



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DIÁMETRO PROMEDIO DE
PARTÍCULA MEDIDA EN UN GRANULÓMETRO LASER Y
RESISTENCIAS TARDÍAS PARA UN CEMENTO TIPO I, PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN EN LÍNEA**

Brian Alexander Luján Montes

Asesorado por el Ing. Rolando Estuardo Arocha

Guatemala, mayo de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DIÁMETRO PROMEDIO DE
PARTÍCULA MEDIDA EN UN GRANULÓMETRO LASER Y
RESISTENCIAS TARDÍAS PARA UN CEMENTO TIPO I, PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN EN LÍNEA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

BRIAN ALEXANDER LUJÁN MONTES

ASESORADO POR EL ING. ROLANDO ESTUARDO AROCHA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Ing. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Cesar Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADORA	Inga. Rosa María Girón Ruíz
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DIÁMETRO PROMEDIO DE PARTÍCULA MEDIDA EN UN GRANULÓMETRO LASER Y RESISTENCIAS TARDÍAS PARA UN CEMENTO TIPO I, PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN EN LÍNEA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, en febrero de 2007.

Brian Alexander Luján Montes

DEDICATORIA A:

- Dios** Por su amor e infinitas bendiciones derramadas sobre mi persona y toda mi familia.
- Mis padres** Luis Fernando Luján García y Sonia Elizabeth Montes Valenzuela de Luján, por acompañarme y guiarme en la vida basada en principios. Los quiero mucho.
- Mi esposa** Glenda Maribel Castañeda Gamboa de Luján, por ser la razón de mi vida desde el momento en que la conocí. Te amo Mary.
- Mis hermanos** Erick Fernando (Kekis) y Sergio (Checho), por ser lo más grande de mi vida haciéndome sentir orgulloso de ser su hermano; los quiero con todo mi corazón.
- Mis abuelos** Ramón Luján (QEPD), Victoria Arrazola, Francisco Montes y Berta Valenzuela, por su amor incondicional; los quiero y los extraño.
- Mis tíos** Por apoyarme y quererme mucho, en especial a Mynor Montes, por ser mi tutor en mis primeros años de estudio.
- Mis primos** Porque cada uno de ustedes son ejemplo para mí; los extraño mucho.

**Familia Castañeda
Gamboa**

Dr. Raúl, Doña Carmen, Paty, Raulito, Carmencita y Estuardo, por el apoyo incondicional que me brindan cada día.

Mis amigos y compañeros

Por hacer de los años de la universidad, la etapa más extraordinaria de mi vida, en especial para Abby, Anny, Auri, Bea, Carol, Paty, Chory, Hugo, Fernando, Werner, Paco, David y muy especial para Nacho y Ana Mercedes.

AGRADECIMIENTOS A:

**La Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la casa de estudios que me otorgó el privilegio de estudiar en sus instalaciones.

**La Escuela de Ingeniería
Química**

Por proporcionarme los conocimientos necesarios para ser un profesional en esta especialidad.

Mis Asesores

Ing. Rolando Estuardo Arocha y Lic. Luis Velásquez, por brindarme su apoyo para realizar el presente estudio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	IV
GLOSARIO	V
RESUMEN	VII
HIPÓTESIS	IX
OBJETIVOS	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. CEMENTO	1
1.1. Características esenciales del cemento.....	2
1.2. Composición química.....	3
1.3. Finura de molienda.....	4
2. CONCRETO	7
3. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA	9
3.1. Propiedades de una partícula de cemento.....	9
4. RESULTADOS	11
5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	15
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	19

CONCLUSIONES..... 21
RECOMENDACIONES..... 23
BIBLIOGRAFÍA..... 25

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURA

- | | | |
|----|---|----|
| 1. | Diámetro promedio de partícula contra resistencias tardías en un cemento tipo y su regresión lineal simple..... | 12 |
|----|---|----|

TABLAS

- | | | |
|-----|---|----|
| I. | Resultados, resistencias tardías y diámetros promedios de partículas..... | 11 |
| II. | Resultados, resistencias tardías y diámetros promedio de partículas y variables estadísticas..... | 15 |

LISTA DE SÍMBOLOS

psi	Pouns/inchs (Libras por pulgada cuadrada de presión).
um	Micrómetros o micrones.
\bar{X}	Media aritmética para los valores Xi.
\hat{Y}	Media aritmética para los valores Yi.
r	Coefficiente de correlación muestral.
r²	Coefficiente de correlación.
cm	Centímetros.

