



Certificación ISO 9001:2000 †

Mejora en la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cactáceas

Andrés Antonio Torres Acosta
Cesar Eduardo Celis Martínez
Wilfrido Martínez Molina
María Guadalupe Lomelí González

**Publicación Técnica No. 326
Sanfandila, Qro, 2010**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Mejora en la durabilidad de materiales base
cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos
cactáceas**

Publicación Técnica No. 326
Sanfandila, Qro, 2010

Esta investigación fue realizada por el Ing. Cesar Eduardo Celis Martínez, de la Universidad Marista de Querétaro A.C., del Dr. Andrés Antonio Torres Acosta y la Ing. María Guadalupe Lomelí González, de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, y del M.A. Wilfrido Martínez Molina, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Se agradece la colaboración de la M.C. Guadalupe Evangelina Itandehui Martínez Peña, de la Universidad Marista de Querétaro A.C. durante la realización de las pruebas en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la misma Universidad.

Este proyecto fue realizado bajo los Convenios de Colaboración Específica No. IMT-Q-CC-3303 de fecha 1 de julio de 2003 y No. IMT-Q-C-23-05/CE-01-05 de fecha 3 de octubre de 2005 entre la Instituto Mexicano del Transporte y la Universidad Marista de Querétaro A.C.

Índice

Resumen		v
Abstract		vii
Resumen	Ejecutivo	ix
Capítulo 1.	Introducción	1
Capítulo 2.	Procedimiento experimental	15
Capítulo 3.	Resultados y discusión	37
Capítulo 4.	Conclusiones y recomendaciones	67
Bibliografía		69
Anexos		71
Glosario		111

Resumen

Esta investigación presenta los resultados de la caracterización de cubos de mortero fabricados con adiciones botánicas (verdes) deshidratadas de nopal y sábila (aloe vera). Ochenta y cuatro cubos de mortero fueron fabricados con estas adiciones (1%, 2% y 4% en peso del cemento) y con ellos fueron realizadas pruebas experimentales hasta un periodo de 900 días aproximadamente. Los morteros sin estas adiciones botánicas sirvieron como mezclas patrón. Las adiciones usadas de nopal y sábila se mezclaron con cemento Pórtland ordinario (CPO) en diferentes porcentajes. Para caracterizar las propiedades físicas de estas mezclas, cuatro pruebas experimentales fueron efectuadas: contenido total de vacíos; resistencia a la compresión; velocidad de pulso ultrasónico; y resistividad eléctrica húmeda. Las mezclas con adiciones de nopal incrementaron el comportamiento físico de los morteros en el tiempo. En cambio, se observaron pocas mejoras en el caso de las mezclas con reemplazo de sábila. Los descubrimientos iniciales sugieren que adicionando cantidades pequeñas de nopal, como reemplazo de cemento, puede ser una opción para mejorar las propiedades físicas de los materiales base cemento que, a su vez, mejoran su durabilidad.

Abstract

This research presents the results of the characterization of mortar cubes made with botanical additions (green) dried cactus and aloe (aloe vera). Eighty-four mortar cubes were manufactured with these additions (1%, 2% and 4% by weight of cement) and experimental tests were carried them to a period of 900 days or so. The mortars without additions served as mixtures botanical pattern. The additions used cactus and aloe vera mixed with ordinary Portland cement (OPC) in different percentages. To characterize the physical properties of these mixtures, four experimental trials were performed: total content of voids, compressive strength, ultrasonic pulse velocity and electrical resistivity wet. The mixtures with additions of nopal increased the physical behavior of the mortars in time. In contrast, little improvement was observed in the case of mixtures with replacement of aloe. Initial findings suggest that adding small amounts of cactus, as replacement of cement, may be an option to improve the physical properties of cement based materials, in turn, improve its durability.

Resumen ejecutivo

Esta investigación tiene como objetivo investigar y analizar las propiedades físicas y mecánicas de materiales base cemento con adiciones botánicas tales como el nopal y la sábila agregados de forma deshidratada, con el propósito de determinar si estas adiciones modifican favorablemente los materiales al incluirse como aditivos en el cemento Pórtland.

La selección de estas cactáceas para emplearlas como aditivos, surgió a partir del interés en los estudios de la aplicación del nopal en la pintura de cal y yesos para mejorar sus propiedades higrofóbicas. Después de haber observado las diferentes formas de distribución del nopal y en específico en forma deshidratada y en presentación de cápsulas, se optó por contactar empresas encargadas de producir nopal en polvo, y así realizar las pruebas en materiales base cemento.

La importancia del trabajo se asocia a la posibilidad de mejorar las características mecánicas y de resistencia en mezclas de materiales base cemento adicionando las adiciones botánicas ya mencionadas.

Para determinar esto, se elaboraron probetas de pasta de cemento, y después probetas de mortero para una serie de pruebas que mostrarán los cambios ocurridos en el comportamiento de las pastas de cemento y morteros ordinarios, comparado con otros, hechos con los aditivos naturales previamente mencionados, y así observar de qué forma las adiciones modificaron las propiedades comparadas con un mortero común.

Las pruebas que se realizaron a los especímenes en estudio fueron las especificadas en el manual de la Red DURAR (DURAR 1997) denominado "Descripción de Métodos de Ensayo", en donde se hicieron observaciones y comparaciones respecto a los resultados que se obtuvieron para verificar los cambios ocurridos.

Los cambios se reflejaron en las propiedades de tiempos de fraguado de la pasta; la resistencia del mortero y por tanto la porosidad del mismo, ya que para una mejor calidad en un mortero, éste deberá tener la menor cantidad de poros en si.

Para monitorear el comportamiento en las propiedades de las mezclas de mortero, se efectuaron diversas pruebas tales como porcentaje total de vacíos; resistencia a la compresión; velocidad de pulso ultrasónico; y resistividad eléctrica. Las dos primeras pruebas que se mencionan son los métodos más comunes para la determinación de la porosidad en los especímenes. Por otra parte, los ensayos de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica sirvieron para determinar de manera indirecta, la interconexión de la porosidad del material.

Una vez finalizadas las pruebas, se compararon los resultados para determinar la influencia de los aditivos botánicos en el comportamiento mecánico, de resistencia y calidad de las mezclas base cemento a fin de definir las características finales observadas en los morteros.

1 Introducción

1.1 El nopal

La 'Opuntia Ficus-Índica' que se denomina así de acuerdo con su nomenclatura binomial, es la llamada nopal, tuna o chumbera; pertenece al género Opuntia, de la familia de las cactáceas (fig. 1.1). Las funciones básicas de estas plantas se realizan por los tallos con forma de segmentos elípticos aplanados y sin espinas. En sus bordes aparecen las flores en forma de corona que se transforman en frutos denominados tunos; mismos que poseen una cáscara gruesa, espinosa, y con una pulpa abundante en semillas. Esta planta es originaria de México, donde es conocida desde tiempos prehispánicos.



Figura 1.1

Nopal en su medio natural

El cultivo del nopal contribuye a la alimentación, nutrición y salud de los seres humanos. Además se utiliza en la agroindustria alimentaria; complementa la alimentación animal; es fuente potencial de bioenergía; y ayuda a un mejor manejo del medio ambiente. Esta cactácea del género Opuntia y de la cual se conocen más de 300 especies, es originaria de Mesoamérica y hoy está difundida en todo el mundo. Al ser una planta muy noble, el nopal puede desarrollarse fácilmente; sin embargo, su crecimiento óptimo se da en las zonas áridas y semiáridas; se adapta a casi cualquier tipo de clima mientras cumpla con ciertas características básicas, tales como: buena insolación, cierta disponibilidad de agua, y que el suelo no sea salino o muy arenoso.

Presenta una gran versatilidad de adaptación a distintas zonas agroecológicas, en algunas de las cuales la agricultura enfrenta dificultades para su desarrollo (Sáenz 2006).

Una hectárea puede albergar una densidad de entre 15,000 a 22,000 pencas. Con densidades más altas, se obtienen beneficios como la protección de las plantas por sí mismas y una menor evotranspiración del suelo, dado que están más protegidas y hacen un microclima más favorable (Arid Zone Projects, 2005).

1.1.1 El nopal en Mesoamérica

En sentido estricto se considera como área de Mesoamérica a la superficie del Continente Americano ocupada y controlada por diversos grupos culturales tal como la encontraron los conquistadores españoles al inicio del siglo XVI. En la fig. 1.2 se detalla la parte de Mesoamérica situada en México (Arrieta, 2004).



Figura 1.2

Territorio mesoamericano en México (Agrupación Sierra Madre, S.C.)

El origen e historia del nopal están íntimamente relacionados con las civilizaciones más antiguas de nuestro país, pero en especial con las mesoamericanas y de manera particular, con la cultura azteca. Existen evidencias arqueológicas que permiten afirmar que las poblaciones indígenas asentadas en las zonas semiáridas de Mesoamérica, fueron las que iniciaron su cultivo de modo formal.

Los antiguos relatos hacen mención a la gran variedad de nopales que existían, así como el uso que se les daba. Al acercarse la época de fructificación de los nopales, los pobladores se alimentaban de sus frutos. Sin duda, los nopales influyeron en el asentamiento de tribus errantes que concurrían en la época de la fructificación a las zonas habitadas por estas plantas; y acababan por fijar ahí su residencia (Sáenz 2006).

La evidencia del conocimiento y uso del nopal por los primeros pobladores mexicanos se encuentra en excavaciones de Tamaulipas y Puebla. En éstas se encontraron fosilizadas semillas y cáscaras de tuna, así como fibras de pencas de nopal, con antigüedad de siete mil años (Flores-Valdez 2003).

1.1.2 Uso del nopal

Son muchos los sectores industriales que se pueden beneficiar con la explotación de los nopales, ya que esta planta es de gran ayuda para el desarrollo de diferentes tecnologías para beneficio del hombre. A continuación se mencionan algunos de estos, y la forma de explotación de este cactáceo (Sáenz 2006):

- Agroindustria de alimentos y bebidas para consumo humano (producción de diversos alimentos, bebidas alcohólicas y analcohólicas de tuna y nopalitos).
- Agroindustria de alimentos para animales (suplementos y piensos de cladodios y de desechos de la industria procesadora de tuna, como las cáscaras y semillas).
- Industria farmacéutica (protectores gástricos de extractos de mucílagos; cápsulas y tabletas de polvo de nopal).
- Industria cosmética (cremas, shampoo, lociones de cladodios)
- Industria de suplementos alimenticios (fibra y harinas de cladodios)
- Industria productora de aditivos naturales (gomas de cladodios; colorantes de la fruta)
- Sector de la construcción (compuestos ligantes de los cladodios)
- Sector energético (producción de biogás a partir de las pencas)
- Sector productor de insumos para la agricultura (productos del nopal como mejoradores del drenaje de suelos)
- Sector turismo (artesanías con base en cladodios lignificados)
- Industria textil (uso de colorantes naturales, como el carmín de cochinilla).

El nopal se usa en todas estas industrias no sólo por su fácil producción y almacenaje, sino por sus diversas propiedades (tabla 1.1).

Tabla 1.1

Información nutricional del nopal

Valor nutritivo en 100 g de peso neto de nopal fresco	
Concepto	Contenido
Porción comestible	78,00
Energía (Kcal)	27,00
Proteína (g)	1,70
Grasas (g)	0,30
Carbohidratos (g)	5,60
Calcio (mg)	93,00
Hierro (mg)	1,60
Tiamina (mg)	0,03
Riboflavina (mg)	0,06
Niacina (mg)	0,03
Ascórbico (mg)	8,00

(Mad Industrias, 1999)

1.2.1 Complemento alimenticio

En lo que respecta al valor nutricional del nopal, se puede decir que en 86 g de nopal crudo; aproximadamente hay 2,9 g de hidratos de carbono y 1,1 g de proteína; y solamente 14 Kcal. Pero su principal atractivo es que contiene una gran cantidad de fibra dietética, soluble e insoluble.

Existe una relación 30:70 de fibra soluble a insoluble. La fibra insoluble puede prevenir y aliviar el estreñimiento y las hemorroides, al mismo tiempo que previene la aparición de cáncer de colon. La fibra soluble, se ha usado en muchos padecimientos porque su presencia en el tubo digestivo retarda la absorción de nutrimentos, y hace que estos no pasen a la sangre rápidamente. También son una buena fuente de calcio, ya que en 100 g de nopales, hay aproximadamente 80 mg de calcio (Fuentes, J, 2002).

La fibra del nopal se considera en una serie de productos presentes, principalmente en el mercado mexicano; todos ellos tienen como base la harina o polvo obtenido de los cladodios del nopal. La elaboración de tabletas y cápsulas de polvo de nopal, sigue la línea de sus similares en la industria farmacéutica (Flores-Valdez, 1995).

El nopal por su parte; al igual que otras verduras, contribuye con una alta proporción de agua a la dieta, y son altamente cotizados por su contenido en fibra; forman parte de la dieta común del pueblo mexicano y están siendo ampliamente consumidos en el sur de Estados Unidos de América por la población mexicana allí residente. Esta verdura es rica en fibra dietética y su contenido es comparable al de varias frutas y hortalizas; entre ellas la espinaca, la alcachofa, la acelga, la berenjena, el brócoli, el rábano y otras. En la tabla 1.2 observamos algunos productos obtenidos a partir del nopal y algunos de sus derivados.

Las fibras que posee en mayor cantidad esta planta son concretamente la pectina, los mucílagos y gomas de efecto saciante y absorbente; su consumo antes de la comida permite reducir el aporte calórico. Su celulosa proporciona fibra indispensable para el correcto funcionamiento gastrointestinal; siendo así, la fibra deshidratada del nopal ayuda como auxiliar para estos trastornos.

Por su composición, los segmentos frescos de este cactus contienen alrededor de un 90 % de agua. Los frutos, un 12% de azúcar y 6.75% de materias nitrogenadas, además de ácidos orgánicos (alrededor del 0,10%), con un característico colorante entre rojo y anaranjado (wikipedia.org)

Los cladodios son actualmente una fuente importante de fibra, la cual se obtiene por secado y trituración. Este polvo o harina se destina tanto para la industria de alimentos como para la industria de complementos alimenticios, ligada en cierto modo a la industria farmacéutica.

Las tabletas y cápsulas de nopal se encuentran en el mercado mexicano desde hace años, y se ofrecen como un complemento para controlar la obesidad y la diabetes. Un producto existente actualmente, al cual se ha incorporado harina de nopal, es la mezcla extraída de cereal con harina de nopal para ser consumida en el desayuno.

Estos complementos que se comercializan en el mercado con fines de combatir la obesidad, la diabetes o de aumentar el consumo de fibra son en ocasiones sujeto de controversias. Es altamente deseable que el sustento científico que tienen sea cada vez más claro, por lo que es necesario continuar las investigaciones al respecto a fin de tener una mejor comprensión de su modo de acción.

1.2.2 Uso medicinal

El aprovechamiento de las propiedades curativas de las plantas es una práctica milenaria que a la fecha ha dejado de existir. El caso del nopal en México, tiene un especial significado por el papel simbólico del asentamiento de los aztecas en el lago de Texcoco, dando lugar a su imperio Tenochtitlán. Dentro de sus usos medicinales, los aztecas lo usaban para las fiebres bebiendo el jugo, el mucílago o baba del nopal. Ésta la utilizaron también para curar labios partidos; la pulpa curaba la diarrea; las espinas para la limpieza de infecciones; la fruta para el exceso de bilis; empleaban las pencas del nopal como apósito caliente para aliviar

inflamaciones, y la raíz para el tratamiento de hernia, hígado irritado, úlceras estomacales y erisipela (Pérez Sandi, 2000).

Tabla 1.2

Productos obtenidos del nopal y algunos derivados

Productos		Subproductos
Tunas	Cladodios	Tunas y cladodios
Jugos y néctares	Jugos	Aceite de las semillas
Mermeladas, gel y jaleas	Encurtidos	Mucílagos de los cladodios
Fruta y láminas deshidratadas	Mermeladas	Pigmentos de las cáscaras
Edulcorantes	Harinas	Fibra dietaria de los cladodios
Alcoholes, vinos y vinagres	Alcohol	Pasta forrajera de la cáscara
Fruta enlatada	Confites	
Fruta y pulpa congelada	Salsas	

(Sáenz, 2006).

El nopal ha cobrado una particular importancia en la Medicina por sus propiedades hipoglucemiantes, es decir, controla los niveles excesivos de azúcar en el cuerpo.

Los estudios realizados por el Instituto Mexicano del Seguro Social han mostrado que la administración en ayunas de cladodios de nopal a individuos sanos y diabéticos, causa disminución de glucosa.

En individuos sanos produce menor elevación de glucosa y de la insulina sanguínea. No ha sido posible determinar el principio activo del nopal que tiene acción sobre el metabolismo de los glúcidos, aunque la reducción de glucosa e insulina observada en estos estudios ha llevado a sospechar que existe una mayor sensibilidad a la insulina inducida por la ingestión del nopal (JR Herbaline, 2004).

Se cree que la función del nopal sobre la glucosa se debe a que contiene una sustancia identificada como polisacáridos aislados que secuestran las moléculas de glucosa; de tal modo que la insulina, si es mínima, sea suficiente para regular los niveles de azúcar (Linopal Plus, 2006-2007).

Por otra parte, la pulpa deshidratada del nopal da por resultado un material fibroso cuya función medicinal se basa, como cualquier otra fibra natural, en favorecer el

proceso digestivo, reducir el riesgo de problemas gastrointestinales, y ayudar en los tratamientos contra la obesidad.

Adicionalmente, la fibra disminuye el nivel de lipoproteínas de baja densidad, que son las que se acumulan en las arterias causando problemas de arteriosclerosis. También disminuye el colesterol en la sangre al interferir en la absorción de grasas que realizan los intestinos (JR Herbaline, 2004).

Éste se utiliza también para el tratamiento de enfermedades como úlceras, gastritis y otros problemas digestivos; por lo cual, es consumido mediante cápsulas, comprimidos o en polvo. En la fig. 1.3 observamos una serie de productos que actualmente están circulando en el mercado con fines medicinales y alimenticios.



Figura 1.3

Productos hechos a base de nopal

Recientes estudios científicos señalan que la glucoproteína mucina contenida en sus tejidos mitiga irritaciones y es antiinflamatoria. Sus aportaciones medicinales son múltiples: para la fiebre se bebe su jugo; la pulpa cura la diarrea; y su fruta se puede utilizar para el exceso de bilis. De manera externa se utiliza para irritaciones de la piel y acné.

1.2.3 Alimento de ganado

El uso del nopal ha tenido mayor relevancia en las regiones desérticas y semidesérticas del norte de México, ya que es común observar cambios extremos en temperaturas y periodos prolongados de sequía, lo que ocasiona escasez de alimento herbáceo que consume el ganado, o también llamado forraje (Fuentes *et al*, 2002).

Bajo estas condiciones, una alternativa para alimentar al ganado bovino, productor de carne y leche, caprino y ovino, es el nopal; cuya información nutricional muestra un alto contenido de agua, mediano contenido de energía, alto contenido

de calcio y potasio, mediano contenido de fibra, y bajo contenido en proteína y fósforo (Agricultura 21, 2000).

Algunas de las características que han hecho del nopal un alimento importante para el ganado bovino, caprino, ovino, equino, asnal y fauna silvestre en las zonas áridas y semiáridas del país son su alta digestibilidad y palatabilidad (*sic*), que ofrece facilidades como manejo accesible, resistencia al transporte, abundancia, tasa de recuperación a la cosecha, y productividad.

Las características del nopal hacen difícil que el ganado en pastoreo pueda acceder a la utilización de este forraje; por lo que los productores de ganado, han creado diversas prácticas para hacer el alimento accesible para los animales. Tradicionalmente, el nopal ha sido utilizado quemando la planta completamente en el campo, para que el animal se acerque a ella y pueda cortar los pedazos de la planta por si mismo.

Otra forma de empleo ha sido cortando las pencas, que posteriormente son quemadas y picadas y después ofrecidas al ganado. Esta práctica es útil para el ganado en establo. Algunos productores pecuarios sólo cortan las orillas de las pencas para hacer más apetitoso el nopal para el ganado que pastorea.

Se ha observado también nopal ensilado, que con el proceso de fermentación y la producción de ácidos hace que se suavicen las espinas; por tanto, ya no hay necesidad de cortar y quemarlas para que el ganado las pueda consumir. Además, durante este proceso se da la oportunidad de agregar compuestos en los que el nopal es deficiente, como urea o sulfato de amonio para incrementar el contenido de proteína (Teorema Ambiental, 2004).

1.2.4 Construcción

Los usos tradicionales que tiene el nopal y sus derivados, además del valor que tiene como alimento en forma directa, se suma su aplicación en rubros tan ajenos a los anteriores, como el de la construcción por sus propiedades aglutinantes en adobes y pinturas, o anticorrosivos, como infiltradores de suelo entre otros.

En México hay una larga historia del uso del mucílago de nopal en combinación con cal: aumenta sus propiedades adhesivas y mejora su repelencia al agua. Tradicionalmente, se ha empleado de modo similar al yeso en paredes de adobe y de ladrillo; y también como una barrera al agua en el estuco. A partir del jugo de nopal, se puede fabricar pintura que actúa como impermeabilizante (Fig., 1.4), el cual puede ser aplicado a cualquier construcción para protegerla. En caso de aplicarse a una vivienda, este impermeabilizante hecho a base de nopal, protege la construcción del frío, la humedad del ambiente, del agua y de los insectos (Cárdenas, *et al.* 2002).



Figura 1.4

Pintura hecha con nopal

El mortero de cal adicionado con baba de nopal se utiliza también para restaurar y proteger edificios históricos debido a su funcionamiento mejorado contra la penetración del agua y agrietamientos. Se sabe que el uso del cemento en la restauración de edificios históricos tiene efectos perjudiciales porque es demasiado duro e incompatible con el adobe. El empleo de este material restringe la transpiración, aumentando el riesgo del daño causado en humedad.

Por tanto, los morteros para el uso en edificios históricos o los monumentos se derivan de la masilla de la cal y revestimiento de sal que incorporan generalmente materiales puzolánicos. Estos morteros tienen una alta resistencia mecánica, una protección impermeable creciente, y características antihongos.

La baba del nopal se agrega como adherente orgánico para que evite que el mortero se seque demasiado rápido, y ayuda a retener la humedad que la mezcla necesita para fijar correctamente, transportando el CO_2 de la atmósfera que combinado con la cal, forma una piedra caliza artificial (Cárdenas, *et al.* 2002).

Últimamente se estudia la acción anticorrosiva del mucílago, y también se continúan los estudios acerca de la utilidad que prestan las pencas como adherentes de pinturas y clarificantes de agua.

1.3 Proceso de deshidratación

Existen muchas empresas productoras de harina de nopal, pero generalmente sus procesos son confidenciales. Básicamente, el proceso de deshidratación del nopal consiste en el secado, trituración y pulverización.

Antes de entrar a la línea de producción, los nopales se seleccionan, descartando los dañados o atacados por insectos; enseguida se lavan, colocándolos en un tanque con agua clorada (30-50 ppm), y se pasan a una mesa de acero inoxidable para cortarlos manualmente en tiras o láminas (fig. 1.5). Esta operación se puede

hacer también en forma mecánica, utilizando, por ejemplo, una cortadora de fiambres o un equipo similar.



Figuras 1.5, 1.6, 1.7 y 1.8

Proceso de deshidratación

Las pencas cortadas se colocan en bandejas y se llevan a un túnel deshidratador de cabina comenzando por un secado a 80°C durante 2 h, y luego a 70°C hasta llegar a una humedad de 7% - 10%. En la fig. 1.6 se observan las tiras de nopal introduciéndose a un horno para ser deshidratadas.

Las pencas deshidratadas, posteriormente se someten a una molienda; para lo cual se puede utilizar un molino de cuchillas (fig. 1.7) o de muelas, y se pulverizan hasta obtener un polvo fino, como se muestra en la fig. 1.8.

La granulometría depende del destino final que tenga el producto.

El polvo de nopal se envasa en recipientes impermeables al vapor de agua, y se almacena en ambiente de humedad relativa baja (60%HR – 65%HR) y libre de insectos.

1.4 La sábila

Es originaria de África y sur de Arabia, perteneciente a la familia de las Liliácea Asphodelaceae. Es una planta conocida a nivel mundial por sus beneficios a la salud. Su empleo medicinal se remonta a los orígenes de la humanidad. Fue usada por los griegos, romanos, egipcios, hindúes y chinos; sin embargo, todas las civilizaciones del pasado apreciaron los valores curativos de la esta planta,

dándole diversas aplicaciones que en la actualidad se han continuado con su respectiva mejora.

Esta planta crece en regiones tropicales y subtropicales, aunque también se pueden encontrar en regiones desérticas y semidesérticas (figura 1.9), ya que soporta temperaturas muy altas y es muy resistente a la sequía, aunque si se desea utilizar el gel de las hojas, debe regarse a menudo. Los sitios de plantación, preferentemente deben seleccionarse en lugares libres de heladas; suelos francos, profundos, ricos en materia orgánica y con buen drenaje. Las plantaciones de temporal se establecen en el suelo húmedo en época de lluvias, con fecha límite de trasplante el 15 de agosto. En plantaciones comerciales los rendimientos son variables, pues dependen de la densidad de plantación, así como de la adecuada aplicación de las prácticas de manejo y de las condiciones ambientales (Sábila, planta milagrosa, 2005). La sábila en condiciones de riego presenta cuatro posibles periodos de corte anualmente, siendo estos en los meses de marzo, junio, agosto y noviembre.



Figura 1.9

Sábila en su medio natural

1.5 Usos y aplicaciones

Su nombre científico es aloe vera, y es una planta que posee innumerables propiedades regenerativas, curativas, humectantes, lubricantes y nutritivas.

La sábila es por excelencia una planta medicinal. Muy conocida en México con el nombre de sábila. Actualmente se ha convertido en una industria importante. Algunas empresas que la procesan, elaboran productos de consumo general, donde se incluyen cremas, shampoo, enjuagues, lociones y bronceadores, entre algunos otros de uso medicinal o nutricional (fig. 1.10).



Figura 1.10

Productos a base de la sábila

Dentro de sus cualidades medicinales se encuentra la protección y regeneración de la dermis; disuelve los depósitos grasos que obstruyen los poros, e hidrata a profundidad. Es muy útil para el acné; contribuye a evitar las arrugas, y reduce el tamaño de los poros. Se emplea también como purgante y desinflamante.

El gel húmedo dentro de las hojas de sábila se usa para tratar quemaduras, incluso quemaduras de sol y cortadas: aplicado sobre la piel se obtiene alivio inmediato. La inflamación de la piel puede ocurrir en individuos sensibles. El gel es ligeramente tóxico en caso de ser ingerido (Sábila, planta milagrosa, 2005).

Después de diversos estudios y pruebas de laboratorio realizados a esta planta, se encontró una diversa gama de propiedades como las mencionadas, además de otras tantas que se muestran en la tabla 1.3.

TABLA 1.3
Propiedades de la sábila

Propiedad	Descripción
Inhibidora del dolor	Sus principios activos tienen una notable capacidad de penetración hasta los planos más profundos de la piel, inhibiendo y bloqueando las fibras nerviosas periféricas (receptores de dolor) interrumpiendo el modo reversible a la conducción de los impulsos.
Antiinflamatorio	Tiene una acción similar a la de los esteroides, como la cortisona; reduce el dolor por poseer una poderosa fuerza antiinflamatoria, pero sin sus efectos nocivos colaterales.
Coagulante	Por contener calcio, potasio y celulosa, provoca en las lesiones la formación de una red de fibras que aseguran las plaquetas de la sangre, ayudando en la coagulación y cicatrización.
Queratolítico	Hace que la piel dañada dé lugar a un tejido de células nuevas
Antibiótico	Su capacidad bacteriostática, bactericida y funguicida, elimina bacterias que causan infecciones, inhibiendo su acción dañina.
Regenerador celular	Posee una hormona que acelera la formación y el crecimiento de células nuevas. Gracias al calcio que contiene ayuda a las células a mantener su frágil equilibrio interno y externo
Energético y nutritivo	La sábila contiene 19 aminoácidos esenciales, necesarios para la formación y estructuración de las proteínas, que son la base de las células, tejidos y minerales como el calcio, fósforo, cobre, fierro, manganeso, magnesio, potasio y sodio, todos elementos indispensables para el metabolismo y actividad celular. Contiene también vitamina A, excelente para la visión, para el cabello y la piel; vitamina B1, B5, B6 y B12, usada para el sistema nervioso central y periférico; y vitamina C que es responsable del fortalecimiento del sistema inmunológico y de la tonalidad de los capilares del sistema cardiovascular y circulatorio.
Digestivo	Contiene grandes cantidades de enzimas necesarias para el procesamiento y aprovechamiento de los carbohidratos, grasas y proteínas en el organismo
Desintoxicante	Contiene un elemento que facilita la eliminación de toxinas a nivel celular; y a nivel general estimula la función hepática y renal, primordiales en la desintoxicación de nuestro organismo
Rehidratante y cicatrizante	Penetra profundamente en las de la piel, gracias a la presencia de ligninas y polisacáridos. Restituye los líquidos perdidos, tanto naturalmente como por deficiencias del equilibrio o daños externos, reparando los tejidos desde adentro para afuera en las quemaduras, fisuras, cortes, raspaduras, pérdida de tejido, etc.

(Zeballos, M.P, 2002)

2 Procedimiento experimental

2.1 Materiales utilizados

Los ensayos para observar los cambios en las propiedades físicas y mecánicas de los morteros y pastas son los que se mencionan detalladamente en este capítulo. La experimentación se realizó en morteros con adiciones porcentuales de los aditivos botánicos reemplazando una cantidad determinada de cemento por cada una de éstas, teniendo una serie de cubos con y sin aditivo; sirviendo estos últimos como referencia y comparativo del comportamiento presentado por aquellos que si contuvieron adición.

