se enlistan los diferentes tiempos de curado acelerado estudiados (mesetas):

- CE; curado estándar de referencia
- CA6; curado acelerado con meseta de 6 horas.
- CA12; curado acelerado con meseta de 12 horas.
- CA18; curado acelerado con meseta de 18 horas.
- CA42; curado acelerado con meseta de 42 horas.
- CA66; curado acelerado con meseta de 66 horas.

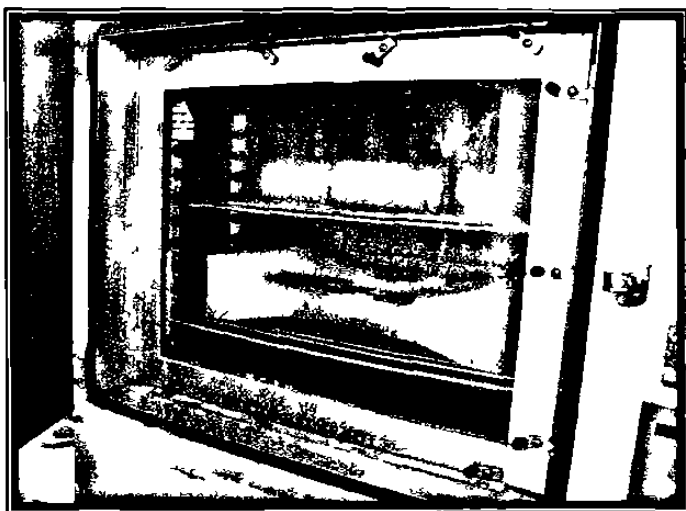


Imagen 22.- Horno con humedad y temperatura máxima de 120°C empleado para el curado acelerado de los especímenes.

Previo a los ensayos de los cilindros, para asegurar que la carga fuera aplicada de manera axial y que no se presentara excentricidad entre la carga y el eje del espécimen, las caras de los especímenes sobre las que se aplicaría la carga fueron pulidas con un torno como se ilustra en la **Imagen 23**, ya que el recapeo convencional con azufre que se usa para concreto de baja resistencia, no pudo ser empleado por la baja resistencia del azufre (35 MPa) con relación a la esperada para nuestros morteros.



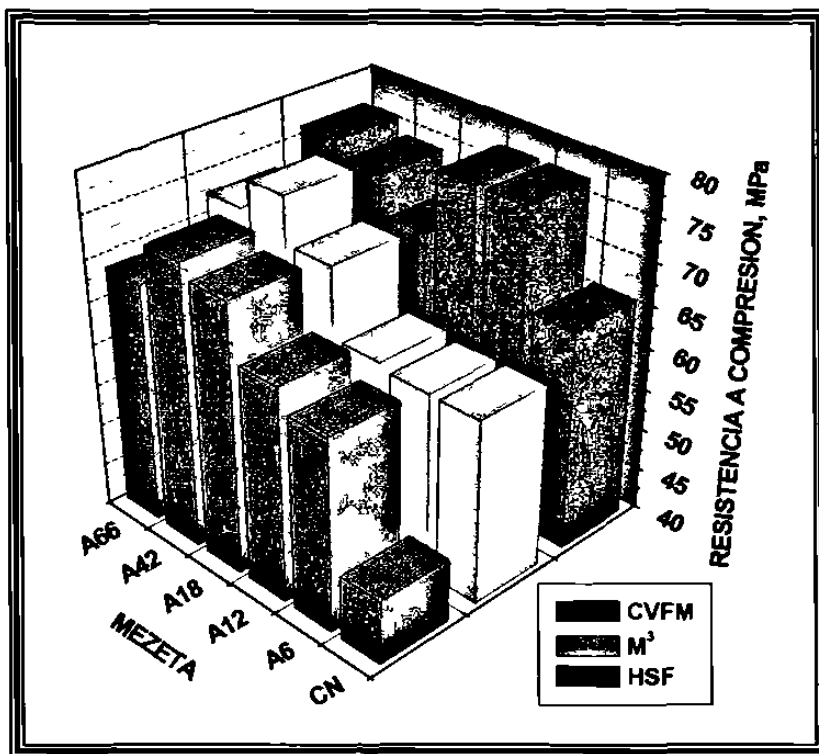
Imagen 23.- Desbastado de las caras de especímenes cilíndricos para dejarlos simétricamente paralelos con el eje del cilindro previo al ensaye a la compresión

En la **Tabla 18** aparecen las resistencias a la compresión promedio en MPa para los diferentes regímenes de curado, así como las desviaciones estándar correspondientes. Las resistencias promedio también se presentan en las **Graficas 18 y 19** para las edades de ensaye de 7 y 28 días respectivamente.

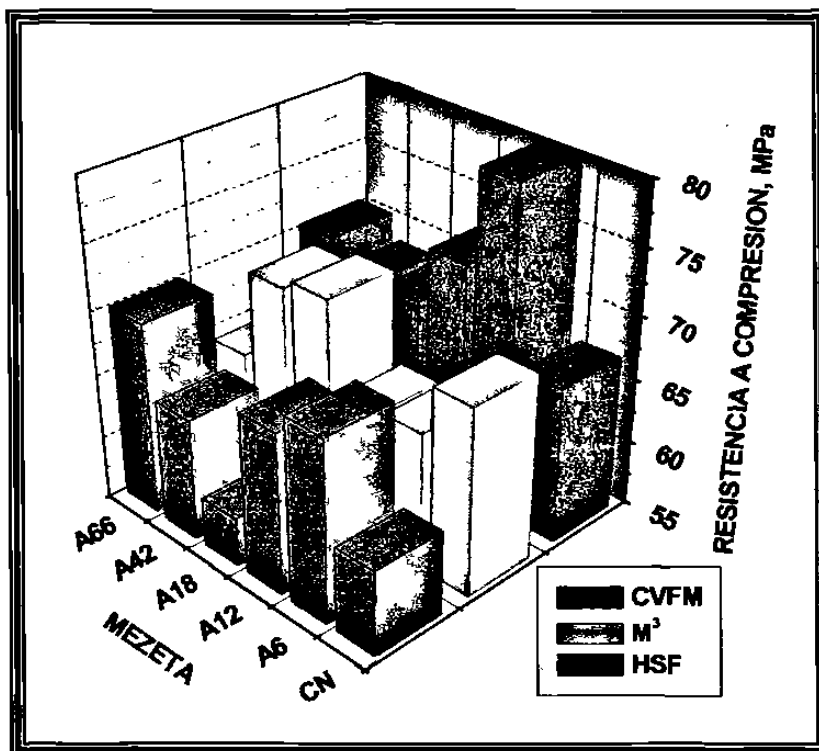
Tabla 18.- EFECTO DEL CURADO ACELERADO EN LA RESISTENCIA A COMPRESION Y DESVIACIONES ESTANDAR CORRESPONDIENTES PARA LOS MORTEROS CON COMBINACION DE ARENAS SILICAS "AS".

CURADO	EDAD dias	RESISTENCIA A * COMPRESION MPa			DESVIACION ESTANDAR MPa		
		HSF	M ³	CVFM	HSF	M ³	CVFM
CE	7	63.3	62.0	47.8	6.5	4.7	2.8
	28	67.1	69.5	61.6	13.4	5.3	8.4
CA6	7	77.7	62.0	63.0	6.0	5.7	7.6
	28	80.4	65.6	69.2	5.3	8.5	11.1
CA12	7	77.6	62.7	65.6	4.6	3.4	2.8
	28	73.0	65.1	67.5	8.4	9.2	7.2
CA18	7	69.9	70.9	72.1	9.0	9.0	11.1
	28	68.6	72.0	58.8	15.0	5.6	9.4
CA42	7	74.4	76.3	73.7	4.6	3.1	8.5
	28	68.5	71.2	64.5	8.7	10.0	11.7
CA66	7	76.3	72.6	68.6	5.8	3.1	10.0
	28	70.4	64.2	70.1	6.1	6.0	14.9

* promedio de 7 especimenes



Grafica 18.- Resistencias a compresión promedio a la edad de 7 días para especímenes cilíndricos de 7.5 cm de diámetro por 15.0 cm de altura curados de manera estándar (CE) y bajo diferentes regímenes de curado acelerado (CA).



Grafica 19.- Resistencias a compresión promedio a la edad de 28 días para especímenes cilíndricos de 7.5 cm de diámetro por 15.0 cm de altura curados de manera estándar (CE) y bajo diferentes regímenes de curado acelerado (CA).

El variar la meseta del curado acelerado tenía como objetivo determinar el tiempo de meseta mas apropiado. De los resultados reportados en la **Tabla 18** podemos comentar que la resistencia potencial para los tres sistemas no se ve incrementada significativamente para un régimen de curado acelerado con meseta superior a 6 horas, por lo que para estos especimenes un curado acelerado CA6 es suficiente.

6.11.- POROSIDAD POR INTRUSION DE MERCURIO DE LOS MORTEROS CON LA COMBINACION DE ARENAS SILICAS SELECCIONADAS:

Para conocer las características de la microestructura en los morteros seleccionados, se hicieron análisis porosimétricos con pedazos del mortero curado bajo el régimen CA12 con tamaños del orden de 5 mm, empleando un porosímetro por intrusión de mercurio marca CARLO ERBA modelo 2000. Los resultados obtenidos de estos análisis, aparecen en la **Tabla 19**.

El mortero fabricado con M³ resultó con menor porosidad (16.3%), los morteros con HSF y CVFM resultaron con porosidades mayores en 10 y 22% respectivamente. Un comportamiento similar se obtuvo para la superficie específica de los poros.

Empleando los rangos en los que el fabricante del equipo distribuye los radios de los poros para diferentes regiones (Manual de Operación del Porosímetro 2000 Carlo Erba), y con conocimiento de que seria deseable que el mortero concentre la mayor cantidad de poros en la región de los mesoporos, observamos que los tres CC tienen poros mayoritariamente concentrados en esta región y aproximadamente la misma cantidad. Los morteros con HSF y CVFM presentan radios promedios de poros de 19 nm y el mortero con M³ de 27 nm.

Tabla 19.- POROSIDAD Y OTRAS CARACTERISTICAS DE POROSIMETRIA OBTENIDAS POR INTRUSION DE MERCURIO EN MORTEROS CON LOS CC HSF, M³ Y CVFM Y CON LA COMBINACIÓN DE ARENAS SILICAS "AS".

MORTERO	PT %	RPP nm	SE m ² /g	DISTRIBUCION DE TAMAÑOS DE POROS		
				ULTRAMACROPOROS r > 7500 nm	MACROPOROS 30 ≤ r ≤ 7500 nm	MESOPOROS 3.7 ≤ r < 30 nm
HSF	16.65	19	6.53	15.5%	41.5%	43.0%
M ³	16.26	27	6.15	23.3%	35.4%	41.3%
CVFM	19.84	19	7.31	24.7%	33.2%	42.1%

A/CPO + CC = 0.23, CC = 20% del CT

PT = Porosidad Total, RPP = Radio Promedio del Poro, SE = Superficie Especifica

Concluimos que a pesar de que los tres morteros muestran aproximadamente la misma concentración de mesoporos y de radio promedio de poros el M³ es el que resulto con la menor porosidad por lo que seguramente este mortero resultará mas impermeable.

6.12.- TANTEOS CON OTRAS ARENAS:

En la **Imagen 24**, tomada al plano de falla de un espécimen de mortero con HSF ensayado a compresión, observamos que gran parte de las partículas de arena habían fallado por corte siguiendo el plano de falla, esto nos condujo a pensar que la arena silica podría ser en parte responsable de las bajas resistencias a la compresión obtenidas en relación a la esperada, en los especimenes de M³ y CVFM también pudimos hacer la misma observación.

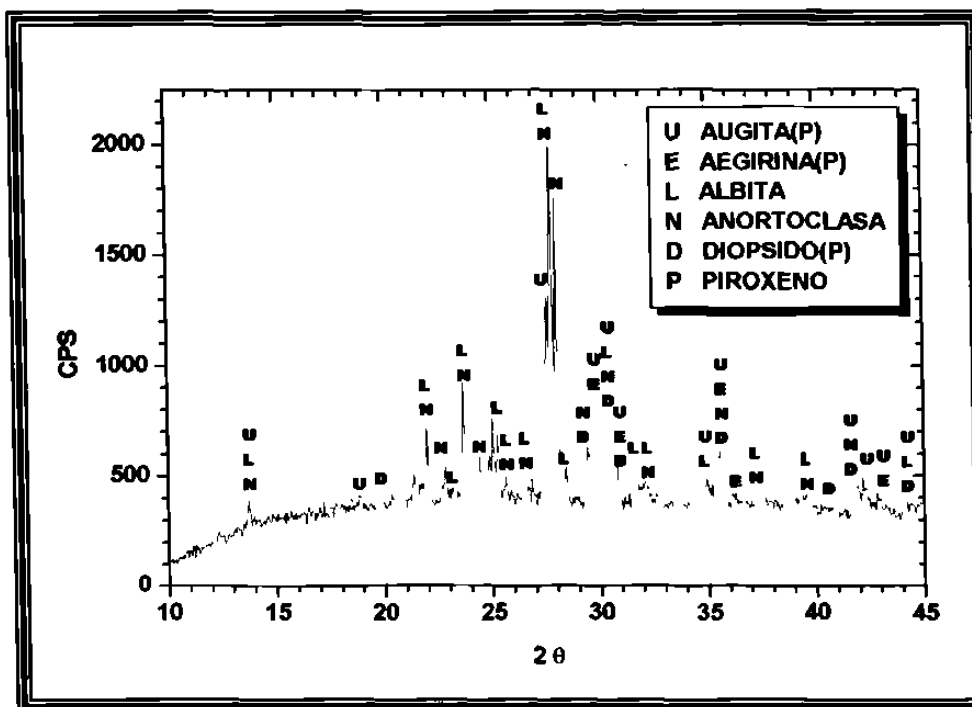
Por lo anterior, consideramos conveniente hacer pruebas con otras arenas, estas fueron: una arena de origen volcánico de Sabinas Coahuila, una gravilla silicosa conocida comúnmente en la región como Piedrita de Reynosa y una caliza de Monterrey.



Imagen 24.- Fotografía de la superficie de falla del mortero con HSF y combinación de arenas silicas "M", se observa poca porosidad y la propagación de la falla en las partículas de la arena silica.

Tabla 20.- RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICO VIA FRX, PARA EL AGREGADO DE ORIGEN VOLCANICO DE COAHUILA.