GLOSARIO

- ASTM** American Society for Testing and Materials.
- Blaine** Medida de la permeabilidad del cemento expresado como el área ocupada por un centímetro de material.
- Caliza** Roca formada por carbonato de calcio (CaCO_3) y carbonato de magnesio (MgCO_3), en el que el carbonato de magnesio esta presente en cantidades menores a un 5% en peso.
- Clinker** Material con propiedades hidráulicas compuesto principalmente por óxidos de sílice, que se endurece al contacto con el agua.
- Energía de Molturación** Energía empleada para disminuir el tamaño a una partícula.
- Finura** Fracción de material que logra pasar por un tamiz determinado.
- Fraguado** Se le llama a la acción de endurecimiento del cemento.
- Muestra Puntual** Muestra de un material tomado una sola vez en un tiempo establecido, representando las características del material en ese único momento.

Tamiz Malla con medidas específicas utilizada para clasificar materiales.

RESUMEN

Distribución del tamaño de partícula (DTP), es el nombre que se le da a la distribución matemática que representa la cantidad de los diversos tamaños de partículas que componen un polvo.

La distribución del tamaño de partícula está directamente relacionada con las propiedades de los polvos. En la industria del cemento, la DTP está estrechamente relacionada con la hidratación del cemento, influyendo en las resistencias a compresión de los concretos.

En el presente trabajo de investigación se determinó la relación lineal que existe entre el diámetro promedio de partícula y resistencias tardías para un cemento tipo I; a partir de muestras puntuales de cemento obtenidas de la línea de producción de un molino de bolas, se procedió al análisis de diámetros promedio de partícula medidos en un granulómetro laser y resistencias tardías según norma ASTM-305, se demostró que la relación lineal presenta un coeficiente de correlación alto (0.897); dicho estudio es muy importante para la implementación de un sistema de medición en línea de diámetros promedio de partícula, el cual presenta un número de ventajas sobre los métodos tradicionales de control de calidad, notoriamente en términos de alta frecuencia y mejores controles, resultando así un ahorro de energía en el área de molienda de cemento.

HIPÓTESIS

1. Hipótesis afirmativa

Que exista una relación matemática que describa la interacción de diámetro promedio de partículas y resistencias tardías en muestras de cemento tipo I.

2. Hipótesis negativa

Que no exista una relación matemática de diámetro promedio de partículas y resistencias tardías en muestras de cemento tipo I.

OBJETIVOS

General

Determinar la relación diámetro promedio de partícula y resistencias tardías para un cemento tipo I.

Específicos

1. Determinar una ecuación matemática que describa la relación diámetro promedio de partícula y resistencias tardías para un cemento tipo I.
2. Determinar si diámetros promedio de partícula con valores bajos producen altas resistencias tardías en un cemento tipo I.
3. Determinar el valor óptimo para diámetros promedio de partícula en muestras de cemento tipo I, con el cual se asegure la calidad del mismo (altas resistencias tardías).

INTRODUCCIÓN

La historia del cemento, es la historia misma del hombre en la búsqueda de un espacio para vivir con la mayor comodidad y seguridad.

El cemento se obtiene cuando se muele conjuntamente clinker con yeso y aditivos, los cuales ayudan a regular la calidad del cemento.

El proceso de fabricación del cemento inicia con la obtención de las materias primas necesarias para conseguir la composición química deseada, y producir un producto intermedio llamado clinker.

Para la elaboración del clinker se emplean materias primas capaces de aportar principalmente cal y sílice, y adicionalmente óxido de hierro y alúmina, para lo cual se seleccionan materiales calizos y arcillosos de composición adecuada. La materia prima se introduce en hornos rotatorios donde se calcina a temperaturas del orden de 1,400 °C, hasta que alcanza un estado de fusión incipiente.