2.1.1 Cemento

El cemento es un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un sólo elemento. Esta definición comprende una gran variedad de materiales cementantes.

Para efectos de construcción, el significado del término cemento se restringe a materiales aglutinantes utilizados con piedras, arena, ladrillos, bloques de construcción, etc. Los principales componentes de este tipo de cemento son compuestos de cal. Los cementos que se utilizan en la fabricación de concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer con el agua, en virtud de que experimentan una reacción química con ella y, por tanto, se denominan cementos hidráulicos.

En otras palabras, en presencia del agua, los silicatos presentados a continuación en la tabla 2.1 forman productos de hidratación, los cuales con el paso del tiempo producen una masa firme y dura, que se conoce como pasta de cemento endurecida.

TABLA 2.1

Componentes principales del cemento Pórtland

Nombre	Composición de óxido	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

(Neville, A.M, 1992).

Actualmente, la denominación de los cementos ha cambiado. Anteriormente se clasificaban como cementos I, II, III, IV y V, siendo la nomenclatura actual como se muestra en la tabla 2.2.

TABLA 2.2

Clasificación del cemento por sus adiciones

Nomenclatura	Descripción
CPO	Cemento Pórtland ordinario
CPP	Cemento Pórtland puzolánico
CPC	Cemento Pórtland compuesto
CPEG	Cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno
CPS	Cemento Pórtland con humo de sílice
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno

(Damazo, D, 2006).

El cemento empleado para la realización de los especímenes de prueba, fue cemento Pórtland CPO, de la marca Moctezuma, de la misma corporación.

2.1.2 Adiciones botánicas

Los aditivos botánicos que se emplearon en esta investigación son el nopal y la sábila deshidratada. Estas dos plantas pertenecientes a la familia de las cactáceas, se obtuvieron, después de un minucioso proceso, en forma deshidratada y en polvo. La empresa Therbal, SA de CV, fue la que proporcionó los productos para las adiciones.

La adición de los componentes botánicos en la fabricación de los morteros, es con el fin de observar los cambios en las propiedades físicas y mecánicas de las pastas.

Al ser plantas que se desarrollan en medios áridos o semiáridos, éstas absorben gran cantidad de agua. Por esa razón, a la pasta deberá agregársele una mayor cantidad de agua, comparada con la cantidad necesaria para fabricar una pasta sin adiciones botánicas. Es por ello que esta investigación inició con el cálculo de la cantidad óptima de agua para obtener una pasta de cemento de consistencia normal, según la norma ASTM C-187 (2004).

2.2 Pruebas en pasta de cemento

La fabricación del cemento requiere de controles rigurosos en su producción; por lo que se realizan diversas pruebas de calidad en los laboratorios de fábricas donde se elabora este producto para asegurarse de que posea la calidad que se especifica, y de que esté dentro de los requisitos que marcan las normas de cada país.

Sin embargo, es conveniente hacer pruebas de aceptación o lo que es más común, examinar las propiedades del cemento que se va a usar para alguna aplicación especial.

La determinación de los tiempos de fraguado inicial y final de las pastas de cemento se realizarán en una mezcla de cemento con consistencia normal. Por tanto, es necesario determinar para cualquier pasta de cemento, el contenido de agua necesaria para producir la consistencia normal.

2.2.1 Consistencia normal

Al agregar agua al cemento se produce una pasta, contiene fluidez a medida que se le va aumentando el contenido de agua. La consistencia normal es un estado de fluidez alcanzado por la pasta del cemento, que tiene una propiedad óptima de hidratación. Es esencial que la pasta, una vez que ha fraguado, no sufra gran cambio en su volumen ya que en condiciones de esfuerzo podría ocasionar rompimiento del cemento endurecido. En particular, no debe haber una expansión apreciable; la cual, en condiciones de esfuerzo podría ocasionar un rompimiento de la pasta de cemento endurecida. El siguiente procedimiento fue tomado de la norma internacional ASTM C-187 (2004).

La consistencia se mide por medio de un aparato llamado Vicat, en honor de la persona que lo diseñó y utilizó por primera vez. La prueba consiste en penetrar la pasta de cemento con un émbolo de 10 mm de diámetro, acondicionado dentro de un soporte de agujas, como se muestra en la fig. 2.1. La pasta de cemento y agua se mezcla en la forma prescrita, y se coloca en el molde. Enseguida se pone el émbolo en contacto con la superficie superior de la pasta, y la profundidad de penetración depende de la consistencia. Se dice que la pasta de cemento tiene su “consistencia normal” cuando la varilla de 10 mm de diámetro penetra en dicha pasta 10 ± 1 mm contados a partir de la superficie libre durante los 30 s en que se permitió su deslizamiento. El contenido de agua de la pasta estándar se expresa como porcentaje por peso de cemento seco, y el valor normal varía entre 26 y 33%.



Figura 2.1

Aparato Vicat

Tal expansión puede tener lugar debido a una hidratación retardada o lenta, o a otra reacción de algún compuesto presente en el cemento endurecido, particularmente la cal libre, la magnesia libre o el sulfato de calcio. La prueba se obtiene con diferentes porcentajes de agua hasta que por interpolación se consiga su consistencia normal.

2.2.2 Tiempos de fraguado inicial y final

El fraguado es el fenómeno por medio del cual la pasta de cemento cambia de plástico a endurecido, y es posterior al fenómeno de hidratación.

El tiempo de fraguado inicial es el transcurrido desde la adición del agua hasta alcanzar el estado de plasticidad y semidureza; en otras palabras, es el tiempo del que se dispone para fabricar, transportar, vibrar y colocar el concreto en obra.



Fig. 2.2

Prueba de fraguado inicial y final

Por otro lado, el tiempo de fraguado final va desde el fraguado inicial hasta que se endurece la pasta, y se vuelva indeformable.

El tiempo de fraguado se mide mediante un aparato de Vicat con distintos accesorios de penetración, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C-191 (2004).

Para determinar el fraguado inicial se utiliza una aguja, del mismo equipo de Vicat, con diámetro de 1 mm, como se muestra en la fig. 2.2. Esta aguja penetra en la pasta de consistencia normal colocada en un molde especial, bajo un peso prescrito.

Cuando la pasta ha endurecido lo suficiente para que la aguja penetre 25 ± 1 mm de la base, se determina el tiempo de fraguado inicial. El tiempo que transcurre para que la aguja no deje marca visible en la pasta, se denomina fraguado final.

En la BS 12:1978 se describe un tiempo mínimo de 45 min, para cemento Pórtland normal, de fraguado rápido, de alto horno y para cemento Pórtland de bajo calor BS 1370:1979; el tiempo de fraguado de cemento de alta alúmina se describe en la BS 915:1972 de entre 2 a 6 h.

El fraguado final se determina por medio de una aguja similar adaptada a un aditamento metálico ahuecado, de forma tal que deje un borde circular de corte de 5 mm de diámetro, colocado a 0,5 mm detrás de la punta de la aguja. Se dice que se ha llevado a efecto el fraguado final cuando la aguja, bajada lentamente hacia la superficie de la pasta, se imprime sobre ella; pero los bordes de corte circular no pueden hacerlo.

Debe recordarse que la velocidad de fraguado y la rigidez de endurecimiento; es decir, la obtención de resistencia, son completamente independientes una de otra.

2.3 Prueba en morteros

Una vez obtenidas las pastas con consistencia normal, se procedió a otras pruebas en morteros, mismas que se detallan a continuación, con el fin de obtener cubos de 5 x 5 x 5 cm, y posteriormente ejecutar los ensayos pertinentes para determinar la influencia de las adiciones botánicas en las características de los morteros que fueron adicionados con nopal y sábila, con los resultados de los ensayos.

2.3.1 Fluidéz

Con esta prueba se calcula el porcentaje de agua óptimo necesario que debe agregarse a las mezclas para fabricar los cubos de mortero. La cantidad óptima de agua de mezclado para los cementos deberá ser tal que produzca una fluidéz de $110 \pm 5\%$, según la norma ASTM C-230 (2003).

Las mezclas se realizaron en forma mecánica de acuerdo con el método ASTM C-305 (2003) como se aprecia en la fig. 2.3. Para determinar la fluidéz esperada, se realizaron pruebas empleando diferentes proporciones de agua y manteniendo fija la cantidad de arena y cemento; mismas que se detallan en el siguiente capítulo.



Figura 2.3

Mezcladora eléctrica utilizada

El procedimiento consiste en fabricar morteros de prueba con diferentes contenidos de agua; luego la mezcla se coloca en un molde estandarizado (fig. 2.4) en dos capas, dando 25 golpes a cada una de ellas. Esta operación debe realizarse en un lapso no mayor a un minuto.



Figura 2.4

Colocación de la mezcla en molde

La colocación de la mezcla en el molde se hace sobre la mesa de fluidez; se enrasa el mortero excedente, y posteriormente se hace funcionar la mesa de golpes dándole al prisma truncado de mortero formado ya sin el molde, 25 golpes de la mesa; con un vernier especial, el diámetro de la muestra es medida, y así se estima la expansión de la base del mortero después de los golpes (fig. 2.5). Una vez obtenidos estos datos se determinaron las proporciones necesarias para así dar pie a la fabricación de los cubos de mortero con las propiedades adecuadas y tener la misma fluidez aseguradas, con las pruebas previamente hechas.



Figura 2.5

Medición del diámetro final

2.3.2 Fabricación de los morteros

Se realizó una serie de pruebas para obtener mezclas que fueran tixotrópicas y con consistencias similares. Las proporciones de mezcla aplicadas para esta fase son las de la tabla 2.3.

Una vez obtenidas las cantidades de agua para una mezcla con fluidez óptima, se prepararon las mezclas de cemento con las adiciones botánicas, agrupándolas en bolsas para su fácil identificación (fig. 2.6).



Figura 2.6. Agrupación de las mezclas

TABLA 2.3

Proporciones de las mezcla usadas

Mezcla	Cemento (g)	Nopal (g)	Sábila (g)
C0	5,445		
CN1	5,445	55	
CN2	5,390	110	
CN4	5,280	220	
CS1	5,445		55
CS2	5,390		110
CS4	5,280		220

Posteriormente se colocaron los morteros en moldes metálicos de acuerdo con la norma ASTM C-109 (2005), como se muestra en la fig. 2.7, obteniéndose un total de 84 cubos de 5 x 5 x 5 cm.



Figura 2.7

Colocación de las mezclas en moldes metálicos

Setenta y dos de estos incluyeron porcentajes de remplazo de cemento de 1, 2 y 4% de nopal y sábila, según se muestra en la nomenclatura anterior y 12 cubos fueron fabricados sin aditivos. A estos se les denominó controles para así tener una comparativa en las pruebas de los morteros con adición a un mortero común.

La finalidad de crear esta cantidad de especímenes fue para las pruebas que se describen más adelante considerando la edad de los especímenes, y así mismo, hacer una comparativa de su comportamiento y las propiedades que presentan. Las edades consideradas son a 30, 90, 180 y 900 días.

Ya colocada la mezcla en estos moldes se dejaron reposar, permaneciendo ahí por 14 días, antes de desmoldarse. Una vez desmoldados se marcaron de acuerdo con el tipo de mezcla.

Finalmente, estos cubos se colocaron en una cámara de humedad controlada (fig. 2.8) con temperatura promedio de $22 \pm 6^{\circ}\text{C}$ y un 100%HR. Durante 14 días, los cubos permanecieron en esta cámara para posteriormente realizar las pruebas físicas a la edad de 28 ± 2 días.



Figura 2.8

Moldes en cámara de alta humedad

2.3.3 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del mortero y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa en función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras. Es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. En cuanto a materiales y equipos puede efectuarse en el laboratorio sobre testigos de concreto extraídos de la estructura o directamente sobre la estructura en campo. Los materiales y equipos requeridos para esta prueba fueron los siguientes:

- Medidor de resistividad eléctrica.
- Equipo para medir dimensiones, con precisión de décimas.

Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo especializado de resistencia eléctrica en suelos y materiales porosos, de la marca Nilsson (fig. 2.9).



Figura 2.9

Instrumento para lecturas de resistencia

Los cubos se mantuvieron en una cámara de alta humedad como se muestra en la fig. 2.10, para mantenerlos saturados y evitar que su humedad se perdiera. De esta forma se eliminó la variable de falta de agua en la porosidad del mortero.



Figura 2.10

Especímenes en cámara de alta humedad

La prueba se realizó colocando las caras laterales del espécimen entre dos placas de acero inoxidable y esponjas húmedas (fig. 2.11). A éstas se le adicionaron tornillos del mismo material para así poder conectar la fuente, y someterlos a una corriente dada (I) para regular el voltaje (E).



Figura 2.11

Prisma colocado para la realización del ensayo

La resistencia eléctrica (R) se calcula como E/I , y se expresa en Ohm.

De esta manera, la resistividad eléctrica está dada por:

$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right) \text{ (Ohm-cm); (Ohm-m)} \quad \text{(Ec. 2.1)}$$

Donde:

A = área transversal del espécimen

L = longitud del espécimen.

En cuanto a los criterios de evaluación, no existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las armaduras puede ser considerado despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general los datos que se muestran en la tabla 2.4.

Debe tenerse en cuenta que la resistividad es sólo uno de los parámetros que evalúa la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el mortero, por tanto, no podrá considerarse como único criterio para definir o prever un posible daño sobre la estructura.

TABLA 2.4

Criterios de evaluación en resistencia eléctrica

Intervalo	Criterio
$\rho > 200 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Poco riesgo
$200 > \rho > 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Riesgo moderado
$\rho < 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Alto riesgo

(Durar, 1997).

2.3.4 Velocidad de pulso ultrasónico

Este es un ensayo no destructivo que tiene como objetivos principales los siguientes puntos:

- Verificar la homogeneidad, es decir, la uniformidad y calidad relativa del mortero.
- Detectar las fallas internas, es decir, la presencia de vacíos, introducidas durante la fabricación, la profundidad de las fisuras, y otras imperfecciones.
- Monitorear las variaciones de las propiedades del mortero a lo largo del tiempo, debido a la agresividad del medio.

La velocidad de pulso ultrasónico se define como la relación que existe entre la distancia de viaje, a través del mortero, de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del mortero, hasta que es detectado por el receptor. Aquí, el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico el cual se registra en un osciloscopio.

El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividida entre el tiempo de viaje, da la velocidad promedio de la propagación de onda.

Los equipos y materiales requeridos para este ensayo fueron:

- Acoplante (vaselina o gel).
- Equipo comercial de ultrasonido.

- Circuito generador-receptor (aparato de pulso ultrasónico de baja frecuencia ultrasónica).
- Transductor-emisor (aparato que posibilita la transformación del pulso eléctrico en onda de choque en una banda de 24 kHz hasta 500 kHz).
- Circuito medidor de tiempo (aparato que permite medir el tiempo recorrido desde la emisión de onda hasta su recepción).
- Cables coaxiales que deben permitir la conexión perfecta de los transductores al circuito generador-receptor.
- Barra de referencia. Pieza que permite la calibración del equipo de ultrasonido, cuya superficie tiene un acabado pulido y el tiempo de recorrido grabado.

Previo a la realización de la prueba de pulso ultrasónico, se deberá verificar que los especímenes de mortero a ser ensayados, tengan la superficie plana, lisa, exenta de suciedad y carbonatación.

En el caso de que la superficie no sea suficientemente lisa deberá regularizarse a través de procedimientos mecánicos, o con una capa de pasta de cemento, yeso o resina epóxica con un espesor mínimo para no interferir la medida, y facilitar el acoplamiento de los transductores.

Para comenzar la prueba, se deberá tener calibrado el aparato usando la barra de referencia, o dispositivo equivalente del equipo. Posteriormente, los transductores se deberán posicionar como se indica a continuación:

- Transmisión directa, con los transductores en las caras opuestas del material.
- Transmisión indirecta, con los transductores en la misma cara.
- Transmisión semidirecta, con los transductores en las caras adyacentes.

Se colocan y presionan las superficies de los transductores sobre la zona de ensayo, considerándose satisfactorios cuando sea obtenido un valor mínimo de lectura como variación de $\pm 1\%$. Para esta prueba se realizó la medición por transmisión directa.

Una vez verificada la barra de patrón se procede con los cubos de mortero utilizando el mismo procedimiento. Se coloca en ambas caras del cubo, un poco de gel para ubicar y presionar las superficies de los transductores sobre la zona de ensayo, a fin de tener un buen contacto de estos con el mortero. Ya colocados se enciende el equipo empleado para esta medición, y se registra el valor obtenido.

En la fig. 2.12 se muestra el procedimiento para la correcta ubicación de los transductores en los cubos, así como el aparato de ultrasonido empleado para la realización de esta prueba.



Figura 2.12

Ubicación de transductores y cubos de mortero

Una vez obtenidos los valores a partir del aparato de medición, se procede a calcular la velocidad de propagación de ondas conforme a la siguiente fórmula:

$$v = l / t$$

(Ec. 2.2)

Donde:

v = velocidad de propagación (m/s)

l = distancia entre los puntos de acoplamiento

t = tiempo recorrido desde la emisión de la onda hasta su recepción

En este estudio, se consideraron tres especímenes de cada muestra para obtener un valor promedio del tiempo. Sin embargo, también es posible expresar la homogeneidad y calidad del mortero en forma de parámetros estadísticos tales como la desviación estándar o el coeficiente de variación de las medidas de velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en el mortero, hechas en varios puntos de la estructura o elemento estructural por separado. Tales parámetros, sólo pueden ser usados para comparar variaciones en la composición de concretos similares, debiendo considerarse los siguientes factores: distancia entre las superficies de contacto de los transductores, posición de la armadura, en el sentido de la propagación de onda, densidad del concreto, dependiendo esta del

trazo de las condiciones de fabricación, tipo de cemento, grado de hidratación y edad del mortero.

Los criterios de evaluación para esta prueba son los descritos en el manual de la Red DURAR (1997), y que se muestran a continuación en la tabla 2.5.

TABLA 2.5. Criterios de evaluación en pulso ultrasónico

Velocidad de propagación	Calidad del mortero
< 2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001 a 4000 m/s	Alta
> 4000 m/s	Durable

(DURAR, 1997).

2.3.5 Porosidad efectiva o absorción capilar

Esta prueba tiene como objetivo determinar la absorción capilar y la porosidad de morteros y concretos como una medida de compacidad. Por porosidad del concreto se consideran los espacios vacíos que quedan dentro de la masa del concreto y mortero, a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado en su manipulación (DURAR, 1997).

Los poros, dependiendo de su tamaño y características, se subdividen en:

- Poros de gel: son de tamaño considerablemente pequeño, menor a 15-25 Å, y corresponden a espacios intersticiales del gel de cemento. Estos poros sólo intercambian agua con el ambiente cuando se secan a humedades menores a 20 %HR
- Poros capilares: son de forma variable, y su tamaño es del orden de entre 2 ηm y 1 μm. Cuando están interconectados y abiertos al exterior constituyen la causa principal de la permeabilidad de la pasta endurecida de cemento, así como su vulnerabilidad a la acción de agentes externos. Por ello, la eliminación de la capilaridad interconectada es una condición necesaria para la durabilidad de las pastas.
- Poros de aire: son generados por las burbujas de aire atrapadas en la masa del concreto o mortero, durante la manipulación tecnológica. No suelen estar interconectados entre si y su dimensión es variable, aunque generalmente son mayores a 0,05 mm. Aunque afectan la resistencia

mecánica en cuanto a la durabilidad pueden según el caso, inducir efectos benéficos.

Como absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando el mortero se encuentra en contacto con agua líquida. El ensayo de absorción capilar se basa en la metodología propuesta por Fagerlund. Los equipos y materiales necesarios para realizar este procedimiento fueron los siguientes:

- Horno con termostato digital.
- Cubeta con fondo plano y tapa.
- Esponjas para secar la superficie de los cubos.
- Balanza digital.
- Parafina o resina para cubrir los laterales de los especímenes.

El ensayo se realizó sobre especímenes de espesor $H \leq 50$ mm (recomendándose de 20 a 30 mm para concretos especiales), luego de un pre-acondicionamiento de secado a 50°C por 48 hrs., para asegurar un peso constante y posterior enfriamiento en desecador. Después de registrar su peso inicial, W_0 , la muestra se coloca sobre una esponja húmeda en el interior de una cubeta de fondo plano teniendo cuidado de que el agua llegue a 3 mm por encima de la parte inferior de la probeta de ensayo. Previamente, los cubos son cubiertos con resina o parafina en las áreas laterales del espécimen. A lo largo del ensayo se mantiene cubierto el recipiente para evitar la evaporación. El cambio de peso ($W_t - W_0$) de la probeta por unidad de área expuesta del espécimen, se registra a intervalos de tiempo de 1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4, 6, 24, 40 h (DURAR, 1997).

Los coeficientes se calculan con base en las siguientes ecuaciones:

$$m = \frac{t}{z^2} (s/m^2) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde z representa la profundidad de penetración del agua, en tiempo t

$$k = \frac{(W_t - W_0)/A}{\sqrt{t}} \quad (\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$\text{Porosidad efectiva} = \varepsilon_e = \frac{k\sqrt{m}}{1000} (\%) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

El coeficiente k puede ser evaluado como la pendiente de la región lineal del gráfico $(W_t - W_0)/A$, en función de \sqrt{t} .

El coeficiente m puede ser determinado calculando el tiempo requerido para que el agua ascienda a la cara superior de la probeta, es decir, cuando $z = H$.

Con la anterior información la absorción capilar, S , se calcula como:

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (\text{mm/h}^{1/2}) \text{ o } (\text{m/s}^{1/2}) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

2.3.6 Porcentaje total de vacíos

El ensayo de porcentaje total de vacíos o porosidad total puede efectuarse de manera independiente, sobre probetas utilizadas en los anteriores ensayos ya que los especímenes requeridos para ésta no se ven afectados por los ensayos realizados sobre ellos.

En cualquiera de los casos anteriores, el espécimen luego de preacondicionado en la cámara de humedad alta para que los poros del material absorban agua a peso constante, y saturar así los poros con agua. Después de confirmar que el peso del espécimen no varía, se registra este último peso. A tal condición se le denomina peso saturado y superficialmente seco.

Este método proporciona un valor de porosidad aproximado, ya que la saturación sólo es posible en una parte de los poros de aire; por tanto, para obtener la porosidad total se debe lograr la saturación total del espécimen, hirviéndolo varias horas. Posteriormente se enfría y se registra su peso saturado (W_{saturado}), o bien hacer vacío en la cámara donde se tiene sumergida la probeta. Al obtenerse el peso saturado, el espécimen se sumerge totalmente en agua con un mínimo de 24 h como se muestra en la fig. 2.13.



Figura 2.13

Probetas sumergidas

Una vez finalizado este lapso, se registra su peso en agua haciendo uso de una balanza hidrostática. Finalmente, el espécimen se seca en el horno a 105 °C hasta peso constante y se registra su peso seco (W_{seco}) como se muestra en la fig. 2.14.



Figura 2.14

Secado en horno a 150°C

La porosidad total se expresa en porcentaje por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de porosidad total} = \frac{W_{saturado} - W_{seco}}{W_{saturado} - W_{sumergido}} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.8})$$

De acuerdo con la Red DURAR (1997), los criterios de evaluación para determinar la calidad de los morteros y concretos en función del porcentaje de vacíos obtenidos con el método descrito es el que se muestra en la tabla 2.6.

TABLA 2.6

Criterios de evaluación en porcentaje de vacíos

Porcentaje total de vacíos	Características del concreto o mortero
< 10%	Indica un mortero de buena calidad y compacidad
10% - 15%	Indica un mortero de moderada calidad
>15%	Indica un mortero de durabilidad inadecuada

(DURAR 1997).

2.3.7 Resistencia a la compresión

La resistencia mecánica del cemento endurecido es la propiedad del material que posiblemente resulta más obvia en cuanto a los requisitos para usos estructurales. Por tanto, no es sorprendente que las pruebas de resistencia se incluyan en todas las especificaciones del cemento. Esta propiedad depende de la cohesión de la pasta de cemento, de su adhesión a las partículas de los agregados y, en cierto grado, de la resistencia del agregado mismo. Para determinar la resistencia del cemento se utilizan morteros de cemento-arena; y en algunos casos, concretos de proporciones determinadas hechas con materiales específicos bajo control estricto.

Existen varias pruebas para determinar la resistencia: tensión directa e indirecta; a compresión directa; y flexión. La prueba de tensión directa solía aplicarse comúnmente; pero la tensión pura es difícil de aplicar, y los resultados mostraban variaciones relativamente grandes. Más aún, puesto que las técnicas estructurales están diseñadas principalmente para aprovechar la buena resistencia del concreto a la compresión, la resistencia a la tensión del cemento, a menudo reviste menos interés que a la resistencia a la compresión. Por todas estas razones, las pruebas de tensión han dado lugar paulatinamente a las de compresión.

Existen dos métodos estándar para probar la resistencia a la compresión del cemento: uno utiliza mortero; y otro, concreto. Esta prueba puede ser considerada como una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general de la estructura, tanto desde el punto de vista de durabilidad como de la capacidad de resistencia mecánica. La resistencia a la compresión del mortero corresponde a la tensión máxima de ruptura general de compresión axial en MPa, que puede soportar un testigo.

El equipo para determinar la resistencia a la compresión se conoce como Prensa Universal, ya que puede realizar ensayos a compresión o tensión, a flexión, con carga estática, carga dinámica, o control de carga.

Para esta prueba se utilizó una prensa marca CONTROLS del laboratorio de SIKA, con base en el procedimiento mencionado en la norma ASTM C-109 (2005).

Para realizar esta prueba, se inició con la verificación de que los testigos en forma de cubo tuvieran sus superficies perfectamente planas; para así, colocarlos entre los platos de la prensa. Los testigos que estaban irregulares en sus caras fueron desbastados por una lija en la superficie, y así obtener caras regulares y lisas.

La aplicación de la carga y velocidad fue constante, de tal manera que la carga máxima se alcanzó entre 20 y 80 s. La fuerza de compresión a la ruptura del espécimen se obtiene de la prensa. Posteriormente, para lograr la resistencia a la compresión, esta fuerza ya en Newton, fue dividida entre el área del testigo, ahora considerada en mm^2 ($1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$).

En la fig. 2.15 se muestra el procedimiento de colocación y aplicación de fuerza a los cubos de mortero mediante la prensa descrita.



Figura 2.15

Instrumentos para resistencia a la compresión

El valor de la resistencia mecánica por sí sólo, no es indicativo de la durabilidad del mortero ya que dependerá de varios factores; entre los cuales se pueden mencionar: la relación agua/cemento; la dosificación, el tipo de cemento; y el espesor de recubrimiento del espécimen, entre algunos otros. Sin embargo, en general se acepta que morteros de elevada resistencia (> 45 MPa) son durables; y que aquellos por debajo de 20 MPa, son de baja durabilidad.

3 Resultados y discusión

3.1 Pruebas en pasta de cemento

Las pruebas descritas en el capítulo anterior, arrojaron resultados que a continuación se muestran para observar el comportamiento mecánico de las pastas con aditivos botánicos, como el nopal y la sábila.

3.1.1 Consistencia normal

La tabla 3.1 señala con detalle los valores de consistencia por el método de la aguja de Vicat de las diferentes mezclas y los datos que arrojaron, con el fin de encontrar el agua requerida para la fabricación de los cubos.

Las figs. 3.1 y 3.2 muestran los datos de la tabla 3.1 de la prueba de consistencia normal aplicados a las diferentes mezclas probadas cuyas proporciones consideradas fueron aquellas con consistencia de 9, de acuerdo con lo establecido en el procedimiento para esta prueba.

Estas presentan una correlación muy bien definida de la proporción de agua empleada para la fabricación de la mezcla contra la penetración de la aguja gruesa de 10 mm a 30 s, conforme los lineamientos para este ensayo descritos en el capítulo 2.

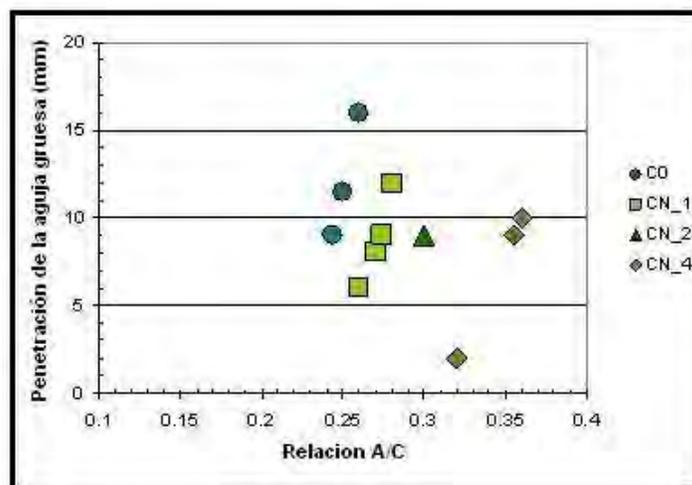


Figura 3.1

Consistencia presentada de acuerdo con la cantidad de agua colocada en prismas de control y nopal

TABLA 3.1

Muestras en ensayo de consistencia normal

Tipo de Cemento	Agua (ml)	Relación A/C	Consistencia
C0	130	0,260	16
	125	0,250	11,5
	122	0,244	9
CN1	130	0,260	6
	135	0,270	8
	137	0,280	9
	140	0,274	12
CN2	150	0,300	9
CN4	160	0,320	2
	178	0,360	9
	180	0,356	10
CS1	135	0,270	3
	145	0,290	8
	150	0,300	9
CS2	150	0,300	3
	165	0,330	8,5
	166	0,336	9
	168	0,332	10
CS4	175	0,350	4,5
	190	0,380	7
	193	0,386	9

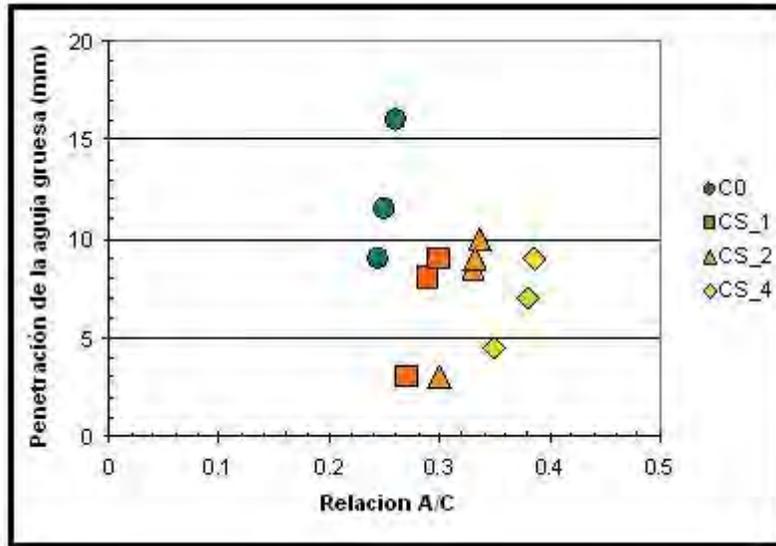


Figura 3.2

Consistencia presentada de acuerdo con la cantidad de agua colocada en prismas de control y sábila

Las muestras seleccionadas fueron aquellas cuya consistencia resultó de 9. Por tanto, se aprecia que a mayor porcentaje de aditivo, mayor será la cantidad de agua empleada para la pasta; para esto, las figs. 3.3 y 3.4 representan la cantidad de agua estimada para obtener la consistencia normal deseada.