Oxido	Contenido %
SiO ₂	80.62
Al ₂ O ₃	7.28
Fe ₂ O ₃	4.04
CaO	1.61
MgO	0.12
SO ₃	0.06
Na ₂ O	1.36
K ₂ O	2.94
TiO ₂	0.18
P ₂ O ₅	0.05
Mn ₂ O ₃	0.27
PPI (950°C)	1.48



Grafica 20.- Espectro de Difracción de Rayos X de la Arena de Origen Volcánico.

Para el agregado de origen volcánico de Sabinas Coahuila, los resultados del análisis químico vía FRX que aparecen en la **Tabla 20** y con el espectro obtenido del análisis para determinar la composición mineralógica vía DRX que aparece en la **Grafica 20**, pudimos definir que esta roca era del tipo Andesita [74,75]. Una fotografía de la andesita aparece en la **Imagen 25**.



Imagen 25.- Vista del agregado de andesita, a) en greña, b) parcialmente triturada y c) pulverizada.

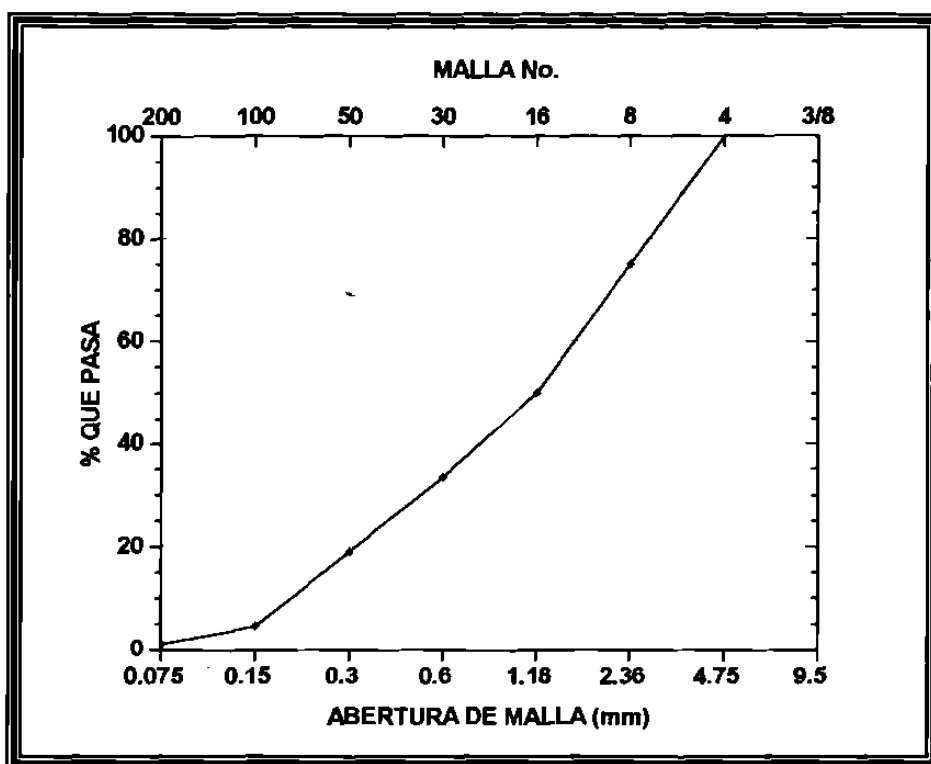
6.12.1.- TRITURACION DE ARENAS Y FABRICACION DE GRANULOMETRIAS:

Tanto la Andesita como la Piedrita de Reynosa, tuvieron que ser trituradas para una vez separadas en las distintas fracciones combinarlas en las proporciones adecuadas para producir la granulometría de referencia (GR) seleccionada en base a trabajos previos en el Departamento de Tecnología del Concreto de la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL. La separación de las fracciones por tamaños se hizo en una cribadora con vibrado, empleando para ello las mallas con aberturas de 9.5mm (3/8), 4.75mm (#4), 2.36mm (#8), 1.18 mm (#16), 600 μm (#30), 300 μm (#50) y 150 μm (#100) de acuerdo a ASTM E 11. En la **Grafica 21** aparece la granulometría de referencia (GR).

Inicialmente los morteros se fabricaron con una granulometría de referencia (GR), pero por los problemas que se presentaron para dar la fluidez de referencia obtenida para el mortero con HSF en la sección 8, debido a que la presencia de finos en el sistema era importante, y sabiendo que conforme disminuye el tamaño de partícula en la arena la adsorción de agua aumenta, con el objeto de mejorar la fluidez acordamos no usar la fracción de material pasa malla #100 (150 μm) en la arena. Las granulometrías GR y sin material pasa malla #100 (GRA) aparecen en la **Tabla 21**.

6.12.2.- TANTEOS DE FLUIDEZ PARA DEFINIR PROPORCIONES:

Las proporciones para las tres arenas con granulometría GRA se definieron partiendo de los procedimientos para el mezclado y la determinación de la fluidez empleados para los morteros con la combinación de arenas sílicas "AS" de la sección 6.8. Para los cuatro morteros fabricados con el CC HSF y las arenas "AS", andesita, piedrita de Reynosa y caliza, las proporciones aparecen en las **Tablas 22 y 23**. Con estas proporciones se fabricaron cubos de 5 cm en base a los procedimientos descritos en ASTM C 109/C 109M-99 para ensayarse a compresión a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días.



Grafica 21.- Granulometría de referencia (GR) empleada para fabricar la granulometría de las arenas Caliza, Andesita y Piedrita de Reynosa.

Tabla 21.- GRANULOMETRIA DE REFERENCIA (GR) Y AJUSTADA (GRA) PARA LAS ARENAS DE ANDESITA, DE PIEDRITA DE REYNOSA Y CALIZA.

MALLA #	ABERTURA mm	GRANULOMETRIA DE REFERENCIA EN % QUE PASA	
		GR CON PASA #100	GRA SIN PASA #100
4	4.75	100.0	100.0
8	2.36	75.0	74.0
16	1.18	50.0	48.0
30	0.60	33.5	30.5
50	0.30	19.0	15.0
100	0.15	4.5	0.0
200	0.075	1.0	0.0

Tabla 22.- PROPORCIONAMIENTO EN kg/m³ PARA LOS MORTEROS^{*1} FABRICADOS CON EL CC HSF Y DIFERENTES ARENAS EN CONDICION SECA.

INGREDIENTES ^{*2}		ARENA SILICA ^{*3}	ANDESITA ^{*4}	PIEDRITA DE REYNOSA ^{*4}	CALIZA ^{*4}
AGUA	REACCION	218.5	218.5	218.5	218.5
	ABSORCION	0	35	27	20
CPO40		760.0	760	760.0	760.0
HSF		190.0	190	190.0	190.0
ADITIVO		23.94	23.94	23.94	23.94
ARENA		1011	1010	945	991
FLUIDEZ ^{*5} cm (%)		24.4 (140%)	24.6cm (142%)	23.7cm (134%)	23.4cm (130%)

*1 A/CM = 0.23, Volumen de Aire promedio = 4.0%, aditivo = 2.52%^{*2}

*2 Densidades: CPO 40 = 3.06; HSF = 2.18; Aditivo = 1.1; Arena Sílica = 2.63; Andesita = 2.72; Piedrita = 2.53; Caliza = 2.63, las densidades de las arenas son SSS. Absorciones: Arena Sílica = 0.00%; Andesita = 3.50%; Piedrita = 2.82%; Caliza = 1.98%.

*3 Combinación de arenas sílicas ajustada por LISA sin M 200.

*4 Arenas con granulometría GR.

*5 Promedio. Medida con el procedimiento descrito en la sección 6.8 de este trabajo.

Tabla 23.- PROPORCIONAMIENTO EN VOLUMENES ABSOLUTOS PARA LOS MORTEROS FABRICADOS CON EL CC HSF Y LAS ARENAS "AS", ANDESITA, PIEDRITA DE REYNOSA Y CALIZA.

INGREDIENTES	LITROS	%
AGUA	218.5	21.85
CPO40	248.37	24.84
HSF	87.16	8.71
ADITIVO	21.76	2.18
ARENA	384.21	38.42
AIRE	40.00	4.00
TOTAL	1000.00	100.00
CEMENTANTE TOTAL	335.53	33.55
PASTA	615.79	61.58

El desarrollo de la resistencia a la compresión se determinó en la misma forma que para los morteros fabricados con arena sílica. Los resultados aparecen en la **Tabla 24** y en la **Grafica 22**, y de ellas se desprenden los siguientes comentarios:

Observamos que de las arenas propuestas la combinación "AS" fue la que arrojó mayor resistencia.

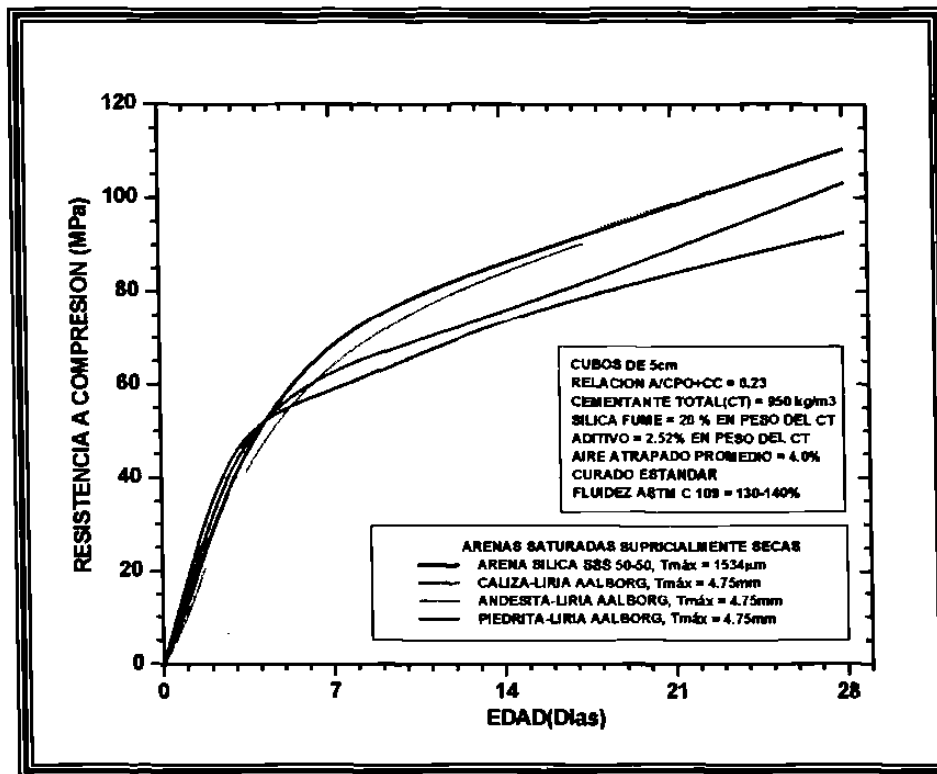
Por otro lado al parecer las aristas angulosas de las arenas trituradas conduce a mayores resistencia a edades tempranas en comparación con la resistencia arrojada por las otras arenas hasta aproximadamente los 7 días.

Como la resistencia a la compresión a la edad de 28 días de los morteros con la combinación de arenas sílicas "AS" y de la andesita se aproximan mucho, consideramos conveniente aprovechar las características de estas con las que se pudiera mejorar la resistencia. Sería conveniente incrementar el tamaño máximo de la arena sílica pero como no existe en el mercado lo podemos hacer combinándola con la andesita.

Tabla 24.- DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION EN CUBOS DE 5.0 cm PARA LOS MORTEROS FABRICADOS CON HSF Y DIFERENTES ARENAS.

EDAD	RESISTENCIA A LA COMPRESION*, MPa			
	ARENA			
	SILICA "AS"	ANDESITA	PIEDRITA DE REYNOSA	CALIZA
1	12.1	8.7	14.7	18.4
3	44.3	41.0	49.0	52.1
7	72.3	67.0	64.3	57.7
14	86.4	85.5	74.7	75.2
28	110.4	107.9	103.1	92.6

* Promedios de tres cubos de 5 cm.



Gráfica 22.- Desarrollo de resistencia de los morteros fabricados con diferentes arenas.

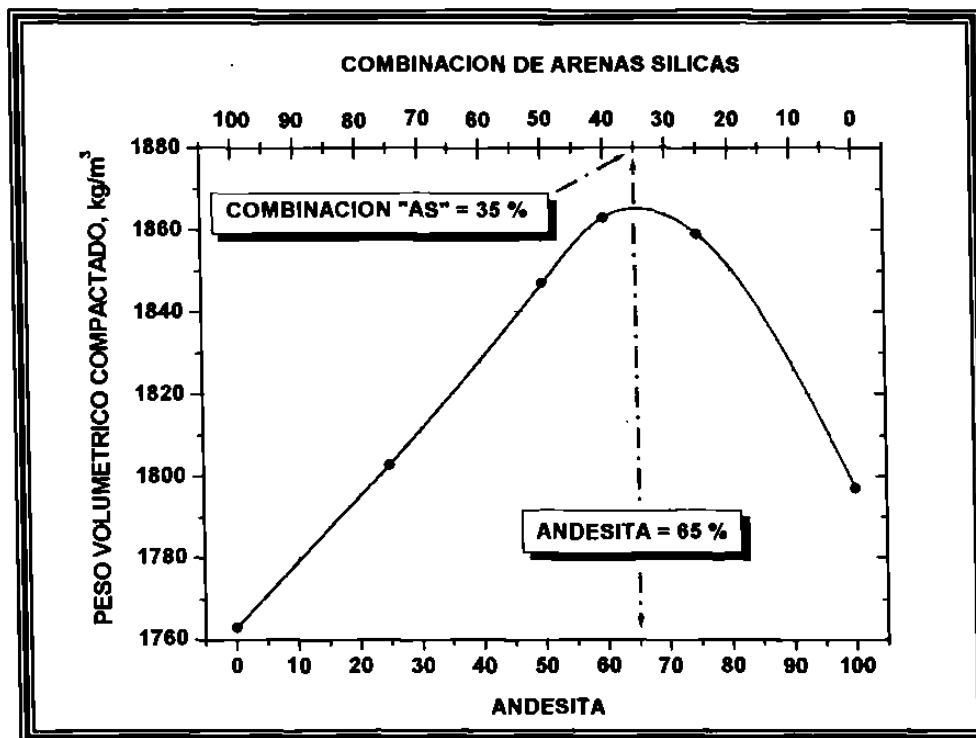
6.13.- TANTEOS CON COMBINACION DE ARENAS "AS" Y ANDESITA:

En esta etapa estudiaremos dos combinaciones de la arena sílica "AS" y la andesita con granulometría GRA:

- Empleando el criterio de máximo peso volumétrico compactado (PVC) descrito en la sección 3.1. **Combinación C1.**
- Empleando el criterio de mejor acomodo de partículas sugerido por Fuller [76], con las variaciones de la especificación ASTM C 33-02a, utilizando un análisis gráfico-granulométrico para la mezcla de dos agregados. **Combinación C2.**

6.13.1.- COMBINACION C1:

La combinación C1 dio como resultado la **Grafica 23**, de la cual definimos que los porcentajes a combinar de la arena "AS" con la andesita debían ser 35 y 65 % respectivamente.