Los principales parámetros para determinar las calidades físicas y químicas del cemento son:

- Resistencia a la compresión a diferentes edades.
- Tiempo de Fraguado.
- Finura (Blaine, retenidos en tamices (ej. en 45 μm), distribución del tamaño de partícula).

Los parámetros anteriores son por lo general medidos en muestras diarias de cementos tomadas de la producción o muestras puntuales de cementos tomadas durante el despacho.

El análisis de la distribución de tamaño de partícula (DTS), medida en un granulómetro láser, da una distribución de los diferentes tamaños de grano presentes en una muestra de cemento, además de proporcionar otros datos importantes como el diámetro promedio de partícula entre otros, y que ahora han substituido la medida de Blaine como el método de control de calidad en plantas cementeras modernas

El propósito del trabajo de graduación es determinar una ecuación matemática que describa la relación diámetro promedio de partícula medida en un granulómetro laser y resistencias tardías para un cemento tipo I, dicha ecuación proporcionará al departamento de producción y control de calidad el aseguramiento de un verdadero control en las líneas de producción, optimizando recursos, tiempo, y sobre todo el ahorro en costos de energía de molturación.

1. CEMENTO

El cemento no es lo mismo que el concreto, es uno de los ingredientes que se usan en él. Sus primeros usos datan de los inicios de 1,800 y, desde entonces, el cemento Pórtland se ha convertido en el cemento más usado en el mundo. Su inventor le dio ese nombre porque el concreto ya curado es del mismo color que una piedra caliza que se obtiene cerca de Pórtland, Inglaterra.

El cemento se obtiene cuando se muele conjuntamente clinker con yeso y aditivos, que ayudan a regular la calidad del cemento.

Para la elaboración del clinker se emplean materias primas capaces de aportar principalmente cal y sílice, y adicionalmente óxido de hierro y alúmina, para lo cual se seleccionan materiales calizos y arcillosos de composición adecuada. Estos materiales se trituran, dosifican, muelen y mezclan íntimamente hasta su completa homogenización.

La materia prima así procesada, ya sea en forma de polvo o de lodo, se introduce en hornos rotatorios donde se calcina a temperaturas del orden de 1,400 °C, hasta que alcanza un estado de fusión incipiente. En este estado se producen las reacciones químicas requeridas y el material se subdivide y aglutina en fragmentos no mayores a 6 cm, cuya forma se regulariza por efecto de la rotación del horno. A este material fragmentado, resultante de la calcinación, se le denomina clinker.

Una vez frío, el clinker se muele conjuntamente con una reducida proporción de yeso, que tiene la función de regular el tiempo de fraguado y aditivos, y con ello se obtiene el polvo fino de color gris que se conoce como cemento. Además, durante la molienda, el clinker puede combinarse con una escoria o un material puzolánico para producir un cemento mezclado, o bien puede molerse con determinados materiales de carácter sulfo-calcio-aluminoso para obtener los llamados cementos expansivos.

También es factible incorporar aditivos durante la molienda del clinker, siendo de uso frecuente los auxiliares de molienda.

De conformidad con lo anterior, a partir del clinker es posible fabricar tres principales grupos o clases de cementos hidráulicos para la elaboración de concreto:

- 1) Los cementos propiamente dichos, moliendo solamente el clinker y el yeso sin componentes cementantes adicionales.
- 2) Los cementos mezclados, combinando el clinker y el yeso con otro cementante, ya sea este una escoria o una puzolana.
- 3) Los cementos expansivos que se obtienen añadiendo al clinker otros componentes especiales de carácter sulfatado, cálcico y aluminoso.

1.1. Características esenciales del cemento

La influencia que el cemento ejerce en el comportamiento y propiedades de la pasta cementante y del concreto se derivan fundamentalmente de la composición química del clinker y de su finura de molienda.

En el caso de los cementos mezclados, habría que añadir a esos dos factores los referentes a las características físicas y químicas de la escoria o puzolana, y el contenido de ésta en el cemento.

1.2. Composición química

Una vez que el agua y el cemento se mezclan para formar la pasta cementante, se inicia una serie de reacciones químicas que en forma global se designan como hidratación del cemento. Estas reacciones se manifiestan inicialmente por el endurecimiento gradual de la mezcla, que culmina con su fraguado, y continúan para dar lugar al endurecimiento y adquisición de resistencia mecánica en el producto.