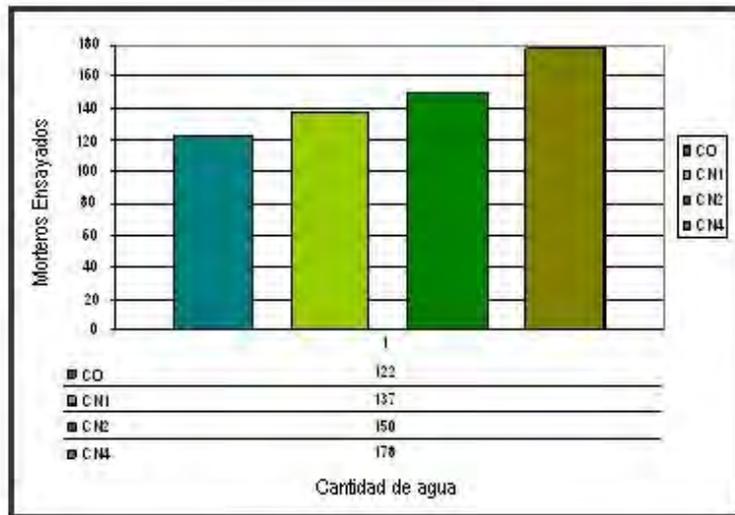


Figura 3.3

Cantidad de agua estimada para consistencia de 9 en las diferentes pastas de nopal

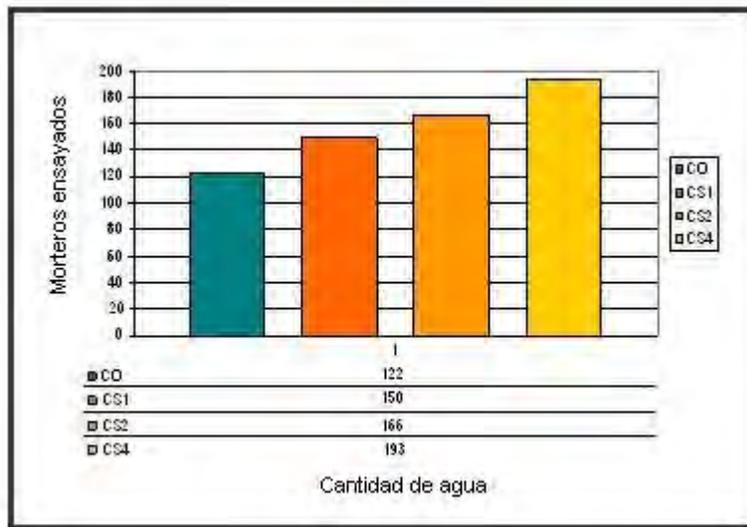


Figura 3.4

Cantidad de agua estimada para consistencia de 9 en las diferentes pastas de sábila

Es claro observar las diferencias en la cantidad de agua necesarias para obtener una consistencia normal de la pasta de cemento; si se le colocan estas adiciones: a mayor cantidad de adición por remplazo se necesita un mayor volumen de agua para tener la misma consistencia obtenida en la pasta control (sin adiciones).

Los resultados de la tabla 3.2 y las figs. 3.3 y 3.4 muestran que, comparando a las dos adiciones entre sí, no hay un cambio sustancial en la cantidad de agua para tener la consistencia normal en la pasta fabricada con estas adiciones. Es decir, el nopal o la sábila producen los mismos cambios en la trabajabilidad de la pasta si se emplean en forma indistinta una u otra.

Siguiendo el estudio, ahora se presentarán los resultados de los tiempos de fraguado de cada mezcla fabricada.

3.1.2 Tiempos de fraguado inicial y final

El análisis de los datos arrojados por esta prueba, y el comportamiento de las mezclas con respecto a su fraguado se muestra en las figs. 3.5 y 3.6, así mismo, el detalle para cada uno de los prismas.

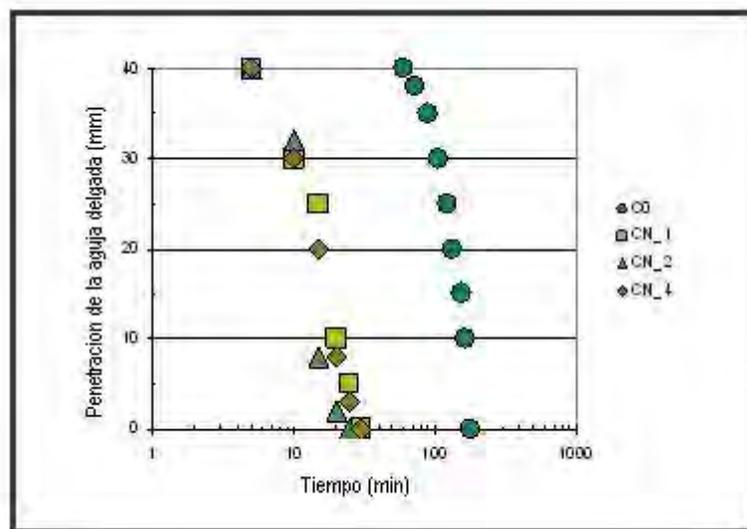


Figura 3.5

Fraguado inicial y final control contra nopal

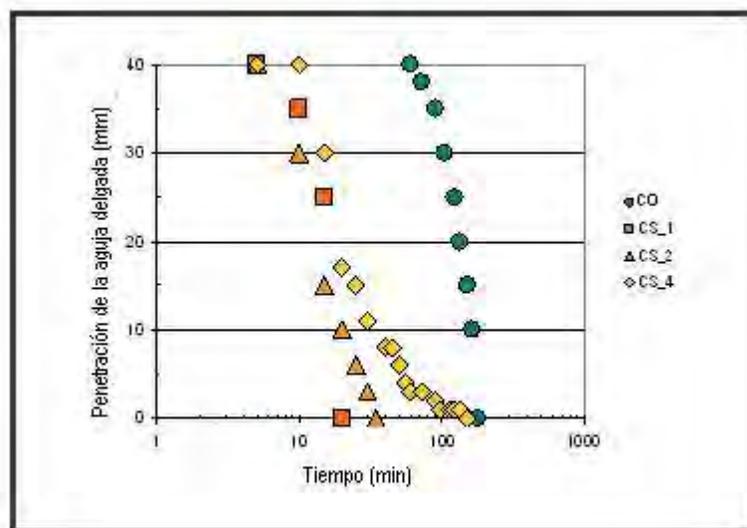


Figura 3.6

Fraguado inicial y final control contra sábila

Estas figuras se diseñaron a partir de los datos registrados con las pastas generadas para este ensayo, mismos que se muestran en la tabla 3.2.

TABLA 3.2

Tiempo de fraguado

Tiempo (min)	Penetración de la aguja (mm)						
	C0	CN1	CN2	CN4	CS1	CS2	CS4
5		40	40	40	40	40	40
10		30	32	30	35	30	40
15		25	8	20	25	15	30
20		10	0	8	0	10	17
25		5		3		6	15
30		0		0		3	11
35						0	
40							8
45							8
50							6
55							4
60	40						3
72	38						3
90	35						2
97							1
105	30						
114							1
123	25						1
133	20						1
153	15						0
165	10						
180	0						

Como se puede observar, la relación que existe en éstas sobre la penetración de la aguja delgada, muestra el tiempo que tardó en presentarse la etapa de endurecimiento de la pasta en los especímenes, teniendo una disminución del tiempo de endurecimiento en aquellas pastas con aditivo botánico.

Se pudo determinar que para las mezclas fabricadas con los aditivos botánicos, por remplazo, el proceso de fraguado (endurecimiento) fue más rápido que el control (sin adición); por tanto, se puede tomar a estas dos adiciones botánicas como acelerante de fraguado.

3.2 Pruebas en morteros

Finalizadas las pruebas en pastas de cemento, el siguiente paso fue caracterizar los morteros fabricados con las mismas adiciones botánicas. También se obtuvieron propiedades físicas de los morteros, como porosidad capilar; porosidad total; resistividad eléctrica; velocidad de pulso ultrasónico; y resistencia a la compresión.

Estas pruebas se diseñaron siguiendo los procedimientos de un estudio previo de la Universidad Marista de Querétaro (Martínez Vargas, 2005) con la diferencia que en el estudio anterior, los morteros fueron fabricados manteniendo la relación agua/cemento (A/C) constante; en comparación con este estudio, que se mantuvo constante la fluidez, cambiando así la relación A/C en cada mezcla fabricada.

3.2.1 Fluidez normal de los morteros

Ya realizada la prueba de fluidez en pastas de cemento, como se detalló anteriormente, y basándose en los parámetros para obtener las proporciones necesarias para la fabricación de los cubos de mortero, se respetó la Norma ASTM C-230 (2003) que menciona una fluidez normal para el mortero, si el diámetro de la base del cono de mortero fabricado tuviera un aumento de entre un $10 \pm 5\%$ del original.

Las cantidades para las mezclas de mortero de 12 especímenes, repitiéndose para obtener el total de 84 cubos, se muestran en la tabla 3.3.

TABLA 3.3

Proporciones para la mezcla de mortero

Ingrediente	Cantidad para 12 especímenes (g)
Cemento	1000
Arena	2750
Relación a/c = 0.485 para cemento CPO	486

Después de haber realizado la serie de ensayos, se determinaron las proporciones de agua que se muestran en la tabla 3.4.

Con esta prueba se calculó el porcentaje de agua necesario que debe agregarse a las mezclas para los cubos de mortero, tomando como base las proporciones con una fluidez de $110 \pm 5\%$. Para este caso, aquellas con un 112%.

En las figs. 3.7 y 3.8 que se muestran a continuación, se detallan los valores de fluidez obtenidos en la tabla 3.4 para nopal y sábila respectivamente, comparados con los valores obtenidos del control sin adiciones.

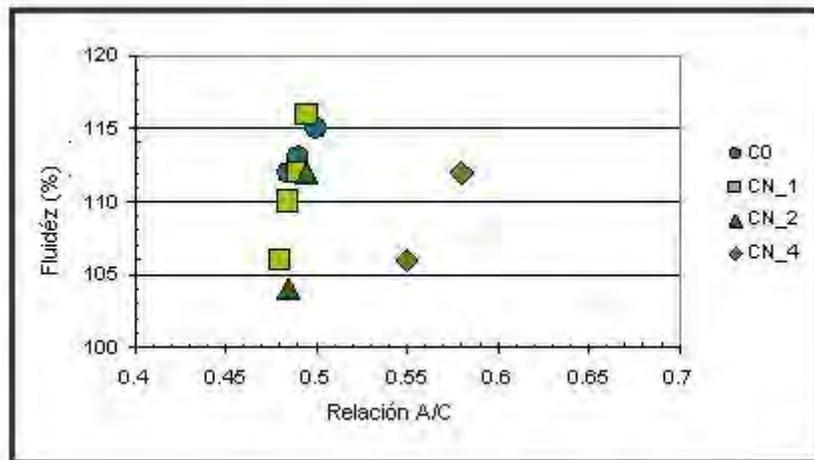


Figura 3.7

Fluidéz presentada en morteros de control y nopal

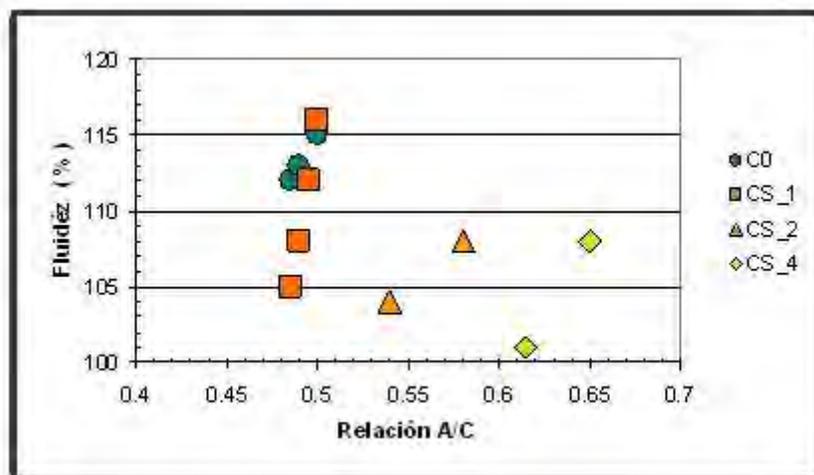


Figura 3.8

Fluidez presentada en morteros de control y sábila

De acuerdo con el rango que se tomó, se puede observar que los prismas de mayor porcentaje de remplazo, tanto nopal como sábila, fueron los que requirieron mayor cantidad de agua para obtener la fluidez esperada, y así una mezcla adecuada para la realización de los cubos.

Una vez obtenidos los valores de agua necesarios para una fluidez normal en cada tipo de mezcla, se fabricaron los diferentes cubos de mortero que se utilizarían para la determinación de las pruebas físicas de las mezclas cuando el material se haya endurecido siguiendo la Norma ASTM C-109 (2005).

Los cubos preparados con estas mezclas se mantuvieron en sus moldes por 14 días en una cámara de humedad controlada y después de desmoldados se colocaron en cámaras de humedad alta más pequeñas esperando realizarles las pruebas programadas. Se seleccionaron los cubos, y éstos se extraían de las cámaras de humedad alta controlada; es decir, se mantuvieron húmedos todo el tiempo hasta que se efectuaran estas pruebas físicas. A continuación se presentan los resultados de las pruebas físicas. Se dividen en resistividad eléctrica; velocidad de pulso ultrasónico; porosidad efectiva; y resistencia a la compresión.

3.2.2 Resistividad eléctrica

Después de concluida la prueba de resistividad eléctrica, los datos que arrojaron las probetas estudiadas se reflejan en la recopilación de datos de la tabla 3.5.

TABLA 3.4

Proporciones para determinar porcentaje de fluidez

Tipo de cemento	Relación A/C	Fluidez (%)
C0	0,260	112
	0,250	113
	0,244	115
CN1	0,260	106
	0,270	110
	0,280	112
	0,274	116
CN2	0,300	104
	0,320	112
CN4	0,360	106
	0,356	112
CS1	0,270	105
	0,290	108
	0,300	112
	0,300	116
CS2	0,330	104
	0,336	108
CS4	0,332	101
	0,350	108

TABLA 3.5

Datos promedio de 3 cubos en resistividad eléctrica (k Ω -cm)

Tiempo (días) Probeta	0	0,145	1	1,145	2	2,145	3,08	5,041	6	7	7,145	8	9
C0	1751	2466	1245	1133	463	434	25	23	24	28	24	28	28
CN1	1150	2050	950	833	246	228	28	20	21	21	23	22	22
CN2	2033	2141	1100	1000	313	368	30	22	20	21	23	23	23
CN4	2966	2066	2783	2083	310	341	22	17	18	17	19	19	19
CS1	623	80	14	12	13	11	11	11	12	13	16	16	16
CS2	3650	2500	10	11	10	8	9	9	10	11	12	12	13
CS4	3698	4350	2138	1837	183	180	12	11	11	11	13	13	13

Los valores de resistividad de la tabla 3.5 se incluyen en las figs. 3.9 y 3.10, de nopal y sábila respectivamente, mostrando el tiempo en que las diferentes probetas se estabilizaron, y cómo influyó el aditivo para que esto ocurriera.

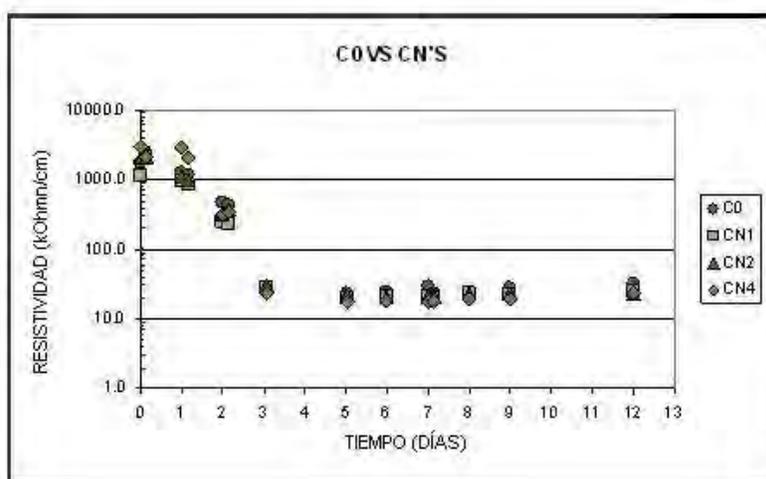


Figura 3.9

Estabilización de resistividad eléctrica. Control vs nopal

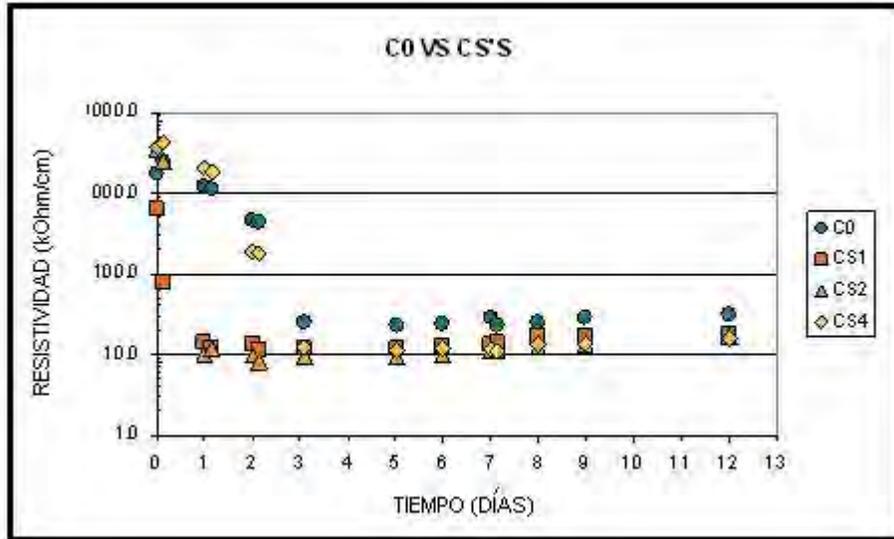


Figura 3.10

Estabilización de resistividad eléctrica. Control vs sábila

Como se aprecia en la tabla y las figuras anteriores, los valores registrados disminuyeron casi dos órdenes de magnitud, desde la primera medición cuando el cubo se encontraba seco hasta el tercer día cuando el valor de la resistividad en todos los cubos mostró valores de resistividad constantes. Es interesante observar que los cubos hechos con sábila al 1 y 2% presentaron una caída más pronunciada en los primeros días de las pruebas, llegando a valores constantes de resistividad eléctrica tan sólo al primer día de la prueba.

Esto es indicativo que dicho mortero succionó más rápido el agua, posiblemente por la capacidad absorbente de la adición botánica. Lo extraño es que los cubos de 4% de remplazo mostraron un comportamiento similar a los controles.

Los valores de mayor resistividad eléctrica húmedas resultaron los obtenidos con los morteros sin adiciones (28 kΩ·cm en promedio) y los morteros con adiciones del 1 y 2 % de nopal mostraron valores un 22 % más bajas que los controles (23 kΩ·cm promedio). Los morteros con adiciones del 4 % de nopal presentaron también un decremento de un 33% en esta característica (19 kΩ·cm) con respecto a los obtenidos por los controles. De acuerdo con el criterio del Manual de la Red DURAR (1997) estos morteros con nopal serían de mediana calidad, por lo que su resistividad húmeda está muy cercana a 20 kΩ·cm.

Aquellos especímenes que tuvieron adiciones de sábila en cualquiera de sus porcentajes, mostraron una resistividad eléctrica húmeda baja en comparación a los anteriores; ya que sus valores de entre 13 y 16 kΩ·cm de resistividad eléctrica húmeda corresponden a un decremento en la resistividad de entre 54 y 43 %, respectivamente, conforme a los morteros sin adiciones (controles). De acuerdo

con el criterio del Manual de la Red DURAR (1997) estos morteros con sábila serían de baja calidad porque su resistividad húmeda se encuentra muy cercana de 10 k Ω -cm.

Es importante aclarar que las pruebas de resistividad proporcionan, de manera indirecta, la tortuosidad presente en la porosidad de materiales base cemento. Además, la tabla del Manual de la Red DURAR proporciona un método para comparar cómo el acero es propenso a que se corroa en función de la conductividad iónica dentro del concreto. El dato de resistividad eléctrica debe de considerarse, ya que podría tener un efecto por la existencia de otros iones dentro de la porosidad del material y no solo por su tortuosidad.

Es por ello que si el material tiene otros iones, como el caso de las adiciones botánicas que poseen minerales adicionales, la resistividad estará en función también de la movilidad de tales iones. Las tablas de DURAR son para concretos con cemento normal y sin adiciones; entonces, los datos con nopal y sábila pueden estar enmascarados con la movilidad iónica; por lo tanto, el criterio de aceptación de este Manual puede ser erróneo.

3.2.3 Velocidad de pulso ultrasónico

De igual forma, una vez finalizada esta prueba de VPU se obtuvieron resultados, mismos que se agruparon y estudiaron para definir lo que representan. En la tabla 3.6 se muestran los valores promedio obtenidos en la prueba y el resultado en cuanto a la calidad de concreto de acuerdo al criterio mencionado en el manual de la Red DURAR (1997).

TABLA 3.6

Valores promedio de VPU (en m/s)

Tipo de cemento	Velocidad promedio VPU (m/s)	Calidad del mortero
C0	3 778,39	ALTA
CN1	3 816,94	ALTA
CN2	3 713,46	ALTA
CN4	3 504,83	ALTA
CS1	3 579,99	ALTA
CS2	3 432,96	ALTA
CS4	2 623,24	NORMAL

Así mismo, en la fig. 3.11 se presenta una comparación de los diferentes morteros con sus respectivas adiciones; con los resultados obtenidos en esta prueba y mostrando como efectivamente, los especímenes con adiciones de nopal en bajo porcentaje de remplazo, muestran un incremento en la velocidad de pulso ultrasónico y por tanto, homogeneidad de la mezcla preparada y posible disminución de espacios vacíos.

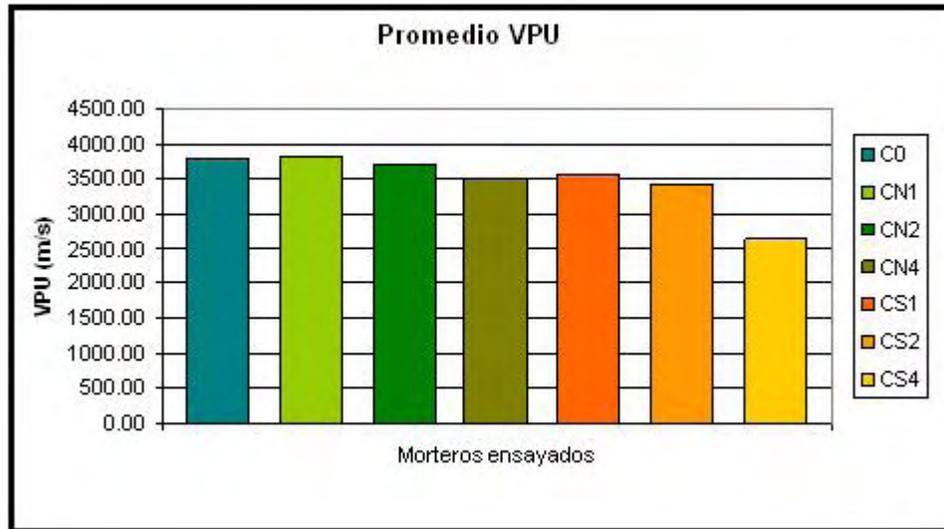


Figura 3.11

Correlación de morteros con la velocidad de pulso ultrasónico

Los resultados obtenidos en esta prueba indican que a mayor porcentaje de vacíos existe menor velocidad de pulso ultrasónico. Las ondas ultrasónicas viajan más lentamente en el vacío que en un material sólido. Esto se observa comúnmente en materiales porosos. Los valores obtenidos con 1 y 2% de remplazo de nopal señalan valores de VPU similares al control (3 778 m/s), por lo que indica que no se generó diferencia alguna en la microestructura del mortero base. De acuerdo con los criterios de aceptación presentados en la tabla 2.6 y con los resultados obtenidos, se concluye que estas mezclas son de mayor calidad.

Por otro lado, los morteros con 4% de remplazo de nopal tuvieron valores de VPU un 8% menor que los controles, demostrándose así que la diferencia entre ambos fue muy pequeña.

En comparación, los resultados obtenidos de VPU para las mezclas con sábila manifestaron reducciones en el valor de VPU entre 8% y un 31%, indicando que esta adición cambió la microestructura del mortero incrementando, posiblemente, la porosidad o disminuyendo la tortuosidad del material.

Los resultados de esta segunda prueba física apoyaron los obtenidos en las pruebas de resistividad eléctrica, en donde también se obtuvo poco cambio en la tortuosidad de las mezclas de nopal con respecto a la mezcla control, por lo que aparentemente no se afecta la porosidad total del mortero ni su tortuosidad si se le adiciona nopal.

Por otro lado, los morteros adicionados con sábila, mostraron diferencias considerables en los resultados entre los controles y aquellos en donde la sábila fue mezclada.

A continuación, los resultados obtenidos a partir de la prueba de porosidad efectiva.

3.2.4 Porosidad efectiva o absorción capilar

Esta prueba sirvió básicamente para el cálculo del porcentaje de poros presentados en los cubos de mortero con y sin adiciones para que al tener el dato, se comparara este factor con los demás parámetros resultantes de las pruebas del capítulo 2.

El análisis de resultados va íntimamente ligado con este factor de porosidad, ya que en base en ello se determinaron las propiedades en los cubos si estas mejoraban o no conforme la cantidad de vacíos presentes en ellos.

La tabla 3.7 en conjunto con la fig. 3.15 presenta una serie de datos resultantes de la prueba de porosidad de acuerdo al procedimiento detallado en la sección 2.3.5.

Estos datos pertenecen a la probeta CN1_10, sin embargo, el resto de los ensayos aplicados se pueden verificar en la sección de anexos.

TABLA 3.7

Resultados de prueba de capilaridad para CN1_10

$W_0=0.26182$		Área (m²)=0.00255		
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0000	0,000	0,26182	0,000
300	17,321	0,012	0,26269	0,341
600	24,495	0,012	0,26341	0,624
900	30,000	0,015	0,26387	0,804
1800	42,426	0,015	0,26461	1,094
3600	60,000	0,019	0,26520	1,325
7200	84,853	0,020	0,26596	1,624
10800	103,923	0,021	0,26673	1,925
14400	120,000	0,022	0,26704	2,047
75600	274,955	0,026	0,27196	3,976
86400	293,939	0,027	0,27251	4,192
104400	323,110	0,280	0,27310	4,424
165600	406,940	0,030	0,27532	5,294
172800	415,692	0,030	0,27558	5,396
190800	436,807	0,030	0,27598	5,553
259200	509,117	0,034	0,27771	6,231
338400	581,722	0,035	0,27900	6,737
345600	587,878	0,035	0,27923	6,827
604800	777,689	0,040	0,28113	7,573
691200	831,384	0,050	0,28142	7,686
777600	881,816	0,050	0,28146	7,702
864000	929,516	0,050	0,28160	7,757
950400	974,885	0,050	0,28169	7,792
1209600	1099,818	0,050	0,28190	7,875
1296000	1138,420	0,050	0,28191	7,878
1382400	1175,755	0,050	0,28198	7,906

Se observa que la tendencia de los puntos es en forma curva conforme transcurre el tiempo. Esto significa que tiene resistencia a la absorción de agua, que comparándolo con la gráfica de los valores generados por el espécimen CS4 (véase anexos), muestra una absorción casi inmediata, significando una cantidad mayor de poros presentes en esta; por tanto, CS4_10 posee una calidad deficiente en comparación con CN1_10.

En la tabla 3.8 se muestran las estimaciones obtenidas usando los valores de la tabla 3.7 y las ecuaciones de la sección 2.3.6 para la resistencia a la penetración del agua (m); coeficiente de absorción capilar (k); porosidad efectiva (εe), y absorción capilar (S), del prisma CN1_10. Para el resto de los especímenes ensayados, sus resultados se encuentran en la sección de anexos.