Grafica 23.- Combinación de la arena de andesita con granulometría GRA y la combinación de arenas silíceas "AS" para Peso Volumétrico Compactado (PVC) máximo.

6.13.2.- COMBINACION C2:

En la **Tabla 25** aparece la distribución granulométrica ideal para un agregado con tamaño máximo de 4.75 mm recomendada por Fuller, con los límites definidos en base a ASTM C 33-02a. Para definir los porcentajes de cada una de las arenas se siguió el método gráfico que se describe a continuación.

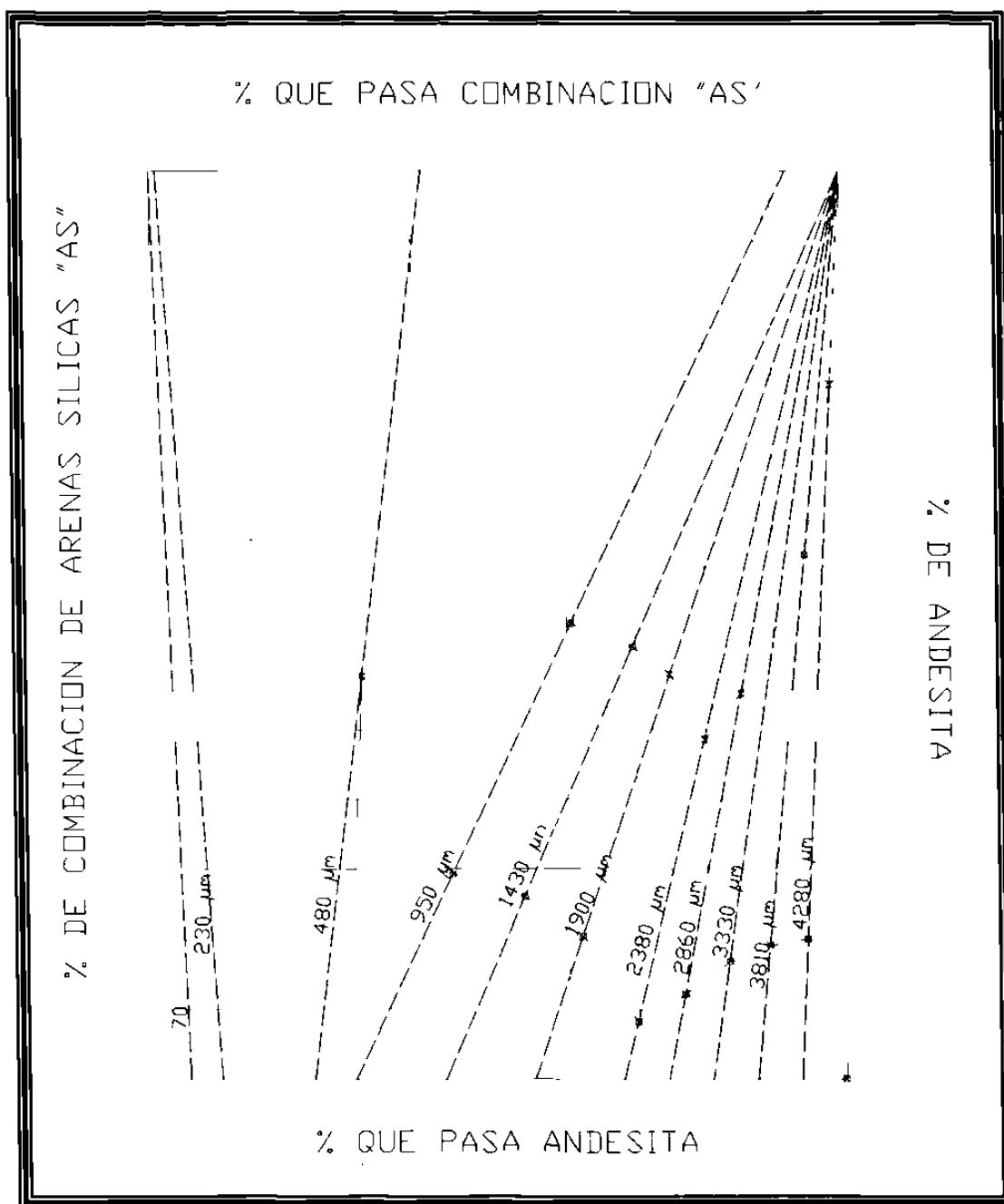
6.13.2.1.- MÉTODO DE AJUSTE POR GRANULOMETRÍA (ANÁLISIS GRÁFICO-GRANULOMÉTRICO):

El método consiste en elaborar un grafico para cada dos arenas que se deseen combinar. El grafico que deberemos fabricar estará constituido por la siguiente información:

1. Sobre el **eje de las ordenadas inferiores X1** se anotan los porcentajes de cada una de las mallas correspondientes al agregado #1.
2. Sobre el **eje de las ordenadas superiores X2** se anotan los porcentajes de cada una de las mallas correspondientes al agregado #2.
3. En el **eje de las abscisas izquierdo Y1**, acotado de 0 a 100%, aparecerá el porcentaje final del agregado #1.
4. En el **eje de las abscisas derecho Y2**, acotado de 100 a 0%, aparecerá el porcentaje final del agregado #2.
5. Mediante una recta se deberán unir los puntos graficados sobre los ejes X1 para la misma abertura de malla. Cualquier línea recta horizontal en la intersección con Y1 nos dará el % del agregado 1 y en la intersección con Y2 el % del agregado 2, las intersecciones de esta línea con las correspondientes a cada una de las líneas que corresponden a cada tamaño de malla, nos da el % de esa malla en la mezcla.
6. Para utilizar el gráfico es necesario establecer la especificación a la cual deseemos que se ajuste la combinación. En la **Tabla 25** aparece la especificación que

establecimos a partir de la granulometría recomendada por Fuller y las variaciones que recomienda para una arena para concreto ASTM C 33-02a .

7. Sobre cada una de las líneas que definen un mismo tamaño de abertura de malla se ubican mediante puntos los límites de la especificación.
8. Los puntos correspondientes al límite superior se unen entre ellos y por otro lado los correspondientes al límite inferior, formándose un polígono superior y un polígono inferior.
9. Aplicando el criterio de la línea horizontal del punto 3, cualquier línea horizontal que no corte los polígonos arrojará las proporciones que cumplen con la especificación.
10. Tomando en cuenta los costos de los agregados 1 y 2, seleccionaremos aquella línea en la cual tenga mayor participación la arena más económica. Si no es posible encontrar una línea que no corte los polígonos significa que no existe combinación que cumpla con la especificación. Si este es el caso, se recomienda trazar líneas tangentes a cada uno de los polígonos y el punto medio entre estas líneas nos dará la combinación que mejor se ajuste a la especificación.



Grafica 24.- Combinación de las arenas de andesita con granulometría GRA y la combinación de arenas sílicas "AS", optimizada por medio del Análisis Grafico - Granulométrico descrito en el Método de Ajuste por Granulometría.

Tabla 25.- DISTRIBUCION GRANULOMETRICA FULLER CON LIMITES SUPERIOR E INFERIOR DEFINIDOS EN BASE A ASTM C 33-02a.

TAMAÑO mm	PORCIENTOS QUE PASAN		
	LIMITE INFERIOR	PROMEDIO	LIMITE SUPERIOR
4.76	100.0	100.0	100.0
4.28	90.5	94.5	98.5
3.81	83.6	89.1	94.6
3.33	76.2	83.2	90.2
2.86	68.2	76.7	85.2
2.38	59.8	69.8	79.8
1.90	48.9	61.9	74.9
1.43	37.5	53.5	69.5
0.95	25.6	43.1	60.6
0.48	18.2	30.2	42.2
0.23	13.0	20	27.0
0.07	6.0	10	14.0

6.13.2.2.- RESULTADO:

De la **Grafica 24**, se definió que los porcentajes a combinar de la arena "AS" con la andesita para la combinación C2 debían ser 23 y 77 % respectivamente.

6.13.3.- FABRICACION Y ENSAYE DE ESPECIMENES PARA LAS COMBINACIONES DE ARENAS C1 Y C2:

Las proporciones de estos mortero en kg/m^3 se establecieron en base a las definidas en la sección 13.2 y estas aparecen en la **Tabla 26**.

Para observar el desarrollo de resistencia a la compresión de las dos combinaciones, para cada combinación se fabricaron 3 cubos de 5 cm para ensayarse a las edades de 3, 7, 14 y 28 días. Los resultados correspondientes aparecen en la **Tabla 27** y en la **Grafica 25**.

Observando el desarrollo de la resistencia notamos que después de los 10 días, se aprecia la diferencia a favor de la combinación C2, que tiende a permanecer constante a mayor edad. Dada la limitación que teníamos en tiempo para definir cual combinación seleccionaríamos, elegimos la combinación C2 como la combinación definitiva para utilizarla en etapas posteriores. La fluidez resulto prácticamente la misma para las dos combinaciones.

Por las estrechas diferencias observadas en las curvas de desarrollo de resistencia para los morteros con diferentes arenas (**Grafica 22**) y combinaciones de arenas (**Grafica 25**), fue la pasta la que repercutió de manera directa en la resistencia del mortero y no la resistencia del agregado.

Tabla 26.- PROPORCIONAMIENTO EN kg/m³, PARA LOS MORTEROS CON HSF Y COMBINACIONES DE ARENAS C1 Y C2 SECAS.

INGREDIENTES		COMBINACIONES	
		C1	C2
AGUA	REACCION	218.5	218.5
	ABSORCION	29	29
CPO 40		760.0	760.0
HSF		190.0	190.0
ADITIVO		26.13(2.75% ^{*1})	26.13(2.75% ^{*1})
ARENA ^{*2}		1020	1028
FLUIDEZ ^{*3}		26.7cm(163%)	25.6cm(152%)

A/CM = 0.23, Volumen de Aire promedio = 4.0 %

*1 % en masa del Cementante Total

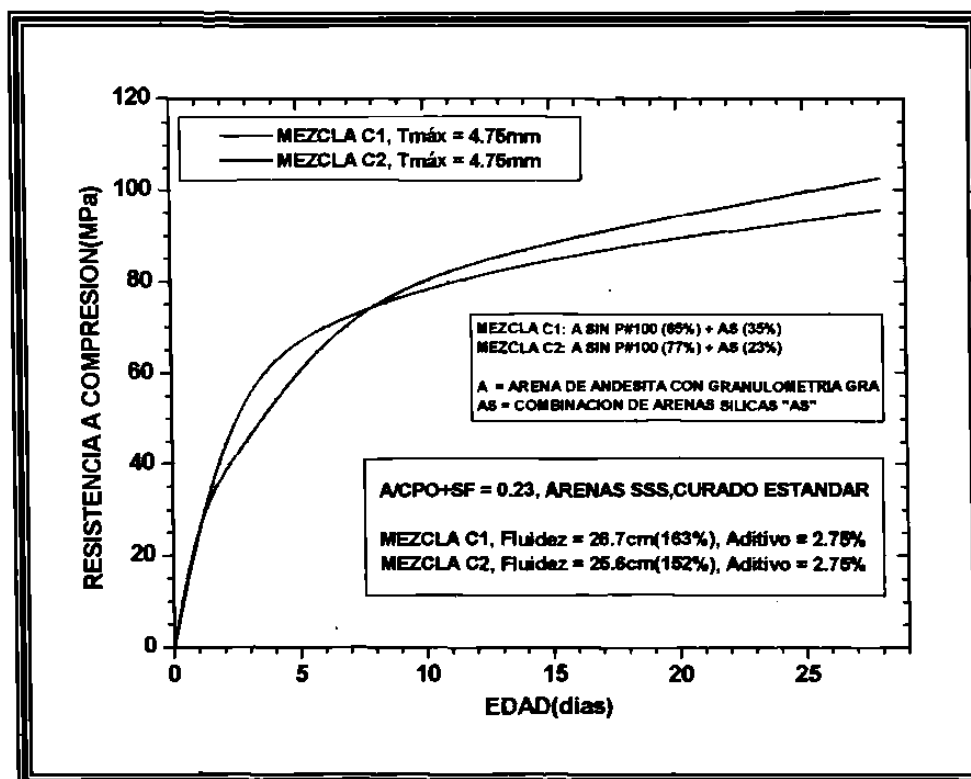
*2 Propiedades de arenas; D_{ss} C2 = 2.74, D_{ss} C3 = 2.77, Absorción de Agua para ambas arenas = 2.81%

*3 Promedio. Medida con el procedimiento descrito en la sección 6.14 de este trabajo.

Tabla 27.- DESARROLLO DE RESISTENCIA A COMPRESION PARA LOS MORTEROS CON HSF Y COMBINACIONES DE ARENAS C1 y C2.

EDAD	RESISTENCIAS EN MPa	
	C1	C2
1	27.1	30.6
3	61.5	46.3
7	73.6	75.6
14	84.7	92.1
28	95.4	102.5

* Promedios de tres cubos de 5cm.



Grafica 25.- Desarrollo de resistencia en cubos de 5 cm de morteros con combinaciones de arenas C1 y C2.

6.14.- *DOSIFICACION OPTIMA DE ADITIVO PARA EL MORTERO CON HSF Y COMBINACION DE ARENAS C2:*

Aunque todo el trabajo previo con el CC HSF, se hizo basados en una dosificación de aditivo de 2.5 %, apoyados en el criterio del punto de saturación decidimos determinar el porcentaje optimo de dosificación de aditivo para una relación A/CM de 0.23. El punto de saturación se considero como la dosificación de aditivo máxima a partir de la cual un incremento en la dosificación de aditivo no arroja un incremento en la fluidez.

El mezclado de los morteros y la determinación de la fluidez se hicieron siguiendo los procedimientos descritos en la sección 6.8. Para estos morteros el área de la mesa de Fluidez de ASTM C 230/C 230M-98⁶² resulto insuficiente ya que los morteros presentaban fluideces mayores al diámetro de la mesa, por lo que se opto por colocar sobre la mesa una placa de acero tipo canal de 30 por 32 cm y de 5.94 kg de peso que aparece en la **Imagen 26**.