Aún cuando la hidratación del cemento es un fenómeno sumamente complejo, existen simplificaciones que permiten interpretar sus efectos en el concreto. La composición química de un clinker se define convenientemente mediante la identificación de cuatro compuestos principales, cuyas variaciones relativas determinan los diferentes tipos de cemento:

Compuesto fórmula del óxido	Notación abreviada
Silicato tricálcico	$3\text{CaO SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$

En términos prácticos se concede que los silicatos de calcio (C_3S y C_2S) son los compuestos más deseables, porque al hidratarse forman los silicatos B hidratados de calcio (S-H-C) que son responsables de la resistencia mecánica y otras propiedades del concreto. Normalmente, el C_3S aporta resistencia a corto y mediano plazo, y el C_2S a mediano y largo plazo, es decir, se complementan bien para que la adquisición de resistencia se realice en forma sostenida.

El aluminato tricálcico (C_3A) es talvez el compuesto que se hidrata con mayor rapidez, y por ello propicia mayor velocidad en el fraguado y en el desarrollo de calor de hidratación en el concreto. Asimismo, su presencia en el cemento hace al concreto más susceptible de sufrir daño por efecto del ataque de sulfatos. Por todo ello, se tiende a limitarlo en la medida que es compatible con el uso del cemento.

Finalmente, el aluminoferrito tetracálcico es un compuesto relativamente inactivo pues contribuye poco a la resistencia del concreto, y su presencia más bien es útil como fundente durante la calcinación del clinker y porque favorece la hidratación de los otros compuestos.

1.3. Finura de molienda

En la determinación del proceso industrial adecuado para la molienda del cemento, intervienen factores técnicos y económicos que deben conciliarse.

En el aspecto técnico interesa principalmente definir el grado de finura que debe darse al cemento para que cumpla especificaciones de acuerdo con su tipo, pero sin dejar de considerar también los efectos secundarios que la finura del cemento puede inducir en el comportamiento del concreto, tanto en estado fresco como ya endurecido.

El grado de finura del cemento tiene efectos ambivalentes en el concreto. Al aumentar la finura el cemento se hidrata y adquiere resistencia con más rapidez, y también se manifiesta mayor disposición en sus partículas para mantenerse en suspensión en la pasta recién mezclada, lo cual es ventajoso para la cohesión, manejabilidad y capacidad de retención de agua en las mezclas de concreto. Como contrapartida, una finura más alta representa mayor velocidad en la generación de calor y mayor demanda de agua de mezclado en el concreto, cuyas consecuencias son indeseables porque se traducen en mayores cambios volumétricos del concreto y posibles agrietamientos en las estructuras.

En el caso de los cementos, debe dárseles una finura de molienda adecuada para cumplir con los valores especificados en cuanto a superficie específica y resistencia a compresión.

2. CONCRETO

El concreto es un material durable y resistente pero, dado que se trabaja en su forma líquida, prácticamente puede adquirir cualquier forma. Esta combinación de características es la razón principal por la que es un material de construcción tan popular.

El concreto de uso común o convencional, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo. Al mezclar estos componentes y producir la mezcla resultante, se introduce de manera simultánea un quinto participante representado por el aire.

La mezcla íntima de los componentes del concreto convencional produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad; pero gradualmente pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido.

La representación común del concreto convencional en estado fresco, lo identifica como un conjunto de fragmentos de roca, globalmente definidos como agregados, dispersos en una matriz viscosa constituida por una pasta de cemento de consistencia plástica.

Esto significa que en una mezcla así hay muy poco o ningún contacto entre las partículas de los agregados, característica que tiende a permanecer en el concreto ya endurecido.

Consecuentemente, con ello el comportamiento mecánico de este material y su durabilidad en servicio dependen de tres aspectos básicos:

1. Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento, o matriz cementante, endurecida.
2. La calidad propia de los agregados, en el sentido más amplio.
3. La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto.

En el primer aspecto debe contemplarse la selección de un cementante apropiado, el empleo de una relación agua/cemento conveniente y el uso eventual de un aditivo necesario, con todo lo cual debe resultar potencialmente asegurada la calidad de la matriz cementante.