TABLA 3.8

Resultados de otras pruebas para CN1_10

Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (εe)	Absorción capilar (S)
CN1 10	3,43E+07	0,0265	15,50	1,71E-04

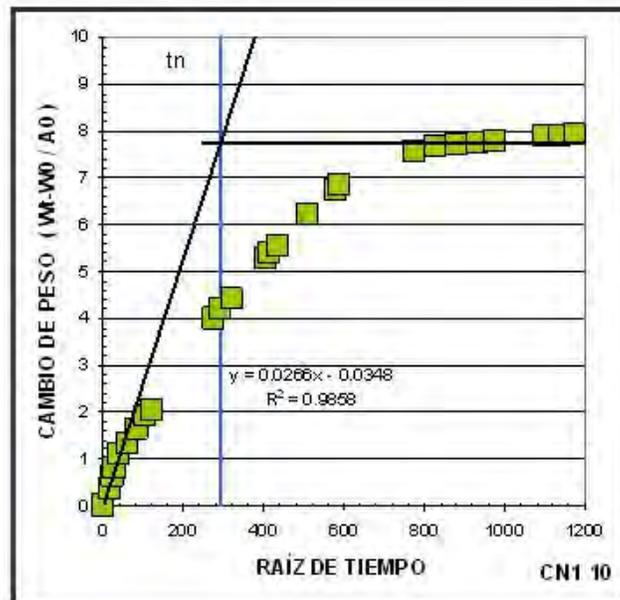


Figura 3.12

Absorción de agua de la probeta CN1_10

Para cada cubo se realizó una gráfica parecida a la de la fig. 3.12; y los parámetros de absorción capilar se estimaron con las ecuaciones de la sección 2.3.6. Gráficas similares a la fig. 3.12 para las mezclas de control y con adiciones, se encuentran en los anexos al final del trabajo.

Como puede observarse, del conjunto las mezclas control y con adiciones de nopal se presenta un comportamiento muy similar, mostrando una zona curvada, lo cual es indicativo de que el material es resistente a la absorción de agua. Para el caso de CS1 se encuentra algo similar al caso del nopal; sin embargo, para las probetas CS2 y CS4 la zona no lineal desaparece, siendo un indicio de que este material absorbe más rápido el agua. Con el fin de sintetizar los resultados, las siguientes figuras muestran los promedios de los resultados de las pruebas mencionadas. Para mayor detalle de los resultados para cada uno de los diferentes especímenes, los resultados correspondientes se localizan en la sección de anexos.

La fig. 3.13 muestra los valores promedio (de tres cubos) del coeficiente de absorción capilar (k) de agua para las diferentes mezclas preparadas. Esto implicaría que las mezclas con estas adiciones botánicas podrían poseer mayor cantidad de poros capilares, porque su absorción fue siempre mayor que la obtenida en la mezcla de control (sin adiciones).

A diferencia de las demás pruebas físicas ya estudiadas, la de absorción de agua podría estar enmascarada por la habilidad de las adiciones botánicas de absorber más rápido el agua; pero eso no implica que la porosidad sea mayor en las que tengan dichas adiciones en comparación con la mezcla control. Por tanto, el uso de esta prueba para determinar calidad de la mezcla se debe de tomar con mucha reserva.

El coeficiente de absorción capilar de las probetas estudiadas que se presenta en la fig. 3.13, ayuda a observar como aquellas probetas con aditivo de sábila incrementan su capacidad de absorción, y por tanto reducen sus características.

Sin embargo, aquellas de nopal en 1 y 2% mantienen una resistencia tal que el agua absorbida es en cantidad semejante al de aquellas probetas cuyo contenido botánico fue nulo.

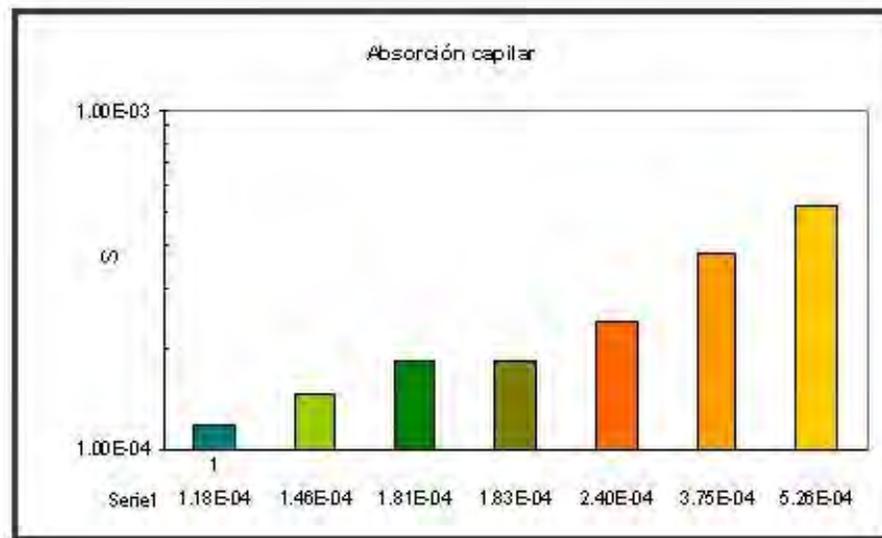


Figura 3.13

Absorción capilar (S) de los especímenes ensayados

La fig. 3.14 expone como las probetas con adiciones de nopal manifestaron una resistencia a la penetración del agua muy semejante a aquellas que no contenían aditivo alguno; a diferencia de las probetas cuyo contenido botánico era la sábila, que mostraron una penetración de agua mucho mayor que la mezcla control. Esto podría darnos un indicio de que la sábila absorbe más rápido el agua, o que la mezcla es más porosa.

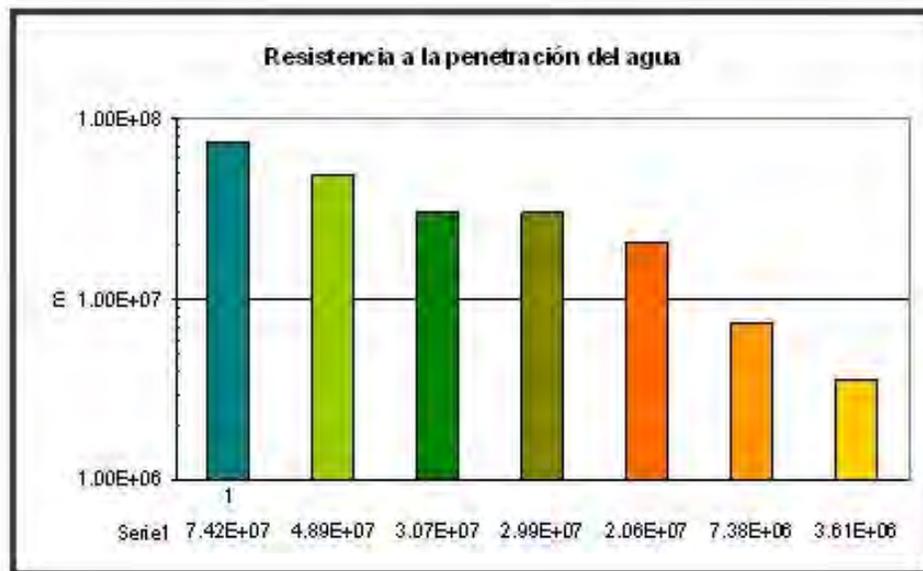


Figura 3.14

Resistencia a la penetración del agua (m)

Como se puede observar en la fig. 3.15, de acuerdo con los resultados de absorción de agua al incrementarse el aditivo botánico, la cantidad de poros capilares aumenta. Sin embargo, esto no quiere decir que la calidad del mortero reduzca, ya que al ser dichos aditivos, importantes captadores de agua, la almacenan e incluso el coloide producido entre la adición botánica y el agua podría tapar los poros, consiguiendo así un mortero más sólido. Esta hipótesis deberá de comprobarse en un siguiente trabajo.

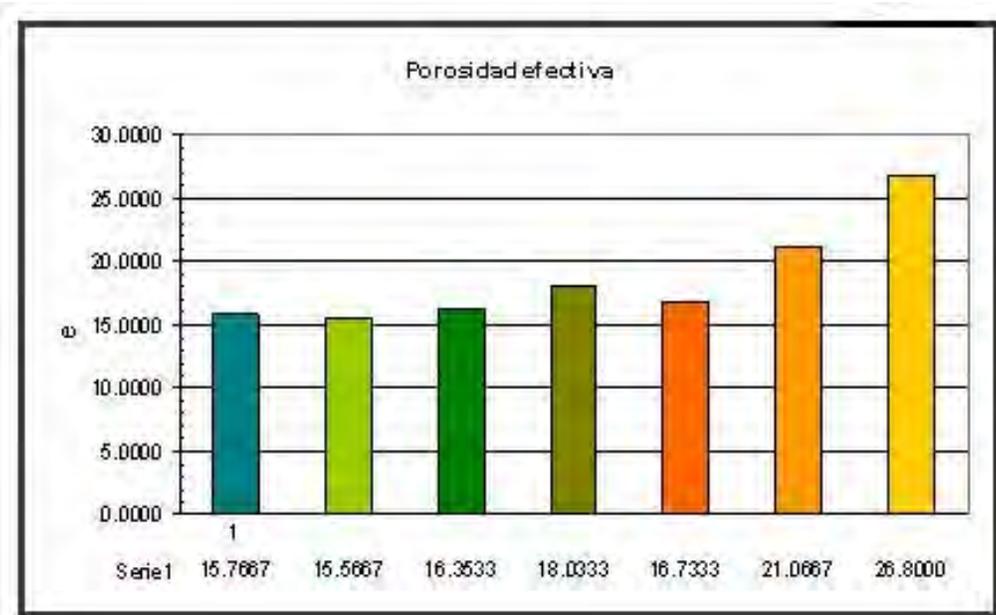


Figura 3.15

Porosidad efectiva (ϵ) determinada en ensayos

De los resultados promedio obtenidos en estas pruebas se puede inferir que las probetas CN1 y CN2 tuvieron un incremento en el valor de " ϵ " del 1 y 3,7% respectivamente frente al valor de la mezcla control; mientras que el CN4 mostró un incremento del 14 % por arriba del control. Para los casos de sábila, las probetas con 1% de este aditivo presentaron un incremento del 6%; un 34% para el CS2; y un 70% para las CS4, mostrando así un cambio radical con respecto a la mezcla control (sin adiciones). Como ya se explicó, las mezclas de sábila registraron una mayor cantidad de poros; sin embargo, esto se debe a la cantidad de aditivo colocada en la mezcla; por tanto, la absorción es mayor.

Una vez graficados los resultados en la fig. 3.16, se observa claramente como los especímenes con contenido botánico de nopal mantuvieron su capacidad de absorción semejante al espécimen de control, siendo que aquellos con adiciones de sábila incrementaron esta capacidad mientras más remplazo presentaban.

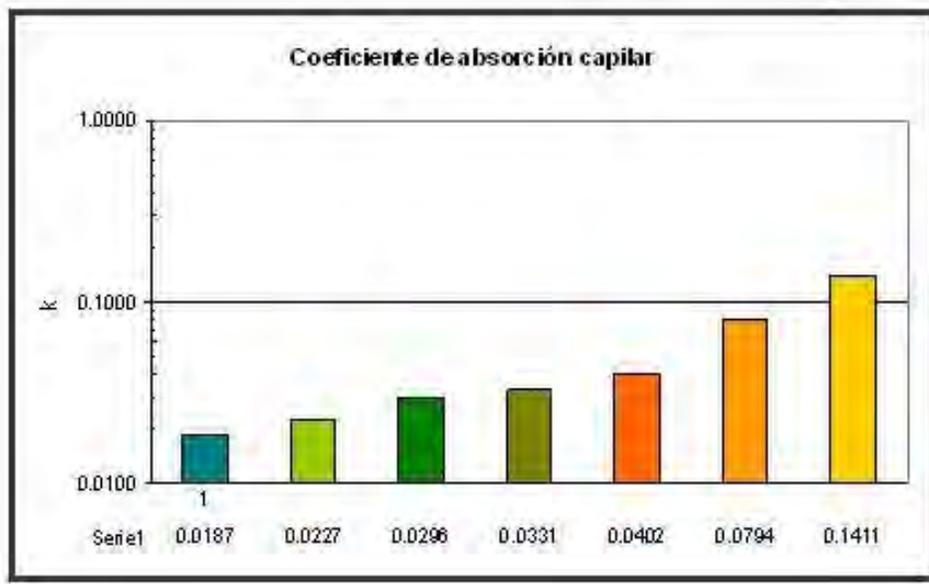


Figura 3.16

Coeficiente de absorción capilar (k) obtenido

Después de analizados todos los datos, se puede concluir que los prismas con contenido de nopal de remplazo, mostraron un buen comportamiento comparado con el control, manteniéndose en condiciones semejantes o incluso mejorando.

A pesar de que se muestra que estos absorbían más agua, los poros aparentemente fueron cubiertos por un gel que impedía el paso del agua a zonas más interiores de los cubos usados.

3.2.5 Resistencia a la compresión

En la tabla 3.9 se muestran los promedios (de tres cubos) de los datos obtenidos de la prueba de compresión para cada mezcla probada a diferentes edades (30, 90, 180 y 900 días).

Las figs. 3.17 y 3.18 muestran los resultados incluidos en la tabla 3.9 realizados a los prismas con adiciones de nopal y sábila, respectivamente, y comparándose nuevamente con los prismas de control.

TABLA 3.9

Valores promedio de resistencia a la compresión (MPa)

Tiempo (días)	C0	CN1	CN2	CN4	CS1	CS2	CS4
30	37,10	36,36	36,02	2,92	33,91	21,30	0,34
90	44,55	47,94	41,79	23,75	40,27	28,51	0,48
180	53,40	54,50	49,30	37,8	48,80	37,60	1,22
900	37,2	38,3	35,2	28,4	29,0	26,2	11,2

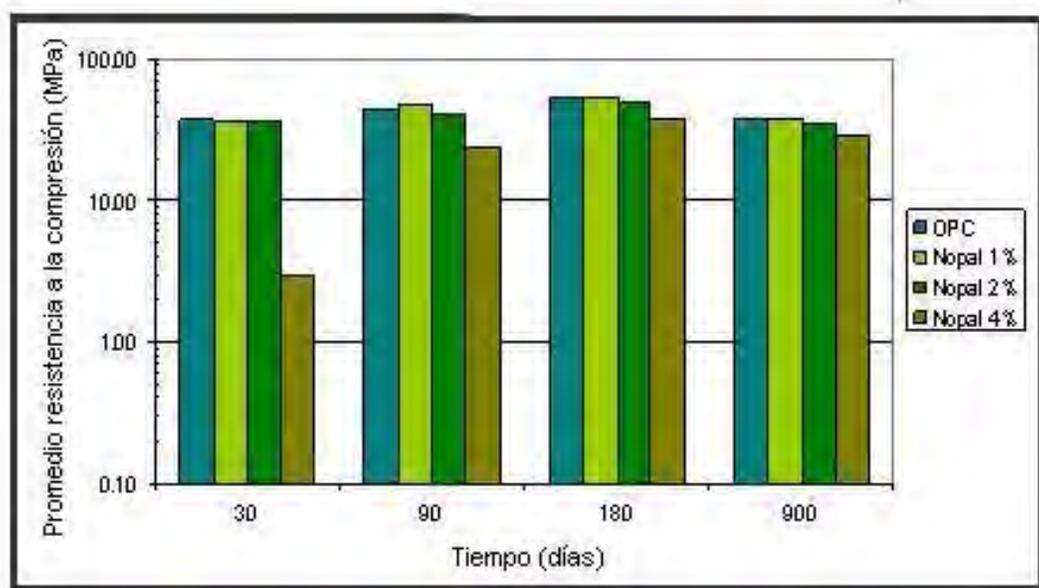


Figura 3.17

Comportamiento de los prismas de nopal vs control en la prueba de compresión en tiempos de 30, 90, 180 y 900 días

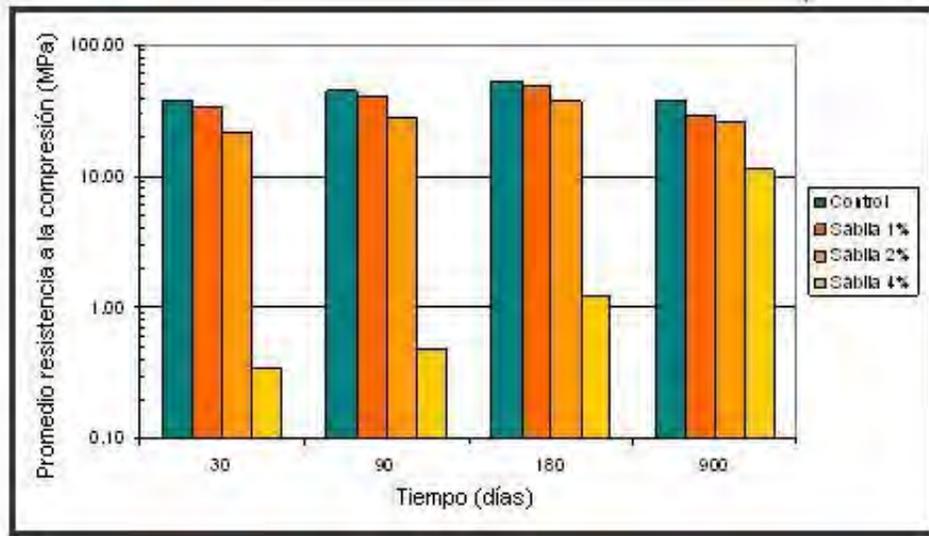


Figura 3.18

Comportamiento de los prismas de sábila vs control en la prueba de compresión en tiempos de 30, 90, 180 y 900 días

Los resultados obtenidos y graficados después de concluida la prueba de compresión, muestran un comportamiento semejante a las pruebas anteriores: las adiciones de nopal menores al 2% no afectan las propiedades físicas de las mezclas probadas. Inclusive la resistencia a la compresión para las mezclas con un remplazo mayor (4%) presentó una tendencia a mejorar después de 180 días de haberse preparado la mezcla, y mantuvieron su resistencia hasta la prueba realizada a 900 días de fabricarse las mezclas probadas.

Para los morteros preparados con sábila, la resistencia a la compresión disminuyó conforme el remplazo aumentó, comportándose de manera opuesta a las adiciones con nopal. Para la mezcla con mayor sustitución de sábila, su resistencia a la compresión a edades mayores también tuvo un incremento; pero no fue en la misma proporción que el obtenido con la adición del nopal hasta la última prueba realizada a los 900 días, en donde la resistencia a la compresión aumentó considerablemente; pero aún así, esta mezcla de sábila 4% no alcanzó la resistencia de la mezcla de 2% o menores reemplazos.

Cabe aclarar que todas las mezclas con remplazo de adiciones botánicas se fabricaron de tal manera que la fluidez (trabajabilidad) fuera similar a la mezcla control, por lo que hubo un incremento de la cantidad de agua en el amasado directamente proporcional al aumento del sustituto botánico. De aquí se podría pensar en que las mezclas con mayor remplazo, al incrementarse el agua de amasado, incrementaría la relación agua-cemento; y por ende, la resistencia a la compresión del material al aumentar la cantidad de vacíos en la mezcla.

En el caso de las mezclas con adiciones de nopal esto no sucedió; inclusive, en la mezcla con 4% de remplazo, cuya resistencia a la compresión fue menor a edades tempranas; pero a edades mayores (180 días) su resistencia fue muy similar al valor obtenido en la mezcla de control.

Esto proporciona un fuerte indicio que el nopal reacciona con el agua de amasado, disminuyendo así el agua que reacciona con el cemento durante la hidratación del mismo; y la posibilidad de que el agua de más forme vacíos o macroporos en la pasta del cemento que producirían una disminución en la resistencia a la compresión.

En la tabla 3.10 se muestran los requisitos de la BS 12:1978 para resistencias mínimas de mezclas de mortero con cemento Pórtland ordinario sin adiciones. y cemento con cemento de fraguado acelerado.

TABLA 3.10

Requisitos de resistencia (BS 12:1978)

Edad en días	Resistencia mínima a la compresión							
	Prueba de mortero				Prueba de concreto			
	Pórtland normal		Pórtland de fraguado rápido		Pórtland normal		Pórtland de fraguado rápido	
	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa
3	2320	23	2953	29	1336	13	1828	18
28	4148	41	4710	46	2953	29	3374	33

(Neville, A.M. 1992)

Los resultados de esta tabla muestran que para las mezclas de mortero con cemento tipo Pórtland y a 28 días de edad, la resistencia típica deberá de ser de 41 MPa, comprobándose así que los resultados obtenidos en las mezclas control (sin adiciones) estuvieron en el mismo rango y, por tanto, dentro de esta Norma.

3.3 Correlación entre las propiedades estudiadas

Presentados y discutidos ya los resultados de cada una de las pruebas físicas realizadas a las mezclas de mortero de esta investigación, las siguientes figuras muestran una correlación empírica entre las pruebas aplicadas; mismas que se

explican brevemente a continuación. La fig. 3.19 correlaciona los valores, uno a uno de resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico. En esta figura se puede observar que a mayor resistividad eléctrica existe una mayor velocidad de pulso ultrasónico; es decir, que los especímenes con aditivo de nopal así como los controles, son los que muestran un mejor comportamiento en esta característica. Es de esperarse que a mayor velocidad de pulso exista menos vacío que puedan estar llenos de líquido así como iones flotando en éstos, por lo que la resistividad se incrementa, fenómeno que se observa en la fig. 3.19.

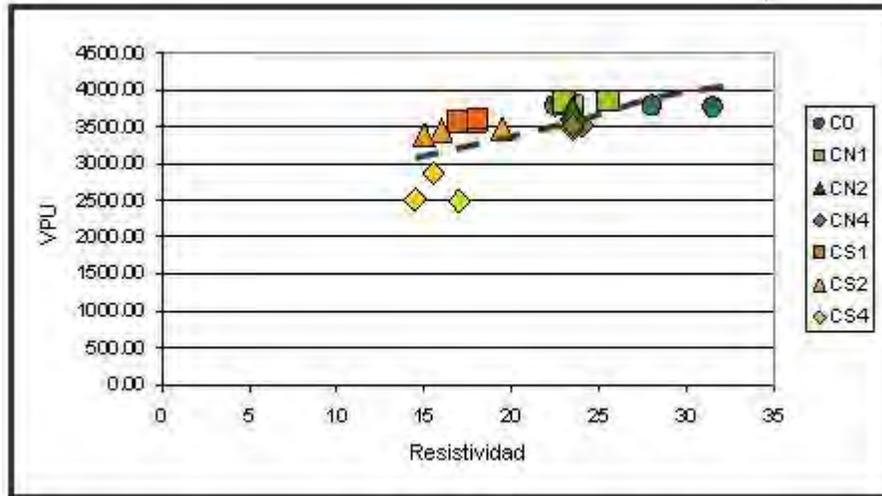


Figura 3.19

Resistividad vs. VPU

El efecto entre la resistividad y la porosidad del material, también se puede revisar con los resultados obtenidos en esta investigación en los capítulos anteriores. En la fig. 3.20 los indicadores para las muestras de morteros sin adiciones y con aditivo de nopal, expresan un comportamiento adecuado para dicha característica, siendo que para aquellos con sábila tal comportamiento no se rige como para las muestras descritas. En este caso se muestra que a mayor resistividad se presenta un decremento en la porosidad.

Siguiendo con el tema de porosidad, se sabe que una mayor resistividad implicaría menor porosidad del material como se demostró con los datos de la fig. 3.20. Esta disminución en la porosidad, a su vez implicaría mayor resistencia a la compresión. La fig. 3.21 muestra la relación empírica entre los resultados de la resistividad eléctrica y resistencia a la compresión. Se puede observar de la figura que aquellas mezclas cuyo contenido fue sábila en diferentes porcentajes de remplazo, denotaron una baja resistividad y a su vez una baja resistencia a la compresión. Los prismas de control, así como aquellos con contenido de nopal registraron que mientras más resistividad presentaron en las pruebas, su resistencia a la compresión aumentó de igual forma.

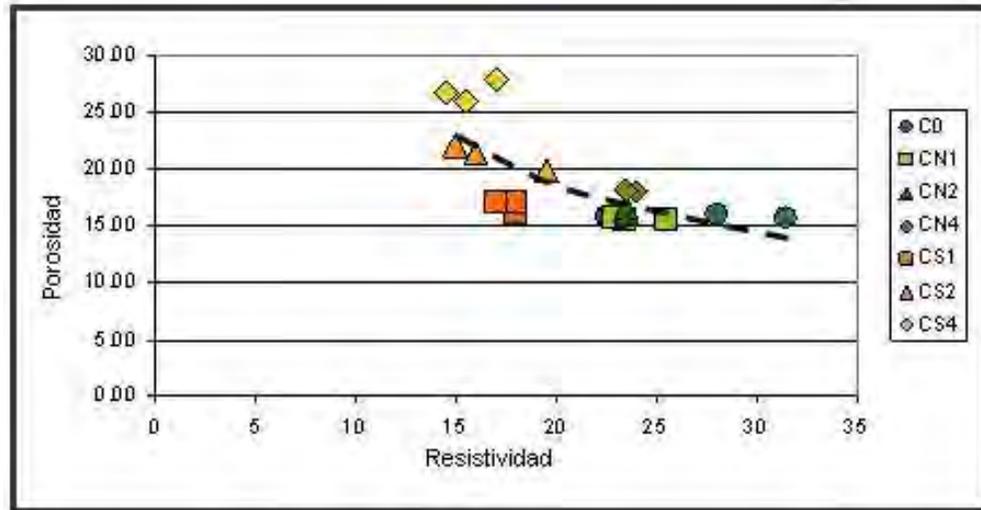


Figura 3.20

Resistividad vs. Porosidad

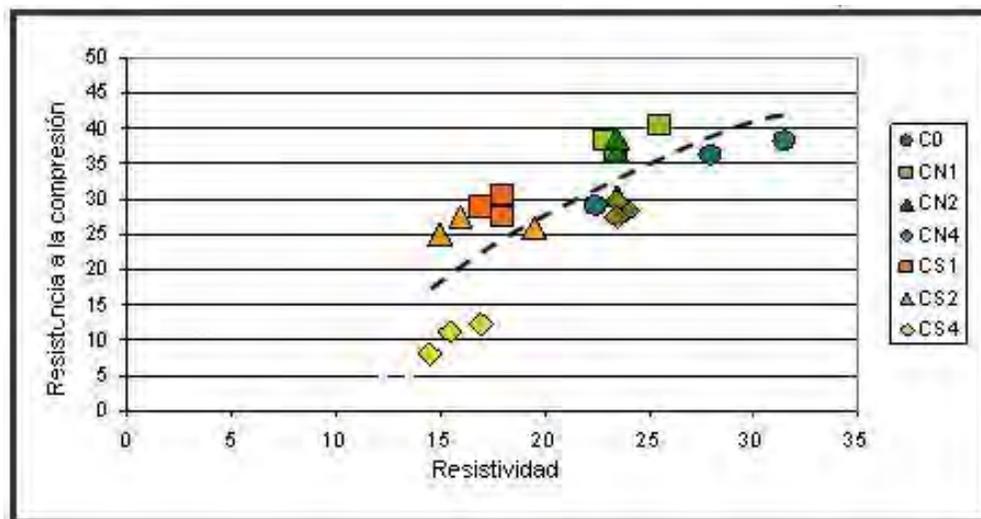


Figura 3.21

Resistividad vs resistencia a la compresión

La fig. 3.22 contempla los resultados correlacionados de porosidad efectiva y velocidad de pulso ultrasónico. Se observa claramente en ella una relación casi lineal entre las dos propiedades físicas, que al registrarse una mayor velocidad de pulso ultrasónico se tiene una menor cantidad de vacíos en el espécimen; y por tanto, un prisma más homogéneo.

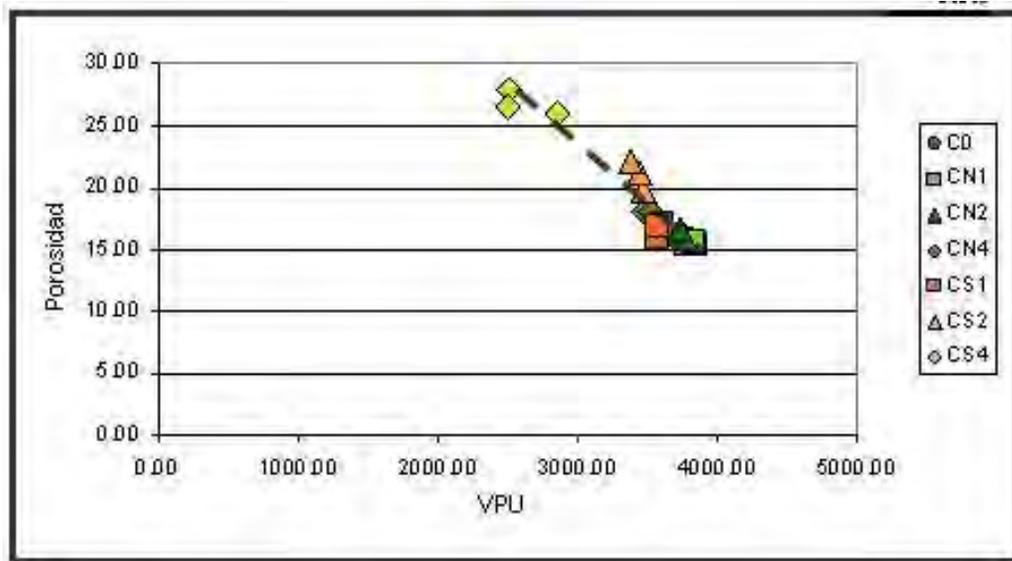


Figura 3.22

VPU contra porosidad

Aquellos cubos, cuyo contenido botánico fue nulo o con contenido de 1 y 2% de nopal mostraron resultados más favorables para esta característica, siendo que en el caso de los de 2 y 4% de sábila, la cantidad de poros presentes fue considerablemente mayor.