En la **Tabla 28** aparecen las fluideces para las diversas dosificaciones de aditivo. En esta tabla observamos que el punto de saturación corresponde a 2.75 % de aditivo en relación al peso del CT, para esta dosificación se obtuvo una fluidez de 147 ± 5 %.

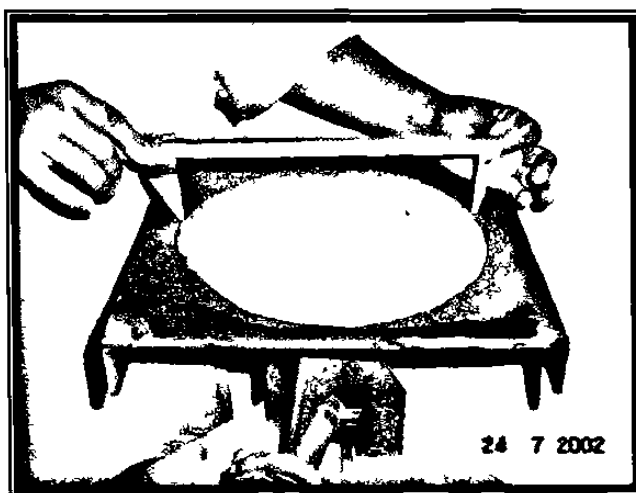


Imagen 26.- Prueba de fluidez modificada a un mortero definitivo con M³.

Tabla 28.- FLUIDECES EN MORTEROS CON HSF Y COMBINACION DE ARENAS C2 PARA DEFINIR PUNTO DE SATURACION

A/CPO 40 + HSF		0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Aditivo %		2.5	2.5	2.6	2.6	2.75	2.75	2.75	2.85
Fluidez	cm	24.1	24.4	24.6	24.5	24.6	25.1	25.2	25.2
	%	137	140	142	141	142	147	142	146
Aire Atrapado*, %		—	—			4.0	5.0	4.0	—

* Determinado con Medidor Tipo B de acuerdo a ASTM C 231-97¹.

6.15.- TANTEOS PARA DEFINIR MINIMA RELACION A/CM EN MORTEROS PARA LOS SISTEMAS CPO 40 + M³ Y CPO 40 + CVFM:

El punto de saturación para el mortero con HSF resulto ser de 2.75 % con una fluidez de 147 %, ¿si fabricamos los morteros con M³ y CVFM para la misma fluidez aumentando los consumos de aditivo con relación a los utilizados para estos morteros fabricados con estos CC en la sección 8, cual seria la relación A/CM mínima que resultaría?

Los resultados de los tanteos aparecen en la **Tabla 29**. Las relación A/CM resultaron de 0.20 y 0.21 para el M³ y el CVFM respectivamente y con una dosificación de aditivo de 2.6 % en peso del CT para ambos morteros.

Tabla 29.- RESUMEN DE FLUIDEZES Y CONTENIDOS DE AIRE PARA LOS MORTEROS CON M³ Y CVFM Y ARENA C2.

M³ A/CM = 0.20, ADITIVO = 2.60% ^{*1}		
FLUIDEZ ^{*2}, %	RANGO	146 – 161
	PROMEDIO	154
AIRE ATRAPADO, %	RANGO	1.9 – 2.3
	PROMEDIO	2.1
CVFM A/CM = 0.21, ADITIVO = 2.60%*		
FLUIDEZ ^{*2}, %	RANGO	147 – 166
	PROMEDIO	155
AIRE ATRAPADO, %	RANGO	1.4 – 2.5
	PROMEDIO	2.0

^{*1} % en masa del Cementante Total

^{*2} Medida con el procedimiento descrito en la sección 6.14 de este trabajo.

6.16.- FLUIDEZ EN PASTAS:

Debido a que resulta mas fácil y ventajoso determinar el punto de saturación para el aditivo en pastas, mediante pruebas de fluidez con el minicono de Kantro y el cono de la mesa de fluidez de ASTM C 230/C 230M-98⁶² se le hicieron pruebas al sistema cementante CPO 40 + HSF para determinar este parámetro, el cual resultó ser de 2.75%, igual al que se obtuvo para el mortero en la sección 6.14, ver **Tabla 30**. A las pastas para los sistemas cementantes CPO 40 + M³ y CPO 40 + CVFM con relaciones A/CM de 0.20 y 0.21 respectivamente se les determinaron los puntos de saturación correspondientes resultando ser para ambos casos de 2.6 %. Los resultados de estas pruebas aparecen en las **Tablas 31 y 32** respectivamente.

Los procedimientos que se siguieron para el mezclado y la determinación de la fluidez son los que se describen a continuación.

Tabla 30.- FLUIDECES EN PASTAS PARA DEFINIR DOSIFICACIÓN DE ADITIVO OPTIMA EN EL SISTEMA CEMENTANTE CPO 40 + HSF^{*1}.

Aditivo, ^{*2} %		2.70	2.74	2.75	2.75	2.76	2.80	2.85	2.95	
Fluidez ^{*3}	KANTRO, cm	100	—	102	103	91	103	101	90	
	ASTM C 230	cm	22.2	23.0	—	23.1	21.8	22.8	—	—
		%	118	126	—	128	115	124	—	—

*1 A/CM = 0.23; HSF = 20 % del CT

*2 % en peso con relación al peso del CT.

*3 Determinadas de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 6.16.2 de este trabajo.

Tabla 31.- FLUIDECES EN PASTAS PARA DEFINIR DOSIFICACIÓN DE ADITIVO OPTIMA EN EL SISTEMA CEMENTANTE CPO 40 + M^{*1}.

Aditivo, ^{*2} %		2.4	2.5	2.6	2.6	2.7	
Fluidez ^{*3}	KANTRO, cm	100	113	108	105	107	
	ASTM C 230	cm	25.1	25.7	26.1	25.8	24.9
		%	147	153	157	154	145

*1 A/CM = 0.20; HSF = 20 % del CT

*2 % en peso con relación al peso del CT.

*3 Determinadas de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 6.16.2 de este trabajo.

Tabla 32.- FLUIDECES EN PASTAS PARA DEFINIR DOSIFICACIÓN DE ADITIVO OPTIMA EN EL SISTEMA CEMENTANTE CPO 40 + CVFM^{*1}.

Aditivo, ^{*2} %		2.4	2.5	2.5	2.6	2.6	2.7	
Fluidez ^{*3}	KANTRO, cm	94	97	102	109	102	103	
	ASTM C 230	cm	21.4	24.1	23.8	25.2	24.6	24.4
		%	111	137	134	149	142	140

*1 A/CM = 0.21; HSF = 20 % del CT

*2 % en peso con relación al peso del CT.

*3 Determinadas de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 6.16.2 de este trabajo.

6.16.1.- MEZCLADO:

Se deberá mezclar agua, cementante y aditivo en proporciones adecuadas para producir un volumen de pasta de 1 litro en la mezcladora descrita en ASTM C 305, siguiendo para ello el procedimiento de mezclado que se describe a continuación:

Colocar la paleta y el tazón en la posición de mezclado en la mezcladora, entonces se deberán introducir los materiales para la bachada y mezclarlos de la siguiente manera:

1. Introducir el agua dentro del tazón, el cementante y el aditivo previamente homogeneizados en el orden en que se mencionan; mezclarlos a velocidad baja por dos (2) minutos (tiempo aproximado que tardara en soltarse la pasta).
2. Apagar durante un periodo de 30 segundos, durante este tiempo cambiar a velocidad media y con una espátula raspar el fondo y las paredes del tazón.
3. Encender la mezcladora a velocidad media por 2.5 minutos.

4. Apagar por un periodo de 30 segundos, durante este tiempo cambiar a velocidad alta y raspar con una espátula paredes y fondo del tazón.
5. Encender a velocidad alta por 2.5 minutos. Al final del mezclado el tiempo acumulado es de 8 minutos.
6. Determinar la fluidez a más tardar 30 segundos después de terminar el mezclado.

6.16.2.- DETERMINACION DE LA FLUIDEZ:

Para determinar la fluidez con el minicono de Kantro o con el cono de ASTM C 230/C 230M-98^{e2}, se siguió el procedimiento que se describe a continuación:

1. Se deberá colocar el cono sobre una superficie lisa y nivelada previamente humedecida que puede ser de vidrio, placa de acero pulida o cualquier otro material no absorbente apropiado para los fines de la prueba.
2. Se llena con pasta el cono, de requerirse se enrasa con una espátula, se deberá retirar cualquier fracción de pasta que haya caído fuera del molde sobre el vidrio o placa.
3. Levante el cono y deje que la pasta fluya libremente sobre la superficie.
4. Cuando la pasta ya no presente movimiento, usando un fluxómetro haga 4 mediciones diametrales a cada 45°.
5. Calcule el promedio de las cuatro mediciones y reporte la fluidez como el incremento en % del diámetro del mortero esparcido sobre la mesa con relación al diámetro inferior de la base del cono de fluidez (10.16 cm).

Debido a que la pasta es muy cohesiva por tan bajas relaciones A/CM, de los dos métodos utilizados, en base a los resultados consideramos mas apropiado el método que utiliza el cono de la meza de fluidez de ASTM C 230/C 230M-98^{e2}, ya que el minicono de Kantro de la **Figura 1** resulta poco sensible para registrar las variaciones que se presentan en la fluidez.

6.17.- MORTEROS DEFINITIVOS:

La constitución inicial de los morteros para los tres sistemas cementantes que a partir de aquí serán identificados como definitivos para etapas posteriores, quedo como aparece en la **Tabla 33**. Partiendo de los parámetros que se definieron previamente en las sección 6.13 (combinación de arena a utilizar) y en las secciones 6.14, 6.15 y 6.16 las (relaciones A/CM y las dosificaciones de aditivo) las proporciones definitivas correspondientes en kg/m^3 que se obtuvieron de las mezclas de tanteo, aparecen en la **Tabla 34**.

TABLA 33.- CONSTITUCIÓN DE PARTIDA PARA DEFINIR PROPORCIONES DE MORTEROS DEFINITIVOS.

Sistema Cementante	CPO 40 (kg/m^3)	CC (kg/m^3)	CT (kg/m^3)	A/CM	Aditivo*	Arena
CPO 40 + HSF	760	190	950	0.23	2.75	C2
CPO 40 + M ³				0.20	2.60	
CPO 40 + CVFM				0.21		

* En peso con relación al peso del CT.

TABLA 34.- PROPORCIONAMIENTO EN kg/m³ PARA LOS MORTEROS DEFINITIVOS FABRICADOS CON LOS SISTEMAS CEMENTANTES CPO 40 + HSF, CPO 40 + M³ Y CPO 40 + CVFM CON ARENA C2 EN CONDICION SECA¹.

INGREDIENTES		PROPORCIONES EN kg/m ³		
CEMENTANTE		HSF	M ³	CVFM
AGUA	REACCION	218	194	204
	ABSORCION	29	32	31
CPO 40		758	775	776
CC		189	194	194
ADITIVO		25(2.75 ²)	25(2.6 ²)	25(2.6 ²)
ARENA C2		1,018	1,154	1,103
AIRE ATRAPADO, %		4.3	2.1	2.0
FLUIDEZ PROMEDIO ³ , %		147	154	155

*1 Propiedades de arena; D_{ss} = 2.74, Absorción de Agua para ambas arenas = 2.81%

*2 % en masa del Cementante Total

*3 Promedio. Medida con el procedimiento descrito en la sección 6.14 de este trabajo.

6.17.1.- RESISTENCIA A COMPRESION DE MORTEROS DEFINITIVOS:

En la Tabla 35 aparecen los resultados de resistencias a compresión para cilindros de 7.5 cm de diámetro por 15 cm de altura fabricados con los morteros definitivos sin fibras, para los sistemas cementantes CPO 40 + HSF, CPO 40 + M³ y CPO 40 + CVFM, curados bajo los regimenes CA18 y CE que fueron ensayados a las edades de 7 y 28 días respectivamente.

Con el curado CE las resistencias a la compresión resultaron de 80, 95, y 96 % para los CC HSF, M³ y CVFM respectivamente con relación a las resistencias que arrojo el curado CA18.

En la producción de prefabricados es de interés acelerar el desarrollo de resistencia para sacar el producto al mercado lo mas pronto posible, para esta finalidad observamos que el curado acelerado resulto eficiente.

TABLA 35.- RESISTENCIA A LA COMPRESION EN MPa, DE MORTEROS DEFINITIVOS, EN ESPECIMENES CILINDRICOS DE 7.5 cm DE DIAMETRO CURADOS BAJO LOS REGIMENES CA18 Y CE.

CURADO	EDAD DE ENSAYE días	CEMENTANTE COMPLEMENTARIO		
		HSF	M ³	CVFM
CA18	7	77.6	75.2	62.4
CE	28	61.8	71.4	60.6
DESARROLLO DE RP*, %		80	95	96

* Resistencia de especimenes curados bajo el régimen CE y ensayados a los 28 días de edad, en % con relación a la obtenida para los especimenes curados bajo el régimen CA18 y ensayados a los 7 días de edad (RP = Resistencia Potencial).

6.17.2.- TIEMPOS DE FRAGUADO DE LOS MORTEROS CON PROPORCIONES DEFINITIVAS:

Ya que en base a los resultados obtenidos en las secciones 14, 15 y 16 la dosificación de aditivo sufrió un incremento para los tres sistemas cementantes con relación a las obtenidas en la sección 6.9, empleando el procedimiento descrito en ASTM C 403/C 403M-99, a los morteros definitivos se les determino el efecto de este incremento de aditivo en los Tiempos de Fagruado. Los resultados de estas determinaciones aparecen en la **Tabla 36** y en la **Grafica 26**.