En cuanto a la calidad de los agregados, es importante adecuarla a las funciones que debe desempeñar la estructura, a fin de que no representen el punto débil en el comportamiento del concreto y en su capacidad para resistir adecuadamente y por largo tiempo los efectos consecuentes de las condiciones de exposición y servicio a que esté sometido.

3. DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA (DTP)

La Distribución del Tamaño de Partícula (DTP) ha sido ignorada muchas veces debido a la falta de disponibilidad de instrumentos capaces de medir la DTP. La DTP es una propiedad importante usada para caracterizar a un polvo en volumen.

Afecta directamente las siguientes propiedades:

- Área superficial.
- Densidad de empaado.
- Resistencia a la compactación.
- Solubilidad.
- Porosidad.
- Propiedades de transporte.

El tamaño de las partículas afecta las propiedades de los polvos en diferentes formas. Determina el tiempo de fraguado del cemento, la actividad de catalizadores químicos, etc.

3.1. Propiedades de una partícula de cemento

- Volumen.
- Peso.
- Área superficial.

- Área proyectada.
- Tasa de sedimentación.

Diversos métodos son utilizados para determinar la DTP, los más sencillos y de menor precisión como lo son el tamizado y la sedimentación, hasta mas sofisticados y de mayor precisión como el de difracción laser.

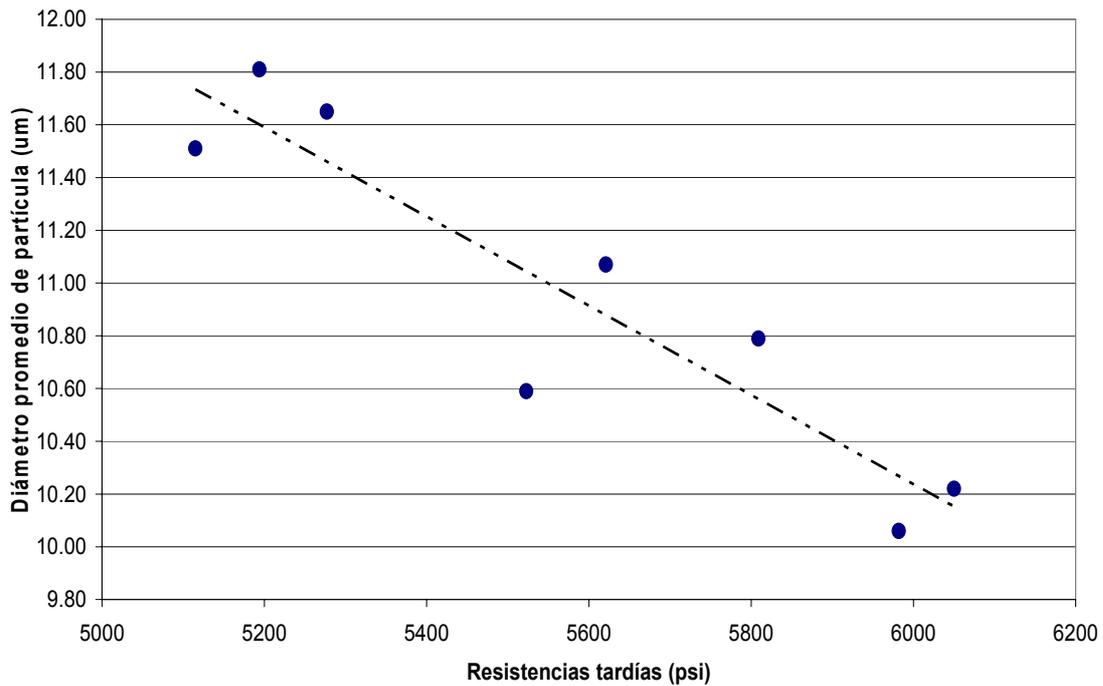
4. RESULTADOS

Tabla I. Resultados de resistencias tardías y diámetros promedios de partículas.

Muestra No.	Resistencias tardías (psi)	Diámetro promedio de partícula (um)
1	5,277	11.65
2	5,982	10.06
3	5,523	10.59
4	6,050	10.22
5	5,621	11.07
6	5,115	11.51
7	5,194	11.81
8	5,809	10.79

Fuente: Datos de campo.

Figura 1. Diámetro promedio de partícula contra resistencias tardías para un cemento tipo I y su regresión lineal simple.



Fuente: Tabla I. Resultados de resistencias tardías y diámetros promedio de partículas.

3. Ecuación matemática que describe la relación diámetro promedio de partícula y resistencias tardías para un cemento tipo I (utilizando como herramienta para obtener la gráfica, Microsoft Excel 2007).

$$D = -0.0017 (R) + 20.384 \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

D = diámetro promedio de partícula

R = resistencias tardías

4. Coeficiente de correlación muestral (r^2) = 0.897.

5. Valor óptimo de diámetro promedio de partícula en muestras de cemento tipo I, con el cual se asegure la calidad del mismo (Norma ASTM 305). = 13.584 μm .

5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Determinación del coeficiente de correlación muestral (r^2) a partir del coeficiente de correlación (r).

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{(S_{xx} S_{yy})}}$$

Fuente: Ronald E. Walpole, **Probabilidad y estadística para ingenieros**. Pág. 396.

Donde

$$S_{xx} = \sum (X_i - \bar{X})^2$$

$$S_{yy} = \sum (Y_i - \hat{Y})^2$$

$$S_{xy} = \sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \hat{Y})$$

Tabla II. Resultados de resistencias tardías, diámetros promedios de partículas y variables estadísticas.

Y	X					
D (um)	R28 días (psi)	(Y _i - Ŷ)	(Y _i - Ŷ) ²	(X _i - X̄)	(X _i - X̄) ²	(X _i - X̄)(Y _i - Ŷ)
11.650	5,277.000	0.688	0.473	294.375	86,656.641	202.383
10.060	5,982.000	0.902	0.815	410.625	168,612.891	370.589
10.590	5,523.000	0.372	0.139	48.375	2,340.141	18.020
10.220	6,050.000	0.742	0.551	478.625	229,081.891	355.379
11.070	5,621.000	0.108	0.012	49.625	2,462.641	5.335
11.510	5,115.000	0.548	0.300	456.375	208,278.141	249.865
11.810	5,194.000	0.848	0.718	377.375	142,411.891	319.825
10.790	5,809.000	0.172	0.030	237.625	56,465.641	40.990

Media 10.963 5,571.375

Sumatorias 4.380 3.037 2,353.000 896,309.875 1,562.386

Fuente: Datos de campo.

De la tabla II de resultados de resistencias tardías, diámetros promedios de partículas y variables estadísticas.

$$S_{xy} = 1,562.386$$

$$S_{xx} = 896,309.875$$

$$S_{yy} = 3.037$$

por tanto,

$$r = 1,562.386 / (\sqrt{(896,309.875*3.037)})$$

$$r = 0.947$$

Conociendo el coeficiente de correlación (r) podemos encontrar el coeficiente de correlación muestral (r^2).

$$r^2 = 0.896$$

Comprobación de la hipótesis

Partimos de la hipótesis negativa

Que no exista una relación matemática del diámetro promedio de partículas y resistencias tardías en muestras de cemento tipo I.

En otras palabras al comprobar el rechazo de nuestra hipótesis negativa (nula) nos conduce a la aceptación de la hipótesis afirmativa (alternativa), que

exista una relación matemática que describa la interacción de diámetro promedio de partículas y resistencias tardías en muestras de cemento tipo I.

Entonces,

H_0 = hipótesis nula o negativa; $\rho = 0$. (No hay relación)

H_1 = hipótesis alternativa o positiva; $\rho \neq 0$. (Si existe relación)

Con un nivel de significancia = 0.05, nuestra región crítica de $t < -2.447$ y $t > 2.447$ según tabla A.4 (Fuente: Ronald E. Walpole, **Probabilidad y estadística para ingenieros**. Pág. 683), valores críticos de la distribución t con n-2 grados de libertad.

donde,

$$t = \frac{r \sqrt{(n - 2)}}{\sqrt{(1 - r^2)}}$$

entonces,

$$t = (0.947 * \sqrt{6}) / \sqrt{(1 - 0.896)}$$

$$t = 7.224$$

Debido a que t no está dentro de la región crítica de $t < -2.447$ y $t > 2.447$ rechazamos la hipótesis de la no relación matemática para el diámetro promedio de partículas y resistencias tardías en muestras de cemento tipo I.

Por lo tanto, confirmamos nuestra hipótesis afirmativa, que si existe una relación matemática que describa la interacción de diámetro promedio de partículas y resistencias tardías en muestras de cemento tipo I.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De las muestras puntuales analizadas, se determinó que la relación diámetro promedio de partículas y resistencias tardías para un cemento tipo I, posee según su coeficiente de correlación una tendencia lineal, cuya ecuación esta representada de la siguiente manera:

$$D = - 0.0017R + 20.384 \text{ (Ecuación 1)}$$

en donde se observa que el diámetro promedio de partícula es inversamente proporcional a las resistencias tardías de un cemento tipo I. La ecuación 1 posee un coeficiente de correlación de 0.897 el cual nos indica que aproximadamente el 89.7 % de la variación en los valores de resistencias tardías se explican por una relación lineal con los diámetros promedio de partículas; además podemos estimar a partir de dicha ecuación que nuestro valor máximo permitido para diámetro promedio de partícula es de 13.58 um con el cual se asegura la calidad del cemento (resistencias tardías > 4000 psi) según norma ASTM 305.

La parte experimental de este trabajo de graduación se llevó a cabo a temperatura ambiente entre 24 y 25 °C y a una humedad relativa entre 70-71 %.

CONCLUSIONES

1. La relación diámetro promedio de partícula y resistencias tardías para un cemento tipo I, está representada por la ecuación lineal $D = - 0.0017R + 20.384$.
2. Diámetros promedio de partícula con valores bajos, producen altas resistencias tardías en un cemento tipo I.
3. El valor óptimo para diámetros promedio de partícula en muestras de cemento tipo I es 13.58 μm , con el cual se asegura la calidad del cemento (resistencias tardías $> 4,000$ psi) según norma ASTM 305.

RECOMENDACIONES

1. La buena relación de diámetros promedio de partícula medida en un granulómetro láser y resistencias tardías para un cemento tipo I, sugiere la implementación en línea de un analizador laser de diámetros promedio de partícula, con lo cual se asegura la calidad del cien por ciento del cemento tipo I como producto terminado.
2. La implementación de un sistema de medición en línea de un analizador láser de diámetros promedio de partícula, será una herramienta de mucha utilidad en el Laboratorio de Control de Calidad, debido a su alta frecuencia y mejores controles.
3. La implementación de un sistema de medición en línea complementará mejores controles en el departamento de producción con el fin de optimizar la demanda energética en el área de molienda de cemento.

BIBLIOGRAFÍA

1. Davis, Kelly Troxell. Properties of mortars and concretes containing portland puzzoland cement. s.l. Davis Proc. s.a.
2. Ghosh, S.N. Testing and quality control in cement industry. India. Akademia Books International. 1997.
3. Haider, Anis. Innovations in Portland Cement Manufacturing. s.l. s.e s.a.
4. Neville, Adam M. Tecnología del concreto. México. Instituto del cemento y del concreto A.C. s.a.
5. Rawle, Alan. Basic Principles of particle size analysis. Marvel Instruments Technical Paper. Inglaterra. s.e. 2004.
6. Taylor, H.F.W. Cement Chemistry. 2a edición. Inglaterra. Redwood Books. 1997.
7. Walpole Ronanld E., Myers Raymond H., Myers Sharon L. Probabilidad y estadística para ingenieros. 6ª ed. México. s.e. 1998.
8. www.cementosrezola.com/Pages/produccion/cemento/historia.asp#PP.
Noviembre de 2006.
9. www.coatingsgroup.com. Noviembre de 2006.
10. www.jetro.go.jp/chile/pdf/nedo_cemento.pdf. Noviembre de 2006.
11. www.monografias.com. Noviembre de 2006.

12. www.malvern.co.uk. Noviembre de 2006.

13. www.wikipedia.org. Noviembre de 2006.