La fig. 3.23 muestra la relación empírica entre los resultados de las pruebas de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión. Esta gráfica demuestra que conforme incrementa la velocidad de pulso ultrasónico, la resistencia a la compresión también lo hace; y por consiguiente, la cantidad de vacíos en el espécimen reduce siendo que entre más uniforme es, estas dos características son más favorables.

Finalmente, en la fig. 3.24 se manifiesta una relación de muchos conocida en ingeniería; principalmente en el área de conocimiento de materiales de construcción: a mayor porosidad, menor es la resistencia a la compresión.

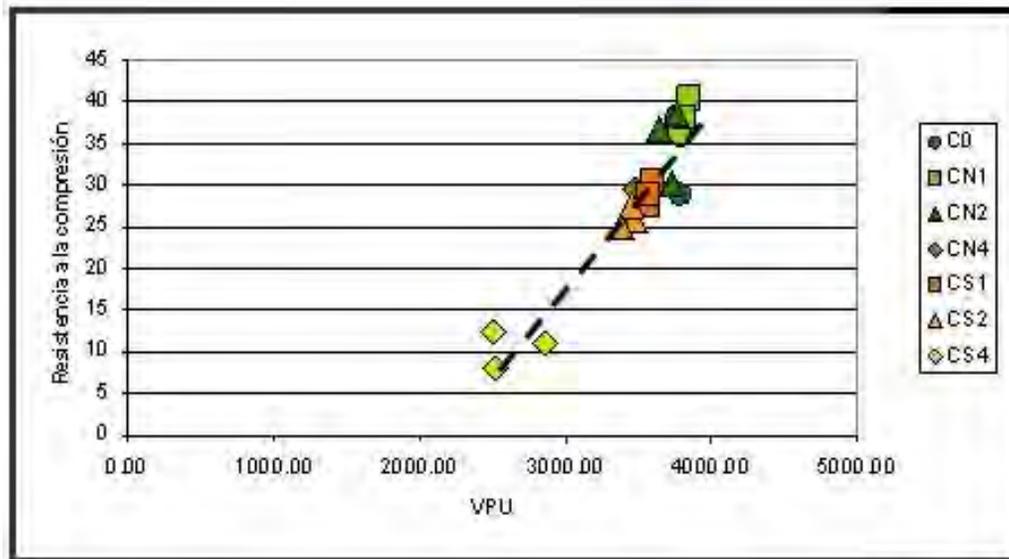


Figura 3.23

VPU vs resistencia a la compresión

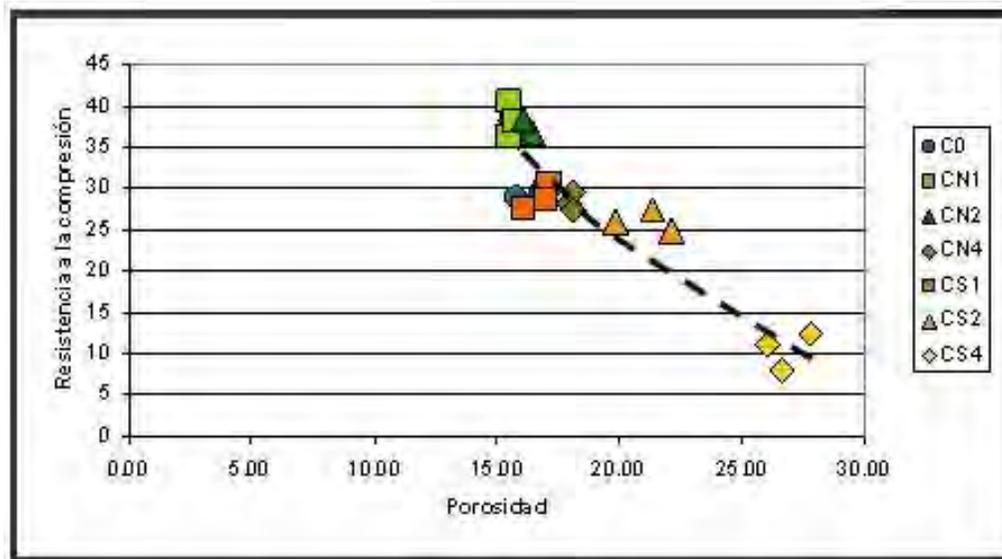


Figura 3.24

Porosidad contra resistencia a la compresión

Aquellos prismas cuya porosidad es pequeña, presentan mayor resistencia a la compresión; y por tanto, aquellos con contenido de nopal en 1 y 2%, así como los controles demostrando que las pruebas realizadas en esta investigación, se encuentran en concordancia con las leyes naturales de los materiales.

3.4 Resultados finales de los ensayos

Una vez concluidas las pruebas, analizados y discutidos los datos, se determinaron las calidades de las mezclas probadas en la investigación, que fueron sin duda los más relevantes por las características presentadas. La tabla 3.11 comprende los comportamientos de cada uno de las mezclas en forma más general para las pruebas realizadas utilizando los criterios de control de calidad incluidos en el Manual de la Red DURAR (1997). Del mismo modo se incluyen en la tabla 3.12 las observaciones generales en cada una de éstas.

De la tabla 3.13 se resume que la mezcla C0, en promedio posee una calidad buena, cumpliendo en la mayoría de las pruebas físicas realizadas con los parámetros de un material durable. Las mezclas CN1 y CN2 cumplieron las dos con los criterios de calidad que lo califican como un material durable de manera excelente según el Manual de la Red DURAR (1997) como material durable, dejando únicamente afuera la propiedad de porosidad, la cual, como ya se discutió, podría estar enmascarada debido a la condición de que el nopal es una adición que absorbe más agua de lo normal. La mezcla CN4 mostró un comportamiento que define su calidad entre bueno y regular desde el punto de vista de durabilidad.

TABLA 3.11

Comportamiento de las probetas en los ensayos

Prueba / Especimen	Resistividad	VPU	Compresión	Porosidad
C0	Excelente	Bueno	Bueno	Bueno
CN1	Excelente	Excelente	Excelente	Bueno
CN2	Excelente	Excelente	Excelente	Bueno
CN4	Regular	Bueno	Bueno	Regular
CS1	Regular	Malo	Regular	Malo
CS2	Regular	Malo	Malo	Malo
CS4	Regular	Malo	Malo	Malo

(DURAR 1997).

La mezcla CS1 denotó un comportamiento en durabilidad entre regular y malo; y, finalmente, las mezclas CS2 y CS4 fueron calificadas como las menos durables de todas de acuerdo con sus resultados.

La tabla 3.12 hace un resumen de lo obtenido en todas y cada una de las pruebas en pastas, como morteros; propiedades que servirán para listar las conclusiones en el siguiente capítulo de este trabajo.

TABLA 3.12

Observaciones generales de las pruebas

Prueba	Observación
Consistencia normal	A mayor porcentaje de aditivo se requiere una mayor cantidad de agua debido a la alta capacidad de absorción de estos aditivos botánicos.
Fraguado inicial y final	Las muestras con aditivo disminuyeron el tiempo de fraguado, por lo que las adiciones botánicas funcionaron como un acelerador de fraguado.
Fluidez	A mayor porcentaje de aditivo se requiere una mayor cantidad de agua para producir la fluidez en morteros.
Resistividad eléctrica	Morteros sin adición y con remplazo de 1 % y 2 % de nopal mostraron incrementos en valores de resistividad eléctrica.
Velocidad de pulso ultrasónico	Morteros con aditivo de nopal, mostraron valores similares a los controles en la velocidad de pulso ultrasónico; por tanto, el porcentaje de vacíos en los morteros se mantuvo similar a la mezcla control.
Resistencia a la compresión	Morteros con 1 y 2 % de remplazo, muestran resistencias a la compresión similares a los controles, a pesar de que la relación A/C usada para prepararlos aumentó; y es apreciable un incremento en esta resistencia al paso del tiempo.
Absorción de agua	Morteros con adiciones botánicas presentan un incremento en la absorción de agua. Esta propiedad no implica necesariamente que el mortero con adiciones sea más poroso que el control, sólo que atrapa más agua.

4 Conclusiones y recomendaciones

Una vez finalizadas las pruebas destructivas y no destructivas en especímenes cuyas adiciones de nopal y sábila en diferentes porcentajes dieron una serie de resultados, que muestran al nopal como un aditivo natural que puede incrementar la durabilidad de materiales base cemento.

Las mezclas cuyo remplazo fue de nopal mostraron incrementos en propiedades como resistencia a la compresión y resistividad eléctrica. A pesar de que se agregó mayor cantidad de agua y se disminuyó la cantidad de cemento al ser sustituido por estas adiciones, se encontró que sus resistencias mecánicas y eléctricas no disminuyeron; por el contrario, se incrementaron. En el caso de los morteros cuyos porcentajes fueron del 1 y 2% de adición de nopal, los especímenes presentaron aún mayores incrementos en las propiedades mencionadas, por lo que se definieron como materiales de mayor durabilidad.

Debe considerarse un cuidado especial la determinación del comportamiento físico global de la mezcla con estas adiciones utilizando una sola prueba (resistencia a la compresión), ya que los aditivos botánicos mencionados ocasionan cierto comportamiento, ya sea a mediano y largo plazo que pueden engañar al tener resultados finales sólo a tiempos menores de 28 días de su fabricación.

Por otra parte, aquellos especímenes con contenido de sábila deshidratada mostraron un decremento en las propiedades del mortero, dando como resultado morteros con baja durabilidad y resistencia. En un inicio se optó por colocar este aditivo para tener otra especie de cactus muy común en México y comparar con el nopal; sin embargo; los efectos producidos fueron lo contrario a los alcanzados con el nopal. Por esto, la sábila no se propone como opción para incrementar la durabilidad de materiales base cemento.

Con los resultados obtenidos, los beneficios mostrados quedan como aplicables estrictamente a morteros. Sin embargo, al ser este un material a base de cemento, se puede extrapolar para elementos de concreto. Actualmente se realiza un estudio del efecto de las adiciones en mezclas de concreto.

Con base en los resultados y las pruebas realizadas en el proyecto, se puede concluir que la adición botánica de nopal en forma deshidratada a morteros base cemento Portland, produce efectos benéficos en sus propiedades. No obstante, el proceso para la obtención de nopal deshidratado es costoso; por lo que si se desea aplicar de manera industrializada, resultaría poco factible por su elevado costo; de ahí que es necesario continuar los estudios recurriendo al uso de productos de nopal más económicos.

Bibliografía

Agricultura 21 (2000). "Novedades para el ganado," www.fao.org

Agrupación Sierra Madre, SC. University of Virginia, (2004). www.biodiversityscience.org/.../Mesoamerica.html.

Alimentación Sana (2005) "Propiedades del nopal" www.alimentacionsana.com.ar

Arid Zones Projects (2005). "Plantación del nopal," www.thenopaltrade.com

Arrieta, P. "Mesoamérica: ecología humana," Número 1, Universidad Nanzan de Japón, Japón. (2004).

ASTM C-109 (2005). "*Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*" ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.

ASTM C-187 (2004). "*Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*" ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.

ASTM C-191 (2004). "*Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*" ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.

ASTM C-230 (2003). "*Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*" ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.

ASTM C-305 (2003). "*Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*" ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.

Cárdenas, A., Arguelles, W. M., and Goycoolea, F. M. (2002). "*On the Possible Role of Opuntia ficus-indica Mucilage in Lime Mortar Performance in the Protection of Historical Buildings*" Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, Hermosillo, Sonora, México.

Damazo, D. "Edificios prefabricados en concreto para vivienda de interés social," Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, D.F. (2006).

Díaz, J. A., Ávila, L. M. "Sondeo del mercado mundial de sábila (Aloe vera)," Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Bogotá, Colombia. p. 21. (2002).

Red DURAR. "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado," Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, CYTED, Maracaibo, Venezuela. (1997).

Flores-Valdez, C., de Luna Esquivel, J. Ramírez Moreno, P. "Mercado Mundial del Nopalito," Universidad Autónoma Chapingo, CIESTAAM, Estado de México, México. (1995).

Flores-Valdez, C. "Importancia del nopal," en Nopalitos y tunas, producción, comercialización, poscosecha e industrialización, ed. Flores Valdez, C.A., 1ª Ed. Universidad Autónoma Chapingo, CIESTAAM. México, pp. 1-18. (2003).

Fuentes, J.; Rodríguez, M.; Jiménez Cruz, L.; Suárez García, L.; Torres Hernández, M.; Murillo Soto, M.E.; López González, J.J.; y Ortiz de la Rosa, B. "Evaluación nutricional de cuatro especies de nopal (Opuntia spp) forrajero," Golden Omega "Propiedades del nopal," (2002). www.lalinaza.com

JR Herbaline "Nopal," (2004). <http://www.sabilinaza.com/nopal.php>

Linopalplus "Nopal" (2006-2007). <http://linopalplus.com/Nopal.html>

Mad Industrias "Tratado Nopal" (1999).
[http://www.giga.com/~mag/Tratado Nopal.html](http://www.giga.com/~mag/Tratado_Nopal.html).

Martínez Vargas, M.R. "Adición para mortero utilizando puzolanas naturales," Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Marista de Querétaro A.C., diciembre, Santiago de Querétaro, Querétaro, México. (2005).

Neville, A.M. "Tecnología del Concreto," Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 3ª Edición, México, D.F., México. (1992).

Pérez Sandi, M. "De nopales y tunas"
<http://www.laneta.apc.org/emis/jornada/2000/enero/nopales.htm>

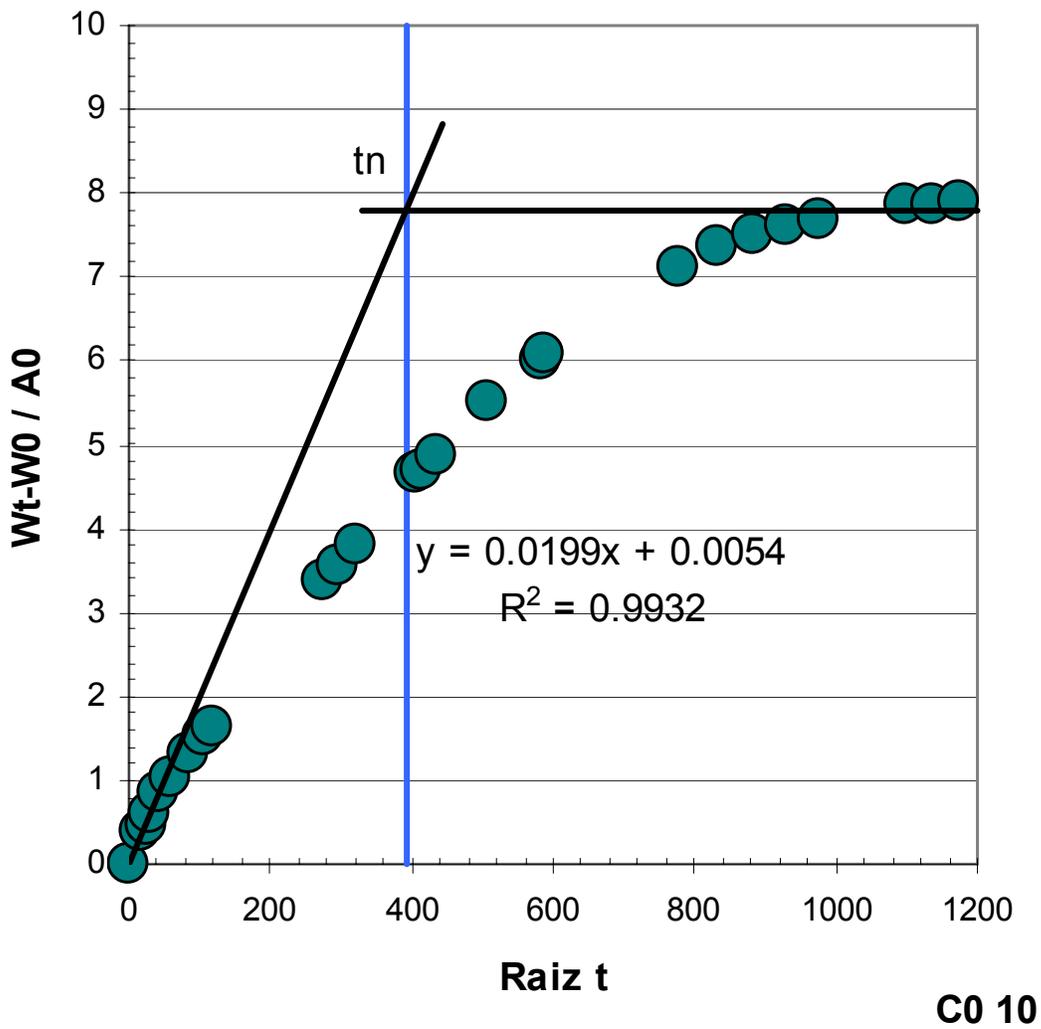
Sáenz, C. "Utilización agroindustrial del nopal," Boletines de servicios agrícolas de la FAO. (2006).

Teorema Ambiental "Alimentación ganadera con nopalitos" (2004).
www.teorema.com.mx.

Zeballos, M.P. "Productos naturales peruanos" (2002).
<http://www.gratisblog.com/productosperuanos/b1099s1637-acne.html>.

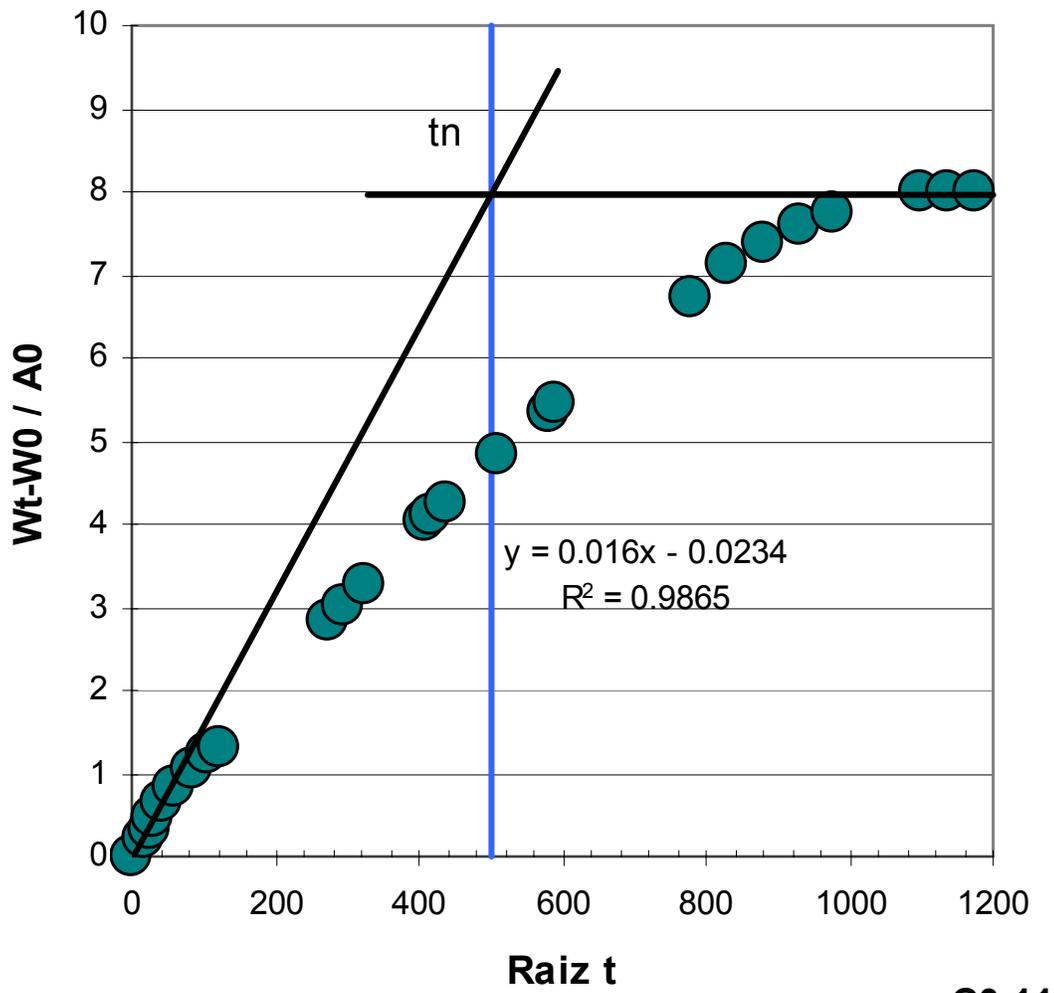
Anexos.

Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵ_e)	Absorción capilar (S)
C0 10	6,18E+07	0,0198	15,60	1,27E-04



Datos resultantes de la prueba de capilaridad para C0 10				
$W_0=0.26475$			Área (m²)=0.00255	
Tiempo s	(s) ^{1/2} s	Altura z	W _t kg	(W _t -W ₀)/A ₀ kg/m ²
0	0,000	0,000	0,26475	0,000
300	17,321	0,010	0,26573	0,384
600	24,495	0,011	0,26591	0,455
900	30,000	0,012	0,26630	0,608
1800	42,426	0,013	0,26693	0,855
3 600	60,000	0,015	0,26742	1,047
7 200	84,853	0,015	0,26814	1,329
10 800	103,923	0,015	0,26868	1,541
14 400	120,000	0,016	0,26894	1,643
75 600	274,955	0,018	0,27333	3,365
86 400	293,939	0,020	0,27379	3,545
104 400	323,110	0,022	0,27444	3,800
165 600	406,940	0,024	0,27660	4,647
172 800	415,692	0,026	0,27677	4,714
190 800	436,807	0,026	0,27720	4,882
259 200	509,117	0,027	0,27882	5,518
338 400	581,722	0,030	0,28008	6,012
345 600	587,878	0,030	0,28029	6,094
604 800	777,689	0,032	0,28287	7,106
691 200	831,384	0,035	0,28356	7,376
777 600	881,816	0,035	0,28393	7,522
864 000	929,516	0,050	0,28418	7,620
950 400	974,885	0,050	0,28436	7,690
1 209 600	1099,818	0,050	0,28480	7,863
1 296 000	1138,420	0,050	0,28482	7,871
1 382 400	1175,755	0,050	0,28491	7,906

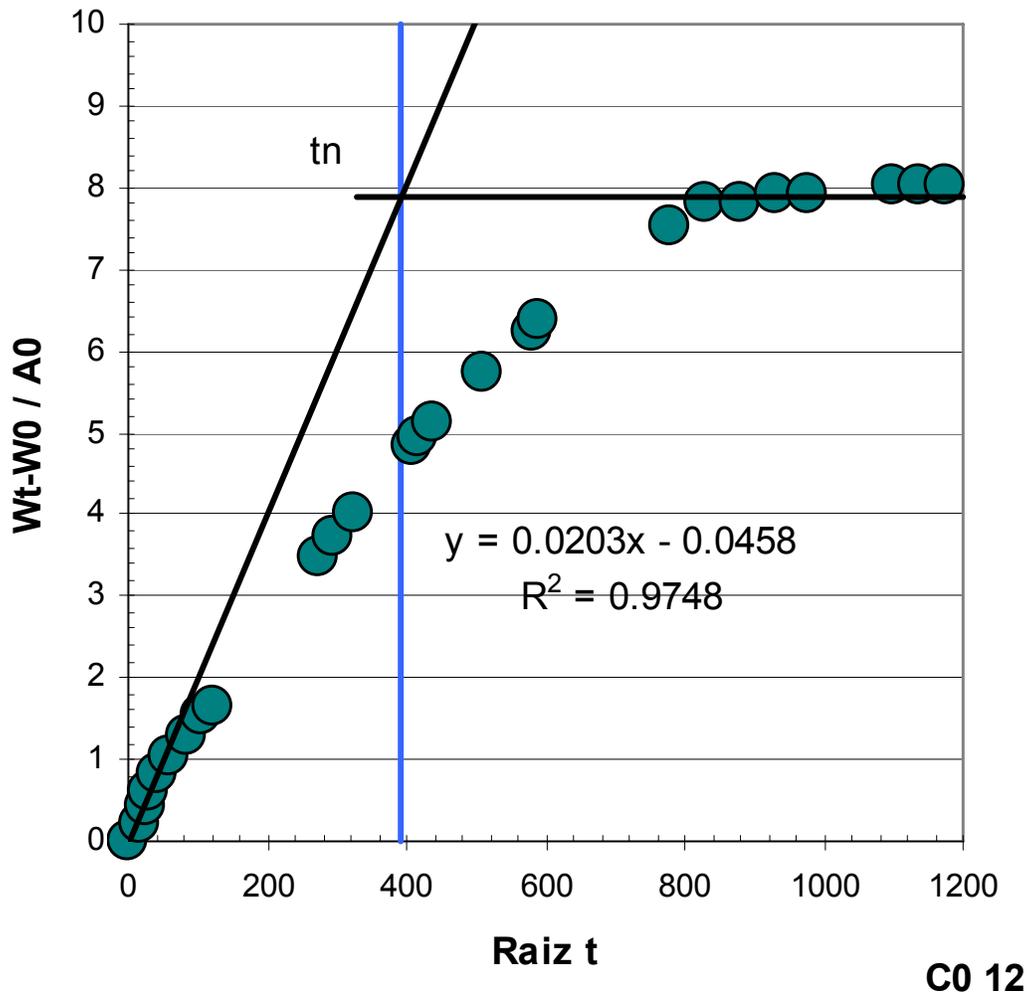
Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵ_e)	Absorción capilar (S)
C0 11	9,96E+07	0,0159	15,90	1,00E-04



C0 11

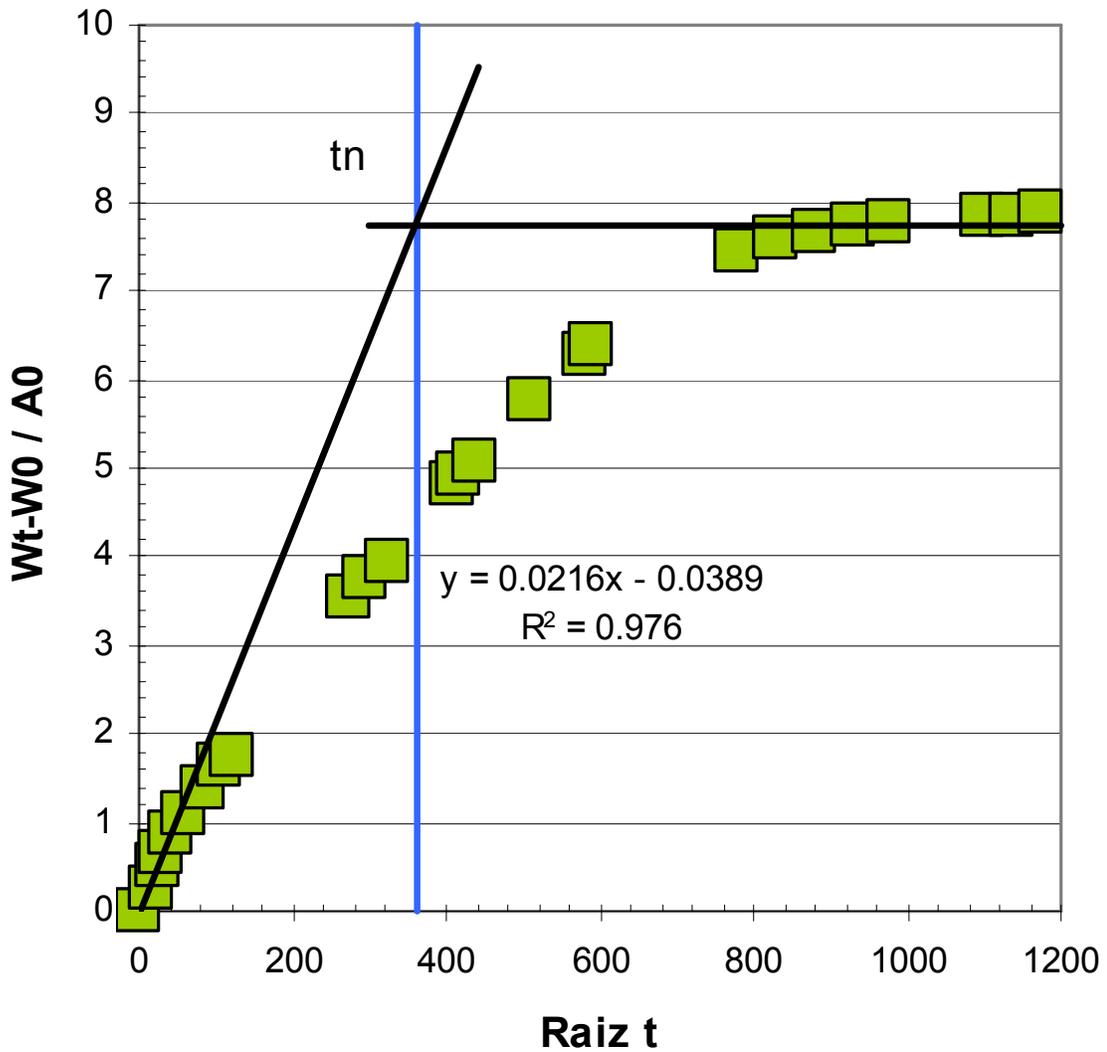
Datos resultantes de la prueba de capilaridad para C0 11				
$W_0=0.26618$			Área (m²)=0.00255	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0,000	0,26618	0,000
300	17,321	0,012	0,26673	0,216
600	24,495	0,013	0,26706	0,345
900	30,000	0,013	0,26742	0,486
1 800	42,426	0,013	0,26787	0,663
3 600	60,000	0,013	0,26831	0,835
7 200	84,853	0,014	0,26884	1,043
10 800	103,923	0,014	0,26929	1,220
14 400	120,000	0,015	0,26950	1,302
75 600	274,955	0,017	0,27343	2,843
86 400	293,939	0,020	0,27390	3,027
104 400	323,110	0,021	0,27449	3,259
165 600	406,940	0,021	0,27644	4,024
172 800	415,692	0,021	0,27666	4,110
190 800	436,807	0,021	0,27701	4,247
259 200	509,117	0,021	0,27852	4,839
338 400	581,722	0,025	0,27980	5,341
345 600	587,878	0,025	0,28009	5,455
604 800	777,689	0,030	0,28330	6,714
691 200	831,384	0,030	0,28432	7,114
777 600	881,816	0,033	0,28496	7,365
864 000	929,516	0,050	0,28555	7,596
950 400	974,885	0,050	0,28593	7,745
1 209 600	1 099,818	0,050	0,28660	8,008
1 296 000	1 138,420	0,050	0,28660	8,008
1 382 400	1 175,755	0,050	0,28660	8,008

Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵ_e)	Absorción capilar (S)
C0 12	6,12E+07	0,0202	15,80	1,28E-04



Datos resultantes de la prueba de capilaridad para C0 12				
$W_0=0,26763$			Área (m²)=0,0026	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,26763	0,000
300	17,321	0,0095	0,26823	0,231
600	24,495	0,012	0,26872	0,419
900	30,000	0,012	0,26919	0,600
1 800	42,426	0,013	0,26980	0,835
3 600	60,000	0,014	0,27036	1,050
7 200	84,853	0,015	0,27101	1,300
10 800	103,923	0,015	0,27165	1,546
14 400	120,000	0,017	0,27190	1,642
75 600	274,955	0,019	0,27671	3,492
86 400	293,939	0,021	0,27731	3,723
104 400	323,110	0,021	0,27811	4,031
165 600	406,940	0,021	0,28022	4,842
172 800	415,692	0,021	0,28051	4,954
190 800	436,807	0,021	0,28093	5,115
259 200	509,117	0,023	0,28258	5,750
338 400	581,722	0,026	0,28388	6,250
345 600	587,878	0,026	0,28423	6,385
604 800	777,689	0,026	0,28724	7,542
691 200	831,384	0,050	0,28795	7,815
777 600	881,816	0,050	0,28795	7,815
864 000	929,516	0,050	0,28819	7,908
950 400	974,885	0,050	0,28819	7,908
1 209 600	1 099,818	0,050	0,28850	8,027
1 296 000	1 138,420	0,050	0,28850	8,027
1 382 400	1 175,755	0,050	0,28850	8,027

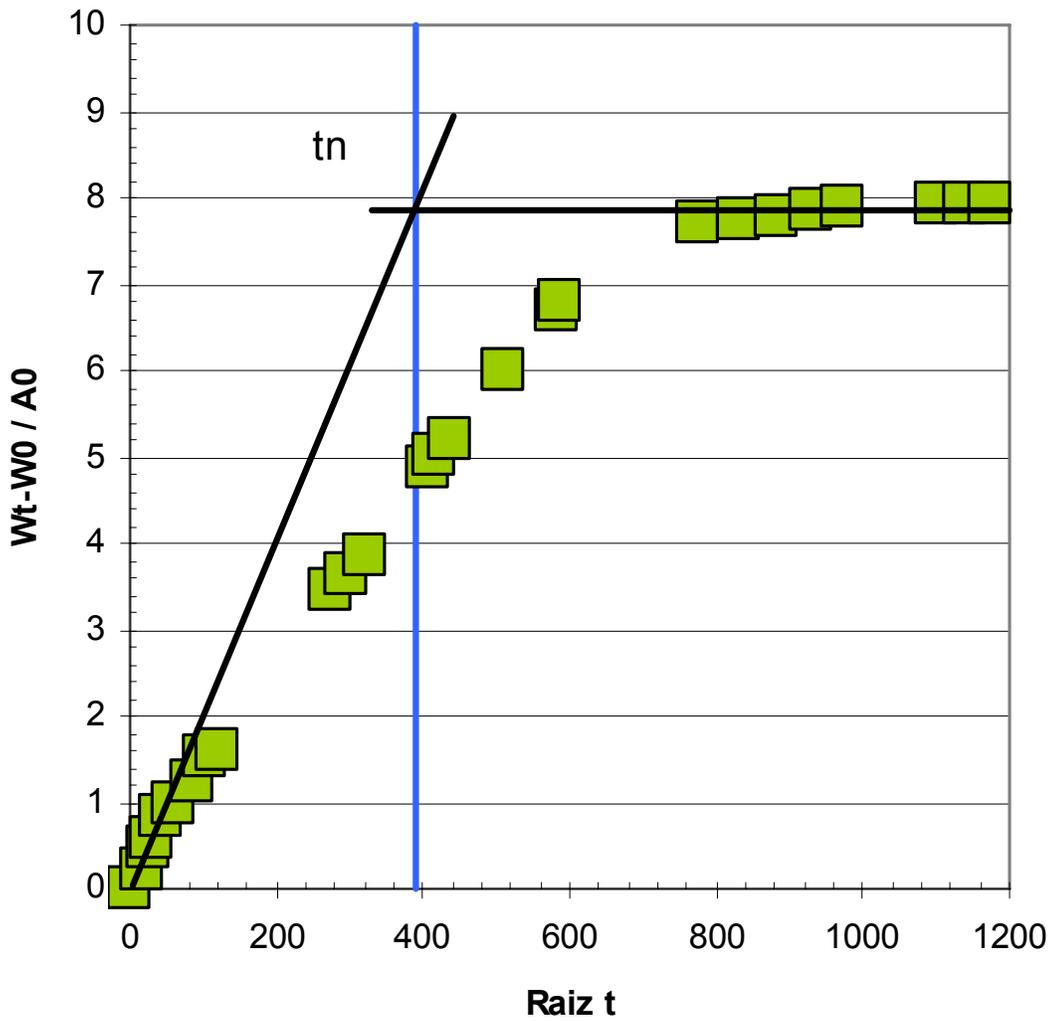
Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵ_e)	Absorción capilar (S)
CN1 11	5,18E+07	0,0215	15,50	1,39E-04



CN1 11

Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CN1 11				
$W_0=0,26244$			Área (m²)=0,00255	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,26244	0,000
300	17,321	0,014	0,26306	0,243
600	24,495	0,015	0,26372	0,502
900	30,000	0,015	0,26408	0,643
1 800	42,426	0,018	0,26469	0,882
3 600	60,000	0,019	0,26525	1,102
7 200	84,853	0,019	0,26596	1,380
10 800	103,923	0,021	0,26666	1,655
14 400	120,000	0,021	0,26690	1,749
75 600	274,955	0,028	0,27146	3,537
86 400	293,939	0,029	0,27201	3,753
104 400	323,110	0,030	0,27253	3,957
165 600	406,940	0,030	0,27472	4,816
172 800	415,692	0,032	0,27500	4,925
190 800	436,807	0,032	0,27542	5,090
259 200	509,117	0,035	0,27711	5,753
338 400	581,722	0,035	0,27849	6,294
345 600	587,878	0,035	0,27875	6,396
604 800	777,689	0,040	0,28139	7,431
691 200	831,384	0,040	0,28181	7,596
777 600	881,816	0,050	0,28196	7,655
864 000	929,516	0,050	0,28216	7,733
950 400	974,885	0,050	0,28227	7,776
1 209 600	1 099,818	0,050	0,28246	7,851
1 296 000	1 138,420	0,050	0,28247	7,855
1 382 400	1 175,755	0,050	0,28254	7,882

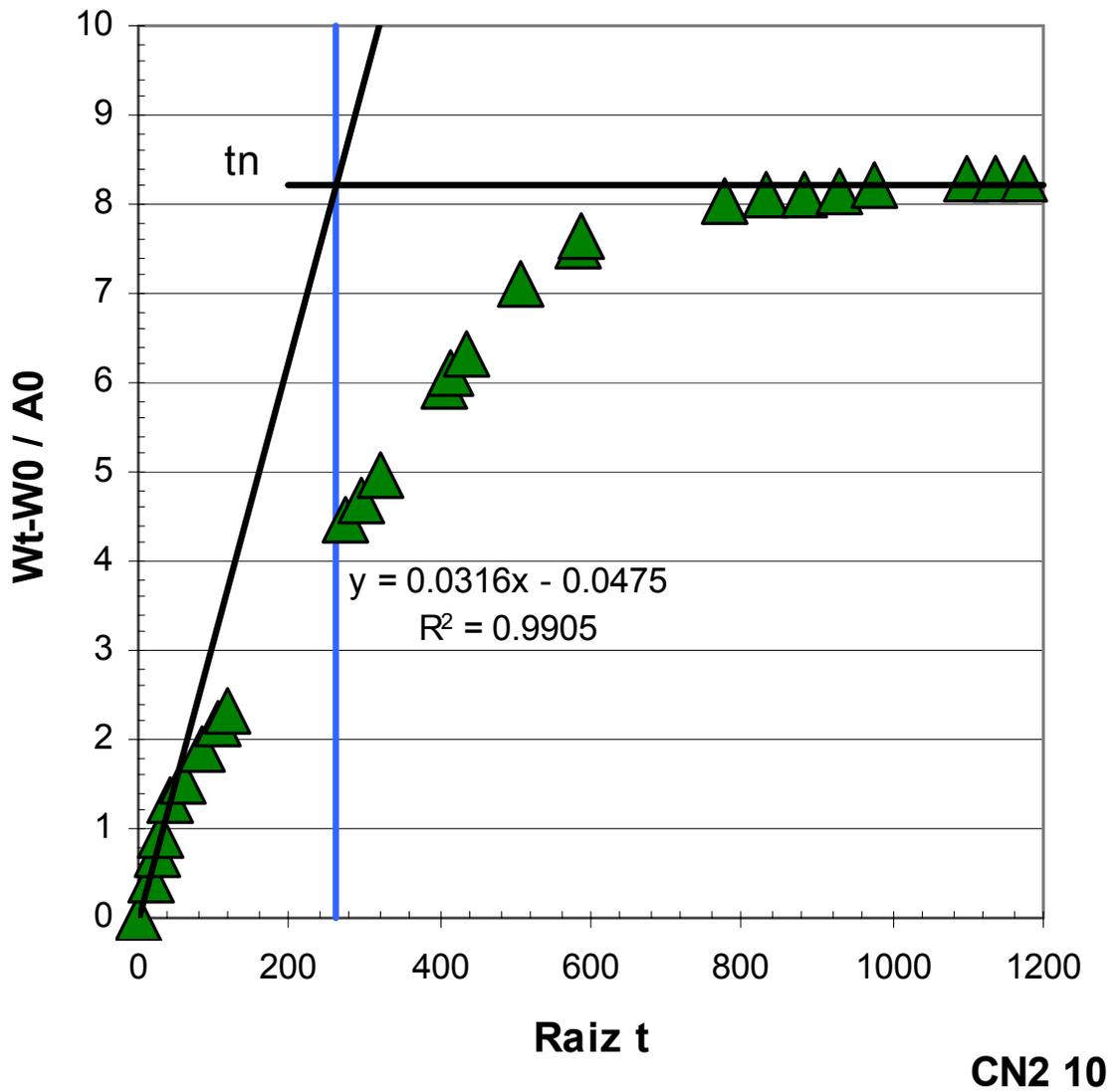
Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵe)	Absorción capilar (S)
CN1 12	6,05E+07	0,0202	15,70	1,29E-04



CN1 12

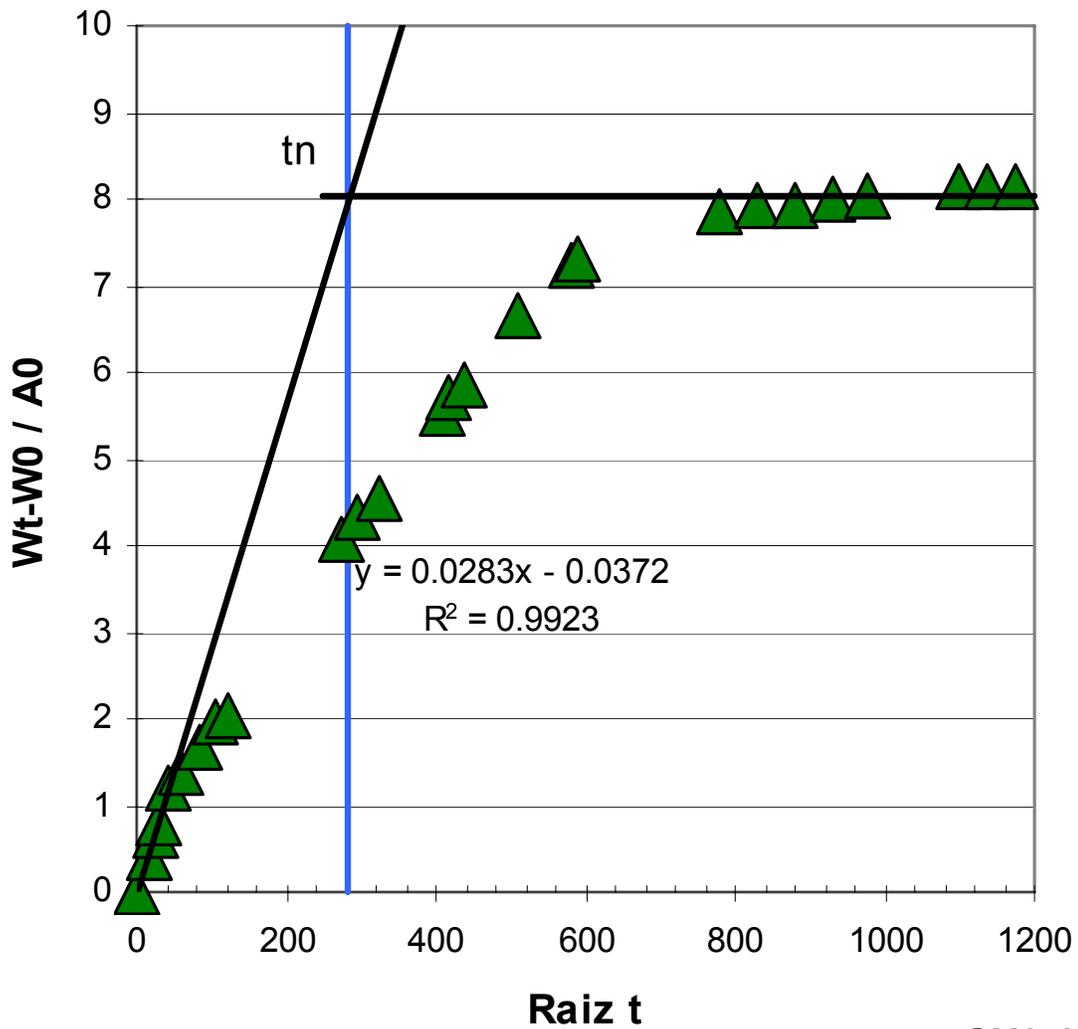
Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CN1 12				
$W_0=0,26416$			Área (m²)=0,00255	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,26416	0,000
300	17,321	0,014	0,26476	0,235
600	24,495	0,015	0,26533	0,459
900	30,000	0,017	0,26566	0,588
1 800	42,426	0,022	0,26630	0,839
3 600	60,000	0,022	0,26669	0,992
7 200	84,853	0,024	0,26735	1,251
10 800	103,923	0,025	0,26802	1,514
14 400	120,000	0,028	0,26824	1,600
75 600	274,955	0,031	0,27293	3,439
86 400	293,939	0,031	0,27347	3,651
104 400	323,110	0,031	0,27403	3,871
165 600	406,940	0,033	0,27661	4,882
172 800	415,692	0,033	0,27697	5,024
190 800	436,807	0,033	0,27743	5,204
259 200	509,117	0,038	0,27948	6,008
338 400	581,722	0,04	0,28120	6,682
345 600	587,878	0,04	0,28149	6,796
604 800	777,689	0,050	0,28380	7,702
691 200	831,384	0,050	0,28394	7,757
777 600	881,816	0,050	0,28401	7,784
864 000	929,516	0,050	0,28418	7,851
950 400	974,885	0,050	0,28428	7,890
1 209 600	1 099,818	0,050	0,28440	7,937
1 296 000	1 138,420	0,050	0,28440	7,937
1 382 400	1 175,755	0,050	0,28441	7,941

Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵ_e)	Absorción capilar (S)
CN2 10	2,70E+07	0,0315	16,40	1,92E-04



Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CN2 10				
$W_0=0,25935$			Área (m²)=0,002575	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,25935	0,000
300	17,321	0,016	0,26044	0,423
600	24,495	0,018	0,26117	0,707
900	30,000	0,019	0,26171	0,917
1 800	42,426	0,025	0,26275	1,320
3 600	60,000	0,025	0,26334	1,550
7 200	84,853	0,026	0,26421	1,887
10 800	103,923	0,027	0,26496	2,179
14 400	120,000	0,029	0,26529	2,307
75 600	274,955	0,032	0,27086	4,470
86 400	293,939	0,034	0,27142	4,687
104 400	323,110	0,034	0,27215	4,971
165 600	406,940	0,035	0,27471	5,965
172 800	415,692	0,035	0,27512	6,124
190 800	436,807	0,035	0,27564	6,326
259 200	509,117	0,040	0,27764	7,103
338 400	581,722	0,045	0,27879	7,550
345 600	587,878	0,045	0,27902	7,639
604 800	777,689	0,050	0,28005	8,039
691 200	831,384	0,050	0,28020	8,097
777 600	881,816	0,050	0,28020	8,097
864 000	929,516	0,050	0,28035	8,155
950 400	974,885	0,050	0,28046	8,198
1 209 600	1 099,818	0,050	0,28069	8,287
1 296 000	1 138,420	0,050	0,28069	8,287
1 382 400	1 175,755	0,050	0,28071	8,295

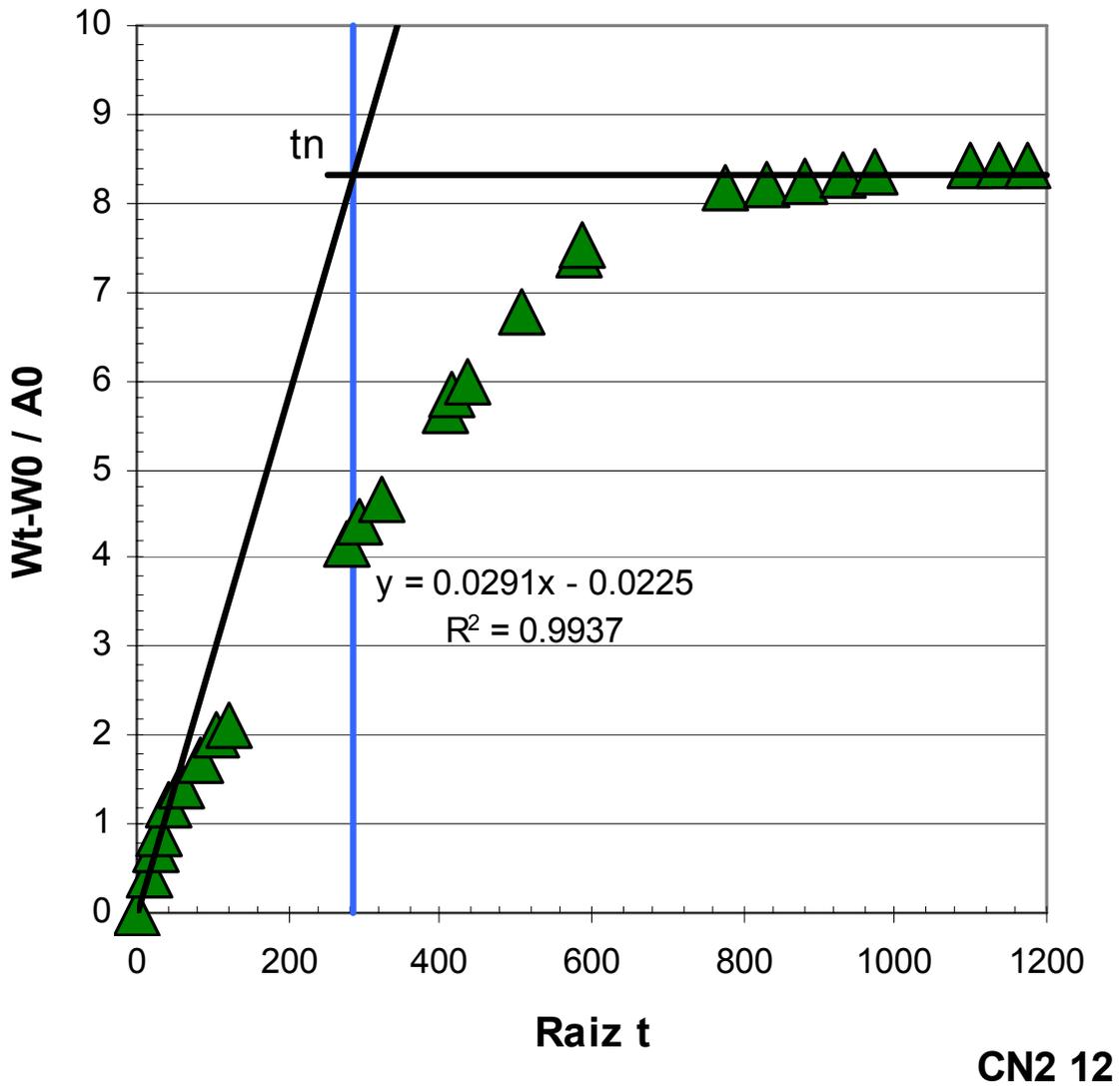
Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵe)	Absorción capilar (S)
CN2 11	3,20E+07	0,0284	16,06	1,77E-04



CN2 11

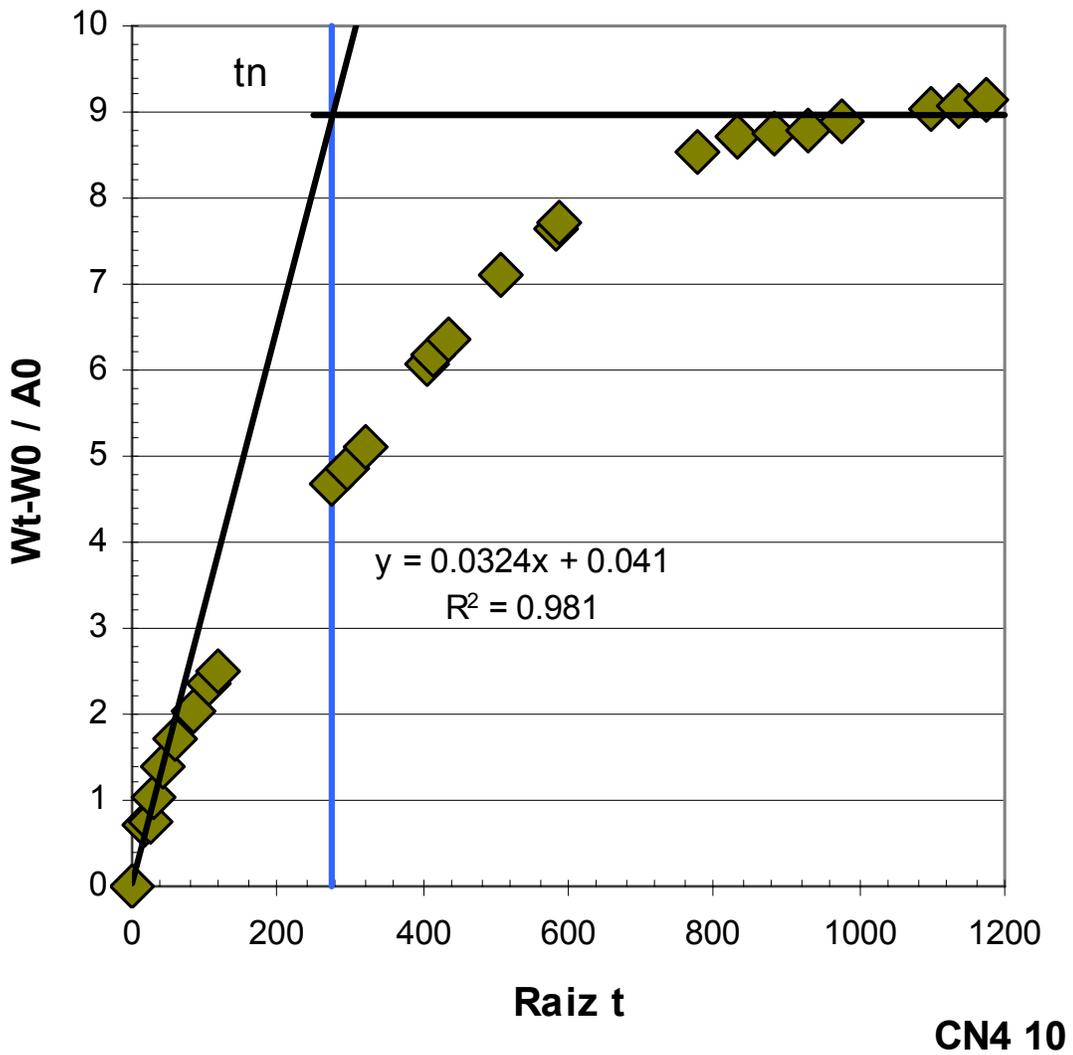
Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CN2 11				
$W_0=0,26034$			Área (m²)=0,002601	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	$(W_t-W_0)/A_0$
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,26034	0,000
300	17,321	0,018	0,26135	0,388
600	24,495	0,019	0,26205	0,657
900	30,000	0,021	0,26246	0,815
1 800	42,426	0,023	0,26343	1,188
3 600	60,000	0,023	0,26396	1,392
7 200	84,853	0,024	0,26468	1,669
10 800	103,923	0,024	0,26542	1,953
14 400	120,000	0,026	0,26567	2,049
75 600	274,955	0,028	0,27098	4,091
86 400	293,939	0,028	0,27155	4,310
104 400	323,110	0,028	0,27215	4,541
165 600	406,940	0,03	0,27475	5,540
172 800	415,692	0,03	0,27517	5,702
190 800	436,807	0,03	0,27561	5,871
259 200	509,117	0,035	0,27767	6,663
338 400	581,722	0,036	0,27913	7,224
345 600	587,878	0,036	0,27935	7,309
604 800	777,689	0,050	0,28078	7,859
691 200	831,384	0,050	0,28094	7,920
777 600	881,816	0,050	0,28098	7,935
864 000	929,516	0,050	0,28118	8,012
950 400	974,885	0,050	0,28128	8,051
1 209 600	1 099,818	0,050	0,28150	8,135
1 296 000	1 138,420	0,050	0,28150	8,135
1 382 400	1 175,755	0,050	0,28151	8,139

Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵe)	Absorción capilar (S)
CN2 12	3,29E+07	0,0289	16,60	1,74E-04



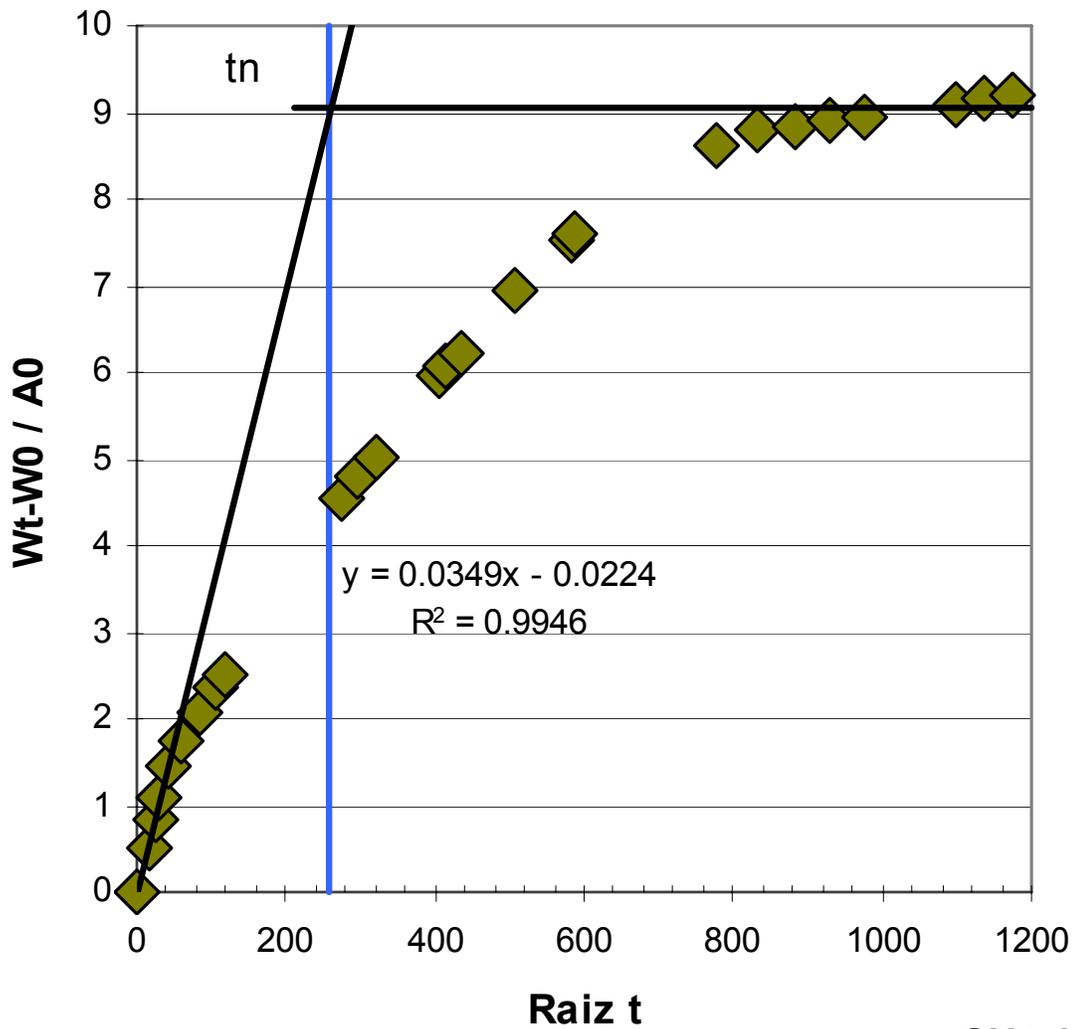
Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CN2 12				
$W_0=0,25991$			Área (m²)=0,00255	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	$(W_t-W_0)/A_0$
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,25991	0,000
300	17,321	0,016	0,26098	0,420
600	24,495	0,018	0,26170	0,702
900	30,000	0,020	0,26215	0,878
1 800	42,426	0,023	0,26299	1,208
3 600	60,000	0,025	0,26355	1,427
7 200	84,853	0,026	0,26434	1,737
10 800	103,923	0,027	0,26500	1,996
14 400	120,000	0,029	0,26529	2,110
75 600	274,955	0,031	0,27053	4,165
86 400	293,939	0,031	0,27111	4,392
104 400	323,110	0,031	0,27176	4,647
165 600	406,940	0,035	0,27435	5,663
172 800	415,692	0,035	0,27477	5,827
190 800	436,807	0,035	0,27519	5,992
259 200	509,117	0,038	0,27721	6,784
338 400	581,722	0,040	0,27881	7,412
345 600	587,878	0,040	0,27906	7,510
604 800	777,689	0,050	0,28077	8,180
691 200	831,384	0,050	0,28085	8,212
777 600	881,816	0,050	0,28091	8,235
864 000	929,516	0,050	0,28110	8,310
950 400	974,885	0,050	0,28121	8,353
1 209 600	1 099,818	0,050	0,28141	8,431
1 296 000	1 138,420	0,050	0,28142	8,435
1 382 400	1 175,755	0,050	0,28142	8,435

Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵe)	Absorción capilar (S)
CN4 10	2,98E+07	0,0328	17,90	1,83E-04



Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CN4 10				
$W_0=0,25127$			Área (m²)=0,00255	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,25127	0,000
300	17,321	0,013	0,25310	0,718
600	24,495	0,013	0,25322	0,765
900	30,000	0,014	0,25388	1,024
1 800	42,426	0,014	0,25485	1,404
3 600	60,000	0,015	0,25562	1,706
7 200	84,853	0,015	0,25648	2,043
10 800	103,923	0,015	0,25731	2,369
14 400	120,000	0,016	0,25767	2,510
75 600	274,955	0,022	0,26316	4,663
86 400	293,939	0,025	0,26364	4,851
104 400	323,110	0,025	0,26432	5,118
165 600	406,940	0,026	0,26678	6,082
172 800	415,692	0,026	0,26705	6,188
190 800	436,807	0,026	0,2675	6,365
259 200	509,117	0,027	0,26936	7,094
338 400	581,722	0,027	0,27075	7,639
345 600	587,878	0,027	0,27097	7,725
604 800	777,689	0,030	0,27307	8,549
691 200	831,384	0,030	0,27352	8,725
777 600	881,816	0,050	0,27357	8,745
864 000	929,516	0,050	0,27371	8,800
950 400	974,885	0,050	0,27391	8,878
1 209 600	1 099,818	0,050	0,27433	9,043
1 296 000	1 138,420	0,050	0,27442	9,078
1 382 400	1 175,755	0,050	0,27456	9,133

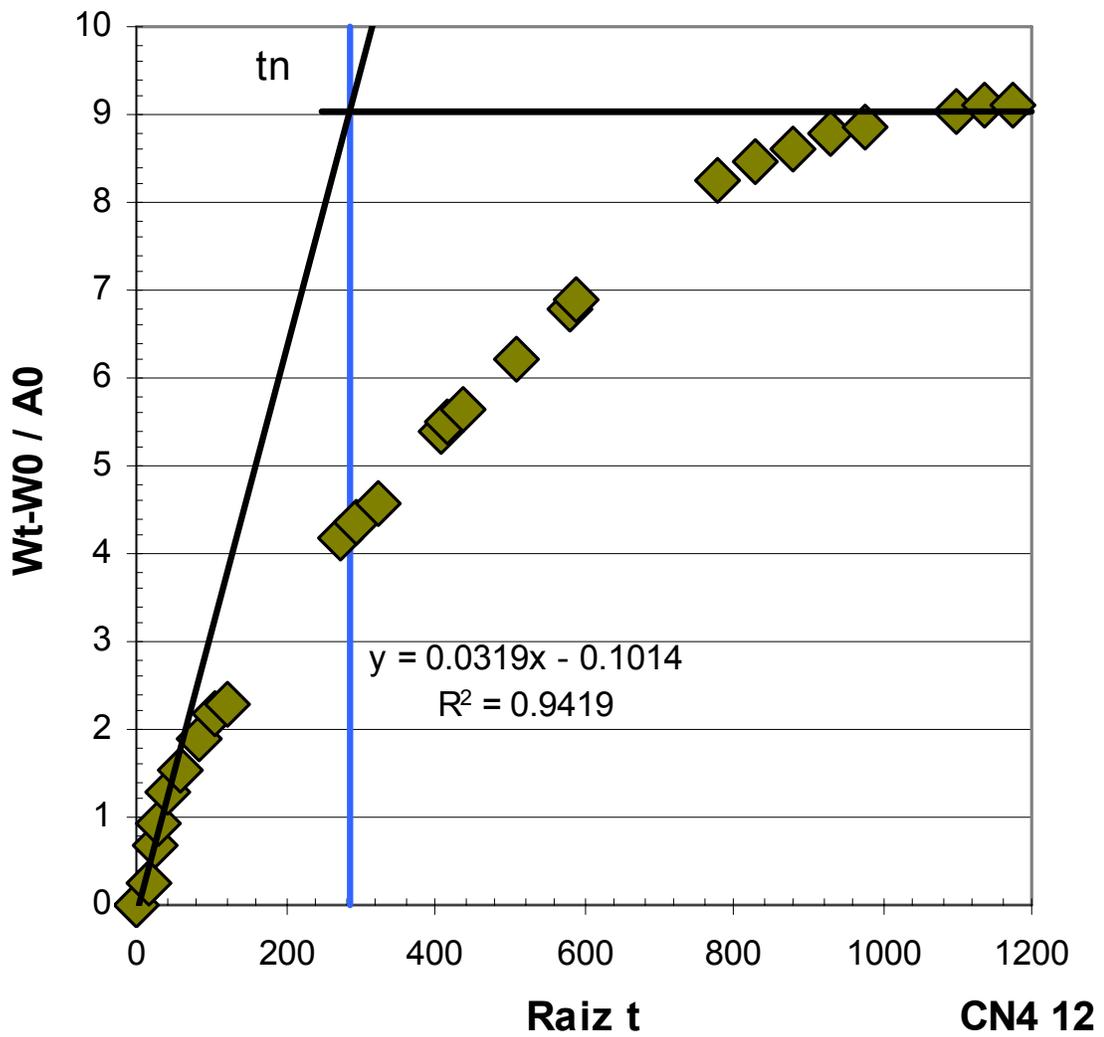
Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵe)	Absorción capilar (S)
CN4 11	2,68E+07	0,0349	18,10	1,93E-04



CN4 11

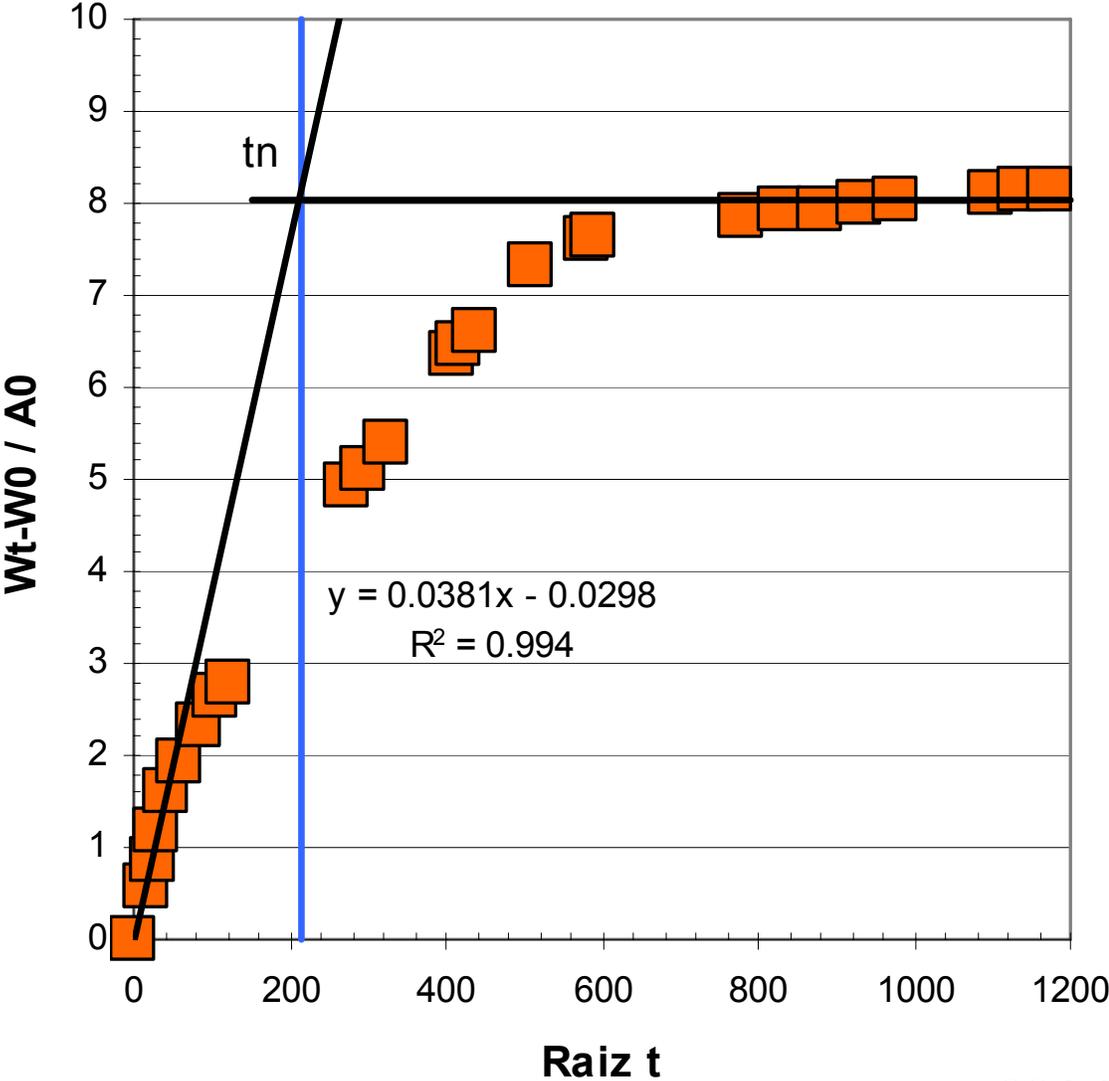
Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CN4 11				
$W_0=0,25155$		Área (m²)=0,002525		
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,25155	0,000
300	17,321	0,013	0,25287	0,523
600	24,495	0,014	0,25364	0,828
900	30,000	0,015	0,25426	1,073
1 800	42,426	0,017	0,25521	1,450
3 600	60,000	0,017	0,25595	1,743
7 200	84,853	0,017	0,25675	2,059
10 800	103,923	0,018	0,25755	2,376
14 400	120,000	0,019	0,25784	2,491
75 600	274,955	0,023	0,26302	4,543
86 400	293,939	0,025	0,26369	4,808
104 400	323,110	0,025	0,26418	5,002
165 600	406,940	0,027	0,26661	5,964
172 800	415,692	0,027	0,26690	6,079
190 800	436,807	0,027	0,26729	6,234
259 200	509,117	0,030	0,26911	6,954
338 400	581,722	0,030	0,27055	7,525
345 600	587,878	0,030	0,27078	7,616
604 800	777,689	0,030	0,27329	8,610
691 200	831,384	0,033	0,27375	8,792
777 600	881,816	0,050	0,27388	8,844
864 000	929,516	0,050	0,27402	8,899
950 400	974,885	0,050	0,27416	8,954
1 209 600	1 099,818	0,050	0,27448	9,081
1 296 000	1 138,420	0,050	0,27469	9,164
1 382 400	1 175,755	0,050	0,27475	9,188

Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵ_e)	Absorción capilar (S)
CN4 12	3,29E+07	0,0315	18,10	1,74E-04



Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CN4 12				
$W_0=0,25298$			Área (m²)=0,002575	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,25298	0,000
300	17,321	0,013	0,25359	0,237
600	24,495	0,014	0,25477	0,695
900	30,000	0,014	0,25536	0,924
1 800	42,426	0,014	0,25629	1,285
3 600	60,000	0,014	0,25698	1,553
7 200	84,853	0,015	0,25787	1,899
10 800	103,923	0,015	0,25860	2,183
14 400	120,000	0,017	0,25891	2,303
75 600	274,955	0,019	0,26372	4,171
86 400	293,939	0,02	0,26422	4,365
104 400	323,110	0,02	0,26476	4,575
165 600	406,940	0,02	0,26689	5,402
172 800	415,692	0,02	0,26712	5,491
190 800	436,807	0,021	0,26751	5,643
259 200	509,117	0,022	0,26902	6,229
338 400	581,722	0,023	0,27044	6,781
345 600	587,878	0,023	0,27072	6,889
604 800	777,689	0,025	0,27420	8,241
691 200	831,384	0,030	0,27482	8,482
777 600	881,816	0,050	0,27516	8,614
864 000	929,516	0,050	0,27556	8,769
950 400	974,885	0,050	0,27578	8,854
1 209 600	1 099,818	0,050	0,27625	9,037
1 296 000	1 138,420	0,050	0,27640	9,095
1 382 400	1 175,755	0,050	0,27647	9,122

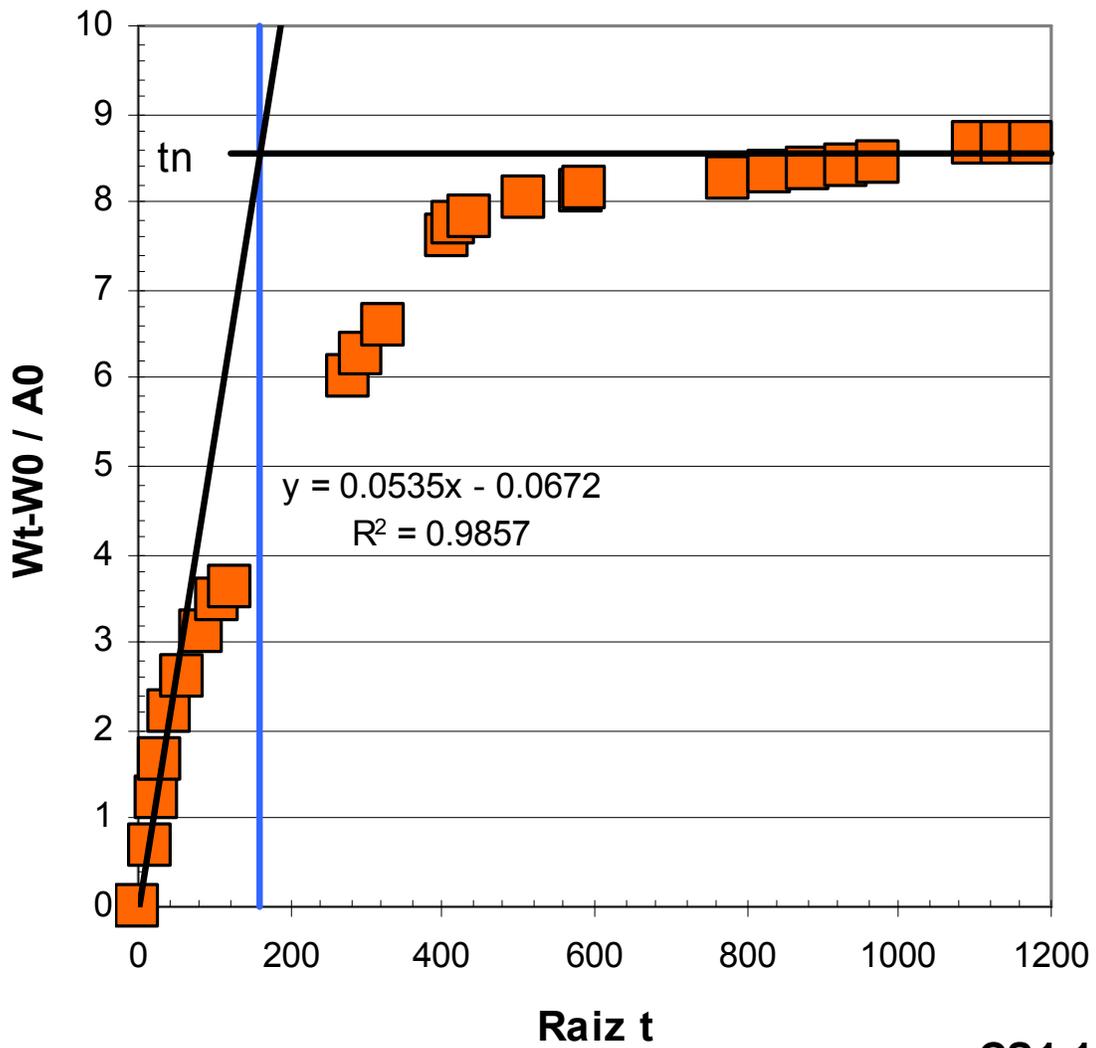
Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵe)	Absorción capilar (S)
CS1 10	1,81E+07	0,0378	16,10	2,35E-04



CS1 10

Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CS1 10				
$W_0=0,26558$			Área (m²)=0,002601	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,26558	0,000
300	17,321	0,014	0,26710	0,584
600	24,495	0,016	0,26781	0,857
900	30,000	0,017	0,26863	1,173
1 800	42,426	0,018	0,26972	1,592
3 600	60,000	0,020	0,27060	1,930
7 200	84,853	0,020	0,27163	2,326
10 800	103,923	0,021	0,27250	2,661
14 400	120,000	0,021	0,27281	2,780
75 600	274,955	0,026	0,27841	4,933
86 400	293,939	0,028	0,27888	5,113
104 400	323,110	0,029	0,27961	5,394
165 600	406,940	0,030	0,28208	6,344
172 800	415,692	0,030	0,28239	6,463
190 800	436,807	0,031	0,28280	6,621
259 200	509,117	0,033	0,28461	7,316
338 400	581,722	0,037	0,28534	7,597
345 600	587,878	0,050	0,28548	7,651
604 800	777,689	0,050	0,28606	7,874
691 200	831,384	0,050	0,28619	7,924
777 600	881,816	0,050	0,28620	7,928
864 000	929,516	0,050	0,28635	7,985
950 400	974,885	0,050	0,28646	8,028
1 209 600	1 099,818	0,050	0,2867	8,120
1 296 000	1 138,420	0,050	0,28673	8,131
1 382 400	1 175,755	0,050	0,28673	8,131

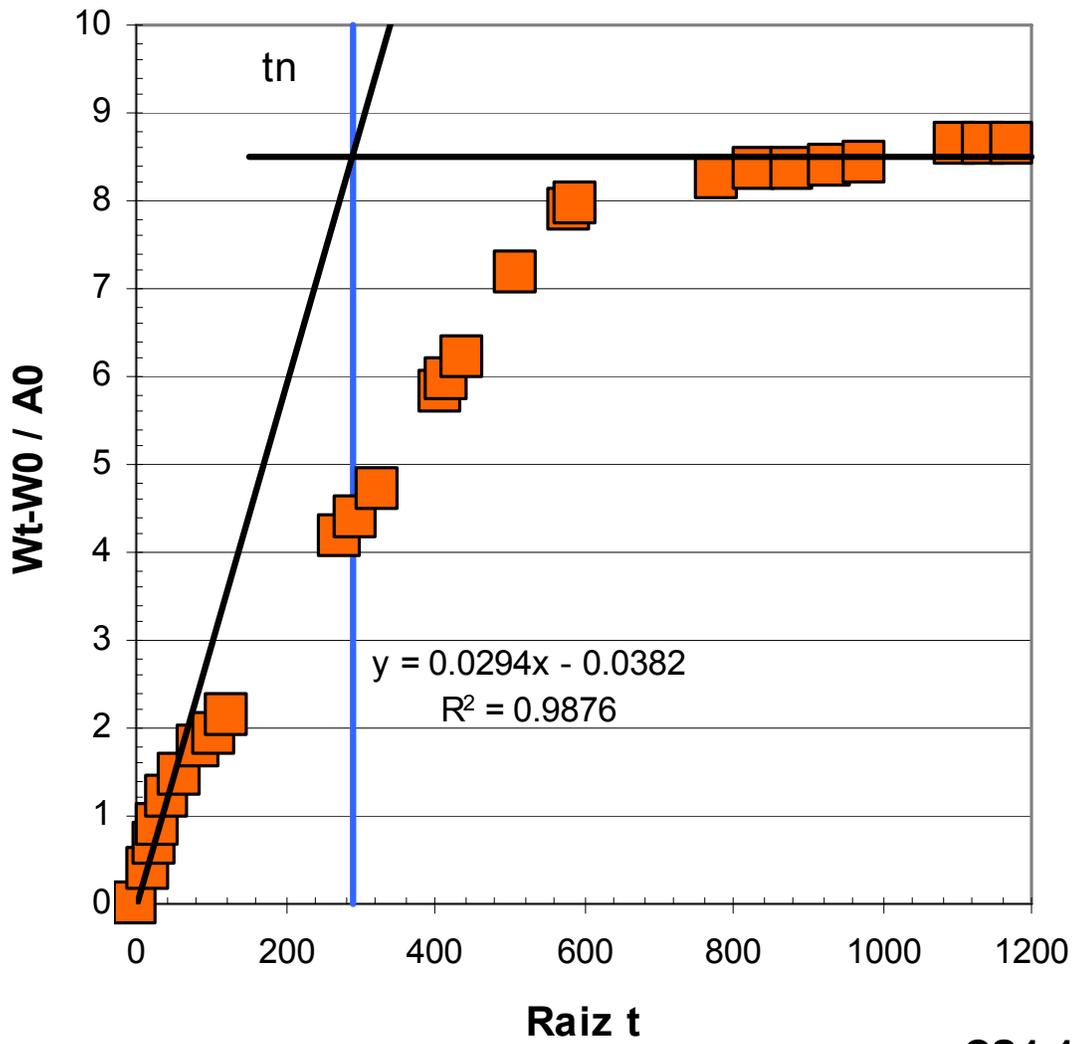
Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵ_e)	Absorción capilar (S)
CS1 11	1,02E+07	0,0534	17,10	3,13E-04



CS1 11

Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CS1 11				
$W_0=0,26514$			Área (m²)=0,00255	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0,000	0,26514	0,000
300	17,321	0,015	0,26694	0,706
600	24,495	0,016	0,26826	1,224
900	30,000	0,017	0,26935	1,651
1 800	42,426	0,018	0,27075	2,200
3 600	60,000	0,018	0,27183	2,624
7 200	84,853	0,019	0,27307	3,110
10 800	103,923	0,020	0,27397	3,463
14 400	120,000	0,021	0,27436	3,616
75 600	274,955	0,023	0,28051	6,027
86 400	293,939	0,025	0,28110	6,259
104 400	323,110	0,027	0,28194	6,588
165 600	406,940	0,030	0,28455	7,612
172 800	415,692	0,030	0,28487	7,737
190 800	436,807	0,030	0,28514	7,843
259 200	509,117	0,032	0,28564	8,039
338 400	581,722	0,036	0,28582	8,110
345 600	587,878	0,050	0,28594	8,157
604 800	777,689	0,050	0,28622	8,267
691 200	831,384	0,050	0,28641	8,341
777 600	881,816	0,050	0,28644	8,353
864 000	929,516	0,050	0,28655	8,396
950 400	974,885	0,050	0,28670	8,455
1 209 600	1 099,818	0,050	0,28720	8,651
1 296 000	1 138,420	0,050	0,28720	8,651
1 382 400	1 175,755	0,050	0,28720	8,651

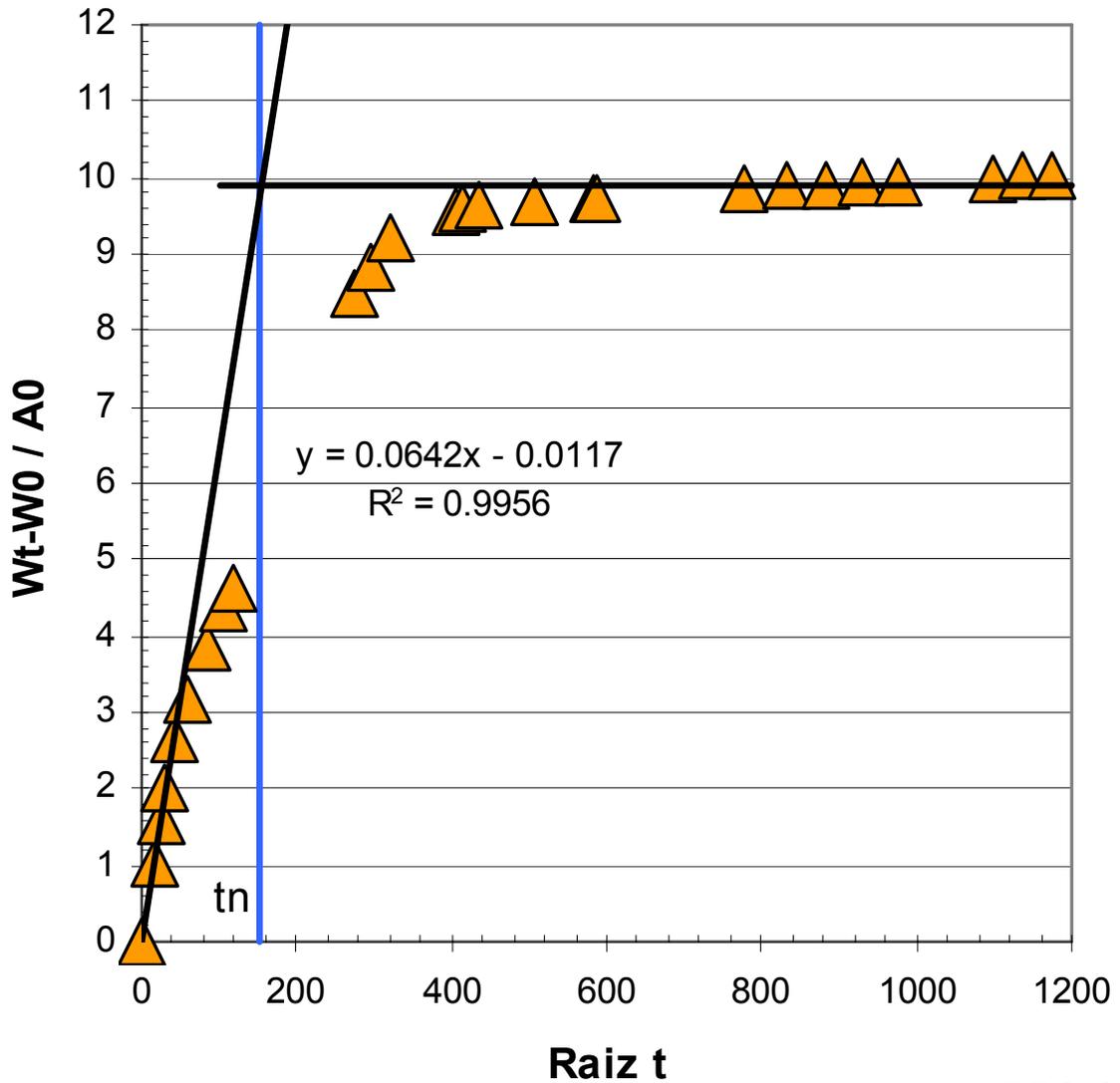
Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵ_e)	Absorción capilar (S)
CS1 12	3,34E+07	0,0294	17,00	1,73E-04



CS1 12

Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CS1 12				
$W_0=0,26415$			Área (m²)=0,002575	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0,000	0,26415	0,000
300	17,321	0,013	0,26516	0,392
600	24,495	0,014	0,26587	0,668
900	30,000	0,016	0,26646	0,897
1 800	42,426	0,018	0,26728	1,216
3 600	60,000	0,019	0,26790	1,456
7 200	84,853	0,020	0,26873	1,779
10 800	103,923	0,021	0,26910	1,922
14 400	120,000	0,022	0,26969	2,151
75 600	274,955	0,027	0,27493	4,186
86 400	293,939	0,028	0,27546	4,392
104 400	323,110	0,029	0,27632	4,726
165 600	406,940	0,031	0,27911	5,810
172 800	415,692	0,031	0,27953	5,973
190 800	436,807	0,031	0,28017	6,221
259 200	509,117	0,033	0,28266	7,188
338 400	581,722	0,038	0,28446	7,887
345 600	587,878	0,050	0,28470	7,981
604 800	777,689	0,050	0,28541	8,256
691 200	831,384	0,050	0,28563	8,342
777 600	881,816	0,050	0,28563	8,342
864 000	929,516	0,050	0,28579	8,404
950 400	974,885	0,050	0,28589	8,443
1 209 600	1 099,818	0,050	0,28640	8,641
1 296 000	1 138,420	0,050	0,28640	8,641
1 382 400	1 175,755	0,050	0,28640	8,641