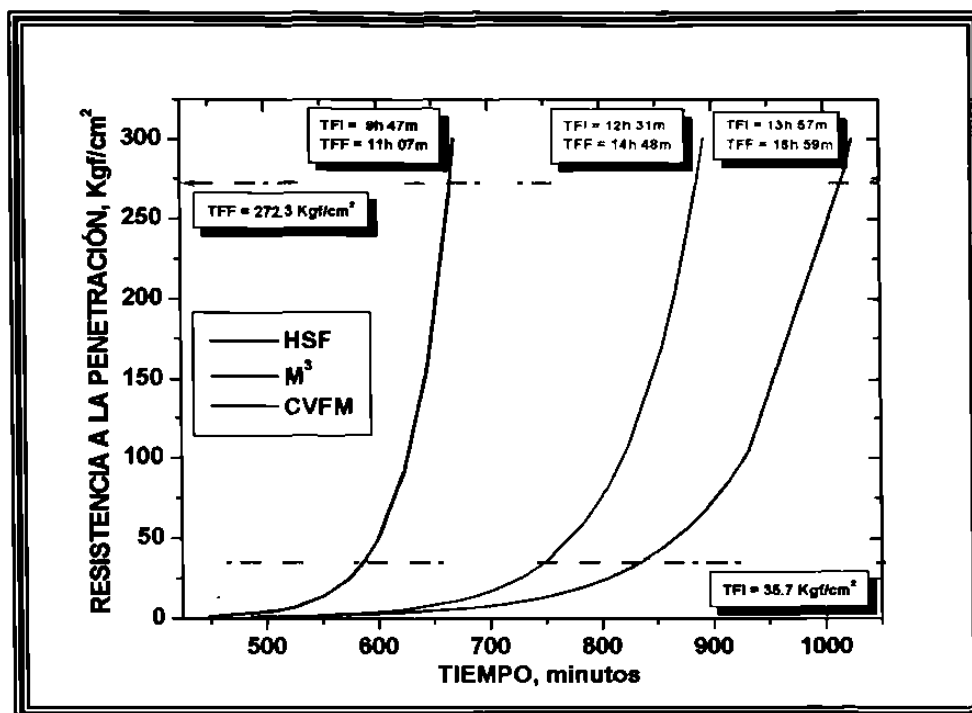
Al principio, los tres sistemas mostraron retardo y diferencias significativas entre ellos en los tiempos de fraguado. No obstante que ya se haya presentado el fraguado final es conveniente dejar el mortero en el molde por mas tiempo para que endurezca. En nuestro caso los especimenes se desmoldearon a las 24 horas, a esta edad el mortero no mostró problemas de despostillamiento ya que la resistencia para los tres sistemas resulto ser alta a esta edad (13 Mpa) como se puede observar en la **Grafica 25**. Por lo anteriormente expuesto para la producción de prefabricados es posible desmoldear en ciclos de 24 horas.

Con relación a los resultados de los tiempos de fraguado reportados en la sección 6.9, los tiempos de fraguado para los morteros con M³ y CVFM registraron un retraso considerable por el aumento en el consumo de aditivo, este retraso no fue del mismo orden para los dos, lo cual es atribuible a que son dos materiales de naturaleza similar pero con diferente morfología, de diferente fuente y con diferente composición química.

Tabla 36.- TIEMPOS DE FRAGUADO POR PENETRACION ASTM C 403 PARA LOS MORTEROS DEFINITIVOS.

CC	A/CM	ADITIVO(%) *1		TIEMPOS DE FRAGUADO (horas:minutos)	
		CPO 40	CT	INICAL	FINAL
HSF	0.23	3.44	2.75	9:47	11:07
M ³	0.20	3.25	2.60	13:57	16:59
CVFM	0.20	3.25	2.60	12:31	14:48

*1 % en masa del del CPO 40 o del CT



Grafica 26.- Tiempos de fraguado ASTM C 403 para los morteros definitivos con la combinación de arenas C2.

6.18.- ADICION DE FIBRAS AL MORTERO DEFINITIVO:

El concreto, como la mayoría de los cerámicos es un material frágil, más resistente a compresión que a tensión, por lo que un elemento típico de concreto reforzado sujeto a flexión se refuerza con varillas de acero. En un elemento de concreto reforzado, el acero toma los esfuerzos de tensión y el concreto los esfuerzos de compresión.

En concretos de resistencia normal la curva esfuerzo-deformación presenta un comportamiento lineal a un nivel de esfuerzos bajo y la forma curva que presenta el grafico es debida al microagrietamiento que se inicia en la interfase con el agregado y al agrietamiento interno progresivo de la pasta [77], conforme aumenta la resistencia del concreto al disminuir la relación A/CM el tramo lineal de la curva esfuerzo-deformación tiende a prolongarse debido a que la formación de microgrietas de adherencia al no presentarse sangrado son suprimidas con mayor efectividad, y el tramo curvo del grafico tiende a desaparecer. El incremento en la resistencia conduce a un incremento en la rigidez, lo cual trae como consecuencia un incremento en la fragilidad.

A diferencia del acero, en los concretos de alta resistencia prácticamente el rango elástico que presenta la curva esfuerzo deformación es nulo y el rango plástico no existe. Si se logra incrementar la deformación posterior al limite elástico se incrementa la ductilidad del compuesto, por consiguiente la resistencia a la flexión y principalmente la tenacidad.

Por lo anteriormente expuesto, debido a que los morteros que produjimos son muy frágiles por las altas resistencias que se obtuvieron, para darle ductilidad es esencial el uso de fibras.

Para un porcentaje de fibra dado, conforme disminuye la longitud y el diámetro de la fibra, aumenta la superficie específica de la fibra disponible para trabajar por adherencia con la matriz, este aumento en la superficie específica maximiza la eficiencia de la fibra para absorber la transferencia de esfuerzos interfaciales de la matriz a la fibra. El diámetro de la fibra deberá ser lo mas pequeño posible, ya que si se usa un porcentaje de fibra alto se pueden mejorar la resistencia y la ductilidad del concreto.

Al aumentar la longitud de la fibra se tendrá mas adherencia, sin embargo la longitud máxima que se puede emplear estará limitada por su repercusión desfavorable en la trabajabilidad de los morteros en estado fresco.

Para este trabajo se seleccionaron fibras de acero por el alto módulo de elasticidad que presenta este material (200Gpa) ya que entre mayor sea el módulo de elasticidad mayor será la proporción de la carga que tomen las fibras en el ensaye de un compuesto antes de que se agriete y por otro lado entre mayor sea el modulo de elasticidad de la fibra menor será la deformación posterior al agrietamiento del compuesto [27].

Para el mismo volumen y longitud de fibra y para dos fibras con diferente diámetro, la de menor diámetro tendrá mayor superficie específica para adherirse con el mortero.

Se investigó en el mercado sobre las opciones disponibles de microfibras de acero y encontramos que debido a que a la fecha las aplicaciones de estos productos son novedosas, son pocas las opciones disponibles. Como resultado de esta búsqueda seleccionamos la fibra de acero Dramix OL 13/0.20 de BAKAERT por ajustarse a las características de aspecto que buscábamos. Una fotografía de esta fibra aparece en la **Imagen 27**, y tiene las siguientes características:

- Longitud = 11 – 15 mm
- Diámetro = 180 – 220 μm
- Resistencia a Tensión mínima = 2,600 MPa
- Composición Química = C = 0.69 – 0.76 %, Mn = 0.40 – 0.60 %, Si = 0.15 – 0.30 %, P \leq 0.025 % y S \leq 0.025 %.

Como ya se menciona, una de las repercusiones negativas que se presenta al agregar fibras a un concreto o mortero, es la disminución en la trabajabilidad del compuesto en estado fresco, como se puede observar en la **Imagen 28**, ya que para el mortero con CVFM la fluidez paso de 155% a 20% por la incorporación de 4% de FA.

En nuestro caso observamos que a pesar de la disminución drástica que presento la fluidez por la incorporación de las fibras, esto no repercutió de manera desfavorable en el acomodo del mortero en los moldes al utilizar un ligero vibrado. Para contrarrestar este efecto indeseable, es recomendable que la fibra que se adicione sea preferentemente corta. Por otro lado, para usar fibra de longitud corta la matriz deberá ser lo mas resistente posible para suministrar la mejor adherencia matriz-fibra, para ello es imprescindible el usar la relación A/CM mas baja posible. Para el mezclado de estos morteros se utilizo una revolvedora de contracorriente siguiendo el procedimiento que se describe a continuación.

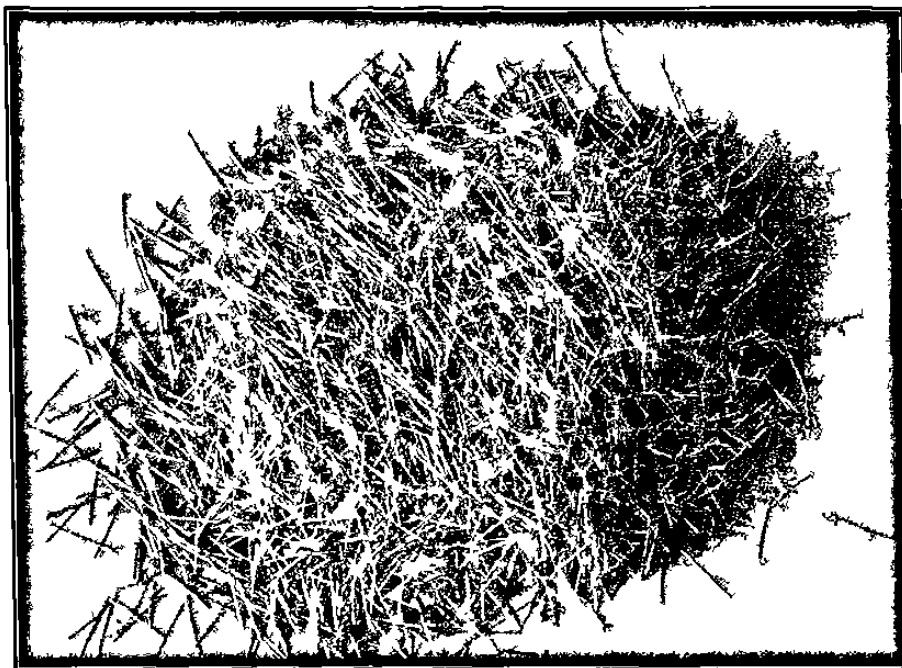


Imagen 27.- Fibra de acero con longitud de 11 a 15 mm y diámetro de 180 a 220 μm .

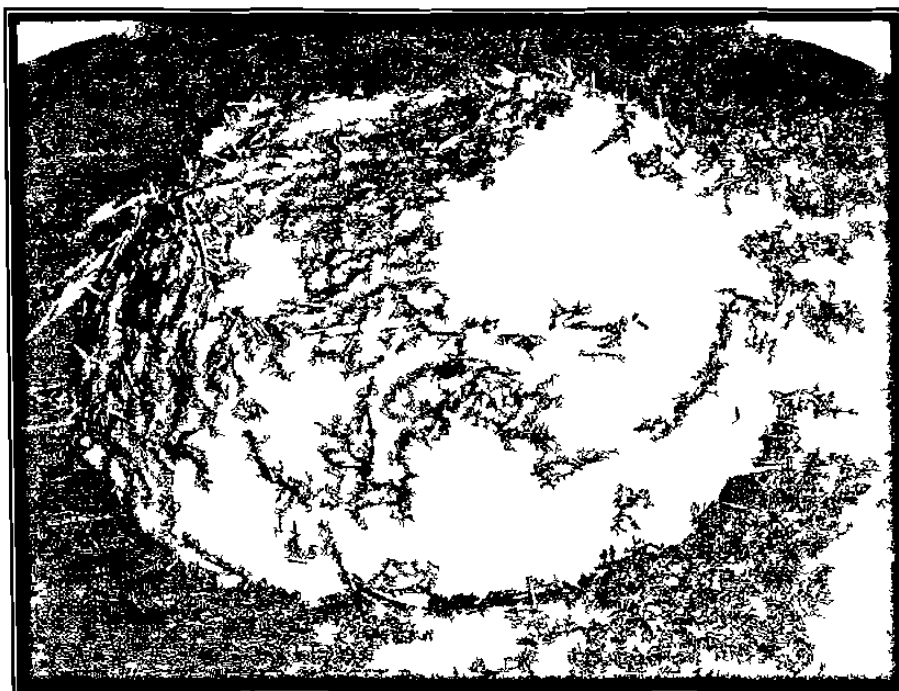


Imagen 28.- Fluidez del mortero definitivo con CVFM y 4% de FA.

6.18.1.- MEZCLADO DE MORTERO EN REVOLVEDORA DE CONTRACORRIENTE:

Cuando se requiera reproducir el mortero para la fabricación de elementos prefabricados a escala industrial, esto se deberá hacer en una revolvedora de contracorriente con las proporciones definitivas obtenidas a pequeña escala para la fluidez objetivo con el procedimiento de mezclado descrito en 6.8.1 con ligeras modificaciones, por tratarse del mezclado de volúmenes mayores. A continuación se describe a detalle el procedimiento recomendado para la revolvedora de contracorriente de dos velocidades que se utilizó para el mezclado y que aparece en la **Imagen 29**.

El volumen de mortero a fabricar, estará en función del volumen elementos a fabricar, y del tiempo que el mortero se mantenga trabajable.

1. Humedecer las paredes del tambor, así como las paletas de agitación.
2. Colocar los ingredientes particulados dentro del tambor (Cemento + Cementante Complementario + Aditivo en polvo + Arena), tapando herméticamente el tambor.
3. Encender la mezcladora a velocidad baja para homogeneizar los ingredientes en seco por un minuto.
4. Sin apagar la mezcladora, verter toda el agua dentro del tambor y entonces cambiar a velocidad alta, continuar el mezclado hasta completar 5 minutos acumulados.
5. Mezclar 3 minutos adicionales, que es el tiempo que consideramos apropiado para introducir y homogeneizar las fibras de acero cuando estas se vayan a utilizar.

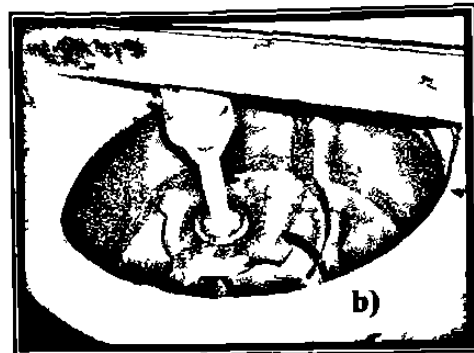


Imagen 29.- Revolvedora de contracorriente marca Eirich con capacidad de 45 litros a) vista general, b) vista del compartimiento de mezclado en donde se observa el tambor interior y el agitador.

6. Enseguida de manera continua, verter la fibra dentro del tambor. Dependiendo del volumen de fibra a dosificar, el tiempo requerido para introducir toda la fibra puede variar, ya que en esta operación se deberá evitar el que se formen bolas de fibra. Para evitar esto se deberá colocar una criba en la alimentación para disgregar mecánicamente las bolas.
7. Terminado el mezclado, de inmediato, en el menor tiempo posible se deberán fabricar los especímenes o elementos programados, ya que por las bajas relaciones A/CM que se emplean, los morteros tienden a rigidizarse con rapidez.

6.18.2.- MORTERO DEFINITIVO CON CVFM:

Siendo la única variable el volumen absoluto de la fibra, para determinar el volumen óptimo de FA, para una buena trabajabilidad y máxima resistencia, se fabricaron morteros sin y con 2, 3 y 4% de FA en volumen absoluto, habiendo podido trabajar con cualquiera de los tres sistemas cementantes seleccionamos el sistema CPO 40 + CVFM.

Para los cuatro morteros se fabricaron en total 47 especímenes cilíndricos de 7.5 cm de diámetro por 15.0 cm de altura que se curaron de manera estándar y de manera acelerada bajo el régimen CA18, para ensayarse a la compresión en base a ASTM 39/C 39M-01a los 28 y a los 7 días de edad respectivamente.

Se tomo como proporcionamiento base el reportado en la sección 6.17 (**Tabla 34**), los volúmenes absolutos de fibra que se emplearon, se dedujeron del volumen absoluto de la arena.

A los morteros se les determino la fluidez de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 6.8.2 con la placa de acero con sección de 30 por 32cm y 5.94 kg de peso que aparece en la **Imagen 26**, así como el contenido de aire atrapado con un medidor ASTM C 231-97^{e1} tipo B.

Las proporciones para el mortero de referencia y para los morteros con los tres porcentajes de fibra aparecen en la **Tabla 37**.

Tabla 37.- PROPORCIONES DE INGREDIENTES EN kg/m³, PARA LOS MORTEROS DEFINITIVOS CON CVFM, 0, 2, 3 Y 4% DE FA EN VOLUMEN ABSOLUTO Y ARENA C2 EN CONDICION SECA.

INGREDIENTES		VOLUMEN DE FIBRA, %			
		0	2	3	4
AGUA	REACCION	204	203	203	203
	ABSORCION	31	29	29	28
CPO40		776	772	773	774
SILICA FUME		194	193	193	194
ADITIVO ^{*1}		25	25	25	25
ARENA C2 ^{*2}		1,104	1,045	1,020	994
FIBRA		—	158	238	318
AIRE ATRAPADO, %		2.0	2.5	2.3	2.2
FLUIDEZ PROMEDIO ^{*3} , %		155	93	55	20

*1 Aditivo en % del peso del Cementante Total (CT) = 2.6 %

*2 Propiedades de arena; D_{ss} = 2.74, Absorción de Agua para ambas arenas = 2.81%

*3 Promedio. Medida con el procedimiento descrito en la sección 6.14 de este trabajo.

Los especímenes cilíndricos para las pruebas de compresión de los morteros con fibras, no permitieron utilizar el procedimiento de pulido o desbastado de las caras sobre las que se aplicaría la carga que se describe en la sección 6.10, ni los cojinetes o almohadillas de neopreno con dureza A70, por lo que para minimizar excentricidades en la aplicación de la carga, se hizo uso de un método Francés que consiste en sentar los especímenes sobre una capa delgada de arena sílica dentro de un plato metálico para compensar las irregularidades en las caras del espécimen, la cual se compacta por vibrado y se sella con parafina para confinar la arena, para este fin se empleó la arena sílica F40. En este procedimiento, los cilindros deberán estar alineados perpendicularmente con la superficie del plato metálico. Este método fue desarrollado por Boulay, una fotografía de un aparato comercial aparece en la **Imagen 30**.

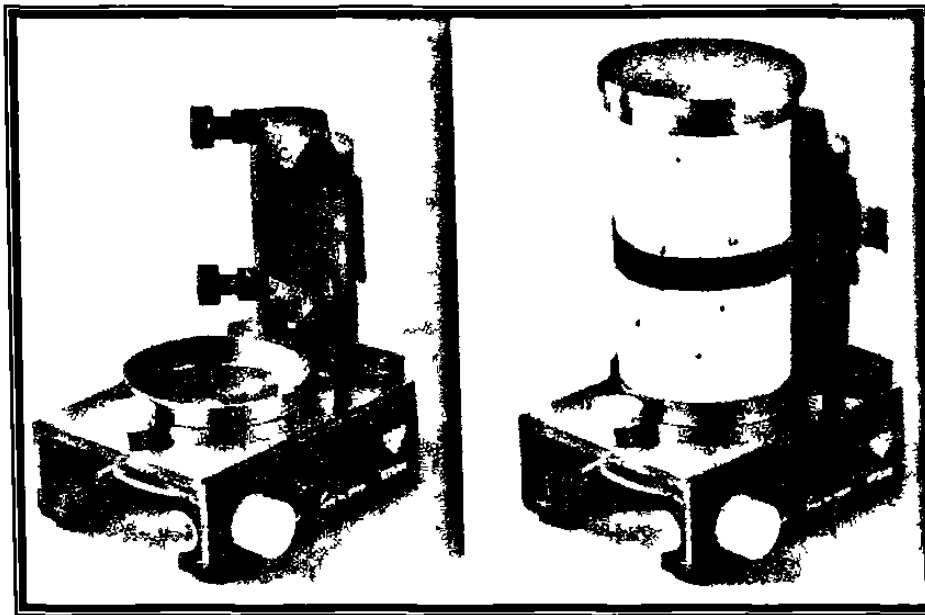


Imagen 30.- Equipo utilizado para recapear con arena sílica las caras de los cilindros de alta resistencia (Sand Box).

En la **Tabla 38** aparecen los resultados de los ensayos a compresión, comparando los resultados del mortero sin fibra con los del mortero con 2% de fibras, observamos que el incremento en la resistencia por efecto de la presencia de las fibras para los especímenes curados de manera estándar fue de 5.3%, y para los especímenes curados de manera acelerada fue de 15.5%.

Para el mortero sin fibra el incremento en la resistencia por efecto del régimen de curado acelerado CA18 con relación al curado CE fue de 12.1%, para el mortero con 2% de fibras fue de 23.1%, para el mortero con 3% de fibras fue de 5.9% y para el mortero con 4% de fibras no hubo incremento.

Las resistencias de la **Tabla 38** muestran para los dos regimenes de curado que la resistencia aumenta con la incorporación de fibras más no con el incremento en el porcentaje de fibras. Debido a estos resultados, por lo que respecta a la resistencia, se eligió trabajar con 2% de fibras, ya que este porcentaje de FA arrojó resistencias ligeramente superiores a los morteros con 3 y 4 % de FA curados bajo el mismo régimen.

Tabla 38. RESISTENCIAS A COMPRESION^{*1} PARA LOS MORTEROS DEFINITIVOS CON CVFM Y 0, 2, 3, Y 4%, CURADOS BAJO LOS REGIMENES CE Y CA18.

REGIMEN DE CURADO	RESISTENCIAS A COMPRESION EN MPa			
	0%	2%	3%	4%
CE	74.1	78.0	89.7	91.8
CA18	83.1	96.0	95.0	94.0

*1 Promedios de 5 especímenes, en cilindros de 7.5 cm de diámetro por 15.0 cm de altura ensayados a los 28 días.

*2 Aditivo en % del peso del Cementante Total (CT) = 2.6%

6.18.3.- MORTEROS DEFINITIVOS CON HSF Y M³:

Una vez definido el 2 % de FA en base a la resistencia a la compresión, procedimos a fabricar los morteros con HSF y M³, con y sin FA para determinar las propiedades mecánicas de Compresión, Flexión, Tensión Directa y Tensión por Compresión Diametral, para lo que se fabricaron especímenes que se curaron bajo el régimen CA18 y se ensayaron a la edad de 7 días.

Las proporciones para estos tres morteros con y sin FA en kg/m³ aparecen en la **Tabla 39**, las proporciones correspondientes en volúmenes absolutos aparecen en la **Tabla 40** y las fluideces en la **Tabla 41**. En la **Tabla 42** aparece un resumen de las fluideces y los contenidos de aire obtenidos para los morteros definitivos con 2% de FA y sin FA.

Para estudiar la Microestructura de los tres sistemas cementantes se fabricaron especímenes de pasta.

TABLA 39.- PROPORCIONES DE INGREDIENTES EN kg/m³ PARA LOS MORTEROS DEFINITIVOS CON 2% DE FA Y SIN FA.

INGREDIENTES		PROPORCIONES EN kg/m ³					
CEMENTANTE		HSF		M ³		CVFM	
FA, %		0	2	0	2	0	2
AGUA	REACCION	218	217	194	194	204	203
	ABSORCION	29	27	32	31	31	29
CPO 40		758	756	775	774	776	772
CC		189	189	194	194	194	193
ADITIVO		26	26	25	25	25	25
ARENA C2 ¹		1,013	959	1,154	1,098	1,052	1,045
FIBRA		—	156	—	159	—	158
AIRE ATRAPADO, %		4.3	4.5	2.1	2.2	2.0	2.5
FLUIDEZ PROMEDIO ² , %		147	105	154	72	155	93

*1 Propiedades de arena; D_{ss} = 2.74, Absorción de Agua para ambas arenas = 2.81%

*2 Promedio. Medida con el procedimiento descrito en la sección 6.14 de este trabajo.

TABLA 40.- PROPORCIONES DE INGREDIENTES EN VOLUMENES ABSOLUTOS PARA LOS MORTEROS DEFINITIVOS CON 2% DE FA Y SIN FA.

INGREDIENTES	PROPORCIONES EN LITROS					
CEMENTANTE	HSF		M ³		CVFM	
FA, %	0	2	0	2	0	2
AGUA	218	217	194	194	204	203
CPO 40	248	247	253	253	253	252
CC	87	87	76	76	85	85
ADITIVO	24	24	23	23	23	23
ARENA	380	360	433	412	415	392
FIBRA	—	20	—	20	—	20
AIRE	43	45	21	22	20	25
CEMENTANTE	335	334	329	329	338	337
PASTA	618	618	567	568	585	588
CC/CM	0.26	0.26	0.23	0.23	0.25	0.25
A/CM	0.65	0.65	0.59	0.59	0.60	0.60

Tabla 41.- FLUIDECES Y CONTENIDOS DE AIRE OBTENIDOS EN DIFERENTES BACHADAS PARA LOS MORTEROS DEFINITIVOS CON HSF, M³ Y CVFM CON Y SIN FIBRA DE ACERO

MORTEROS DEFINITIVOS SIN FIBRAS																				
CEMENTANTE	HSF				M ³				CVFM											
A/CM	0.23				0.20				0.21											
ADITIVO, %	2.75				2.60				2.60											
FLUIDEZ*1	cm	24.6	25.1	25.2	25.0	25.0	26.2	26.6	25.3	26.1	24.8	25.4	25.8	25.1	25.1					
	%	14.2	147	142	146	146	158	161	149	156	144	150	154	161	147					
AIRE*3, %	4.0				5.0				4.0				1.4							
MORTEROS DEFINITIVOS CON FIBRAS																				
CEMENTANTE	HSF				M ³				CVFM											
A/CM	0.23				0.20				0.21											
ADITIVO, %	2.75				2.60				2.60											
FLUIDEZ*1	cm	21.0	21.0	19.9	21.4	17.6	17.4	20.2	19.9	18.9	17.8	14.8	14.7	12.8	12.1	11.8				
	%	108	107	96	110	73	71	98	96	86	75	45	45	25	19	16				
FIBRA, %*2	2.0				2.0				2.0			3.0			4.0					
AIRE*3, %	4.4				4.5				2.5		2.5		2.1		2.5		2.0		2.3	

*1 Medida con el procedimiento descrito en la sección 14 de este trabajo.

*2 % de Fibra en Volumen Absoluto

*3 Determinado con Medidor Tipo B de acuerdo a ASTM C 231-97*1

TABLA 42.- RESUMEN DE FLUIDECES Y CONTENIDOS DE AIRE PARA LOS MORTEROS CON Y SIN FA, PARA LOS CC HSF, M³ Y CVFM.

SILICA FUME DE HELKEM (A/CM = 0.23; ADITIVO = 2.75%*)					
PARAMETRO		CONTENIDO DE FIBRA, %			
		0		2	
FLUIDEZ, %	RANGO	142-152		96 - 110	
	PROMEDIO	144		105	
AIRE ATRAPADO, %	RANGO	4.0 -5.0		4.4 - 4.5	
	PROMEDIO	4.5		4.5	
CENIZA VOLANTE REFINADA MICRON³ DE BORAL (A/CM = 0.20; ADITIVO = 2.60%*)					
PARAMETRO		CONTENIDO DE FIBRA, %			
		0		2	
FLUIDEZ, %	RANGO	146 - 161		71 - 73	
	PROMEDIO	154		72	
AIRE ATRAPADO, %	RANGO	1.9 - 2.3		2.1 - 2.3	
	PROMEDIO	2.1		2.2	
CENIZA VOLANTE FINA DE MICARE (A/CM = 0.21; ADITIVO = 2.60%*)					
PARAMETRO		CONTENIDO DE FIBRA, %			
		0	2	3	4
FLUIDEZ, %	RANGO	144 - 161	86 - 98	45 - 75	16 - 25
	PROMEDIO	153	93	55	20
AIRE ATRAPADO, %	RANGO	1.4 - 2.5	—	2.1 - 2.5	2.0 - 2.3
	PROMEDIO	2.0	2.5	2.3	2.2

* % en masa del Cementante Total

6.19.- COSTOS ESTIMADOS:

En la **Tabla 43** aparecen los costos estimados para los morteros definitivos con y sin fibra. Para los morteros sin FA, el costo del mortero con HSF fue el que resulto mas alto, 18 % y 90 % mas caro que los morteros con M^3 y CVFM respectivamente y para los morteros con 2 % de FA 9.0 % y 37 % mas caro que los morteros con M^3 y CVFM respectivamente.

El mortero con M^3 resulto 61 % y 26 % mas caro que el mortero con CVFM sin y con FA respectivamente.

Para el 2 % de FA empleado para reforzar los compuestos, el ingrediente que resulto mas caro fue precisamente la fibra. El costo de este ingrediente representa el 42, 46 y 58 % del costo del compuesto/ m^3 para los morteros con HSF, M^3 y CVFM.

Para un tipo de cambio de 10 pesos por dólar americano (USD), el costo del compuesto con HSF sin fibra resulta de \$ 1,098 USD/ m^3 y con fibra de \$ 1,871 USD/ m^3 . EL costo del compuesto con fibra resulto muy superior al costo estimado para el RPC usado para la construcción de un puente peatonal en Canadá, el cual fue de \$ 1,000 USD/ m^3 [58] .

TABLA 43.- COSTOS ESTIMADOS PARA LOS MORTEROS DEFINITIVOS CON 2% DE FA Y SIN FA E INCREMENTO EN EL COSTO POR LA ADICION DE FA.

INGREDIENTES	COSTOS EN PESOS (%)							
	HSF		M ³		CVFM		CVFM	
FA, %	0	2	0	2	0	2	0	2
AGUA	1 (0)	1 (0)	1 (0)	1 (0)	1 (0)	1 (0)	1 (0)	1 (0)
CPO 40	1,046 (10)	1,043 (6)	1,070 (11)	1,068 (6)	1,071 (18)	1,065 (7)	1,071 (18)	1,065 (7)
CVFM	5,216 (48)	5,216 (28)	3,492 (41)	3,492 (20)	69 (1)	69 (1)	69 (1)	69 (1)
ADITIVO	3,510 (31)	3,510 (18)	3,375 (35)	3,375 (20)	3,375 (59)	3,375 (25)	3,375 (59)	3,375 (25)
ARENA	1,205 (11)	1,142 (6)	1,373 (13)	1,307 (8)	1,252 (22)	1,243 (9)	1,252 (22)	1,243 (9)
FIBRA		7,800 (42)		7,950 (46)		7,900 (58)		7,900 (58)
TOTAL	10,978 (100)	18,712 (100)	9,311 (100)	17,193 (100)	5,857 (100)	13,653 (100)	5,857 (100)	13,653 (100)
INCREMENTO, %		70		85		137		137

* Costos Unitarios en Pesos (Smx)/Tonelada:
 Agua = 5; CPO 40 = 1,380; HSF = 27,600; M³ = 18,000; CVFM = 355; EPC = 135,000; Arena C2 = 1,190; FIBRA = 50,000.

6.20.- ENSAYES PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL COMPUESTO EN ESTADO ENDURECIDO:

Para determinar la **Resistencia a la Compresión** se fabricaron 42 especímenes cilíndricos de 7.5 cm de diámetro por 15.0 cm de altura, que se ensayaron siguiendo el procedimiento descrito en ASTM C 39/C 39M-01. En la **Imagen 31** aparece un espécimen durante el ensaye y el modo de falla típico en especímenes sin FA.

Para determinar la **Resistencia a la Flexión** se fabricaron 42 especímenes prismáticos con sección transversal de 5.0 X 5.0 cm y una longitud de 50.0 cm y se ensayaron siguiendo el procedimiento descrito en ASTM C 78-02. En la **Imagen 32** se ilustra el ensaye de estos especímenes.

Para determinar la **Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral**, se fabricaron 42 especímenes cilíndricos de 7.5 cm de diámetro por 15.0 cm de altura, los cuales se ensayaron siguiendo el procedimiento descrito en ASTM C 496-96. En la **Imagen 33** se ilustra el ensaye de estos especímenes.

Para determinar la **Resistencia a la Tension Directa**, se fabricaron 42 briquetas de 50 cm de longitud y sección de prueba de 5.0 por 5.0 cm como la que se muestra en en la **Imagen 34** y en la **Figura 5**. El ensaye de estos especímenes se hizo empleando los accesorios que aparecen en la **Imagen 35**, y la velocidad de aplicación de la carga que se empleo fue de 600 kgf/minuto.

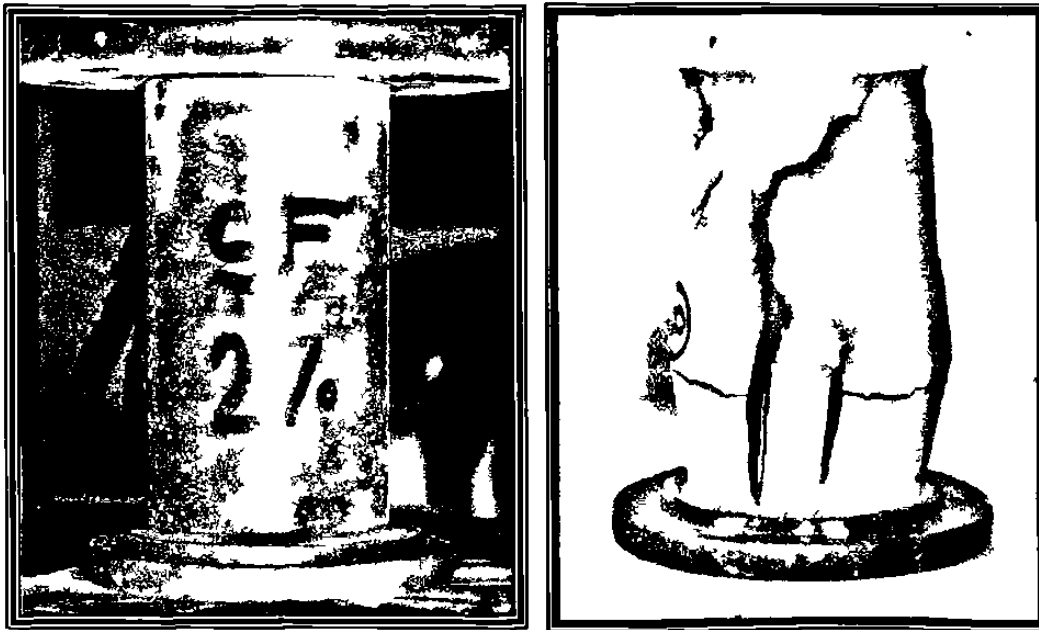


Imagen 31.- a) Ensaye a compresión de un cilindro de 7.5 x 15.0 cm de diámetro del mortero definitivo con HSF con 2% de Fa. b) Modo de falla de un espécimen de mortero definitivo con M³ sin FA.

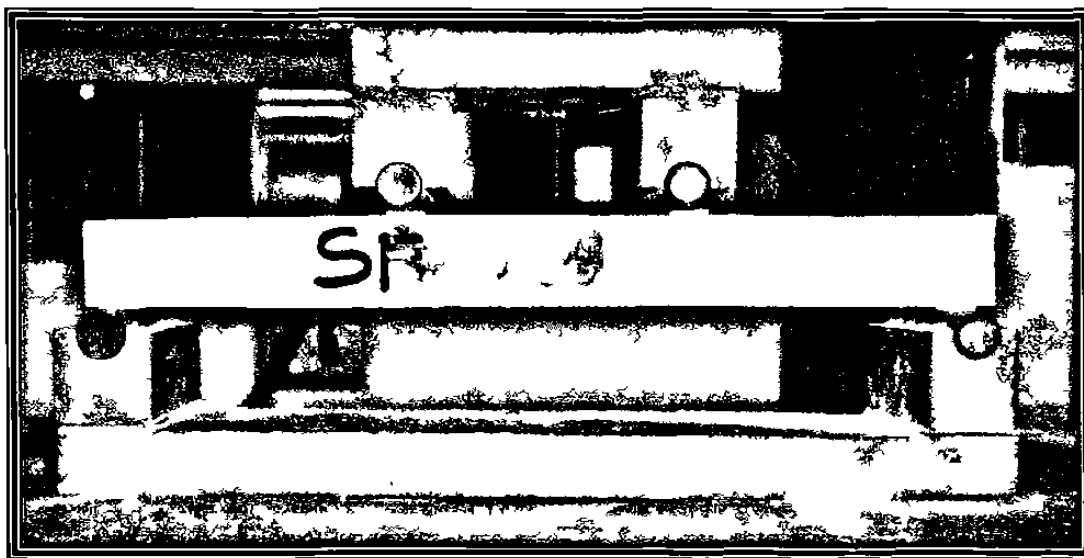


Imagen 32.- Ensaye a flexión de una viga de 5 x 5 x 50 cm del mortero definitivo de HSF con 2% de FA.

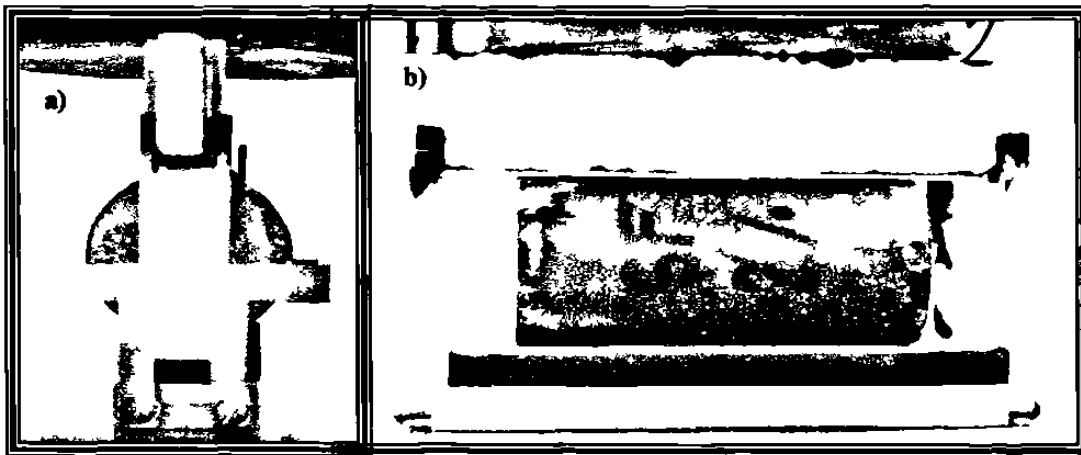


Imagen 33.- Ensaye a Tensión por Compresión Diametral (TCD) a un espécimen cilíndrico de 7.5 cm de diámetro con una relación de esbeltez de 2. a) Vista transversal b) vista longitudinal.

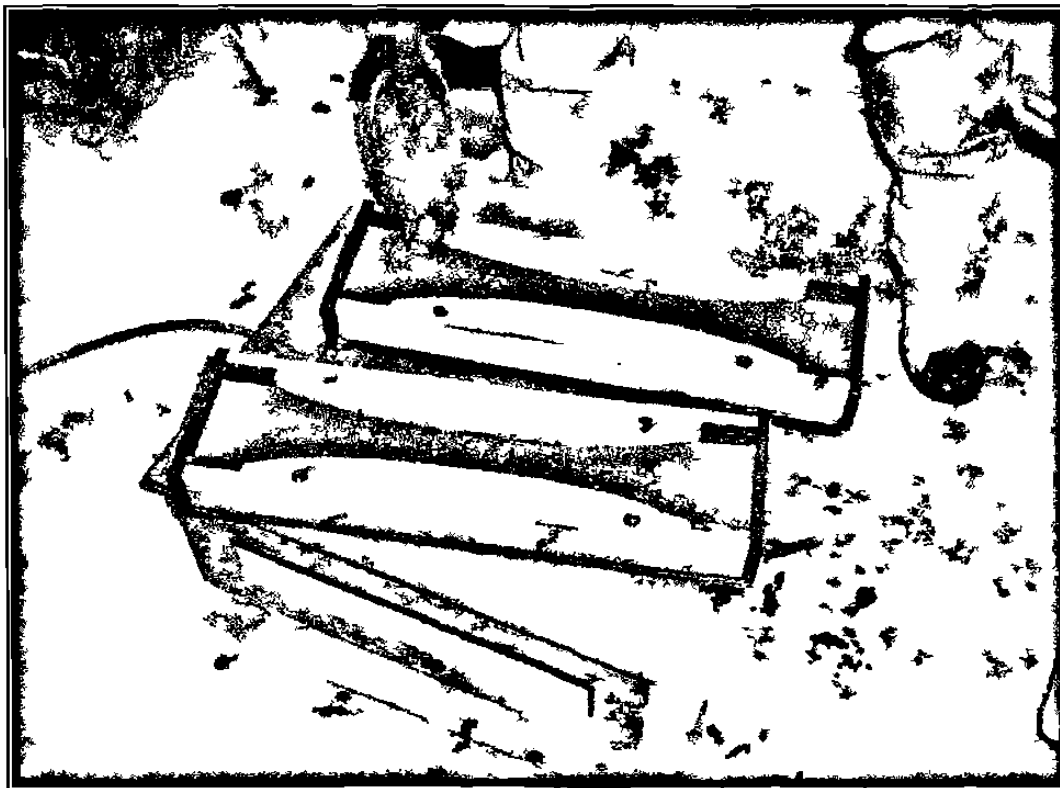


Imagen 34.- Fabricación de briquetas para ensayos de Tensión Directa. Durante este proceso el mortero definitivo con M^3 y 2% de FA presento una consistencia muy cohesiva.



Imagen 35.- Ensayo de tensión directa a una briqueta del mortero definitivo con M^3 y 2% de FA con las dimensiones que aparecen en la.

Todos los ensayos se hicieron en una Maquina Universal Tinius Olsen modelo Súper L 400, el resumen las resistencias, los correspondientes coeficientes de variación y los incrementos en resistencia por efecto de la incorporación de las fibras en los especímenes curados de manera acelerada aparecen en la **Tabla 44**.

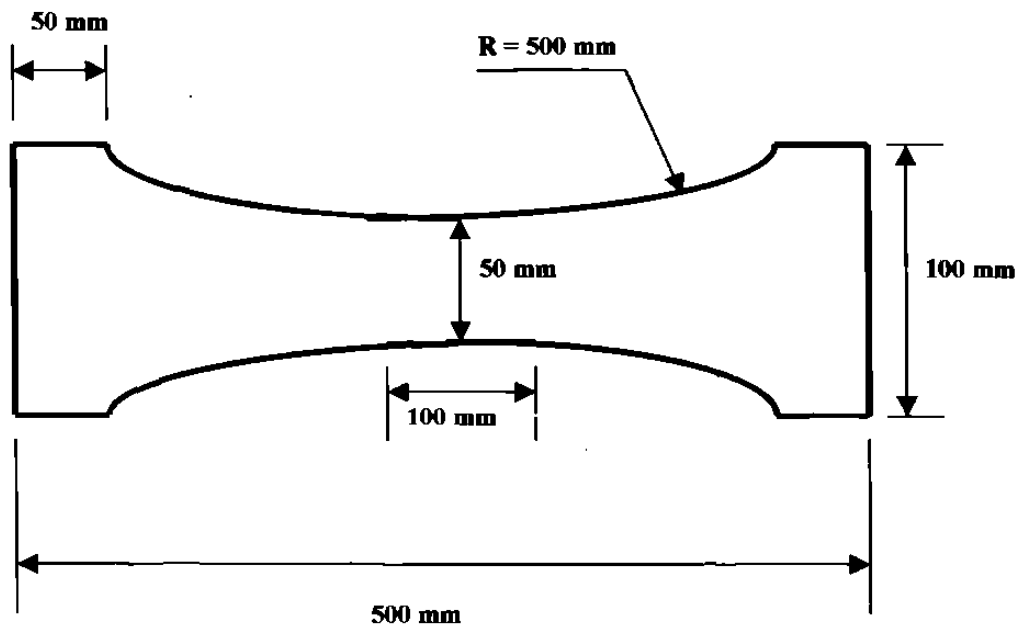


Figura 5.- Dimensiones de las Briquetas con espesor de 50 mm que se fabricaron para las pruebas de Tensión Directa.

TABLA 44.- RESULTADOS DE PRUEBAS MACANICAS, COEFICIENTES DE VARIACION CORRESPONDIENTES E INCREMENTO DE RESISTENCIA POR EFECTO DE LA INCORPORACION DE 2% DE FA PARA LOS MORTEROS DEFINITIVOS CON 0% Y 2% DE FA EN VOLUMEMEN. ESPECIMENES CURADOS DE MANERA ACELERADA BAJO EL REGIMEN CA18 Y ENSAYADOA A LOS 7 DIAS DE EDAD.

PRUEBA	RESISTENCIAS MPa (COEF. DE VARIACION %) {INCREMENTO %}						
	HSF			M3		CVFM	
	0%	2%	2%CE	0%	2%	0%	2%
C	77.6 (8.4)	90.1 (1.2) {16.1}	80.2 (8.1)	75.2 (16.0)	91.4 (5.6) {21.5}	63.2 (17.2)	96.0 (4.0) {56.3}
TD	3.7 (22.1)	6.4 (17.7) {73.0}	5.2 (14.7)	4.1 (34.2)	6.6 (8.4) {61.0}	3.7 (40.1)	5.3 (5.8) {43.2}
F	11.1 (5.9)	16.9 (6.0) {52.3}	15.4 (6.7)	11.8 (10.2)	18.5 (5.2) {56.8}	12.7 (3.2)	19.8 (15.7) {55.9}
TCD	6.0 (8.7)	13.7 (6.7) {128.3}	12.5 (10)	6.6 (11.2)	14.2 (2.8) {115.2}	6.1 (19.7)	16.6 (10.4) {172.1}

CE = serie curada de manera estándar a 23 grados centígrados

C = Compresión

TD = Tensión Directa

F = Flexión

TCD = Tensión por Compresión Diametral

6.20.1.- COMENTARIOS A LOS RESULTADOS:

Al comparar las resistencias a compresión de los morteros sin fibras para los tres CC, el mortero con HSF fue el que arrojó la mayor resistencia (77.6 Mpa) y el que arrojó el valor más bajo fue el CVFM (63.2 Mpa), en otras palabras el M³ y el CVFM arrojaron resistencias inferiores al mortero con HSF en 3% y 19% respectivamente, mas sin embargo comparando los morteros con 2% de FA para los tres CC, el mortero con CVFM (96.0 Mpa) arrojó una resistencia promedio superior a los morteros con HSF (90.1 Mpa) y M³ (91.4 Mpa), esto representa un incremento de 6.5% con relación al mortero con HSF y de 5.0% con relación al mortero con M³.

De los cuatro diferentes ensayos mecánicos los que presentaron mayor coeficiente de variación fueron los de Tensión Directa y en particular los del mortero con CVFM sin fibra. Para los tres ensayos restantes, en la mayoría de los casos los coeficientes fueron significativamente menores.

Por otro lado al comparar las resistencias a compresión de los morteros para los tres CC, el que presentó un mayor incremento por efecto de la incorporación de 2% de FA con relación a su correspondiente sin FA fue el mortero con CVFM, que arrojó un incremento de 51.8% seguido por el mortero con M³ con 21.5% y el que presentó el menor incremento fue el HSF con 16.1%.

Para el mortero con HSF y 2% de FA, se fabricaron dos series que se curaron bajo regímenes de curado diferentes, una se curó de manera acelerada bajo el régimen de curado CA18 y la otra de manera estándar (CE), los resultados de resistencia a compresión fueron 90.1 Mpa para el CA18 y 80.2 para el CE, lo que representa una diferencia de 12% a favor de la serie curada de manera acelerada por el efecto mismo del curado acelerado con humedad a 90°C. Los resultados de los ensayos de Tensión Directa, de Flexión y de Tensión por Compresión Diametral, de los especímenes curados

bajo el régimen CA18, también arrojaron resistencias superiores al los curados bajo el régimen CE en 23, 10 y 10% respectivamente.

En términos generales para los tres morteros definitivos, la resistencia a la flexión promedio representa el 17% para el compuesto sin fibras con relación a la resistencia a la compresión promedio.

Considerando que el HSF es el CC que se ha estado usando para la producción de estos compuestos, de acuerdo a los resultados obtenidos en las diferentes pruebas mecánicas, los CC M³ y CVFM, representan una alternativa viable para la producción de estos compuestos, ya que las resistencias obtenidas para estos dos CC fueron similares a los obtenidos con el HSF.

6.21.- DENSIDADES Y COSTOS ESTIMADOS POR TONELADA PARA LOS MORTEROS DEFINITIVOS EN ESTADO ENDURECIDO:

Para verificar el grado de densificación logrado en cada uno de los tres morteros definitivos, en la **Tabla 45** aparecen las densidades que se les determinaron a los morteros con y sin fibras siguiendo los procedimientos descritos en el método estándar ASTM C 642-97 (Estándar Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete).

Para el mismo volumen de FA, de estos resultados podemos comentar que como se esperaba, en la densidad del compuesto se refleja la densidad del CC (Densidades; HSF = 2.18, M³ = 2.56 y CVFM = 2.27), ya que el compuesto con mayor densidad es el que tiene el CC con mayor densidad (M³) y viceversa (HSF).

En cuanto a los costos por tonelada de compuesto, los compuestos reforzados con M³ y CVFM resultaron 12 y 29 % mas económicos que su similar fabricado con HSF, los cuales son porcentajes que en conjunto con los resultados de las pruebas mecánicas,

refuerzan la viabilidad del potencial uso de estos CC en la producción de estos compuestos.

Cuando la resistencia a la compresión y la durabilidad son factores clave en el diseño de una estructura, por la ductilidad y las resistencias que estos compuestos pueden llegar a presentar tanto a compresión como a flexión, para muchas diferentes aplicaciones algunos investigadores los comparan con el acero estructural. Si de manera conservadora consideramos un costo de \$ 800 USD/Tonelada para el acero estructural, para aplicaciones en las que por sus propiedades ambos materiales podrían utilizarse indistintamente, por economía los Compuestos Densificados-Reforzados representan un serio adversario para el acero, ya que los costos de los compuestos reforzados definitivos que produjimos representan el 95, 83 y 68% del costo del acero estructural para los compuestos reforzados con HSF, M³ y CVFM respectivamente.

TABLA 45.- DENSIDADES DETERMINADAS DE ACUERDO AL METODO ESTANDAR ASTM C 642 Y COSTOS/TONELADA ESTIMADOS PARA LOS MORTEROS DEFINITIVOS.

CC	Volumen de Fibra %	Densidad Aparente g/cm ³	COSTOS ESTIMADOS*	
			PESOS/T	USD/T
HSF	0	2.35	4,671	467
	2	2.46	7,606	761
M ³	0	2.44	3,816	382
	2	2.58	6,664	666
CVFM	0	2.41	2,393	239
	2	2.52	5,418	542
	3	2.56	-----	-----
	4	2.71	-----	-----

* Considerando un tipo de cambio de 10 Pesos Mexicanos/Dólar Americano (USD).

6.22.- MICROESTRUCTURA DE LOS MORTEROS ENDURECIDOS POR MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO:

En las Imágenes de la 36 a la 38, aparecen las microfotografías de los tres morteros definitivos obtenidas por medio de microscopia electrónica de barrido. En todos los casos se aprecia una matriz densa con poca porosidad.

En la Imagen 36 aparece una partícula de arena sílica con aristas redondeadas embebida en la matriz cementante con HSF, la superficie de la partícula se aprecia muy lisa, esta característica superficial repercute en una pobre adherencia entre pasta y agregado.

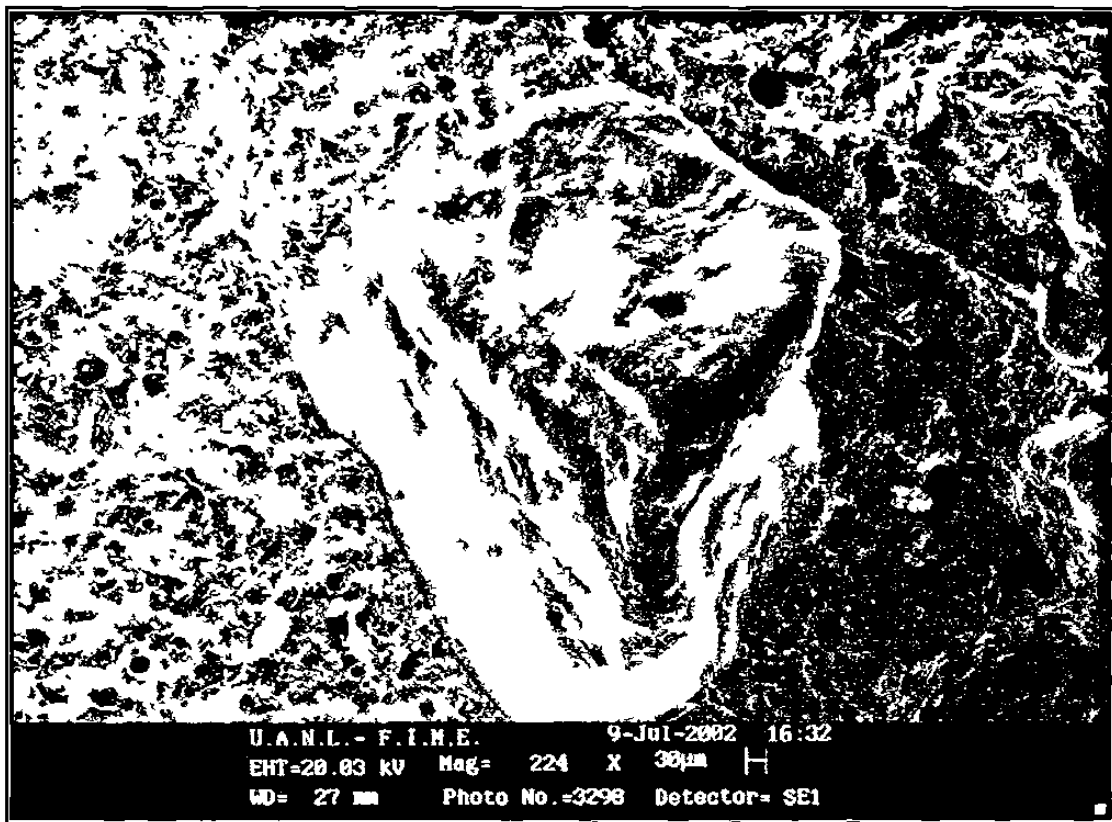


Imagen 36.- Partícula De arena sílica de aristas redondeadas embebida en el mortero definitivo con HSF, por los liso de la superficie de estas partículas la falla en la interfase pasta-arena se dio por adherencia.

En la **Imagen 37** se observa la formación de Etringita dentro de un poro en el mortero definitivo con M^3 , y en la **Imagen 38** observamos la interfase entre la pasta y el agregado de Andesita (A), la densidad de la pasta es homogénea y se observan vacancias de partículas de CVFM embebidas en la matriz cementante y vacancias por desprendimiento de partículas de arena sílica .

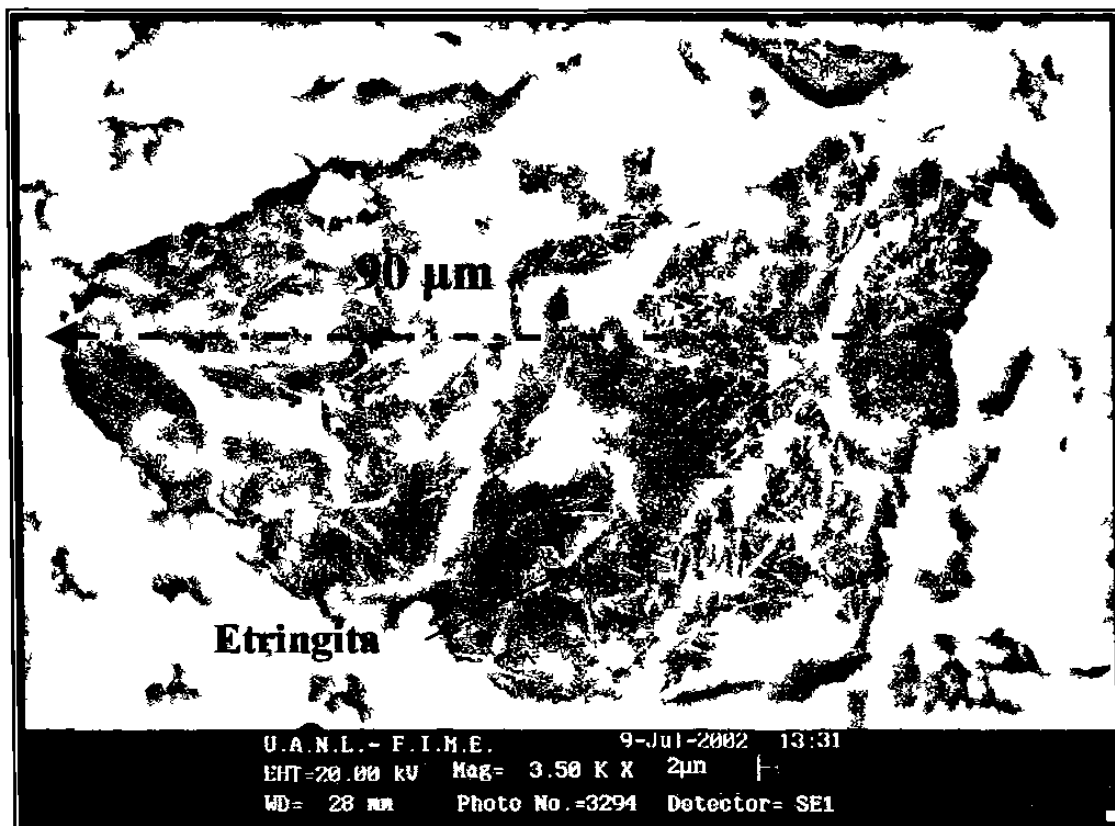


Imagen 37.- Formación de Etringita dentro de un poro en el mortero definitivo con M^3 .



Imagen 38.- Interfase (I) entre Pasta (P) y una partícula de andesita (A) en mortero definitivo con CVFM.