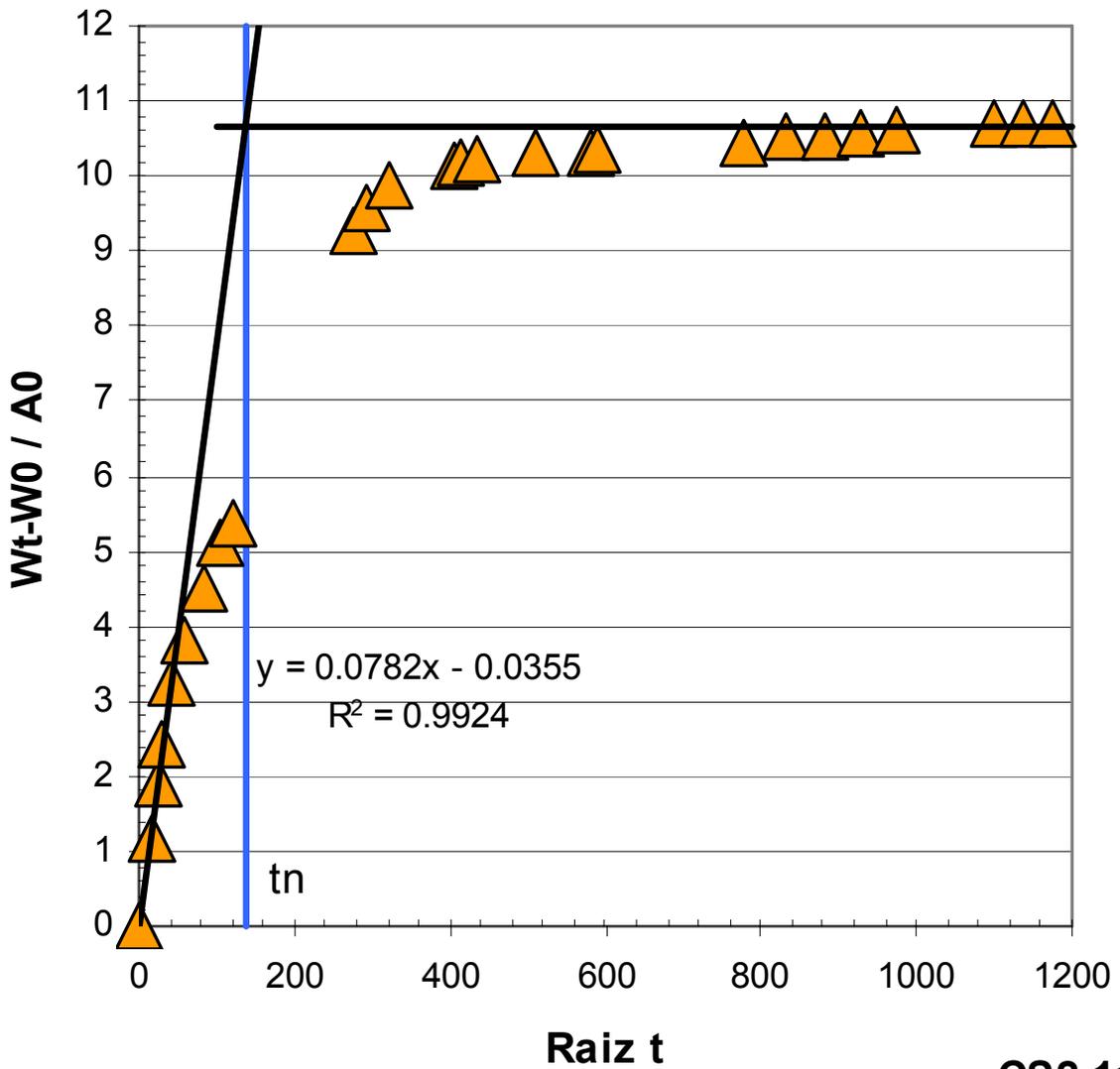
Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵe)	Absorción capilar (S)
CS2 10	9,36E+06	0,0647	19,80	3,27E-04



CS2 10

Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CS2 10				
$W_0=0,2518$			Área (m²)=0,00255	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,25180	0,000
300	17,321	0,014	0,25440	1,020
600	24,495	0,014	0,25583	1,580
900	30,000	0,015	0,25692	2,008
1 800	42,426	0,018	0,25860	2,667
3 600	60,000	0,019	0,25994	3,192
7 200	84,853	0,022	0,26160	3,843
10 800	103,923	0,022	0,26294	4,369
14 400	120,000	0,024	0,26356	4,612
75 600	274,955	0,028	0,27348	8,502
86 400	293,939	0,029	0,27431	8,827
104 400	323,110	0,030	0,27525	9,196
165 600	406,940	0,050	0,27617	9,557
172 800	415,692	0,050	0,27633	9,620
190 800	436,807	0,050	0,27637	9,635
259 200	509,117	0,050	0,27655	9,706
338 400	581,722	0,050	0,27660	9,725
345 600	587,878	0,050	0,27665	9,745
604 800	777,689	0,050	0,27690	9,843
691 200	831,384	0,050	0,27701	9,886
777 600	881,816	0,050	0,27702	9,890
864 000	929,516	0,050	0,27710	9,922
950 400	974,885	0,050	0,2772	9,961
1 209 600	1 099,818	0,050	0,27730	10,000
1 296 000	1 138,420	0,050	0,27738	10,031
1 382 400	1 175,755	0,050	0,27741	10,043

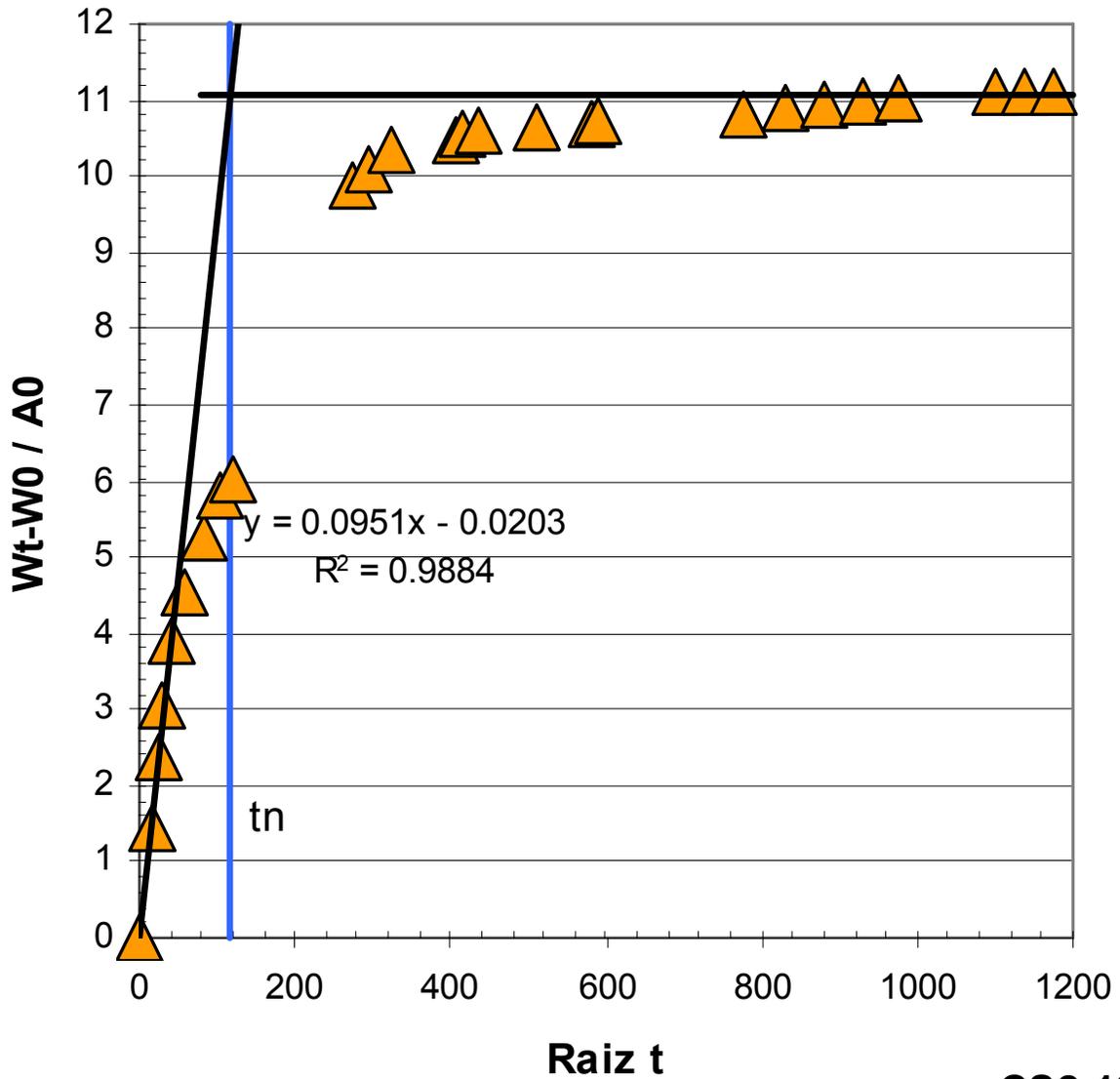
Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵe)	Absorción capilar (S)
CS2 11	7,40E+06	0,0783	21,30	3,68E-04



CS2 11

Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CS2 11				
$W_0=0,254$			Área (m²)=0,00255	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,25400	0,000
300	17,321	0,150	0,25698	1,169
600	24,495	0,016	0,25887	1,910
900	30,000	0,016	0,26024	2,447
1 800	42,426	0,017	0,26223	3,227
3 600	60,000	0,018	0,26374	3,820
7 200	84,853	0,020	0,26551	4,514
10 800	103,923	0,020	0,26699	5,094
14 400	120,000	0,022	0,26768	5,365
75 600	274,955	0,028	0,27768	9,286
86 400	293,939	0,030	0,27846	9,592
104 400	323,110	0,030	0,27921	9,886
165 600	406,940	0,050	0,27985	10,137
172 800	415,692	0,050	0,27999	10,192
190 800	436,807	0,050	0,28002	10,204
259 200	509,117	0,050	0,28025	10,294
338 400	581,722	0,050	0,28031	10,318
345 600	587,878	0,050	0,28040	10,353
604 800	777,689	0,050	0,28067	10,459
691 200	831,384	0,050	0,28080	10,510
777 600	881,816	0,050	0,28084	10,525
864 000	929,516	0,050	0,28096	10,573
950 400	974,885	0,050	0,28108	10,620
1 209 600	1 099,818	0,050	0,28130	10,706
1 296 000	1 138,420	0,050	0,28131	10,710
1 382 400	1 175,755	0,050	0,28131	10,710

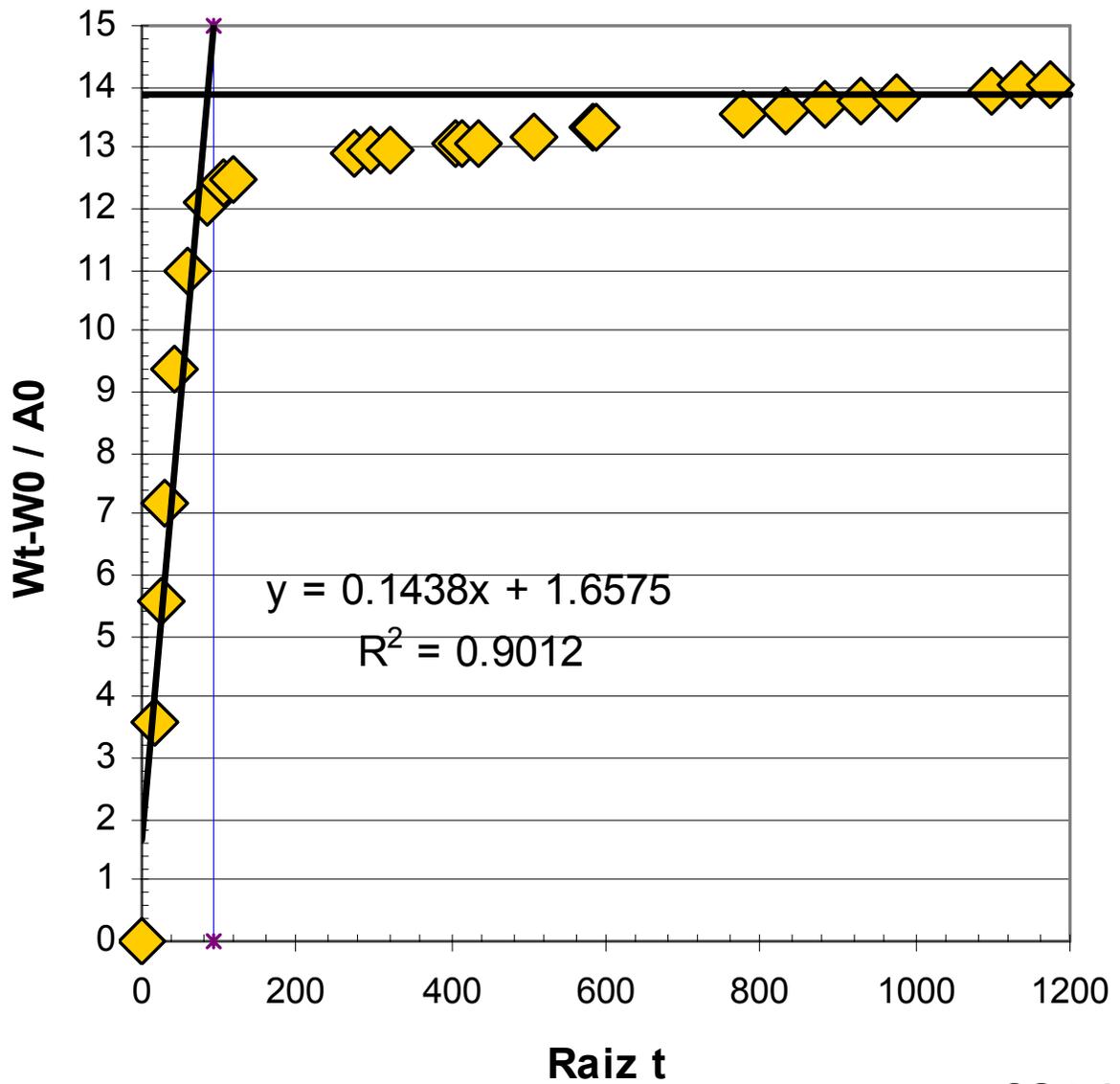
Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵe)	Absorción capilar (S)
CS2 12	5,38E+06	0,0953	22,10	4,31E-04



CS2 12

Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CS2 12				
$W_0=0,25141$			Área (m²)=0,002525	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	$(W_t-W_0)/A_0$
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,25141	0,000
300	17,321	0,014	0,25502	1,430
600	24,495	0,014	0,25744	2,388
900	30,000	0,015	0,25910	3,046
1 800	42,426	0,015	0,26125	3,897
3 600	60,000	0,016	0,26288	4,543
7 200	84,853	0,019	0,26466	5,248
10 800	103,923	0,019	0,26608	5,810
14 400	120,000	0,021	0,26664	6,032
75 600	274,955	0,025	0,27631	9,861
86 400	293,939	0,028	0,27690	10,095
104 400	323,110	0,030	0,27754	10,349
165 600	406,940	0,050	0,27784	10,467
172 800	415,692	0,050	0,27807	10,558
190 800	436,807	0,050	0,27816	10,594
259 200	509,117	0,050	0,27833	10,661
338 400	581,722	0,050	0,27839	10,685
345 600	587,878	0,050	0,27850	10,729
604 800	777,689	0,050	0,27874	10,824
691 200	831,384	0,050	0,27894	10,903
777 600	881,816	0,050	0,27901	10,931
864 000	929,516	0,050	0,27915	10,986
950 400	974,885	0,050	0,27921	11,010
1 209 600	1 099,818	0,050	0,27950	11,126
1 296 000	1 138,420	0,050	0,27950	11,126
1 382 400	1 175,755	0,050	0,27950	11,125

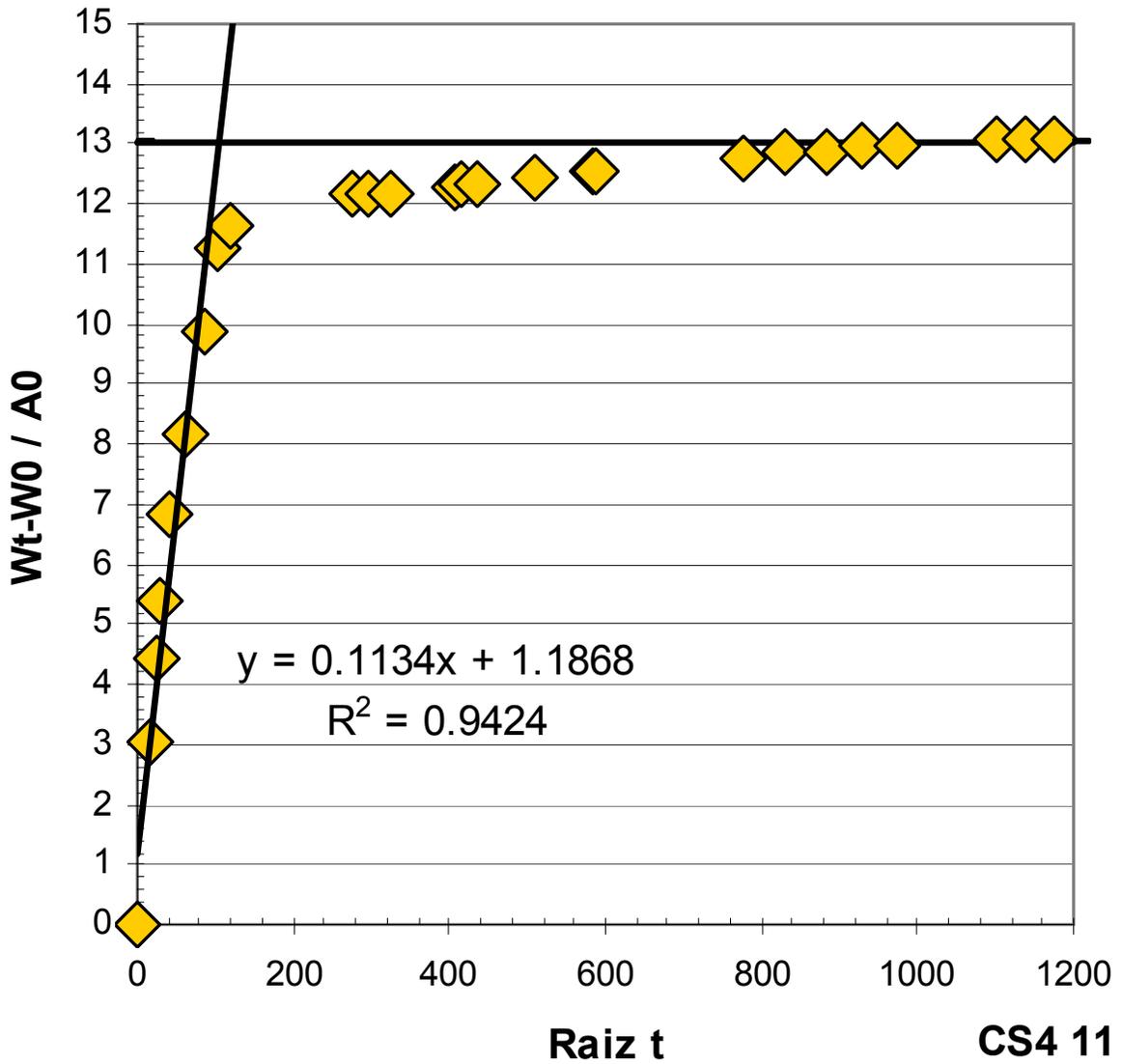
Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵe)	Absorción capilar (S)
CS4 10	3,61E+06	0,1463	27,80	5,26E-04



CS4 10

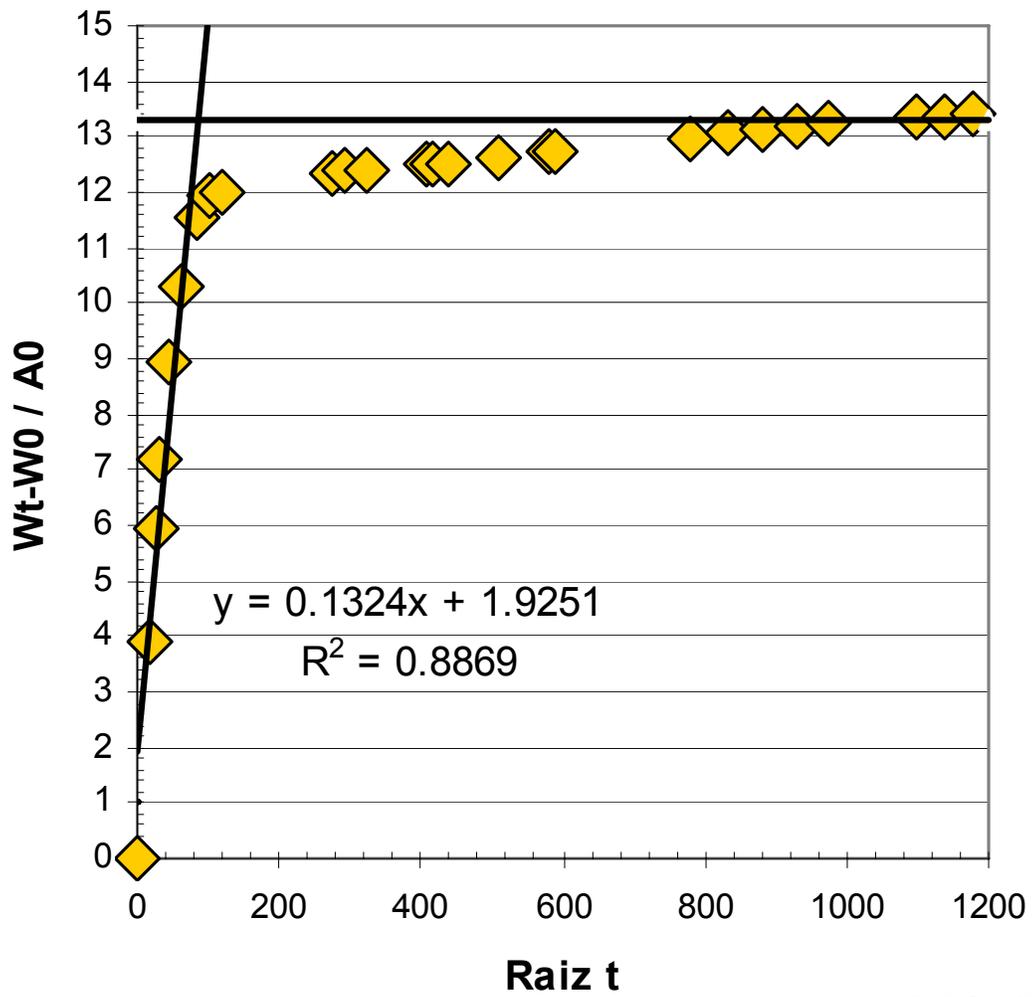
Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CS4 10				
$W_0=0,23708$			Área (m²)=0,00255	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,23708	0,000
300	17,321	0,014	0,24622	3,584
600	24,495	0,025	0,25135	5,596
900	30,000	0,030	0,25545	7,204
1 800	42,426	0,040	0,26100	9,380
3 600	60,000	0,050	0,26509	10,984
7 200	84,853	0,050	0,26798	12,118
10 800	103,923	0,050	0,26877	12,427
14 400	120,000	0,050	0,26897	12,506
75 600	274,955	0,050	0,27000	12,910
86 400	293,939	0,050	0,27008	12,941
104 400	323,110	0,050	0,27008	12,941
165 600	406,940	0,050	0,27039	13,063
172 800	415,692	0,050	0,27043	13,078
190 800	436,807	0,050	0,27044	13,082
259 200	509,117	0,050	0,27070	13,184
338 400	581,722	0,050	0,27103	13,314
345 600	587,878	0,050	0,27103	13,314
604 800	777,689	0,050	0,27164	13,553
691 200	831,384	0,050	0,27182	13,624
777 600	881,816	0,050	0,27200	13,694
864 000	929,516	0,050	0,27220	13,773
950 400	974,885	0,050	0,27232	13,820
1 209 600	1 099,818	0,050	0,2726	13,929
1 296 000	1 138,420	0,050	0,27283	14,020
1 382 400	1 175,755	0,050	0,27291	14,051

Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵe)	Absorción capilar (S)
CS4 11	3,61E+06	0,1368	26,00	5,26E-04



Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CS4 11				
$W_0=0,2378$			Área (m²)=0,00255	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0	0,23780	0,000
300	17,321	0,016	0,24551	3,024
600	24,495	0,024	0,24904	4,408
900	30,000	0,033	0,25153	5,384
1 800	42,426	0,040	0,25518	6,816
3 600	60,000	0,050	0,25859	8,153
7 200	84,853	0,050	0,26304	9,898
10 800	103,923	0,050	0,26646	11,239
14 400	120,000	0,050	0,26743	11,620
75 600	274,955	0,050	0,26882	12,165
86 400	293,939	0,050	0,26879	12,153
104 400	323,110	0,050	0,26879	12,153
165 600	406,940	0,050	0,26912	12,282
172 800	415,692	0,050	0,26921	12,318
190 800	436,807	0,050	0,26921	12,318
259 200	509,117	0,050	0,26951	12,435
338 400	581,722	0,050	0,26981	12,553
345 600	587,878	0,050	0,26981	12,553
604 800	777,689	0,050	0,27040	12,784
691 200	831,384	0,050	0,27056	12,847
777 600	881,816	0,050	0,27066	12,886
864 000	929,516	0,050	0,27083	12,953
950 400	974,885	0,050	0,27090	12,980
1 209 600	1 099,818	0,050	0,27110	13,059
1 296 000	1 138,420	0,050	0,27112	13,067
1 382 400	1 175,755	0,050	0,27120	13,098

Espécimen	Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵ_e)	Absorción capilar (S)
CS4 12	3,61E+06	0,1400	26,60	5,26E-04



CS4 12

Datos resultantes de la prueba de capilaridad para CS4 12				
$W_0=0,2346$			Área (m²)=0,002523	
Tiempo	(s)^{1/2}	Altura	W_t	(W_t-W₀)/A₀
s	s	z	kg	kg/m²
0	0,000	0,000	0,23460	0,000
300	17,321	0,018	0,24441	3,888
600	24,495	0,023	0,24954	5,922
900	30,000	0,030	0,25268	7,166
1 800	42,426	0,042	0,25718	8,950
3 600	60,000	0,050	0,26058	10,297
7 200	84,853	0,050	0,26374	11,550
10 800	103,923	0,500	0,26476	11,954
14 400	120,000	0,050	0,26494	12,025
75 600	274,955	0,050	0,26580	12,366
86 400	293,939	0,050	0,26588	12,398
104 400	323,110	0,050	0,26588	12,398
165 600	406,940	0,050	0,26609	12,481
172 800	415,692	0,050	0,26622	12,533
190 800	436,807	0,050	0,26622	12,533
259 200	509,117	0,050	0,26646	12,628
338 400	581,722	0,050	0,26668	12,715
345 600	587,878	0,050	0,26669	12,719
604 800	777,689	0,050	0,26735	12,981
691 200	831,384	0,050	0,26754	13,056
777 600	881,816	0,050	0,26772	13,127
864 000	929,516	0,050	0,26791	13,203
950 400	974,885	0,050	0,26804	13,254
1 209 600	1 099,818	0,050	0,26830	13,357
1 296 000	1 138,420	0,050	0,26834	13,373
1 382 400	1 175,755	0,050	0,26846	13,421

Glosario

Evotranspiración: es la transferencia de agua desde la tierra a la atmósfera por evaporación desde el agua de la superficie y el suelo, y por transpiración de la vegetación.

Cladodios: son tallos con el aspecto de hojas; parecen así porque las hojas son muy pequeñas, o porque se han transformado y ya no pueden cumplir su función.

Mucílago: es el producto del metabolismo activo de las plantas, formados por cadenas de azúcares químicamente unidas, parcialmente solubles en agua en la que forman un estado de gel, Es comúnmente conocido como baba de nopal.

Pienso: es el alimento seco que se le da al ganado.

Lignificación: proceso por el cual un grupo de compuestos químicos usados en las paredes celulares de las plantas, llamado lignina es depositado en la membrana celular, produce el endurecimiento de la misma y su aumento de volumen.

Homogeneidad: es la cantidad de mortero o concreto por la cual sus componentes aparecen regularmente distribuidos en toda su masa, de manera tal que se encuentre en toda ella, uniformidad de características, estructura, composición y propiedades físicas, mecánicas y químicas.

Forraje: es el alimento herbáceo que consume el ganado como el heno secado al sol.

Aglutinante: elemento que sirven para adherir un objeto con otro tal como el cemento.

Puzolanas: son materiales que contienen sílice y/o aluminio, los cuales por sí solos tienen poca o ninguna propiedad cementante; sin embargo, cuando son mezclados con hidróxido de calcio, ante la presencia de agua, pueden endurecer como los cementos.

Higrofóbico: material que repele en cierta medida al agua.

Cohesión: es la atracción entre moléculas que mantiene unidas las partículas de una sustancia.

Fraguado: reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla resultante de la unión del cemento y el agua.

Tixotrópico: material que es moldeable y durable; es amasado con agua y puede ser aplicado manual o mecánicamente,

Compacidad: es aquello que manifiesta la calidad de compacto representando una masa muy unida; un agregado cuyos elementos constituyentes están muy poco o nada separados los unos de los otros,

Tortuoso: rebuscado; sinuoso; solapado; torcido; trayectoria con vueltas, no continúa.



CIUDAD DE MÉXICO

Av. Nuevo León 210
Col. Hipódromo Condesa
CP 06100, México, D F
Tel. +52 (55) 52 653600
Fax +52 (55) 52 653600

SANFANDILA

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel. +52 (442) 216 9777
Fax +52 (442) 216 9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx