

# Estudio exploratorio para el establecimiento de una metodología para la caracterización geotécnica de material de un tajo, basado en el ensayo de absorción.



# Abstract

The geotechnical characterization of the rocks was determined at Cerro Minas, Santa Ana Quarry.

The following study consists on obtaining samples on different terraces of the quarry, in order to generate an assessment and determine, by laboratory and on-the-field (in situ) tests, the rock's physical and mechanical parameters. The samples for analysis were obtained from the quarry and the rock's crusher directly.

The samples obtained by the explosions and those from the quarry's finished product, will be evaluated by tests of absorption, specific gravity, abrasion porosity, Ethylene Glycol Immersion, point loads and by the in situ Rebound Hammer test with a sclerometer, in order to establish correlations with statistical validity and to improve the assessment of the materials that they have been working with.

After the application of the different tests' rates, and the determination of the relations between them, it is possible to obtain optimal correlations, according to the theory that sustains them.

A sequential program is designed to estimate the absorption test according with different physical and mechanical parameters of the rocks, as well as the application of the stone aggregates according to the results obtained.

# Resumen

La caracterización geotécnica de rocas fue determinada en el sitio de préstamo Cerro Minas, Quebrador San Ana.

El presente estudio consistió en efectuar un número específico de muestreos en distintas terrazas de la cantera, con el fin de generar una valoración y establecer mediante pruebas de laboratorio e In situ las características físicas y parámetros mecánicos del macizo rocoso. Los muestreos para el correspondiente análisis fueron obtenidos tanto propiamente de la cantera como del Quebrador.

Las muestras obtenidas de las voladuras y el correspondiente producto terminado del Quebrador fueron evaluadas por pruebas de Absorción, Gravedad Especifica, Abrasión, Porosidad, Inmersión en Etilenglicol , Carga Puntual y prueba in situ del Martillo de Rebote (Esclerómetro); con el fin de establecer correlaciones de modo que tenga validez estadística y mejorar la evaluación existente de los materiales.

Al final de la aplicación de este conjunto de pruebas índices, y de la determinación de las relaciones existentes entre sus datos, se logró obtener correlaciones óptimas, según la teoría investigada al respecto.

Asimismo, se realizó un programa ejecutable que permite estimar mediante la prueba de absorción diversos parámetros físicos y mecánicos de las rocas, así como la aplicación de los agregados pétreos según los resultados.

# **Estudio exploratorio para el establecimiento de una metodología para la caracterización geotécnica de material de un tajo, basado en el ensayo de absorción**

ALEJANDRA MORICE SANDOVAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Setiembre de 2010

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Contenido

|  |                                |
|--|--------------------------------|
| PREFACIO .....   | ¡Error! Marcador no definido.  |
| RESUMEN EJECUTIVO .....                                | 2                              |
| INTRODUCCION .....                                     | 4                              |
| OBJETIVOS .....  | 5                              |
| ALCANCES Y LIMITACIONES. ¡Error! Marcador no definido. |                                |
| ANTECEDENTES ¡Error! Marcador no definido.             |                                |
| MARCO TEORICO .....                                    | 11                             |
| METODOLOGÍA .....                                      | 23                             |
| RESULTADOS.....  | 30                             |
| ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....                       | 62                             |
| CONCLUSIONES .....                                     | 74                             |
| RECOMENDACIONES .....                                  | 7¡Error! Marcador no definido. |
| APÉNDICES .....  | 77                             |
| ANEXOS .....   | 100                            |
| REFERENCIAS.....                                       | 112                            |

# Prefacio

Estudio exploratorio para el establecimiento de una metodología para la caracterización geotécnica del material de un tajo, es un proyecto propuesto por el Ingeniero Gastón Laporte, para el sitio de préstamo Cerro Minas (Planta de Agregados Santa Ana, Holcim Costa Rica). Consiste en verificar las propiedades de los materiales del macizo rocoso, mediante el análisis de diversos muestreos que fueron evaluados por pruebas de laboratorios e in situ, con el fin de determinar las diferentes características físicas y mecánicas de los materiales.

Para el sitio de préstamo se efectuó un estudio preliminar de la geología, para dar a conocer el ambiente geológico y estructural existente en el Tajo Cerro Minas. Dicho estudio se complementó con la ejecución de este proyecto, con el propósito de correlacionar las características físicas, geológicas y mecánicas.

El origen del proyecto surgió de la necesidad de efectuar una evaluación más simple de los materiales rocosos, con el fin de establecer una correlación de modo que tenga validez estadística y mejorar la evaluación existente de los materiales. Así a futuro; no sería necesario realizar ensayos más costosos o extensos. Por lo tanto, se buscó efectuar una investigación de los materiales pétreos que se tienen a disposición, mediante muestreos en distintas terrazas del Tajo, que fueron evaluados por pruebas de laboratorio como la Absorción, Abrasión, Porosidad, Gravedad Específica, Inmersión en Etilenglicol, Carga Puntual y prueba in situ del Martillo de Rebote (Esclerómetro).

Fue de suma importancia valorizar los materiales de acuerdo con sus características mecánicas, con base en la ejecución de varias pruebas de laboratorio, que permitieron clasificar los materiales para su uso en las distintas aplicaciones en la construcción.

Con la ejecución de este proyecto, a pesar de que no se pudo disponer de un número de muestreo más representativo, debido a la

disposición de tiempo y al planeamiento de voladuras de Holcim, se pretende que a futuro se complementen los resultados con un mayor número de muestras de la cantera, y poder caracterizar el sitio en su totalidad, garantizando resultados confiables en la determinación de las correlaciones, ya que se tendría un estudio de todas las terrazas.

Mi gratitud al Ingeniero Gastón Laporte por darme la oportunidad de llevar a cabo este estudio, así como a la empresa Holcim Costa Rica por la aceptación inicial y la apertura de puertas ante la necesidad y la motivación de llevar a cabo esta práctica profesional dirigida, y agradezco la ayuda de las geólogas, ingenieros y personal que me brindaron su ayuda en la ejecución de este proyecto. De igual manera al Coordinador del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción, Ingeniero Rolando Fournier, por permitirme efectuar la ejecución de las pruebas de laboratorios en las instalaciones del CIVCO.

Finalmente, agradezco al Instituto Costarricense de Electricidad, específicamente al Ingeniero Marco Tapia, por permitirme efectuar los ensayos de Carga Puntual en el Laboratorio de Geotecnia de dicha institución.

El agradecimiento general a cada profesional que tuvo la bondad y generosidad de desplegar una mano a las necesidades que se fueron presentando durante la elaboración del proyecto

# Resumen ejecutivo

En el sitio de préstamo Cerro Minas (Planta de Agregados Santa Ana, Holcim Costa Rica) surgió la necesidad de efectuar una valoración más simple de los materiales rocosos, para establecer correlaciones que tengan validez y mejorar la evaluación de los materiales, permitiendo una clasificación de agregados para construcción. Se efectuó una caracterización geotécnica de rocas que consistió en verificar las propiedades de los materiales por diversos muestreos que serán evaluados por pruebas de laboratorios e in situ.

Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en el Centro de Investigación en Vivienda y Construcción y en el Laboratorio de Geotecnia del Instituto Costarricense de Electricidad, además se efectuó la prueba in situ con el Esclerómetro, en los taludes de las terrazas de donde se obtuvo cada muestra.

Se analizaron cinco muestreos correspondientes de voladuras efectuadas en la cantera, los cuales correspondieron a muestras en distintas terrazas.

A las rocas analizadas se les asignó un código según el muestreo efectuado (M-1, M-2, M-3, M-4, M-5), donde cada número representa una muestra distinta, pero con dos diferentes condiciones de obtención del material para cada una de ellas.

Partiendo de un estudio preliminar realizado por la geóloga Diana Gamboa, se conoció que el área de estudio de este proyecto tiene dos tipos de litología: Andesita porfírica silicificada y Andesita con textura fluidal.

Se presentan mineralizaciones principalmente de calcita que corresponde a la muestra M-1. Rocas con textura fluidal, producto del enfriamiento de la lava al fluir (M-2). Además se presenta en algunas rocas una patina de color rojiza a amarillenta, esto debido al contenido de hematita y limonita respectivamente. (M-3 y M-4).

Y por último la M-5 con presencia de Sericita y óxido de hierro.

Se ejecutó una serie de pruebas para obtener parámetros que permitieran valorizar correctamente los materiales. Se determinaron los valores de distintas características que se mencionan a continuación:

- Clasificación Mineralógica.
- Desgaste o Abrasión.
- Peso Volumétrico Seco
- Gravedad Específica.
- Absorción.
- Porosidad
- Resistencia a la Compresión Simple - Carga Puntual.
- Resistencia a la Compresión -Martillo de Rebote (Esclerómetro).

Como bien se conoce el material quebrado representa el material bruto, es por esta razón que se obtuvieron muestras posteriores a las voladuras y su correspondiente producto terminado (cuartilla) obtenido del Quebrador. Dado que no fue posible muestrear la totalidad del material obtenido en cada proceso de voladura y del apilamiento del producto terminado, se tomó un conjunto de muestras aleatorias, con el fin de que el muestreo fuera representativo del total, además se corroboró que el material que fue muestreado en la voladura corresponda al mismo luego de que la roca fue pasada por el proceso de trituración y criba, contemplando que teóricamente deberán ambas muestras presentar el mismo valor de la prueba correspondiente. Se establecieron relaciones entre los resultados de las pruebas para validar los datos, correlaciones que se describen a continuación.

- Absorción Voladura vrs Absorción Quebrador
- Porosidad Voladura vrs Porosidad Quebrador
- Abrasión Voladura vrs Abrasión Quebrador

Es importante mencionar que no se efectuó esta relación para el parámetro de resistencia a la compresión, ya que la determinación de esta prueba requiere un tamaño nominal de roca intacta que no cumple con el tamaño de las muestras obtenidas del quebrador.

Se establece el ensayo de absorción como el dato que será correlacionado con las distintas pruebas para estimar las características de la roca, esto por el hecho de ser una prueba tan simple y rápida, y ser el parámetro que mejor se comporta al correlacionarlo con las distintas características, conducta que se verifica con la teoría (Kanji & Galvan, 1998)

Por ser la absorción la que presenta el mejor comportamiento, se establecieron las siguientes correlaciones:

- Pérdida por desgaste vrs Absorción
- Peso Volumétricos Secos vrs Absorción
- Porosidad vrs Absorción
- Resistencia a la Compresión (Carga Puntual) vrs Absorción

También se establecieron correlaciones entre los datos obtenidos en este estudio vinculados a investigaciones preliminares. Su relación con estos estudios fueron respecto a; rocas en zonas cercanas al sitio de préstamo, con una misma formación geológica, un mismo tipo de roca y por último a estudios en el pasado de esta misma cantera, con el fin de validar los datos obtenidos y su relación respecto a artículos similares.

Por otra parte, se determinaron correlaciones de vínculos entre gráficas existentes de parámetros con distintos tipos de rocas y el presente estudio. Mediante las investigaciones efectuadas por el brasileño Milton Kanji, específicamente sus correlaciones teóricas determinadas, se logró obtener una valoración de los resultados obtenidos en el presente estudio.

Al valorar los resultados entre sí y al analizar las tendencias obtenidas según la teoría,

se obtuvo una validación de los parámetros determinados para el macizo rocoso de Holcim.

Uno de los objetivos de este trabajo fue mejorar la consistencia en la práctica y estimular un planeamiento racional del programa de caracterización del sitio, por el cual se ejecuta un programa que presenta dos pestañas; la primera, que corresponde a cálculos que arroja una estimación de los resultados de las diferentes pruebas analizadas en los materiales rocosos, con la simple introducción del resultado de la prueba de absorción; la segunda, que establece las aplicaciones en los que el agregado puede utilizarse según los resultados obtenidos, estos cumpliendo especificaciones vigentes en Costa Rica o referencia de libros.

Es recomendable continuar con el estudio de los diferentes tipos de agregados disponibles en Cerro Minas, realizar más muestreos que abarquen la totalidad de la cantera para asegurar la tendencia, comprobar si el comportamiento de los gráficos se mantiene en el tiempo y optimizar las correlaciones, a fin de determinar una caracterización de todo el macizo rocoso y estimar con mayor confiabilidad las características mecánicas y físicas del agregado pétreo.

# Introducción

Sin duda, una de las principales fuentes de suministro de agregados de la industria de la construcción en el Valle Central es el sitio de préstamo “Cerro Minas”. Dado la amplia gama de aplicaciones en la ingeniería que tienen estos materiales y por encontrarse en una de las ubicaciones de mayor ejecución de obras civiles y de ingeniería de gran envergadura, se ha considerado importante el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas para efectos de clasificar la calidad de los agregados por usar en el área de la construcción.

Dichas propiedades se obtienen en laboratorios por medio de pruebas que a veces pueden ser lentas o costosas. Por otra parte, surge la necesidad de caracterizar el sitio de préstamo con el fin de determinar diversos parámetros para valorar el material extraído.

Los agregados son un importante aporte dentro de las mezclas de concreto. La selección y empleo de los materiales más apropiados para exigencias particulares de especial interés hacen necesario caracterizar física, mecánica y químicamente los agregados. Esto proporcionará información necesaria para un adecuado diseño de las mezclas y sus diferentes aplicaciones.

Los materiales fueron analizados en este trabajo por muestreos efectuados en la explotación de la terraza del macizo rocoso y su correspondiente producto final, obtenido a partir del proceso de trituración y criba de la roca sólida, evaluados ambos por pruebas de laboratorio de abrasión, absorción, sanidad, inmersión en etilenglicol, carga puntual y prueba in situ del Martillo de Rebote (Esclerómetro), con la intención de utilizar los valores arrojados en cada uno de estos ensayos, valorar los resultados y determinar correlaciones existentes entre ellas. Estas mediciones son de suma importancia, ya que verifican las propiedades de los agregados de acuerdo con las especificaciones de sus correspondientes

normas, en cuanto a calidad y durabilidad de estos.

Esta planta de producción posee condiciones geológicas variables, por lo que es necesario conocer la geología propia del sitio de explotación. En el área de estudio se observaron dos tipos de litologías: Andesita porfírica silicificada y Andesita con textura fluidal.

Los materiales pétreos son utilizados en la producción de mezclas y tienen como objetivo mejorar las condiciones y características específicas de los materiales de construcción. Se utilizan en obras civiles tales como: aeropuertos, puentes, carreteras, edificios, puertos, y otras construcciones que requieren materiales de calidad comprobada y que cumplen especificaciones según el uso que se le dará.

## Ubicación del Área de Estudio

Cerro Minas se ubica a 1 Km al sur-oeste del Cantón de Santa Ana, específicamente entre las coordenadas 515300-516000E y 210200212200N, Hoja Cartográfica Abra, escala 1:50 000 (Fig 1).

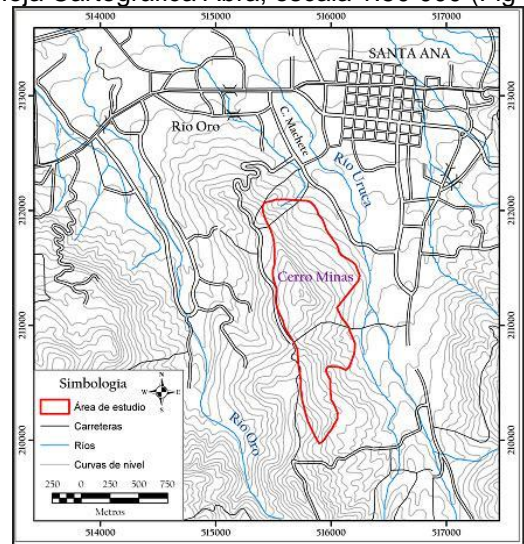


Figura 1: Ubicación de Cerro Minas.



# Objetivos

## Objetivo general

Caracterizar y clasificar cinco muestreos provenientes del sitio de préstamo Cerro Minas, para verificar las propiedades de los materiales del macizo rocoso, mediante el análisis de diversos muestreos que serán evaluados por pruebas de laboratorios como lo son abrasión, absorción, sanidad, inmersión en etilenglicol, carga puntual y prueba in situ del Martillo de Rebote (Esclerómetro).

## Objetivos específicos

- Efectuar distintos muestreos en el Cerro Minas, con el fin de evaluar las diferentes características físicas y químicas de los materiales.
- Efectuar pruebas de laboratorio de abrasión, absorción, porosidad, inmersión en etilenglicol, resistencia a la compresión por pruebas de Load Point y Prueba Martillo de Rebote (Esclerómetro) para los muestreos que rige bajo las normas ASTM.
- Establecer una correlación de modo que tenga validez estadística y para que a futuro sirva como guía en la caracterización.

# Alcances y limitaciones

Esta planta de producción posee condiciones geológicas variables. Dicha característica puede generar diversos rangos de calidad de las rocas. Es por esta razón que se tiene como fin, efectuar un análisis de cinco materiales de construcción que están a disposición mediante muestreos en distintas terrazas del Tajo y su correspondiente producto final, que serán evaluados por pruebas de laboratorio.

La heterogeneidad del terreno es tal que, efectivamente, incluso en zonas que se suponen bien conocidas y llamadas “homogéneas” es siempre posible que las rocas presenten distintas propiedades mecánicas y físicas, por el cual se debe verificar que sean adecuadas para el uso a fin. Por lo tanto, el origen del proyecto surge de la necesidad de efectuar una evaluación más simple de los materiales rocosos, con el fin de establecer una correlación que tenga validez estadística y mejorar la evaluación existente de los materiales, y así caracterizar las terrazas por calidad y propiedades de la roca.

El número de muestreos analizados se estableció de acuerdo con las voladuras programadas en Cerro Minas, el cual corresponde a cinco muestras en cuatro meses de práctica laboral. Estos muestreos fueron preparados y evaluados en los siguientes laboratorios:

- Centro de Investigación en Vivienda y Construcción
- Escuela de Materiales, I.T.C.R
- Instituto Costarricense de Electricidad.

# Antecedentes

Desde la década de los años setenta, el país y en especial el Valle Central, se ha caracterizado por un notable incremento de la construcción de obras civiles, en específico viviendas y edificios comerciales. Ante este fenómeno, producto esencialmente de la presión demográfica, ha sido necesario desarrollar proyectos de infraestructura tales como producción y distribución de energía eléctrica, servicios de agua potable, aguas negras, telecomunicaciones, etc., que han aumentado la necesidad de recurso humanos y materiales para su consecución. Como parte importante de estos recursos de materiales necesarios, se encuentran los agregados para concreto, que inciden en el costo de las obras y sobre todo en calidad y durabilidad de esas.

Como bien se sabe el costo y principalmente la calidad de un concreto, depende en buena parte de los agregados usados. Por otra parte, el diseño estructural se basa en la premisa que el concreto tendrá la resistencia y las características especificadas, las que conservará durante toda su vida, lo cual debe ser garantizado por el uso de concretos de

calidad, tanto por su elaboración como por su colocación.

La demanda de agregado cada día es mayor y hace necesario un estudio detallado sobre la planificación del uso de fuentes de extracción, pensando principalmente en la calidad y costo de materiales y en el equilibrio ecológico que se debe mantener.

El ingeniero Gastón Laporte publicó un artículo titulado *Características y Comportamiento de los Agregados en Costa Rica*, en él se determinan rangos de variación de las principales características para rocas con distinta ubicación y descripción geológica. Dichos resultados fueron utilizados para la valoración de los datos obtenidos en este proyecto.

A continuación, se muestra el cuadro que presentan los rangos de variación de las rocas analizadas en dicho artículo.

| <b>CUADRO 1. CARACTERÍSTICA DEL AGREGADO GRUESO</b>     |                     |  |                                    |                         |                      |
|---|---------------------|--|------------------------------------|-------------------------|----------------------|
| Tipo de Roca  | Lavas               | Ignimbritas  | Garros Dioritas                    | Aluviales               | Calizas              |
| Ubicación   | Dantas<br>El Carmen | Florencia,<br>Vueltas,<br>Garita.<br>Aduana, La<br>pista | T.Bajo, León,<br>Bretaña, Concavas | R.Lagarto<br>R.Chirripó | Nicoya.<br>Turrialba |
| Grav. Espec.<br>Bruta Gbs                               | 2,4-2,6             | 1,5-2,3  | 2,2-2,6                            | 2,4-2,6                 | 2,5-2,6              |
| Grav. Espec.<br>Sup. Seca                               | 2,5-2,7             | 1,7-2,4  | 2 -2,6                             | 2,5-2,7                 | 2,6-2,8              |
| Absorción (%)   | 2,8-3,6             | 4,5-13   | 1,5-16                             | 1,3-2,1                 | 1,4-2,5              |
| Abrasión (%)  | 22-31               | 30-65  | 13-37                              | 20-30                   | 28-31                |
| Sanidad (%)   | 8-12                | -  | 1-6                                | 6,5-7,5                 | 1,3-1,5              |
| Resistencia a<br>la Compresión<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 500-1000            | 100-300  | 100-800                            | -                       | -                    |

Fuente. Publicación *Características y Comportamiento de los Agregados en Costa Rica*, Gastón Laporte.

# Características de los agregados nacionales: región central del país

El Centro de Investigación de Vivienda y Construcción (CIVCO) llevó a cabo el primer estudio de una serie de investigaciones acerca de los agregados pétreos. El estudio estuvo a cargo del ingeniero Aldo Ramírez Coretti y se llevó a cabo de setiembre 1992 a junio de 1993.

Esta publicación nace con el propósito de diagnosticar las características de los agregados del Valle Central.

En el siguiente cuadro se establecen los resultados obtenidos para la zona geográfica de Santa Ana, el cual corresponde a un estudio en Cerro Minas en el año de 1993. Esto con el fin de correlacionar los datos obtenidos en este proyecto y verificar si existen variaciones significativas en el tiempo de las características físicas y mecánicas de las rocas de la cantera.

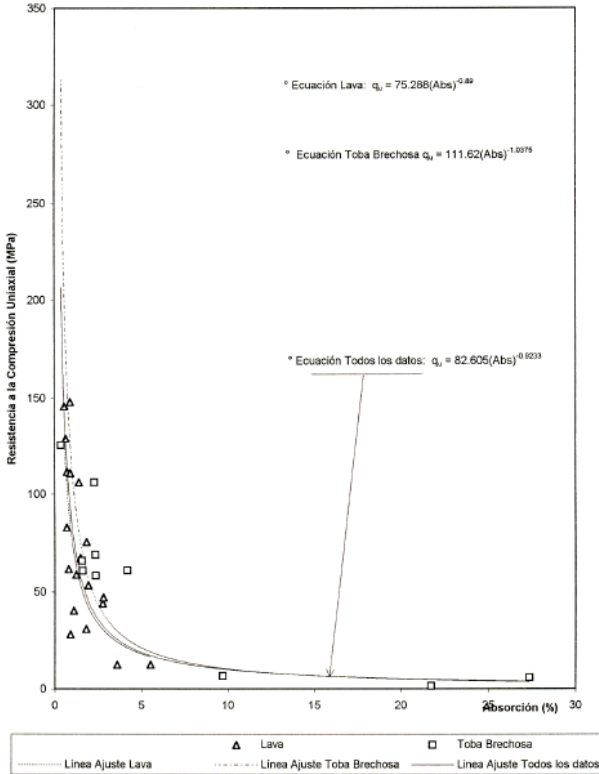
| <b>CUADRO 2.RESULTADOS PARA LA ZONA GEOGRÁFICA DE SANTA ANA, "CERRO MINAS" AGREGADO GRUESO</b> |                             |                             |      |      |          |          |               |
|--|-----------------------------|-----------------------------|------|------|----------|----------|---------------|
| Zona   | P.Un. S (K/m <sup>3</sup> ) | P.Un. C (K/m <sup>3</sup> ) | Gbs  | Gsss | Abr. (%) | Abs. (%) | Tam. Max (mm) |
| Santa Ana  | 1299                        | 1481                        | 2,58 | 2,65 | 17,7     | 2,5      | 19            |

Fuente. Publicación Características de los Agregados Nacionales: Región Central del país. CIVCO

## P.H. Cariblanco

El proyecto hidroeléctrico Cariblanco está asentado en materiales de origen volcánico. Por lo tanto, las diferentes litologías que atravesarán la "línea de conducción" corresponden a ese mismo origen. Para este proyecto se estableció una correlación entre la absorción y la resistencia a la compresión simple, para materiales de lavas

y tobas brechosas. El gráfico de la Figura 2, muestra la relación entre absorción y resistencia de los materiales. Dichas correlaciones fueron evaluadas con los resultados obtenidos en este proyecto, con el fin de aglutinar los datos de ambos estudios y verificar si es constante la tendencia de la gráfica.



**Figura 2.** Efecto de absorción en reducción de la resistencia. (Tapia. M. *Introducción a la Mecánica de Rocas y a la Ingeniería de Rocas*)

Correlaciones obtenidas según el gráfico anterior.

➤ Lavas  
 $q_u = 75,288(Abs)^{-0,89}$  ..... **Ecuación 1**

➤ Toba:  
 $q_u = 111,62(Abs)^{-1,0375}$  ..... **Ecuación 2**

➤ Lavas y Tobas:  
 $q_u = 82,605(Abs)^{-0,9233}$  ..... **Ecuación 3**

Donde:

Abs: Absorción

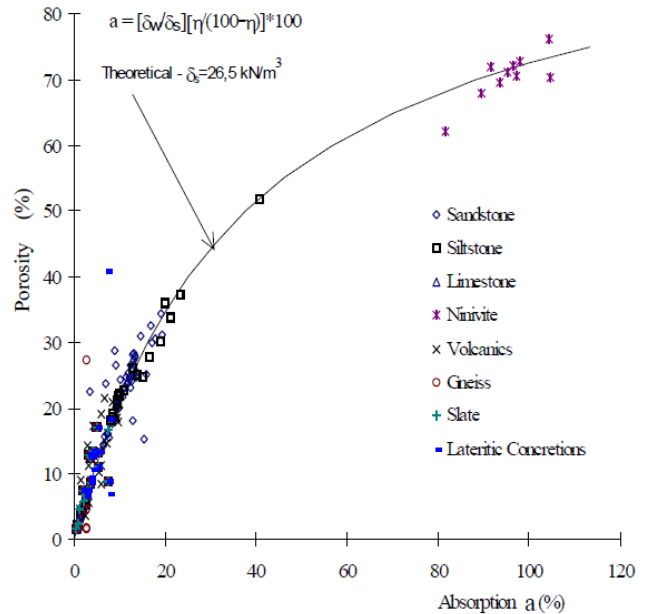
qu: Resistencia a la compresión simple.

## Investigación de Milton Kanji & Galván, 2008

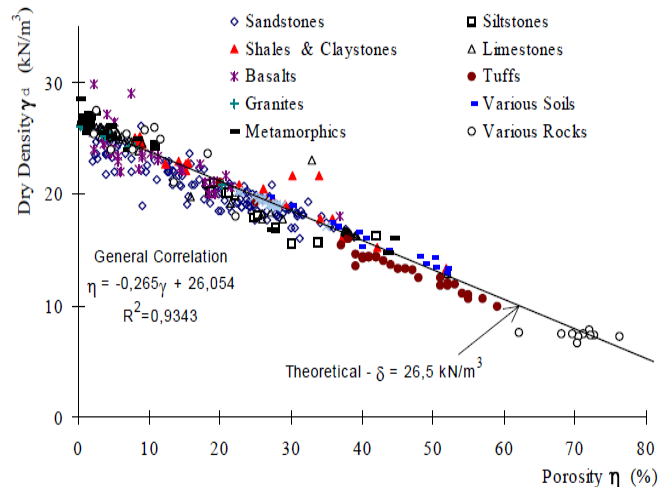
Posteriormente se mostrarán gráficas de correlaciones físicas entre parámetros

contemplando distintos tipos de roca que han sido estudiadas por Milton A Kanji y V.R Galván. Ambas serán usadas para valorar los resultados obtenidos en este proyecto.

Las siguientes gráficas fueron suministradas por el Ingeniero Gastón Laporte:



**Figura 3.** Porosidad vrs Absorción (Kanji & Galván)



**Figura 4.** Densidad Seca vrs Porosidad, (Kanji & Galván)

# Caracterización geotécnica de rocas blandas en el Gran Área Metropolitana

Un estudio preliminar que corresponde a la Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, efectuado por Karol Cruz, 2005, caracteriza las rocas volcánicas blandas en el Gran Área Metropolitana. El trabajo se enfoca hacia la determinación de correlaciones prácticas entre las propiedades físicas y mecánicas de las rocas blandas en la zona de estudio. En dicha tesis se presentaron dos mapas; estos corresponden al Mapa 2 (Mapa Geológico del Gran Área Metropolitana) y al Mapa 3 (Mapa de Distribución Estadística de Rocas Estudiadas en el GAM), ambos adjuntos en Anexos. En la

siguiente tabla se presentan los datos de las propiedades mecánicas y de unidad geológica de la roca intacta blanda y moderadamente dura del GAM que se consideraron en este estudio. Dichas muestras podrán ser ubicadas en el Mapa 2 del Anexo. Véanse los siguientes datos que serán correlacionados con los resultados de rocas duras estudiadas en esta investigación:

| <b>CUADRO 3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE ROCA INTACTA DEL GRAN ÁREA METROPOLITANA ANALIZADAS POR KAROL CRUZ</b> |                               |                  |       |      |        |      |       |                       |           |            |  |
|--|-------------------------------|------------------|-------|------|--------|------|-------|-----------------------|-----------|------------|--|
| Código   | Ubicación                     | Ubicación en GAM |       | Gs   | $\eta$ | Abs  | RCS   | RCS                   | Unidad    | Formación  |  |
|  |                               | X                | Y     |      | (%)    | (%)  | (MPa) | (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Geológica |            |  |
| KC8  | Atenas                        | 498,3            | 218,2 | 1,93 | 29,1   | 21,2 | 6,14  | 62,63                 | TQv       | Grifo Alto |  |
| KC12   | Entre Frailes y San Cristóbal | 532,3            | 192,6 | 2,59 | 17,2   | 8    | 25,46 | 259,70                | TQv       | Grifo Alto |  |
| KC13   | Bustamante                    | 527,9            | 193,1 | 2,8  | 6,4    | 2,5  | 77,63 | 791,83                | TQv       | Grifo Alto |  |
| KC14   | Frailes                       | 530,9            | 193   | 2,65 | 22,4   | 10,9 | 34,15 | 348,33                | TQv       | Grifo Alto |  |
| KC15   | San Gabriel                   | 527              | 196,5 | 2,5  | 15     | 7    | 5,48  | 55,90                 | TQv       | Grifo Alto |  |
| KC16   | Grifo Alto                    | 495,35           | 206,2 | 2,82 | 13,2   | 5,5  | 59,24 | 604,25                | TQv       | Grifo Alto |  |
| KC17   | Grifo Alto                    | 494,4            | 206,4 | 2,91 | 3,4    | 1,2  | 80,17 | 817,73                | TQv       | Grifo Alto |  |
| KC18   | Entre Grifo Alto y Purires    | 491,6            | 208,2 | 2,81 | 2,8    | 1    | 73,8  | 752,76                | TQv       | Grifo Alto |  |
| KC19   | Entre Grifo Alto y Purires    | 491,2            | 209,2 | 2,9  | 8,2    | 3,1  | 122,7 | 1251,54               | TQv       | Grifo Alto |  |
| KC20   | Palmas                        | 484              | 207,3 | 2,46 | 15,7   | 7,6  | 25,7  | 262,14                | TQv       | Grifo Alto |  |
| KC21   | Alto del Monte                | 486,3            | 217,6 | 2,66 | 6,3    | 2,6  | 98,35 | 1003,17               | TQv       | Grifo Alto |  |
| Cerro Minas  | Santa Ana                     | 515,8            | 211,2 | 2,33 | 29,2   | 17,7 | 2,64  | 26,93                 | TQv       | Grifo Alto |  |
| Jaboncillo   | Santa Ana                     | 519,2            | 511,8 | 2,51 | 16,2   | 7,7  | 13,1  | 133,62                | TQv       | Grifo Alto |  |

Fuente. Tesis de Grado Licenciatura Ingeniería Civil. Karol Cruz, 2005

# Los afloramientos de lavas del Tajo Minas

A continuación se describe la investigación realizada, en el área de estudio, por los geólogos Guillermo Alvarado y Diana Gamboa sobre las lavas de Cerro Minas (Mioceno Inferior), el cual denominan como un ejemplo de cuerpos subvolcánicos coetáneos con la sedimentación de la Formación Pacacua.

“Los afloramientos de lavas del Tajo Minas (antiguo Tajo Prendas) son conocidos desde hace varias décadas, pero sus descripciones siempre han sido someras pese a corresponder con exposiciones excelentes (unos 200 m) y tener un rol importante en el uso de los agregados para el Valle Central.

La estructura tectónica del cerro Minas es relativamente tranquila, sin fallas importantes, subhorizontal en los buzamientos de los sedimentos volcánoclasticos, los cuales se encuentran en la base e interestratificado (20 m de espesor) entre cuerpos subvolcánicos. Sin embargo, los buzamientos primarios (no tectónicos) del cuerpo superior pueden ser fuertes (60° y 85°), correspondiendo con pliegues sinvolcánicos en las lavas, en correspondencia con las rampas de avance. El cuerpo inferior (40 m de espesor) corresponde con una andesita (15% plag, 3% opacos), intercalado entre epiclastitas (vulcanorudititas y vulcarenitas, originadas por debris flows y flujos hiperconcentrados, y tobitas ácidas) con brechas hidroclásticas en sus contactos, posibles lavas en almohadilla y peperitas en su contacto superior, sugiriendo un emplazamiento subvolcánico dentro de los sedimentos. La traquiandesita superior (18-22% plag, 3-4% cpx, 0-2,5% opacos; 0-3% hb, 4% sanidina?) posee un espesor de unos 130 m cerca de su supuesta fuente y se adelgaza a unos 10-20 m en su parte distal. Posee textura fluidal-bandeada (laminación planar, cruzada y plegada), localmente perlítica desvitrificada, con rampas de progresión “intruidas” por chimeneas de brechas de almohadillas y brechas hialoclasticas, posiblemente producto de fracturación hidráulica. También se observan autobrechas, disyunción columnar y losas de enfriamiento. Se presume que se trató de un criptodomo. Estos cuerpos poseen localmente sectores con mineralizaciones menores de calcita, amatista y zeolitas

(normalmente presentes en las litofíceas), limonita en las fracturas, y en menor grado malaquita y esfalerita, que no son tomados dentro de los agregados. Las lavas presentan localmente alteración del tipo deutérica, silicificante y carbonática (calcita, zeolita, nontronita, hematita, limonita, sericita, y raramente titanita), y los sedimentos pirometamorfismo, en ciertos casos con completa transformación a jaspe rojo. La edad estimada de estas lavas y su asociación litoestratigráfica ha variado con los autores: Vulcanismo de transición entre la Fm. Aguacate y el Grupo Volcánico Cuaternario (Dóndoli y Chaves, 1968), Grupo Aguacate contemporáneo con Pacuacua (Rivier, 1979), vulcanismo de Pacacua (Alvarado, 1984), y con Fm. Grifo Alto (Barrantes, 1991; Denyer y Arias, 1991) del Plio-Pleistoceno. Las evidencias anteriormente descritas nos hacen pensar en cuerpos subvolcánicos que intruyeron a sedimentos inconsolidados y todavía húmedos de la Fm. Pacacua (Mioceno Inf.), por lo tanto coetáneos. Estaríamos así en presencia de uno de los focos que dio origen a las espesas secuencias volcano-sedimentarias (ignimbritas, tobitas y vulcanorudititas) de las Formaciones Pacacua (incluyendo la Brecha verde de Coyolar) y Mata de Limón.” (Gamboa D, 2008)

# MARCO TEÓRICO

El estudio del macizo rocoso de Cerro Minas ha surgido como consecuencia del importante uso como sitio de préstamo de agregados en el Valle Central. “La mecánica de Rocas se ocupa del estudio teórico y práctico de las propiedades y comportamiento mecánico de los materiales rocosos, y de su respuesta ante la acción de fuerzas aplicadas en su entorno físico” (González de Vallejo, 2002).

Las características de las rocas y de los macizos rocosos y el estudio de su comportamiento mecánico son complejos, dependen de gran variabilidad de características y propiedades propias de la roca, y a los diversos factores que las condicionan, en esto radica la importancia de conocer sus características, ya que serán empleadas como material de construcción.

Las propiedades físicas de las rocas se determinan en laboratorios; las más importantes a nivel de influencia en el comportamiento mecánico son la porosidad, el peso específico, la permeabilidad, la alterabilidad, la resistencia y la velocidad de propagación de ondas. Algunas de estas propiedades, además de que son utilizadas para establecer una clasificación, están directamente relacionadas con las características resistentes y deformacionales de las rocas. (González de Vallejo, 2002).

## Origen mineralógico

Las características geológicas de una roca tienen importancia en el proceso de selección para su empleo en la construcción. La identificación del nombre de la roca permite inferir sobre su calidad mecánica; los materiales de estudio son de origen ígneo. Las rocas a su vez se clasifican de acuerdo con su origen de la siguiente manera, (Suárez, 2009):

- **Rocas Ígneas.** Son aquellas que han sido llevadas a la superficie de la tierra por las fuerzas

volcánicas. Este tipo de origen es el presente en el área de estudio.

- **Rocas Volcánicas.** Son depósitos de materiales arrojados por los volcanes, los cuales se enfriaron después de salir a la superficie.

- **Rocas Metamórficas.** El metamorfismo es la transformación de una roca en un nuevo tipo de roca por la recristalización de sus materiales constitutivos. Las rocas originales pueden ser ígneas, sedimentarias u otras metamórficas, que han sufrido cambios por aumento de calor o temperatura.

- **Rocas Sedimentarias.** Las rocas sedimentarias están compuestas por sedimentos que se han endurecido para formar una roca. Los sedimentos pueden ser granos de minerales o depósitos de compuestos químicos.

Según González de Vallejo, las clasificaciones geológicas o litológicas del Cuadro 4, son fundamentales en ingeniería geológica, ya que aportan información sobre la composición mineralógica, la textura y la fábrica de las rocas, así como sobre la isotropía o anisotropía estructural en rocas de determinado origen, como es el caso de las rocas masivas frente a rocas laminadas o foliadas.

A continuación se presenta una forma simplificada de clasificar las rocas, con base en su composición, relaciones geométricas de sus partículas (textura) y características genéticas en los siguientes grupos:

- Rocas Sedimentarias: detríticas y no detríticas
- Rocas Ígneas: plutónicas y volcánicas
- Rocas Metamórficas

| <b>CUADRO 4. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS POR SU ORIGEN</b> |                              |  |
|---|------------------------------|--|
| Rocas Sedimentarias                                       | Detríticas:                  | Cuarcita, arenisca, lutita, limolita, conglomerado |
|   | Químicas:                    | Evaporitas, caliza dolomítica                      |
|   | Orgánicas:                   | Caliza, carbón, rocas coralíferas                  |
| Rocas Ígneas  | Plutónicas:                  | Granito, gabro, diorita                            |
|   | Volcánicas:                  | Basalto, <b>andesita</b> , riolita                 |
| Rocas Metamórficas  | Masivas:                     | Cuarcita, mármol                                   |
|   | Foliadas o con esquistosidad | Pizarra, filita, esquistos, gneiss                 |

Fuente: Cuadro obtenido del libro de Ingeniería Geología, González de Vallejo, 2000.

## Geología Regional

En los alrededores de la zona de estudio aflora principalmente la Formación Pacacua y la Formación Grifo Alto, que se detallan a continuación: (Denyer & Kussmaul, 2000).

### Formación Grifo Alto

Es una secuencia de lavas y rocas piroclásticas que influye a la formación Basalto La Garita. Aflora principalmente en los montes del Aguacate, desde San Ramón hasta Puriscal y su espesor puede llegar a más de 1000m. Se trata de lavas basálticas, andesíticas- basálticas y tefriticas (Figura 5), que muchas veces contienen fenocristales bien formados de augita con tamaños hasta de 1cm, pocos fenocristales de plagioclasa, olivino alterado y magnetita. A veces también se encuentran lavas con grandes fenocristales de hornblenda.

Se incluyen dentro de esta formación:

- Los Basaltos La Garita
- Los depósitos ignimbríticos que afloran al E de la hoja Caraigres.
- Los depósitos del Cerro Minas cuyos estudios demuestran que este sitio fue foco de emisiones de los Depósitos de Avalancha Ardiente.

La Fm. Grifo Alto se extiende al E y NW de Caraigres, N de Candelaria. Hay afloramientos dispersos en la hoja Abra y presenta su máxima extensión en la hoja Río Grande.

Su forma es irregular pues rellena una topografía existente post-basculamiento, el espesor es de 800 m a 1000 m. (Denyer & Kussmaul, 2000).

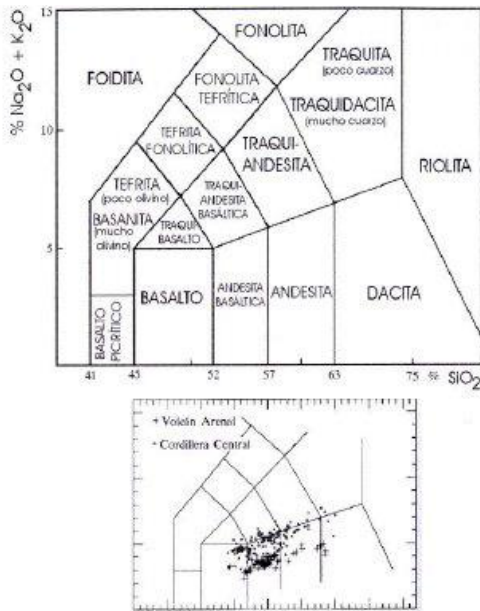
### Formación Pacacua

Se extiende desde los alrededores de Santiago de Puriscal y la fila coyolar hasta el sur de Cartago. Consiste de brechas, areniscas, tobas y lutitas interestratificadas, todas con evidente influencia volcánica y en ocasiones con colores muy llamativos, como rojos, verdes y morado. Sobre esta secuencia volcánica yacen las rocas del Miembro Brechas Verdes Coyolar, que consisten de varios paquetes de brechas de color verde y composición volcánica, interretadas como el resultado de la erosión causada por la reactivación de la falla Candelaria

Se extiende en las hojas Abra y Río Grande y tiene su mejor desarrollo y exposición en un homoclinal que buza al N, el cual cubre parte de las hojas Candelaria y Caraigres. Su espesor alcanza entre 1200 m y 2000 m, presentando una forma tabular.

Estas rocas se depositaron durante el Mioceno Inferior e inicios del Mioceno Medio, sobre las rocas de la formación Caraigres, en un ambiente marino somero (sublitoral) con gran influencia del vulcanismo continental. Poseen un espesor de alrededor de 2000m. (Denyer & Kussmaul, 2000).





**Figura 5.** Diagrama TAS para la clasificación química de las rocas volcánicas y ubicación de algunas unidades ígneas de Costa Rica. . (Denyer & Kussmaul, 2000).

## Geología local

Dentro del área de estudio de la cantera, según estudios preliminares e inspecciones por parte de las geólogas de Holcim, las rocas que se procesan como material industrial son las denominadas Rocas Ígneas, posteriormente se describe el origen, tipo y formación presente en Cerro Minas.

## Rocas ígneas

Las rocas volcánicas o piroclásticas también conocidas como rocas ígneas extrusivas, son producto de la cristalización de los materiales expulsados por los volcanes. Las propiedades ingenieriles de las rocas volcánicas dependen del grado de solidificación y de acuerdo con esta, presentan una variedad de resistencias y permeabilidades. (Denyer & Kussmaul, 2000).

## Andesita

La andesita es una roca de grano fino, volcánica, que se le encuentra como flujo de lava y ocasionalmente, como pequeñas inclusiones. Por

lo general, es de color marrón. Los minerales constituyentes son esencialmente plagioclasa, hornblenda y biotita con muy poco cuarzo. Tiene básicamente la misma composición de la diorita, pero su grano es más fino y puede contener algunos cristales de plagioclasa de varios milímetros de largo. (Denyer & Kussmaul, 2000).

## Origen de la estructura

Estas andesitas sobreyacen a los sedimentos de la Formación Pacacua. Pueden describirse como cuerpos subvolcánicos que intruyeron a sedimentos inconsolidados y todavía húmedos de la Fm. Pacacua, por lo tanto son coetáneos y de una edad probable Miocena Inferior, tal y como lo describió Alvarado (1984). En general, estas rocas presentan una textura fluidal-balanceada “laminar planar y plegada” Se observaron variaciones de coloración en forma lateral y producto posiblemente de alteración de tipo silicificación y carbonatización. Se observan variaciones de coloración en forma lateral y vertical en el tajó. Estas son producto, posiblemente, de alteración propilítica (clorita, calcita-caolinita), cloritización, silicificación (jaspe y opalo), hematización).

## Mineralizaciones

De forma local se presentan mineralizaciones principalmente en las andesitas fluidales, de calcita (como patinas en las rocas), amatista (se encuentra en vetas de hasta 10 cm de ancho aproximadamente) y ceolitas (normalmente presentes en las litofíceas), limonita y óxidos de hierro en las fracturas y en menor grado malaquita. Además, en estas andesitas se presenta una atina de color rojiza amarillenta, esto debido al contenido de hematita y limonita respectivamente.

## Explotación minera

La explotación minera se divide en dos grandes grupos: subterráneas y de superficie. Para el estudio del sitio se tiene una explotación de cielo abierto. La explotación a cielo abierto, en canteras y tajos, se emplea en depósitos de gran

volumen para agregados de construcción. El material útil generalmente está cubierto por suelo o material estéril (sin valor alguno) y el primer paso es la remoción de esta cobertura, la cual traslada a una zona acondicionada para su depósito. Las canteras pueden ser bancos en retroceso que se extienden horizontalmente ladera adentro, similar a una escalera, o pueden tener la forma de un cono invertido, compuesto por terrazas que describen una espiral descendente.

El diseño de los bancos se efectúan mediante explosivos, Los bloques de mayor diámetro no son aceptados por las máquinas trituradoras, por lo que deben ser fragmentados por impacto. El material que es fragmentado se remueve y carga mediante excavadoras en vagonetas encargadas del acarreo a las trituradoras (quebradores). (Denyer & Kussmaul, 2003).

## Los yacimientos no metálicos

Un término más descriptivo y específico es “rocas y minerales industriales”, porque indica que se trata de dos grandes grupos de materiales que tienen un amplio uso en la construcción y han sido de gran importancia en todas las épocas de la civilización.

## Materiales de construcción

Son rocas comunes que se encuentran en gran cantidad y en casi todos los países. En su mayor parte se utilizan rocas quebradas, arena, caliza y arcilla. No todas las rocas sirven para la construcción pues requieren ciertas propiedades, tales como resistencia, duración y factibilidad de extracción y labrado.

Los agregados estructurales (rocas quebradas, grava, arena) hoy son esenciales para casi todas las obras civiles, (viviendas, edificios, carreteras, puentes, represas) (Denyer & Kussmaul, 2003).

Los agregados que presentan dureza serán los idóneos para su uso y su aplicación en concretos y pavimentos.

## Agregados

Los agregados naturales para concreto son una mezcla de rocas y minerales. Las rocas que se utilizaron para efectos del presente proyecto fueron trituradas para ser utilizadas como agregado estructural.

Un mineral es un conjunto (natural formado) de elementos químicos. Generalmente los elementos Si, Al, K, Na, Fe, Ca, Mg, Cl, O, (entre otros) forman el mineral. Los nombres de los minerales dependen de su fórmula y de su estructura atómica.

Un conjunto de minerales se llama roca. El nombre de la roca depende de su génesis y del contenido en minerales. Algunas rocas son monominerálicas, es decir principalmente contienen un mineral (como la caliza y la calcita.) (Material Didáctico, Oldemar, 2007)

La importancia del uso del tipo y de la calidad del agregado no se puede subestimar. Los agregados finos y gruesos ocupan cerca del 60% al 75% del volumen del concreto (70% a 85% de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía del concreto. (Denyer & Kussmaul, 2000).

El agregado es un material relativamente inerte que es capaz de resistir esfuerzos, cambios de climas, desgastes, etc. La forma, textura, graduación tienen una gran influencia en la resistencia del concreto.

Los agregados deben cumplir con algunas normas para que su uso en ingeniería se optimice: deben ser partículas limpias, duras, resistentes, durables y libres de productos químicos absorbidos, revestimiento de arcilla u otros materiales finos en cantidades que puedan afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. . (Denyer & Kussmaul, 2000).

## Agregado grueso

Este material compuesto por áridos de varios tamaños y formas proporciona al concreto resistencia y durabilidad. Además, influye favorablemente en el costo de la producción de concreto. Cuando se agregan áridos a la mezcla, estos sustituyen un volumen importante de la pasta evitando así utilizar más cantidad de cemento que es el material más oneroso.

La ASTM define al agregado grueso como el material que es retenido en la malla No.4, el cual consta de grava o piedra.

Al momento de realizar diferentes mezclas de concreto hidráulico, se hace necesario realizar prácticas de laboratorio para poder determinar con qué clase de agregados se está trabajando y así determinar las diferentes propiedades y características que estos le proveerán a la mezcla realizada. Es por esto que diferentes instituciones se han dado a la tarea de realizar prácticas de laboratorio estandarizadas para que se puedan llegar a resultados similares en cualquier parte del mundo. La institución más reconocida encargada de elaborar dichas prácticas (normas) es la llamada American Society for Testing Materials (ASTM).

Se ha comprobado que la resistencia última de concreto de mediana y alta resistencia depende de la integridad y propiedades físicas del agregado grueso. En este tipo de mezclas la piedra ocupa aproximadamente un volumen bruto entre 35% y 45% del volumen total. Así, la calidad del agregado grueso en Concretos de Mediana Resistencia y Concreto de Alta Resistencia, es un factor muy importante, ya que al ser la pasta muy rica, su resistencia se acerca a la de los agregados, por lo que es importante que estos tengan excelentes propiedades mecánicas (Cascarrillo, 1980).

Un factor predominante de los agregados es la resistencia a la compresión simple, ya que este deberá tener una resistencia a la fractura por lo menos igual a la de la pasta endurecida. Al ser los áridos un material muy resistente a la compresión con valores que pueden alcanzar los 800kg/cm<sup>2</sup> o más, la pasta es generalmente la primera en ceder ante la aplicación de esfuerzos a la compresión, por lo que para concretos de baja resistencia (<350kg/cm<sup>2</sup>) la influencia de los áridos se fundamenta en la forma y textura que en la resistencia mecánica propiamente.<sup>1</sup> Puesto que la resistencia a la fractura de agregados de buena calidad, en general, es mayor a los 75 MPa; este factor no debe limitar la producción de concretos hasta ese valor. Por lo tanto, para prevenir la falla del concreto debido al agregado deben utilizarse agregados de alta resistencia (Cascarrillo, 1980).

---

<sup>1</sup> Mena, 1994. Información tomada del Manual de tecnología del concreto.

## **Características físicas y mecánicas de los materiales**

Las características físicas de las rocas son el resultado de su composición mineralógica e historia geológica, deformacional y ambiental.

La gran variabilidad de estas propiedades se refleja en el comportamiento mecánico diferente frente a las fuerzas que se aplican sobre las rocas, comportamientos que quedan definidos por la resistencia del material y por su modelo de deformación (González de Vallejo, 2002).

Existen una serie de parámetros que se emplean para la identificación y descripción cuantitativa de las propiedades básicas de la roca y permiten establecer una clasificación con fines geotécnicos.

Las características físicas o índices de las rocas se determinan en el laboratorio. Las que se analizaron para este estudio y que tienen influencia en su comportamiento mecánico son de absorción, gravedad específica, porosidad y pesos volumétricos secos. A continuación se describen algunas características importantes que se deben contemplar en los agregados gruesos.

## **CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

### **Forma y textura de las partículas**

El agregado grueso "ideal" debe ser limpio, anguloso, piedra quebrada en su totalidad y con un mínimo de partículas planas y elongadas. Manteniendo constantes todos los demás factores, la piedra quebrada produce concreto de mayor resistencia que la piedra redondeada.

En el siguiente cuadro se muestra una clasificación para determinar la redondez de las partículas

| <b>CUADRO 5. CLASIFICACIÓN DE LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS</b> |   |
|--|---|
| Clasificación  | Descripción   |
| Redondeada   | Completamente desgastada por el agua o totalmente formada por fricción. Ej. Grava de río, arena de playa, desierto.             |
| Irregular  | Irregulares por naturaleza, parcialmente formadas por fricción o con bordes redondeados. Ej.: Otras gravas , pizarra.           |
| Escamosa   | Materiales cuyo espesor es pequeño en comparación con sus dos dimensiones. Roca Laminada  |
| Angular  | Con bordes bien definidos, formados en las intersecciones de caras aproximadamente planas.Ej: Roca de todos los tipos triturada |
| Alargada   | Material que suele ser angular, pero cuya longitud es bastante mayor que las otras dos dimensiones                              |
| Escamosa y Alargada  | Material cuya longitud es bastante mayor que el ancho, y el ancho bastante mayor que el espesor.                                |

Fuente: Componentes Principales de las mezclas de Concreto. (Diseño y Control de Mezclas de Concreto (PCA))

La textura del agregado depende principalmente del grado de opacidad, aspereza, dureza, tamaño del grano y características del poro de la roca original.

La siguiente tabla permite facilitar la clasificación visual de las partículas:

| <b>CUADRO 6. CLASIFICACIÓN DE LA TEXTURA DE LAS PARTÍCULAS</b> |   |  |
|--|---|--|
| Clasificación  | Descripción   | Ejemplos   |
| Vítrea   | Fractura Concoidal  | Pedernal negro, escoria vítrea.                    |
| Lisa   | Desgastada por el agua o lisa debido a fractura de roca laminada o de roca de grano fino.                   | Grava, horsteno, pizarra, mármol, algunas riolitas |
| Granular   | Fracturas que muestran granos más o menos redondeados en forma uniforme                                     | Arenisca u olita                                   |
| Áspera   | Fractura áspera de roca de granos finos o medianos, que contengan partes cristalinas difíciles de detectar. | Basalto, felsita pórfido, caliza                   |
| Cristalina   | Con partes fáciles de detectar  | Granito, gabro, gneis                              |
| De forma Panal   | Con cavidades y poros visibles  | Ladrillo, piedra, pómez, escoria espumosa.         |

Fuente: Componentes Principales de las mezclas de Concreto. (Diseño y Control de Mezclas de Concreto (PCA))

“Los agregados con textura áspera logran mayores resistencias en el concreto, ya que hay mayor adherencia entre partículas y la matriz de cemento. Por otra parte, las partículas con mayor área superficial del agregado angular implican que se alcance una fuerza más grande de adherencia” (Neville, 1988).

## Mineralogía y formación

Investigaciones realizadas en este sentido, demuestran que existe cierta dependencia significativa entre el método de formación de la roca empleada como agregado, y el concreto producido con este. En general, las rocas ígneas poseen un grano de tamaño pequeño y alta resistencia.

## Tamaño máximo y graduación

Algunos investigadores han determinado que en las mezclas de concreto de mediana y alta resistencia, conforme el tamaño del agregado disminuye la resistencia a la compresión se incrementa.

Para concretos en el rango de 420 kg/cm<sup>2</sup> a los 530 kg/cm<sup>2</sup> se sugiere un tamaño máximo del agregado de 1,9 cm.

La recomendación estándar de graduación está establecida por ASTM C33 "Standard Specifications for Concreto Aggregates"

## Limpieza

El agregado grueso usado en concretos de mediana y alta resistencia deber ser libre de polvo, ya que este podría eventualmente causar un incremento en los finos y por lo tanto una mayor demanda de agua de la mezcla.

Las capas de arcilla que, en ocasiones cubren las partículas de agregado, pueden afectar también la unión pasta-agregado.

El lavado de las piedras quebradas empleadas como agregado grueso puede no siempre ser necesario, pero es generalmente recomendado.

## Ensayos de laboratorios e in situ

Los ensayos a que se someten los materiales son muy específicos y de alto costo, pero son indispensables para la valoración y aprobación de su uso. Las pruebas realizadas en este estudio son las siguientes:

## Absorción

La absorción es un porcentaje que expresa la cantidad de agua absorbida en relación con la cantidad del material seco.

La absorción es quizás la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben agua directamente en la mezcladora, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla. Si dos tipos de agregados tienen absorción similar, otros factores secundarios serán de importancia en la consistencia de la mezcla. Tales como forma, tamaño y graduación; ya que mientras mayor superficie del agregado sea necesario cubrir con pasta, se tendrá menos fluidez. Una buena consistencia y manejabilidad de la mezcla se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción y un coeficiente bueno de forma, en donde las partículas son aproximadamente redondas (Alejaos y Fernández: 1996).

Por otro lado, la capacidad de absorción de un material incide directamente sobre el grado de alteración que este mismo puede sufrir; la cantidad de espacios vacíos como los poros y fisuras, y la permeabilidad, son factores que influyen sobre la durabilidad de cualquier estructura de concreto. (Alejaos y Fernández 1996).

La absorción no tiene especificación, sin embargo, debe tomarse en cuenta a la hora de diseñar, ya que una absorción alta implicaría un incremento en costo.

Mena, en su *Manual de tecnología del concreto*, hace referencia a, que cuando las rocas son de muy buena calidad y los agregados cumplen la mayoría de las características ideales, la absorción del agregado no suele exceder del 3% en el agregado grueso. Sin embargo, especificaciones planteadas en el libro *Diseño y Control de Mezclas de Concreto* establece que los agregados gruesos generalmente tienen niveles de absorción (contenido de humedad a SSS) que varían del 0.2% al 2%.

La absorción de los materiales gruesos se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\%Abs = \frac{B-A}{A} * 100 \dots\dots\dots \text{Ecuación 4}$$

Donde:

B = Peso de la Muestra Saturada Superficie Seca (gramos).

A = Peso de la Muestra Seca (gramos).

A continuación se agrega un cuadro cuyos datos representan diversos parámetros de absorción respecto a la geología de la roca.

| <b>CUADRO 7. CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS SEGÚN % ABSORCIÓN</b> |                             |          |
|---|-----------------------------|----------|
| Material  | Porcentaje de Absorción (%) |          |
|   | Intervalo                   | Promedio |
| Arenisca  | 2 a 8                       | 5        |
| Arena y Grava   | 1 a 4                       | 3        |
| Caliza  | 1 a 2                       | -        |
| Granito   | 2 a 4                       | 2,5      |
| Basalto   | 2 a 4                       | 2,5      |
| Ingnimbrita   | 2 a 14                      | 7        |

Fuente: Material Suministrado por el Ing. Mauricio Araya, I.T.C.R 2009.

## Porosidad

La porosidad de un cuerpo sólido es la relación de su volumen de vacíos entre su volumen total, incluye los vacíos, y se expresa como porcentaje en volumen. Todas las rocas que componen a los agregados son porosas en menor o mayor grado, pero algunas poseen un sistema de poros que incluye numerosos vacíos relativamente grandes (visibles al microscopio), que en su mayoría se hallan interconectados, y que las hace permeables.

Es la propiedad que más afecta a las características resistentes y mecánicas, siendo inversamente proporcional a la resistencia y a la densidad y directamente proporcional a deformidad. (González de Vallejo, 2002).

La ecuación para determinar el valor de porosidad  $\eta$  expresada en tantos por cientos del volumen de la muestra es la siguiente:

$$\eta = \frac{B-A}{B-C} * 100 \dots \dots \dots \text{Ecuación 5}$$

Donde:

A = Peso de la Muestra Seca (gramos).

B = Peso de la Muestra Saturada Superficie Seca (gramos).

C = Peso Sumergido (gramos).

El valor de  $\eta$  puede variar entre 0 y 90%, con valores normales de 15% a 30%. En el **cuadro 5** se incluyen los datos de porosidad de algunas rocas.

## CUADRO 8. VALORES TÍPICO DEL PESO ESPECÍFICO Y POROSIDAD DE LA ROCA ANDESITA

| Roca      | Peso Específico(g/cm3) | Porosidad (%) |
|-----------|------------------------|---------------|
| Andesitas | 2,2 -2,35              | 10-15         |

Fuente: Ingeniería Geológica, González de Vallejo

## Gravedad específica<sup>2</sup>

La gravedad específica se define como la relación entre su masa y la masa del agua con el mismo volumen absoluto.

La mayoría de los agregados naturales tienen gravedades específicas relativas que varían de 2,4 a 2,9. Su condición se puede determinar seca al horno o saturada con superficie seca. Ambas se pueden utilizar en los cálculos de proporción del concreto.

Las ecuaciones para determinar la gravedad específica de los agregados gruesos que se utilizan corresponden a las siguientes:

$$G_{bs} = \frac{A}{(B-C)} \dots \dots \dots \text{Ecuación 6}$$

En donde:

$G_{bs}$  = Gravedad Específica Bruta Seca (adimensional).

A = Peso de la Muestra Seca (gramos).

B = Peso de la Muestra Saturada Superficie Seca (gramos).

C = Peso Sumergido (gramos).

$$G_{SSS} = \frac{B}{(B-C)} \dots \dots \dots \text{Ecuación 7}$$

En donde:

$G_{s.s.s.}$  = Gravedad Específica Saturada Superficie Seca (adimensional).

B = Peso de la Muestra Saturada Superficie Seca (gramos).

C = Peso Sumergido (gramos).

$$G_s = \frac{A}{(A-C)} \dots \dots \dots \text{Ecuación 8}$$

En donde:

$G_s$  = Gravedad Específica Aparente Seca (adimensional).

B = Peso de la Muestra Saturada Superficie Seca (gramos).

C = Peso Sumergido (gramos)

<sup>2</sup> Información obtenida del Diseño y Control de Mezclas de Concreto (PCA)

## Densidad Relativa<sup>4</sup>

La densidad relativa de un agregado es la relación entre su masa y la masa de agua con el mismo volumen absoluto. Se usa en algunos cálculos de proporcionamiento y del control de la mezcla, tales como el volumen ocupado por el agregado en el método del volumen absoluto de diseño de mezcla.

Normalmente no se la usa como una medida de la calidad del agregado, aunque algunos agregados porosos que exhiben deterioro acelerado por congelación-deshielo presentan baja gravedad específica. La mayoría de los agregados naturales tiene gravedades específicas relativas que varían de 2.4 a 2.9, con densidad específica correspondiente de las partículas de 2400 a 2900 kg/m<sup>3</sup> (150 y 181 lb/pe<sup>3</sup>).

Una propiedad de los agregados que resulta ser de vital importancia es la densidad, ya que si se emplea un material con una buena densidad ( $\geq 2.25$ ), el concreto resultante podría ser mayor o igualmente denso, lo cual tendrá una influencia directa sobre el peso volumétrico y la resistencia a la compresión del mismo. El volumen que ocupa un agregado según su peso es un indicador de las características del mismo.

En cuanto a ligereza, porosidad y permeabilidad, propiedades que pueden afectar al concreto en un mayor requerimiento de cemento para una resistencia específica y con esto una influencia directa sobre la economía de la mezcla. Por otro lado, es conocido que a mayor porosidad mayor fuerza de adhesión, de manera que los agregados gruesos con una mayor densidad y resistencia al desgaste presentan una menor porosidad, y como consecuencia menor adherencia (Cerón, 1996).

La densidad relativa depende de la gravedad específica de sus constituyentes sólidos como de la porosidad del material mismo. La densidad de los agregados es especialmente importante para los casos en que se busca diseñar concretos de bajo o alto peso unitario. Las bajas densidades indican también que el material es poroso y débil y de alta absorción.

## Abrasión<sup>3</sup>

La resistencia a la abrasión (desgaste) de un agregado frecuentemente se usa como un índice general de su calidad.

La baja resistencia al desgaste de un agregado puede aumentar la cantidad de finos en el concreto durante el mezclado y, consecuentemente, puede haber un aumento en la demanda de agua, requiriéndose ajustes de la relación agua-cemento.

Los pisos, pavimentos y estructuras hidráulicas están sujetos al desgaste. Por tanto, en estas aplicaciones, el concreto debe tener una resistencia elevada a la abrasión o al desgaste que está estrechamente relacionado con la resistencia a la compresión del concreto. Un concreto de alta resistencia a la compresión tiene mayor resistencia a la abrasión que un concreto de resistencia a compresión baja. Un agregado duro es más resistente a la abrasión que un agregado blando y esponjoso.

## Durabilidad<sup>5</sup>

“La durabilidad es la resistencia que la roca presenta ante los procesos de alteración y desintegración, propiedad a la que también se alude como alterabilidad, definiéndose en este caso como la tendencia a la rotura de los componentes o de las estructuras de la roca”

Los procesos como la hidratación, disolución, oxidación, etc., generan cambios en las propiedades de las rocas, debido a esto evaluar esta propiedad es de suma importancia.

Las rocas volcánicas, lutitas o pizarras, poseen contenidos importantes de minerales arcillosos. La exposición al aire o la presencia de agua degradan de una forma importante las propiedades de resistencia.

Para este estudio la durabilidad será medida mediante el ensayo de inmersión en etilenglicol.

Cuando los agregados procedan de yacimientos que contengan basaltos, los mismos deben ser sometidos a evaluaciones para determinar su potencial alterabilidad por la presencia de arcillas expansivas, según la norma IRAM 1519:1982:

---

<sup>3</sup> Información obtenida del Diseño y Control de Mezclas de Concreto (PCA)

a) Los agregados que después de 30 días de inmersión en etilenglicol tengan una pérdida menor del 10 %, se consideran aptos para emplear en la preparación de morteros u hormigones.

b) El agregado que después de 30 días de inmersión tenga una pérdida mayor del 10 % y menor del 30 %, podrá ser utilizado siempre que, habiendo sido empleado en estructuras similares, expuestas durante más de 25 años a condiciones de clima y humedad similares a los de la obra por construir, haya dado prueba de comportamiento satisfactorio en la evaluación, según norma IRAM 1874-3:2004.

c) El agregado que después de 30 días de inmersión tenga una pérdida mayor del 30 % no podrá ser utilizado.

## Resistencia a la compresión simple.<sup>5</sup>

El agregado deberá tener una resistencia a la fractura por lo menos igual a la de la pasta endurecida. Puesto que la resistencia a la fractura de muchos agregados de buena calidad excede de 800kg/cm<sup>2</sup>, este factor no suele limitar la producción de concretos con resistencias hasta este valor.

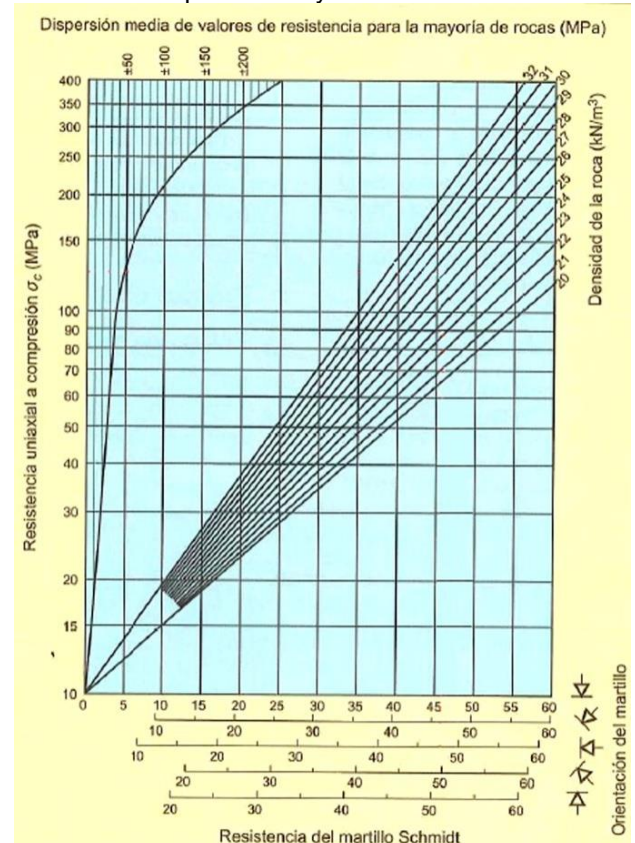
La resistencia a la compresión es la propiedad más frecuentemente medida en las rocas, y con base en su valor se establecen clasificaciones en mecánica de rocas. En el Cuadro 3, se observan las diferentes clasificaciones de la roca basándose en este parámetro.

A continuación se describen los dos ensayos efectuados para determinar los valores de resistencia a la compresión simple de las rocas.

### • Esclerómetro o Martillo Schmidt <sup>4</sup>

Este ensayo permite estimar de forma aproximada la resistencia a la compresión simple mediante una sencilla correlación. Su uso es fácil y de rápida ejecución.

El esclerómetro, dependiendo de la dureza de la roca, el muelle indicará mayor o menor rebote. Este instrumento se debe colocar contra la roca, la cual, al ser presionada, el muelle se dispara y arroja un valor de rebote. Los valores de rebote se correlacionan mediante un ábaco con la resistencia a la compresión simple, en función de la densidad de la roca y de la inclinación del plano ensayado.



.Figura 6 Diagrama de clasificación de rocas basado en la dureza de Schmidt, intervalo de confianza del 75%

<sup>4</sup> Ingeniería Geológica, González de Vallejo.



• **Carga Puntual**

Este ensayo se utiliza para determinar la resistencia a la compresión simple de fragmentos irregulares de roca. El procedimiento consiste en romper una muestra entre dos puntas cónicas metálicas accionadas por una prensa portátil.

A partir de la carga de rotura se obtiene un índice,  $I_s(50)$ , que es determinado por las siguientes ecuaciones.

$$I_s(50) = F_a * \left(\frac{P}{D_e^2}\right) * F_b \dots \dots \dots \text{Ecuación 9}$$

$$D_e = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 10}$$

$$F_a = (D_e / 50)^{0,45} \dots \dots \dots \text{Ecuación 11}$$

Donde:

P: Carga de Ruptura.

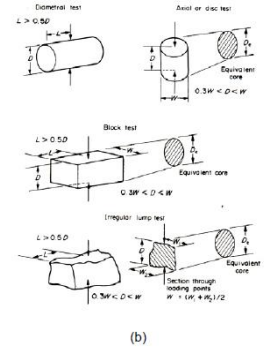
Fb: Factor de corrección por calibración del equipo.

A: Área de la sección de falla del espécimen.

Fa: Factor de corrección aplicado únicamente cuando la altura de la muestra ensayada (distancia entre puntas) es diferente a 50 mm.

El ensayo de carga puntual se utiliza, muchas veces, como un medio para estimar la resistencia a la compresión uniaxial, aunque por muchos es considerado un ensayo de resistencia a la tracción. La relación más divulgada indica la estimación de la resistencia a la compresión uniaxial en la siguiente forma.

$$Q_u = 22 * I_s(50) \dots \dots \dots \text{Ecuación 12}$$



**Figura 7** Ensayo de resistencia a la carga puntual (a) Equipo del Laboratorio ICE y (b) Cálculo del diámetro equivalente (Brook, 1993)

La resistencia a compresión simple es la propiedad más frecuente medida en las rocas y con su valor se establecen clasificaciones mecánicas de rocas. En el siguiente cuadro se incluyen diferentes clasificaciones basadas en este parámetro por diferentes autores.

La clasificación de dureza de las rocas estudiadas en el presente estudio, se efectuó mediante la ISRM (1981), respecto a las resistencias a la compresión obtenidas del ensayo de Carga Puntual.

| <b>CUADRO 9. CLASIFICACIÓN DE DUREZA A PARTIR DE SU RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.</b> |                     |                                     |                   |   |
|---|---------------------|-------------------------------------|-------------------|---|
| Resistencia a la Compresión Simple(MPa)   | ISRM(1981)          | Geological Society of London (1970) | Bieniawski (1973) | Ejemplos  |
| <1  | Suelos              |                                     |                   |   |
| 1-5   | Muy Blanda          | Blanda >1,25                        | Muy Baja          | Sal, lutita, limolita, marga, toba, carbón                                  |
| 5-12,5  | Blanda              | Moderadamente Blanda                |                   |   |
| 12,5-25   |                     | Moderadamente Dura                  | Baja              | Esquisto, pizarra   |
| 25-50   | Moderadamente Dura  | Dura                                | Media             | Rocas metamórficas esquistosas, mármol, granito,                            |
| <b>50-100</b>   | <b>Dura</b>         | Dura                                | Alta              | Rocas ígneas y metamórficas duras, arenisca muy cementada, caliza, dolomía. |
| <b>100-200</b>  | <b>Muy Dura</b>     | Muy Dura                            | Muy Alta          | Cuarcita, gabro, basalto  |
| >200  |                     | Extremadamente Dura                 |                   |   |
| >250  | Extremadamente Dura | Extremadamente Dura                 |                   |   |

Fuente: Tomado de González de Vallejo et al. (2002).

A continuación se muestra un cuadro con el valor de resistencia a la compresión para roca intacta de Andesitas.

| <b>CUADRO 10. VALORES DE RESISTENCIA DE ROCA INTACTA</b> |   |   |
|--|---|---|
| Roca Intacta   | Resistencia a la Compresión Simple(kg/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia a la Compresión Simple(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|  | Valores Medios  | Rango de Valores  |
| Andesita   | 2100-3200   | 1000-5000   |

Fuente: Libro de Ingeniería Geológica González de Vallejo et al.(2002)

# Metodología

## Plan de muestreo

Para fines de este estudio, se escogió como marco de muestreo las terrazas del Tajo Cerro Minas. Sin embargo, por disposición del tiempo de ejecución de la práctica y el planeamiento que tiene Holcim establecido en las voladuras, se analizaron las terrazas que ya se tenían programadas para la explotación de la cantera, a partir de agosto hasta noviembre del 2009.

Posteriormente, se elaboró el plan de visitas con base en las fechas en las que se iban a efectuar las voladuras, por el encargado de la planta de agregados.

Se tomaron muestras de la voladura “in situ” y de su producto terminado “cuartilla”, es decir; se tomaron precauciones con el encargado del quebrador para garantizar que el material que fue muestreado en la cantera corresponda al mismo, luego de que la roca pasara por el proceso de trituración y criba.

Luego de cada muestreo, el material fue transportado al Laboratorio del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), para sus correspondientes pruebas de Abrasión, Gravedad Específica, Absorción, Porosidad, Inmersión en Etilenglicol y sus pruebas de Carga Puntual en el Laboratorio del Instituto Costarricense de Electricidad.

## Muestreo del material

Dado que no es posible muestrear la totalidad del material, se tomó un conjunto de muestras aleatorias, con el fin de que el muestreo fuera representativo del total.

El procedimiento del muestreo del material obtenido de las voladuras in situ “Cerro Minas” se describe a continuación:

- Posterior a la voladura, se procedió a tomar la muestra en la terraza del Cerro,

previo al acarreo del material al quebrador de Holcim.

- Se obtuvieron 4 sacos de rocas de diferentes tamaños, se seleccionaron muestras que representen la variabilidad del material obtenido de la voladura correspondiente.
- Mediante el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), se determinó la posición del muestreo, así como el número de voladura y la ubicación de la terraza de donde se obtuvo el material.
- Se realizó una descripción detallada del material extraído en sitio.
- Las muestras fueron transportadas en sacos al Laboratorio del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), para su correspondiente trituración y evaluación.



**Figura 8.** Material posterior a la voladura de una terraza Cerro Minas.

La muestra del producto final del quebrador se obtuvo de un apilamiento de piedra cuartilla. Seguidamente, se describe el procedimiento de muestreo:

- Posterior a la voladura y al proceso de trituración y criba de la roca, se tomó la muestra de piedra cuartilla (25mm), en el apilamiento del producto de descarga del quebrador.
- Se obtuvieron 2 sacos de piedra cuartilla, el cual supera la cantidad mínima de material a muestrear (50kg) respecto a su tamaño máximo de partícula (25 mm).
- Las muestras fueron transportadas en sacos al Laboratorio del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), para su correspondiente evaluación.



**Figura 9.** Muestra del apilamiento de cuartilla del Producto Final.

## Trituración del material obtenido “in situ”

Las muestras tomadas de la cantera fueron reducidas a partículas en el Laboratorio de Ingeniería de Materiales, mediante un molino que permitió triturar el material, ya que los muestreos estaban comprendidos con bloques con tamaños variables, por lo que fue necesario la reducción

de tamaños según especificaciones, y así proceder a las pruebas de laboratorio, según las especificaciones de las normas ASTM.

## Reducción de muestras en el laboratorio

La reducción de muestras se efectuó en el Laboratorio del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO). Esto, según la norma ASTM C-702. Además, se llevó a cabo por el método de divisor mecánico, con el fin de efectuar las pruebas con una muestra representativa en porciones reducidas respecto de todo el material extraído.

El divisor mecánico utilizado cuenta con 8 rejillas, dos bandejas laterales para la descarga del agregado, y otra bandeja para colocar el material sobre el divisor. Además, con el fin de permitir que el agregado fluya libremente y sin pérdida de material.

El procedimiento se describe a continuación:

- Se fue colocando la muestra en la bandeja de alimentación del divisor mecánico, para garantizar que su distribución fuera aproximadamente en cantidades iguales cuando las muestras pasen a través de cada rejilla hasta completar la totalidad de la muestra.
- La muestra se introdujo a un ritmo tal que permitió el libre flujo a través de las rejillas hasta la bandeja como se muestra en la Figura 10.
- El material fue nuevamente cuarteado cuantas veces fue necesario, para obtener la cantidad de material requerida. Se reservó la porción de material restante en la otra bandeja para reducir su tamaño para otras pruebas.



Figura10. Cuarteo mediante el divisor mecánico.

## Abrasión

La resistencia a la abrasión, desgaste, o dureza de un agregado, es una propiedad que depende principalmente de las características de la roca madre. Este factor cobra importancia cuando las partículas van a estar sometidas a un roce continuo como es el caso de pisos y pavimentos, para lo cual los agregados que se utilizan deben estar duros.

La prueba de abrasión corresponde a la norma ASTM C-131. Esta consiste en determinar el porcentaje de desgaste de los materiales al ser expuestos a una degradación determinada, resultado de la combinación de acciones incluyendo abrasión, impacto y molienda en la rotación de un tambor de acero que contiene un número específico de esferas de acero, cuyo número depende de la graduación de la muestra, por un ciclo de vueltas establecido según el tipo de abrasión que se practique, que corresponde a 500 vueltas, al realizarse la abrasión Tipo B. Esta se detalla seguidamente.

El ensayo de abrasión se llevó a cabo en la máquina Los Ángeles del Laboratorio del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO).

- Se utilizó una muestra de 5000 gramos, el cual correspondía a una muestra de

2500±10g pasando la malla  $\frac{3}{4}$ " y retenidos en la  $\frac{1}{2}$ ", y una segunda muestra de 2500±10g, pasando la malla  $\frac{1}{2}$ " y retenida en  $\frac{3}{8}$ ".

- Se colocó la muestra en la máquina de ensayo Los Ángeles y se introdujo con el material 11 balines de acero.
- Se inició la prueba programando una velocidad de 30 a 33 rev/min que corresponde a 500 revoluciones.
- Se retiró el material de la máquina cuando esta se detuvo automáticamente, y se procedió a pasar el material por la malla  $\frac{1}{2}$ " y se retuvo en la malla  $\frac{1}{4}$ ".
- Se tamizó de nuevo el material que pasó la malla  $\frac{1}{4}$ ", en la malla No.12, y se desechó el agregado que pasó.
- Se procedió a lavar el material retenido en la malla #12.
- Se introdujo en el horno a una temperatura de 100 °C por 24 horas para determinar el peso final de la muestra.
- El material fue nuevamente pesado para conocer el peso final de este..
- Conociendo los pesos inicial y final del material se determinó el porcentaje de desgaste por degradación de los materiales.



Figura 11. Máquina de los Ángeles del Laboratorio del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO).

Los pisos, pavimentos y estructuras hidráulicas están sujetos al desgaste; por tanto, en estas aplicaciones el concreto debe tener una resistencia elevada a la abrasión. Los resultados



de pruebas indican que la resistencia a la abrasión o desgaste está estrechamente relacionada con la resistencia a la compresión del concreto. Un concreto de alta resistencia a compresión tiene mayor resistencia a la abrasión que un concreto de resistencia a compresión baja. Como la resistencia a la compresión depende de la relación agua – cemento, baja. Así como un curado adecuado son necesarios para obtener una buena resistencia al desgaste. El tipo de agregado y el acabado de la superficie o el tratamiento utilizado también tienen fuerte influencia en la resistencia al desgaste. Un agregado duro es más resistente a la abrasión que un agregado blando y esponjoso.

## Gravedad específica y absorción

La prueba de gravedad específica y absorción de agregados gruesos rige por la norma ASTM C-127. Esta consiste en seleccionar un tamaño de muestra ligeramente mayor al establecido, según la norma; el cual corresponde a una masa mínima de 4kg por ser su tamaño nominal de 25mm, posteriormente se lleva a cabo el siguiente procedimiento.

- Se retira el material que pasa el tamiz 4,75 mm (No.4).
- La muestra es sumergida en agua por  $(24 \pm 4)$ h para llenar esencialmente los poros de las partículas.
- Después del periodo de inmersión se saca la muestra del agua y se secan las partículas sobre un paño, hasta que se elimine el agua superficial visible. Se debe evitar la evaporación del agua contenida en los poros de las partículas del árido durante la operación de secado superficial.
- Se determina y anota la masa de la muestra en el estado saturado superficie seca y en el estado saturado superficie superficialmente seca ( $W_{SSS}$ ).
- Inmediatamente se coloca la muestra en condición saturada superficie seca en una canasta. Esta muestra en la canasta queda completamente sumergida en el contenedor, y para su inmersión se utiliza un hilo. Este deberá ser lo más delgado posible para que no afecte a la hora de

determinar la masa aparente en el agua ( $W_{sumergido}$ ).

- Determinar la temperatura del agua.
- Se seca la muestra en el horno a masa constante, a una temperatura de  $(110 \pm 5)$  °C. Se coloca a temperatura ambiente hasta que el agregado se haya enfriado; para determinar su masa ( $W_{seco}$ ).

Así que se obtienen los tres pesos anteriormente descritos, se procede a la aplicación de las fórmulas correspondientes para determinar la gravedad específica bruta, la gravedad específica saturada superficie seca y la absorción de los agregados gruesos.



**Figura 12.** Ilustración de pasos para determinar las tres condiciones de pesos, con base en la muestra saturada con superficie seca ( $G_{bs}$ ) y con base en la muestra secada al horno ( $G_b$ ) y el peso específico aparente ( $G_s$ ). Además del porcentaje de absorción del agregado grueso.

## Carga Puntual

Esta prueba debe ser entendida como una prueba índice para clasificación por resistencia de la roca intacta. Se utiliza para correlacionar los resultados obtenidos con valores de resistencia a la compresión simple. Se rige por la norma ASTM D-5731. El ensayo fue llevado a cabo en el

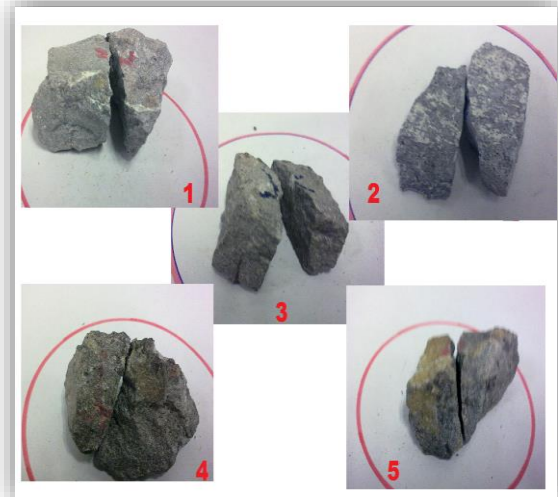
Laboratorio de Materiales del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

El equipo de ensayo es una máquina portátil que consiste en un aparato de carga y un sistema adicional que permite medir la carga y la distancia entre las puntas. A partir de la carga de falla y las dimensiones de la muestra, se calcula un índice de resistencia de carga puntual. Este es un medio simple, confiable y económico de medir la resistencia de la roca intacta y sus resultados son útiles para propósitos de clasificación de la roca.

El procedimiento de la ejecución de la prueba se describe a continuación.

- Selección de muestra y preparación. Se realizaron más de 10 pruebas por muestra de roca.
- Se hizo una selección del material para obtener especímenes retenidos en el tamiz de 1" y 1 1/2 "
- Se aplicó una carga concentrada para cada espécimen de roca, mediante un par de puntas cónicas, en la dirección de su menor dimensión, hasta producir la ruptura del testigo. Este paso se efectuó para todos las muestras a fallar.
- Se midió la distancia del espécimen existente entre ambas puntas cónicas (D) y se anotó el ancho de la muestra.
- Se anotó el valor arrojado en el manómetro que corresponde a la presión necesaria para fallar cada espécimen de roca.

Así que se obtuvieron los datos anteriores, se procedió a la aplicación de los factores de corrección y al cálculo de la resistencia a la compresión de cada espécimen, con el fin de promediar las resistencias obtenidas en cada muestreo, y tener un valor representativo para el grupo de rocas correspondientes. En promedio, la resistencia a la compresión simple fue de 20 a 25 el Is(50).



**Figura 13.** Roca fragmentada por carga puntual mediante un par de puntas cónicas, ilustración para las 5 voladuras analizadas en Cerro Minas.

## Esclerómetro o Martillo de Rebote Schmidt

Los ensayos in situ realizados sobre el testigo fueron la evaluación de la resistencia a compresión simple mediante un esclerómetro.

La ejecución de este ensayo se rigió por la norma ASTM C805.

Para la ejecución de este ensayo, primeramente se identificaron las terrazas de donde se extrajo el material de las voladuras, con el fin de valorar los taludes de los muestreos analizados con anterioridad para las pruebas de laboratorio.

El procedimiento fue el siguiente:

- Se limpió a zona a ensayar, con el fin de realizar la prueba en plano más liso, eliminando la patina de roca meteorizada.
- Se aplicó el martillo en una forma perpendicular al plano por analizar.
- El martillo se aplicó al área presionando hasta que saltara el muelle.
- Se tomaron 10 puntos, anotando el valor del rebote para cada uno de ellos.
- Se promediaron los 5 valores restantes.
- Mediante el gráfico que se muestra en la Figura 6 del Marco Teórico, en función de la inclinación del martillo, se entró con el

valor promedio del rebote de cada material, este en el eje de las abscisas, hasta que se alcanzó el valor de la densidad de la roca estudiada. A partir de este punto, se trazó una línea horizontal hasta cortar el valor del eje de las ordenadas. Se obtuvo de esta forma el valor de la resistencia a la compresión simple.



Figura 14. Ilustración de Prueba del Esclerómetro in situ.

## Inmersión en Etilenglicol

Este método constituye un procedimiento para sujetar muestras de piedra a la inmersión dentro del etilenglicol y observar los efectos de tal inmersión. Se rige por la Norma IRAM 1519, que corresponde a una norma argentina.

El glicol de etileno al combinarse con las arcillas del grupo de montmorillonita forma un compuesto orgánico que produce un aumento de volumen en la roca. Por lo tanto, se espera siempre que experimente ruptura expansiva sobre la impregnación en etilenglicol.

La roca por ensayar fue triturada para obtener  $(5 \pm 0,5)$  kg de partículas comprendidas

entre 10mm y 75 mm. Se tamizaron las muestras separándolas según las partículas retenidas en el tamiz de 2", 1 1/2", 1" y 3/4".

Cuando se estableció el peso y tamaño de las partículas, se procedió a lavar el material en agua destilada para eliminar el polvo.

- Las muestras se colocaron en envases de vidrio y se sumergieron en el reactivo de modo que todas las partículas estuvieran cubiertas con una profundidad de al menos 1 cm, aproximadamente.
- A intervalos que no excedieron de tres días, la muestra se examinó, con el fin de verificar los cambios observados, y si se encontraban cambios significativos estos eran fotografiarlos. La duración del ensayo fue de 1 mes.
- Completado el periodo de inmersión, la muestra fue lavada sobre el tamiz de 3/4", hasta eliminar las partículas menores a esta abertura. El material retenido se colocó en el horno para obtener la masa final.
- Con los correspondientes datos de masa inicial y masa final se determinó el porcentaje de pérdida de la muestra ensayada en por ciento.

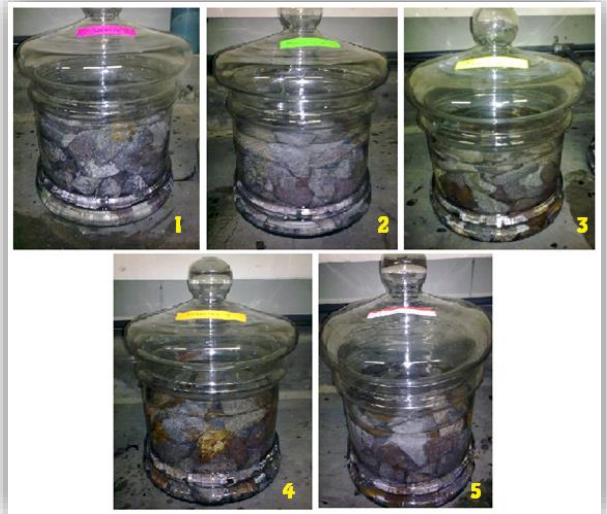


Figura 15. Muestras analizadas que ilustran la inmersión en Etilenglicol



# Elaboración del programa

El programa se efectuó para estimar valores de las propiedades físicas, parámetros mecánicos, clasificación por dureza y aplicaciones del material rocoso. Fue realizado mediante Visual Studio.NET Framework. Este modelo de programación es un ejecutable de Microsoft que permite efectuar distintas aplicaciones. Esta tecnología fue elegida para el desarrollo de esta herramienta debido a que permite distintos lenguajes de programación que pueden usarse con él. En los apéndices se encuentran los códigos para la elaboración de dicho programa.

Este presenta dos pestañas. A continuación se describe el contenido de cada uno de ellas

## Pestaña 1

Esta pestaña corresponde a la introducción del resultado de la prueba de laboratorio más simple como lo es la determinación del porcentaje de absorción. En esta herramienta se introduce el valor obtenido de esta prueba, al igual que su gravedad específica seca. Por medio de correlaciones entre las propiedades físicas y mecánicas de las rocas analizadas en Cerro

Minas se determinan las ecuaciones que permiten estimar las siguientes características.

- Desgaste de la roca
- Porosidad del agregado
- Peso volumétrico seco
- Resistencia a la compresión simple
- Clasificación según su dureza

## Pestaña 2

A esta ventana corresponden las aplicaciones según las características determinadas para la roca, el cual determina:

- Distintos usos según su porcentaje de desgaste, respecto a las especificaciones vigentes en Costa Rica.
- Su aplicación respecto a la resistencia a la compresión, en concretos de mediana o alta resistencia.
- Establece si cumple con el rango que caracteriza a la roca en condición natural respecto a su absorción.
- Establece si cumple la condición natural por su gravedad específica seca.

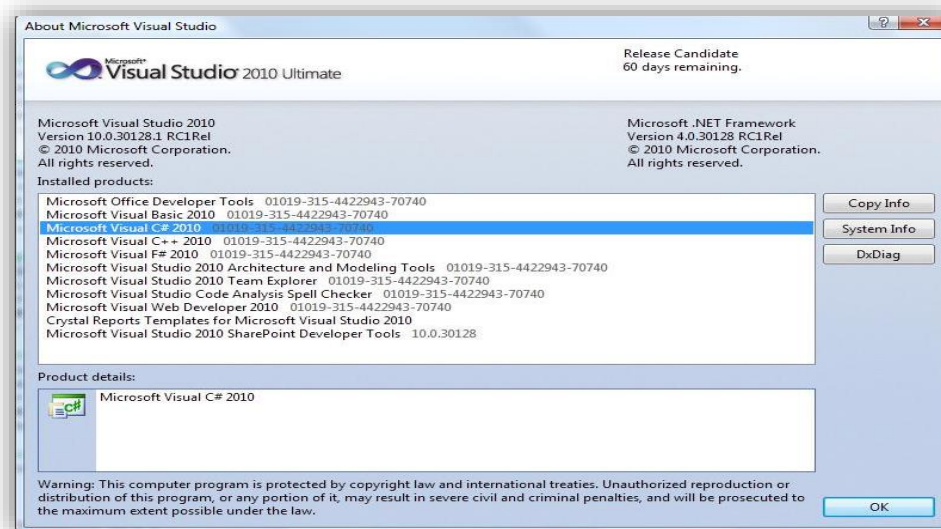


Figura 16. Programa mediante el cual se ejecutó la herramienta

# Resultados

En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio o pruebas in situ, para la valoración de los materiales del sitio de préstamo Cerro Minas.

- Desgaste o Abrasión.
- Gravedad Específica.
- Peso Volumétrico Seco
- Absorción.
- Porosidad.
- Inmersión en Etilenglicol.
- Carga Puntual.
- Prueba Martillo de Rebote (Esclerómetro).

## Clasificación del origen mineralógico de los materiales

Un estudio preliminar efectuado por la geóloga Diana Gamboa, ofrece 7 muestreos de los más representativos de la cantera, con la finalidad de realizar un corte de sección delgada y poder determinar los minerales presentes.








Partiendo del estudio geológico mencionado con anterioridad, se conoció que el área de estudio para este proyecto tiene dos tipos de litología: Andesita porfírica silicificada y Andesita con textura fluidal.

A continuación se presenta la geología para cada uno de los muestreos.



Figura 17: Ubicación de las principales litologías existentes en Cerro Minas.

**CUADRO 11. LITOLOGÍA Y UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN CERRO MINAS**

| Nombre de la Roca       | Andesita sin Textura Fluidal  | Andesita con textura fluidal  | Andesita con textura fluidal  | Andesita con textura fluidal   | Andesita con textura fluidal  |
|-------------------------|---|---|---|--|---|
| Código                  | M-1   | M-2   | M-3   | M-4  | M-5   |
| Ubicación               | 515640211399  | 515614211344  | 515553211338  | 515539211364   | 515608211417  |
| # de Voladura           | 1298  | 1300  | 1304  | 1305   | 1306  |
| # de Terraza            | 1160  | 1170  | 1160  | 1145   | 1130  |
| Color                   | Gris claro  | Color gris y violaceo claro   | Color gris y violaceo   | Color gris y violaceo  | Color gris y violaceo   |
| Textura                 | Holo hasta hipocristalina porfírica, con fenocristales de plagioclasa dentro de una matriz pilotaxítica hasta criptocristalina con muchos minerales secundarios de cuarzo y calcita | Esta roca presenta una textura afírica, con laminaciones producto del enfriamiento de la lava al fluir, fluidal-bandeada "laminación planar y plegada". | Esta roca presenta una textura afírica, con laminaciones producto del enfriamiento de la lava al fluir, puede presentar patinas que varían de 2mm a 1mm de limonita y hematita, razón por la cual en el tajo se observa de color amarillento. |  | Holocristalina porfírica fluidal, con pocos fenocristales de plagioclasa dentro de una matriz microcristalina con algunos microlitos tabulares de plagioclasa |
| Fenocristales           | 7%  |   |   |  | 13%   |
| Matriz                  | 93%   |   |   |  | 87%   |
| Microfotografía         |    |   |   |  |    |
| Fotografía              |   |    |   |  |   |
| Minerales de Alteración | Fenocristales: Fuerte Alteración a Sericita y calcita 7%  |   |   |  | Fenocristales: Alteración Incipiente a Sericita 9%, óxido de hierro y sílice 1%   |
|                         | Matriz: Cuarzo Secundario 13% y calcita 7%  |   |   |  | Matriz: Cuarzo Secundario 4%  |



Los cinco muestreos analizados se clasifican en cuatro clases, los cuales corresponden a clase A, B, C y D. Para esta clasificación también se contemplaron sus características geológicas, físicas y mecánicas.

## CLASE A (M-5)

Para la muestra número cinco se obtuvo que esta roca correspondió a un tipo de muestra analizada por la geóloga Diana Gamboa. Esta clase corresponde al estudio del quinto muestreo. La descripción petrográfica se presenta a continuación:

**Nombre macroscópico de la roca:** Andesita con textura fluidal

**Nombre microscópico de la roca:** Andesita Porfírica muy silicificada

**Color:** gris y violáceo

**Textura:** Holocristalina porfírica fluidal, con pocos fenocristales de plagioclasa dentro de una matriz microcristalina con algunos microlitos tabulares de plagioclasa. Tanto los fenocristales de plagioclasa como los microlitos presentan una orientación paralela (Microfotografía 17). La sección contiene una veta discontinua de cuarzo bordeado por hematita que pasa gradualmente a la matriz; su espesor máximo es de 1,8 mm. Se observa gran presencia de patinas de óxido de hierro.

**Fenocristales:** Plagioclasa cristales hipidiomórficos con tamaño máximo de 2,5x1,2 mm. Presentan una alteración incipiente a sericita. Ocupan aproximadamente el 9% de la roca. Fantasmas de un mineral ferromagnesiano: cristales hipidiomórficos con tamaño máximo de 0,5x0,3 mm, completamente alterados a una mezcla de óxidos de hierro y sílice; menos del 1 % de la roca.

**Matriz:** 87 % de la roca Microcristalina compuesta principalmente por cuarzo secundario y feldespatos, probablemente producto de una desvitrificación del vidrio volcánico, contiene pocos granos de magnetita (diámetro de 0,1 mm) y una impregnación de agujas esqueléticas de óxidos de hierro. Cuarzo secundario granular está presente en unos 4 % (Figura 18).

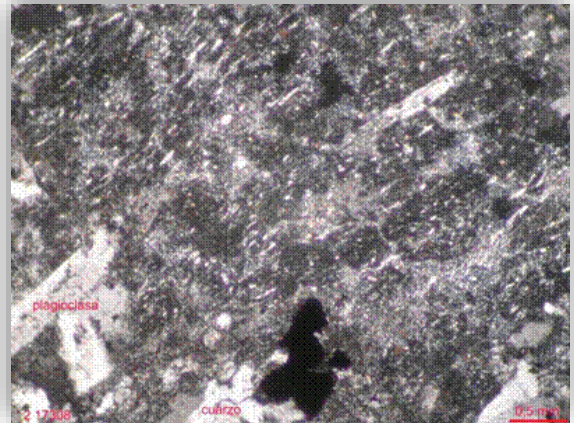


Figura 18.: Microfotografía Muestra 5

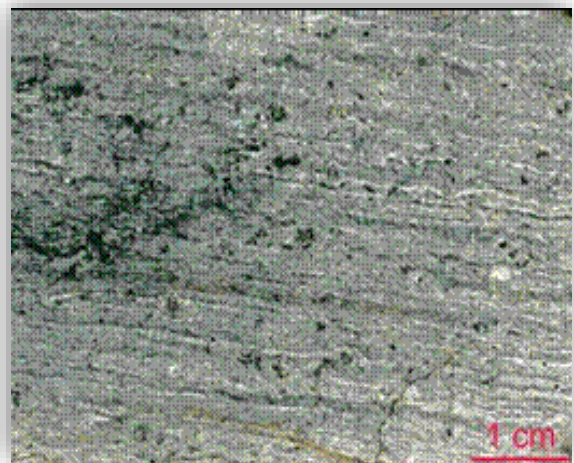


Figura 19. Fotografía de mano muestra 5



Figura 20 Imagen de la Muestra 5. Clase A

## CLASE B (M-3 y M-4)

Para estas muestras no se tiene el correspondiente estudio petrográfico de las muestras analizadas en la cantera, por lo cual la clasificación presente se enfoca más a una descripción visual con la tutela de la geóloga mencionada anteriormente para referir la textura de la roca.

Esta clase corresponde al estudio del tercer y cuarto muestreo.

**Nombre macroscópico de la roca:** Andesita con textura fluidal

**Nombre microscópico de la roca:** Andesita Fluidal

**Color:** Andesita color violáceo y gris

**Textura:** Esta roca presenta una textura afírica, con laminaciones producto del enfriamiento de la lava al fluir, puede presentar patinas que varían de 2mm a 1mm de limonita y hematita, razón por la cual en el tajo se observa de color amarillento.



Figura 21 Imágenes de la Muestra 3 y 4. Clase B

## CLASE C (M-2)

Para esta muestra no se tiene el correspondiente estudio petrográfico, por lo cual la clasificación presente se enfoca más a una descripción visual con la tutela de la geóloga mencionada anteriormente para referir la textura de la roca.

Esta clase corresponde al estudio del segundo muestreo.

**Nombre macroscópico de la roca:** Andesita con textura fluidal

**Nombre microscópico de la roca:** Andesita Fluidal

**Color:** color gris y violáceo claro

**Textura:** Esta roca presenta una textura afírica, con laminaciones producto del enfriamiento de la lava al fluir, fluidal-bandeada “laminación planar y plegada”.



Figura 22 Imágenes de la Muestra 2. Clase C



## CLASE D (M-1)

Esta clase corresponde al primer muestreo. Para la muestra número uno se tiene que esta roca corresponde a un tipo de muestra estudiada por la geóloga Diana Gamboa, la descripción petrográfica se presenta a continuación:

**Nombre macroscópico de la roca:** Andesita sin textura Fluidal

**Nombre microscópico de la roca:** Andesita Porfírica muy silicificada

**Color:** gris claro

### Textura

Holo hasta hipocristalina porfírica, con fenocristales de plagioclasa dentro de una matriz pilotaxítica hasta criptocristalina con muchos minerales secundarios de cuarzo y calcita (Microfotografía 23). La sección presenta vetillas discontinuas de sericita de 0,005 mm de espesor, y de calcita con 0,05 mm de espesor.

### Fenocristales

Plagioclasa: cristales hipidiomórficos con tamaño máximo de 1,2x0,5 mm. Presentan una alteración fuerte a sericita y calcita (Microfotografía 23). Ocupan aproximadamente el 7% de la roca.

### Matriz

La matriz corresponde a un 93 % de la roca. La mayor parte de la matriz presenta una textura criptocristalina, producto de una recristalización del vidrio original (aproximadamente el 73 % del volumen total de la roca). Localmente se observa una textura pilotaxítica con muchas laminillas paralelas de plagioclasa (tamaño promedio 0,02x0,005 mm) con unos pocos granos de magnetita. A través de la sección se encuentran también parches con cuarzo secundario granular (diámetro promedio de 0,2 mm; aproximadamente el 13 % de la roca) y calcita (aproximadamente el 7 %).

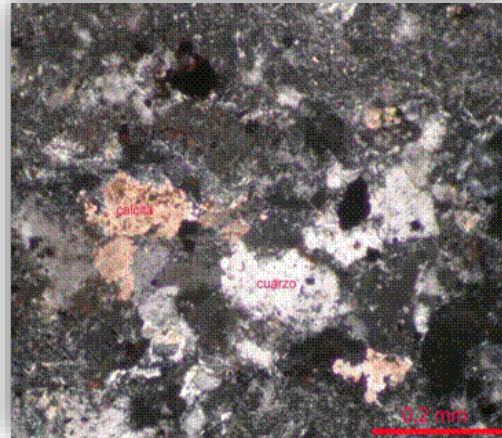


Figura 23. Microfotografía

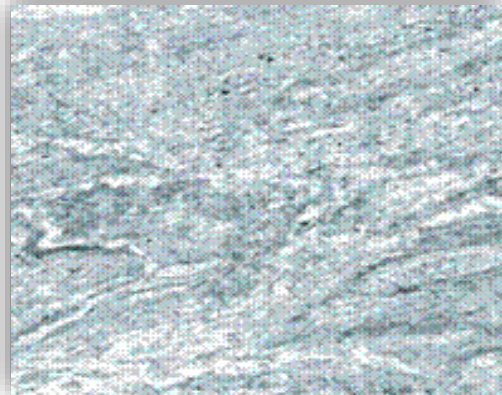


Figura 24. Fotografía de mano



Figura 25 Imágenes de la Muestra 1. Clase D

## Gravedades específicas y absorción

El ensayo para determinar la gravedad específica y la absorción se realiza para los materiales gruesos. Los resultados arrojados por este ensayo corresponden a una muestra que homogeniza toda y cada una de las voladuras analizadas, encontradas a diferentes terrazas de la cantera.

Los datos iniciales requeridos para obtener estos resultados se presentan en los Apéndices del presente informe.

Con base en las ecuaciones que se encuentran en el Marco Teórico para la determinación de la gravedad específica y absorción, vinculado a los cuadros adjuntos en los Apéndices de Gravedades y Absorción, se obtuvieron los siguientes resultados para las cinco muestras analizadas, ambos cuadros corresponden a un mismo material pero su muestreo fue obtenido en una distinta ubicación

| <b>CUADRO 12. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS MATERIALES GRUESOS OBTENIDOS IN SITU VOLADURAS "CERRO MINAS"</b> |      |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|------|
| Características   | M-1  | M-2  | M-3  | M-4  | M-5  |
| Gravedad Específica Bruta (Gbs)   | 2,41 | 2,53 | 2,55 | 2,55 | 2,56 |
| Gravedad Específica Bruta S.S.S (Gsss)  | 2,51 | 2,60 | 2,61 | 2,60 | 2,60 |
| Gravedad Específica Aparente (Gs)   | 2,68 | 2,71 | 2,7  | 2,69 | 2,68 |
| Porcentaje de Absorción   | 4,06 | 2,52 | 2,19 | 2,12 | 1,71 |

| <b>CUADRO 13. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS MATERIALES GRUESOS OBTENIDOS DEL APILAMIENTO DEL QUEBRADOR "PRODUCTO TERMINADO"</b> |      |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|------|
| Características  | M-1  | M-2  | M-3  | M-4  | M-5  |
| Gravedad Específica Bruta (Gbs)  | 2,41 | 2,51 | 2,52 | 2,53 | 2,56 |
| Gravedad Específica Bruta S.S.S (Gsss)   | 2,51 | 2,58 | 2,59 | 2,59 | 2,61 |
| Gravedad Específica Aparente (Gs)  | 2,67 | 2,69 | 2,7  | 2,69 | 2,69 |
| Porcentaje de Absorción  | 4,17 | 2,68 | 2,53 | 2,39 | 1,9  |

| <b>CUADRO 14. DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS RESULTADOS DE ABSORCIÓN</b> |      |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|------|
| Código   | M-1  | M-2  | M-3  | M-4  | M-5  |
| Desviación   | 0,08 | 0,11 | 0,24 | 0,13 | 0,15 |

A continuación se presentan, de manera resumida, los valores obtenidos del porcentaje de absorción de los materiales. Para efectos de considerar el material de manera homogénea, los

resultados obtenidos para cada tipo de material, se promediaron con la intención de tener un valor representativo del área de estudio del enrocado del Tajo Cerro Minas.

**CUADRO 15. VALOR PROMEDIO DE LA ABSORCIÓN Y GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS MUESTREOS ANALIZADOS**

| Muestra del Material            | % Absorción | Gbs   | Gsss |
|---------------------------------|-------------|-------|------|
| In Situ" Cantera Cerro Minas"   | 2,5         | 2,52  | 2,6  |
| Quebrador "Producto Terminado"  | 2,7         | 2,51  | 2,6  |
| Promedio General de Cerro Minas | 2,6         | 2,515 | 2,6  |

## Peso Volumétrico Seco

En el siguiente cuadro se muestran los valores obtenidos de Peso Volumétrico Seco para cada muestreo.

**CUADRO 16. RESULTADOS DE PESO VOLUMÉTRICO SECO DE LOS MATERIALES PÉTREOS**

| Muestra | Peso Volumétrico Seco P.T del Quebrador (kN/m <sup>3</sup> ) | Peso Volumétrico Seco In Situ (kN/m <sup>3</sup> ) |
|---------|--|--|
| M-1     | 23,58  | 23,58  |
| M-2     | 24,55  | 24,75  |
| M-3     | 24,65  | 24,94  |
| M-4     | 24,75  | 24,94  |
| M-5     | 25,04  | 25,04  |

## Porosidad

En el siguiente cuadro se muestran los valores obtenidos de porosidad para cada muestreo.

**CUADRO 17.RESULTADOS DE POROSIDAD DE LOS MATERIALES PÉTREOS**

| Muestra | Porosidad P.T Quebrador (%) | Porosidad Roca In Situ (%) |
|---------|-----------------------------|----------------------------|
| M-1     | 10,0                        | 9,8                        |
| M-2     | 6,7                         | 6,4                        |
| M-3     | 6,4                         | 5,6                        |
| M-4     | 6,1                         | 5,4                        |
| M-5     | 4,9                         | 4,4                        |

## Abrasión o desgaste de los materiales

Para la determinación de la resistencia a la abrasión fue necesario el uso de la máquina de los Ángeles como se describe en la metodología,

para este ensayo corresponde a la clasificación Tipo B. A continuación se describen los resultados:



**CUADRO 18. RESULTADOS DE PÉRDIDA POR ABRASIÓN DE MATERIALES OBTENIDOS IN SITU DE VOLADURAS "CANTERA CERRO MINAS"**

| Muestra | Peso Inicial (g)<br>Pi | Peso Final (g)<br>Pf | Peso de Pérdida(g)<br>Pp (Pi-Pf) | Pérdida por<br>Abrasión (%) |
|---------|------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| M-1     | 5000                   | 3460                 | 1540                             | 30,8                        |
| M-2     | 5004                   | 3962                 | 1042                             | 20,8                        |
| M-3     | 5000                   | 3959                 | 1041                             | 20,8                        |
| M-4     | 5000                   | 4001                 | 999                              | 20,0                        |
| M-5     | 5000                   | 4116                 | 884                              | 17,7                        |

**CUADRO 19. RESULTADOS DE PÉRDIDA POR ABRASIÓN DE LOS MATERIALES GRUESOS OBTENIDOS DEL APILAMIENTO DEL QUEBRADOR. "PRODUCTO TERMINADO"**

| Muestra | Peso Inicial (g)<br>Pi | Peso Final (g)<br>Pf | Peso de Pérdida(g)<br>Pp (Pi-Pf) | Pérdida por<br>Abrasión (%) |
|---------|------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| M-1     | 5001                   | 3813                 | 1188                             | 23,8                        |
| M-2     | 5000                   | 4026                 | 974                              | 19,5                        |
| M-3     | 5000                   | 4064                 | 936                              | 18,7                        |
| M-4     | 5000                   | 4082                 | 918                              | 18,4                        |
| M-5     | 5000                   | 4271                 | 729                              | 14,6                        |

A continuación se presentan, de manera resumida, los valores obtenidos de abrasión. Los resultados fueron promediados para efectos de

tener un valor representativo del enrocado de estudio del Tajo Cerro Minas.

**CUADRO 20. VALOR PROMEDIO DE PÉRDIDA POR ABRASIÓN DE LOS MUESTREOS ANALIZADOS**

| Muestra del Material            | % Pérdida por Abrasión |
|---------------------------------|------------------------|
| In Situ" Cantera Cerro Minas"   | 22                     |
| Quebrador "Producto Terminado"  | 19                     |
| Promedio General de Cerro Minas | 20,5                   |

## Inmersión en Etilenglicol

**CUADRO 21. RESULTADOS DE PÉRDIDA POR INMERSIÓN EN ETILENGLICOL**

| Muestra | Peso Inicial (g)<br>Pi | Peso Final (g)<br>Pf | Porcentaje de Pérdida (%) |
|---------|------------------------|----------------------|---------------------------|
| M-1     | 4994                   | 4994                 | 0                         |
| M-2     | 4994                   | 4994                 | 0                         |
| M-3     | 4996                   | 4996                 | 0                         |
| M-4     | 4994                   | 4994                 | 0                         |
| M-5     | 4997                   | 4997                 | 0                         |

**CUADRO 22. RESULTADOS DE PÉRDIDA POR INMERSIÓN EN ETILENGLICOL EN MUESTRA EXTRA**

| Muestra | Peso Inicial (g)<br>Pi | Peso Final (g)<br>Pf | Porcentaje de Pérdida (%) |
|---------|------------------------|----------------------|---------------------------|
| M-6     | 4995                   | 4930                 | 1,3                       |

## Carga Puntual

El parámetro de carga puntual permite correlacionar los resultados y determinar la resistencia a la compresión simple. Es una prueba que permite clasificar los materiales rocosos intactos en cuanto a su resistencia.

Este ensayo fue efectuado únicamente para muestreos in situ. A continuación se presentan los resultados promedios arrojados de resistencia a la compresión simple.

El Cuadro 23 corresponde a la determinación de la resistencia a la compresión mediante el factor de 22,5 veces el Índice de Resistencia a la Carga Puntual, y en el Cuadro 24 las resistencias fueron determinadas con una constante de 18 veces el Índice de Resistencia a la Carga Puntual.

**CUADRO 23. RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS IN SITU DE VOLADURAS**

| Tamaño Nominal        | Resistencia a la Compresión Simple (kg/cm <sup>2</sup> )=22,5*I(50) |        |        |        |        |
|-----------------------|---|--------|--------|--------|--------|
|                       | M1  | M2     | M3     | M4     | M5     |
| Especímenes de 1"     | 883   | 1560,4 | 1888,0 | 2066,3 | 2058,7 |
| Especímenes de 1 1/2" | 1090  | 1384,0 | 1389,5 | 1676,0 | 2201,1 |
| Promedio              | 987   | 1472   | 1639   | 1871   | 2129   |

**CUADRO 24. RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS IN SITU DE VOLADURAS**

| Tamaño Nominal                   | Resistencia a la Compresión Simple (kg/cm <sup>2</sup> )=18*I(50) |         |         |         |         |
|----------------------------------|---|---------|---------|---------|---------|
|                                  | M1  | M2      | M3      | M4      | M5      |
| Especímenes de 1"                | 707,19  | 1248,3  | 1510,43 | 1653,07 | 1646,07 |
| Especímenes de 1 $\frac{1}{2}$ " | 872,64  | 1107,16 | 1111,62 | 1340,79 | 1340,8  |
| Promedio                         | 790   | 1178    | 1311    | 1497    | 1704    |

**CUADRO 25. RESUMEN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS IN SITU DE VOLADURAS**

| Coeficiente de Carga Puntual                           |              | Muestras |      |      |      |      |
|--|--------------|----------|------|------|------|------|
|  |              | M1       | M2   | M3   | M4   | M5   |
| Resistencia la Compresión Simple (Kg/cm <sup>2</sup> ) | 22,5 Is (50) | 987      | 1472 | 1639 | 1871 | 2129 |
|  | 18 Is (50)   | 790      | 1178 | 1311 | 1497 | 1704 |
| Desviación   |              | 140      | 208  | 232  | 265  | 301  |

## Prueba Martillo de Rebote (Esclerómetro)

El fin de esta prueba es poder corroborar que los resultados de Resistencia a la Compresión Simple, obtenidos por el ensayo de Carga Puntual sean confiables al ser usados para establecer correlaciones que serán determinadas posteriormente.

Para la ejecución de esta prueba se analizaron los taludes de donde se tomó la muestra inicialmente, siguiendo los pasos descritos en la Metodología.

| <b>CUADRO 26. RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE OBTENIDAS POR EL VALOR PROMEDIO DE REBOTE DEL ESCLERÓMETRO.</b> |                 |   |   |  |
|--|-----------------|---|---|--|
| Muestra  | Valor de Rebote | Peso Volumétrico Seco de la Roca (kN/m <sup>3</sup> ) | Resistencia a la Compresión Simple(Mpa) | Resistencia a la Compresión Simple (kg/cm <sup>2</sup> ) |
| M-1  | 58,6            | 23,58   | 150                                     | 1530   |
| M-2  | 60,5            | 24,55   | 180                                     | 1836   |
| M-3  | 77              | 24,65   | 185                                     | 1887   |
| M-4  | 96              | 24,75   | 190                                     | 1938   |
| M-5  | 94              | 25,04   | 200                                     | 2040   |

Los valores de rebote se correlacionan mediante la siguiente figura, con el fin de determinar la resistencia a la compresión simple, en función del peso volumétrico seco y de la inclinación del plano ensayado.

Como el cuadro anterior muestra que hay valores de rebote mayores a 60, y el ábaco (Figura 25) tiene un valor máximo 60, se parte de este valor para las muestras :M-2, M-3, M-4, M-5.

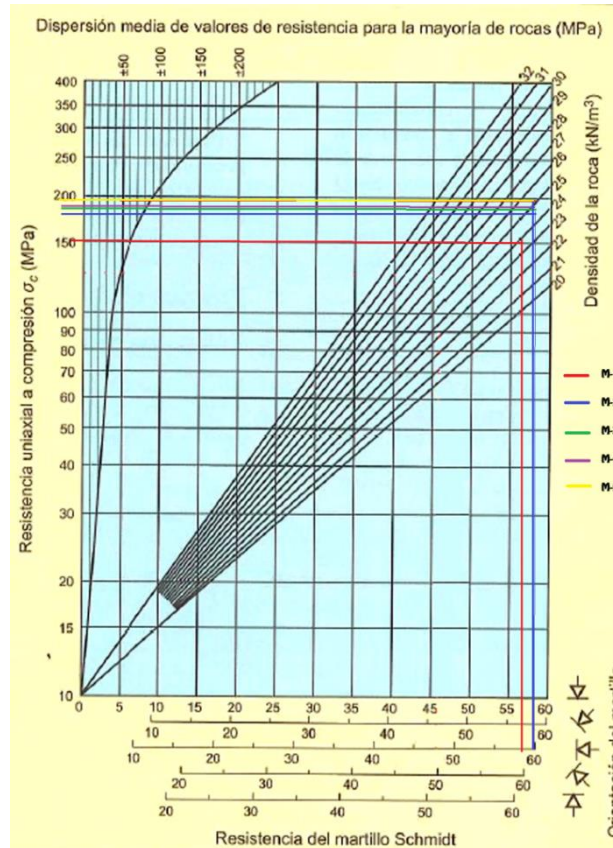


Figura 26. Diagrama de clasificación de rocas basado en la dureza de Schmidt, intervalo de confianza del 75%

## Comparación de los resultados de características del enrocado de Cerro Minas de un estudio en el año de 1993 vrs la presente investigación

| CUADRO 27.RESULTADOS PARA LA ZONA GEOGRÁFICA DE SANTA ANA, "CERRO MINAS" AGREGADO GRUESO |           |                             |                             |      |      |          |          |               |
|--|-----------|-----------------------------|-----------------------------|------|------|----------|----------|---------------|
| Año de Estudio   | Zona      | P.Un. S (K/m <sup>3</sup> ) | P.Un. C (K/m <sup>3</sup> ) | Gbs  | Gsss | Abr. (%) | Abs. (%) | Tam. Max (mm) |
| 1993   | Santa Ana | 1299                        | 1481                        | 2,58 | 2,65 | 17,7     | 2,5      | 19            |
| 2009   | Santa Ana | -                           | -                           | 2,5  | 2,6  | 19       | 2,7      | 19            |

En los siguientes gráficos se muestran el comportamiento característico entre los distintos parámetros determinados, tanto para las muestras obtenidas in situ y el Quebrador.

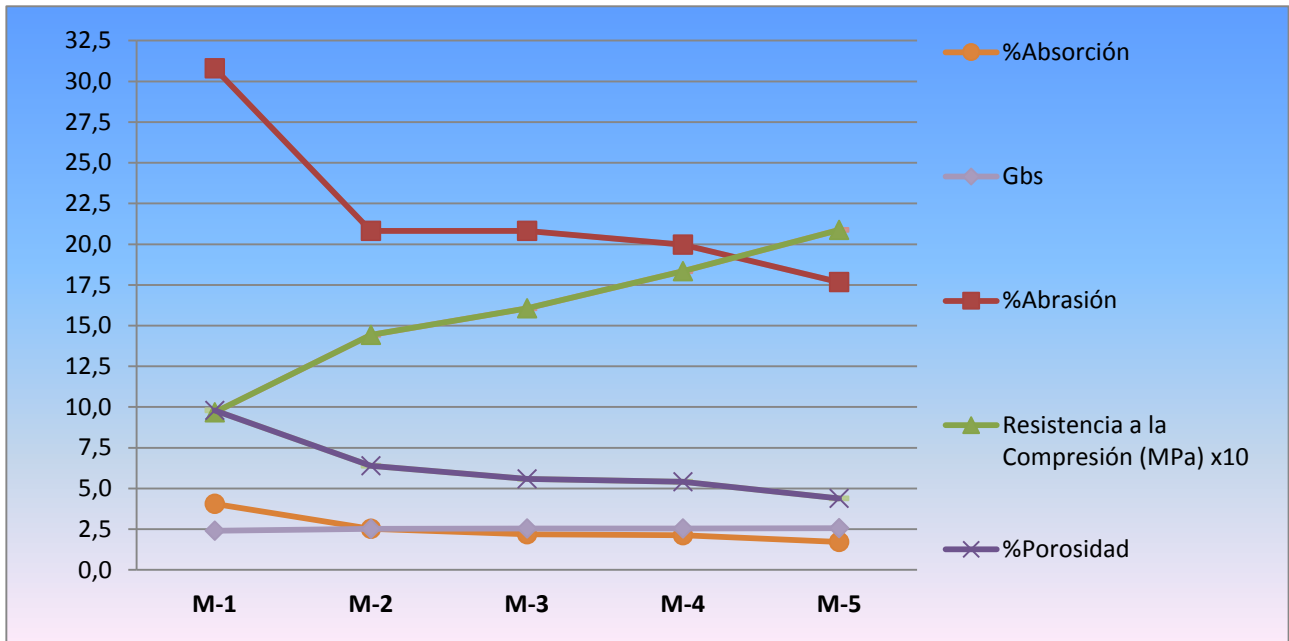


Gráfico 1. Comparación de los distintos parámetros analizados para las cinco muestras obtenidas in situ.

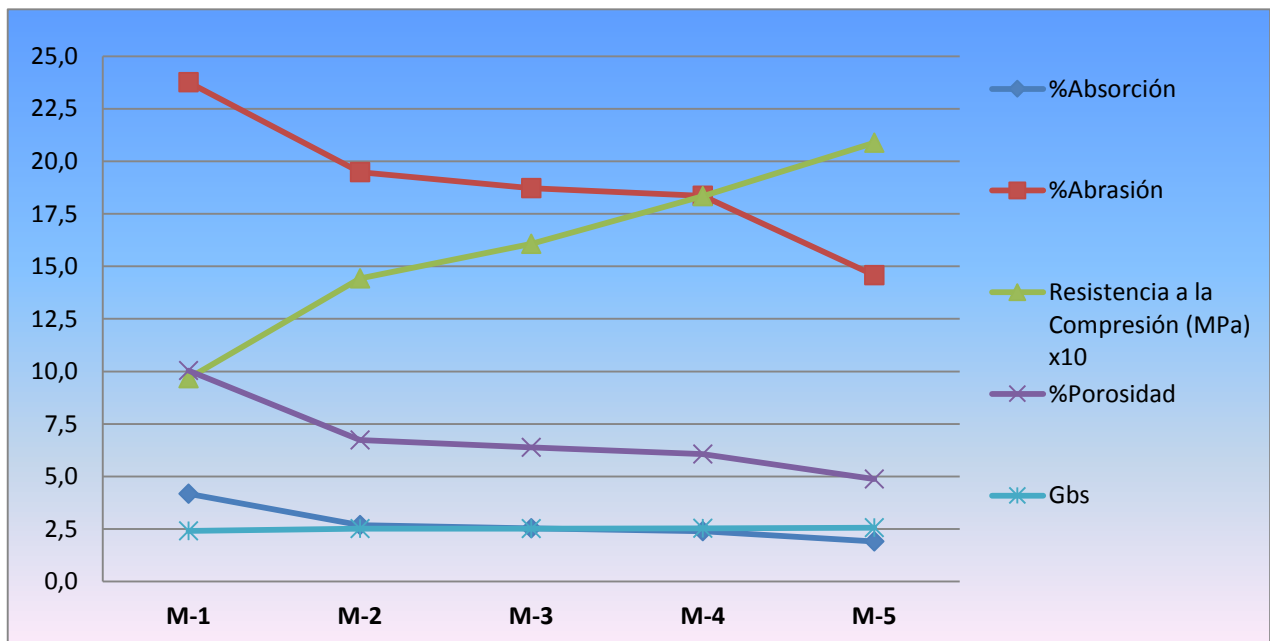


Gráfico 2. Comparación de los distintos parámetros analizados para las cinco muestras de producto terminado obtenidas del apilamiento del Quebrador.

Donde  
 Gbs: Gravedad Específica Seca

# Correlaciones entre características físicas y mecánicas de la roca

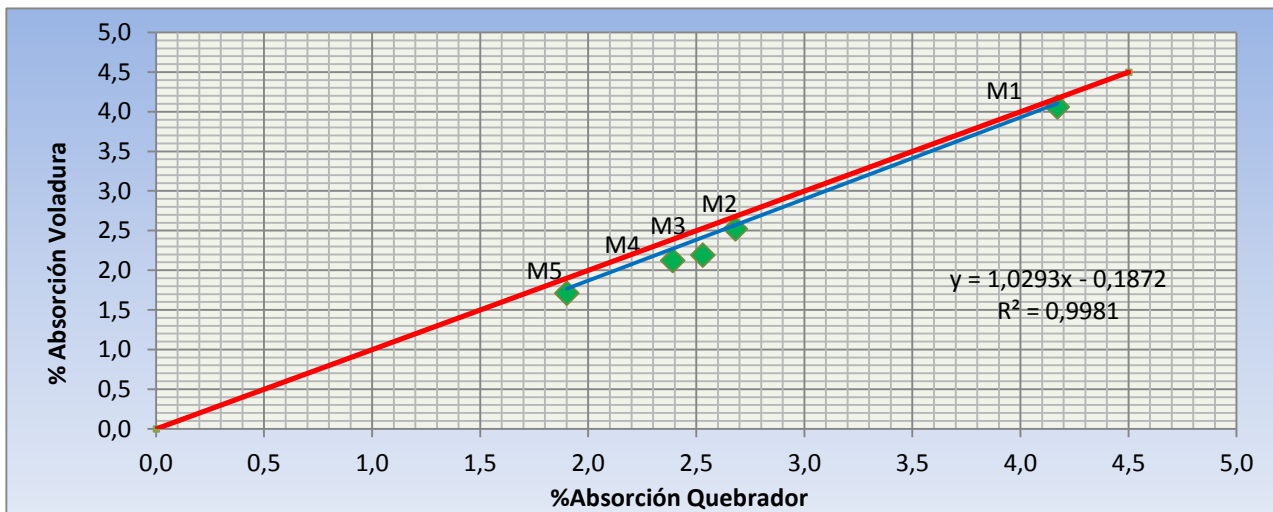
A continuación se presentan algunas correlaciones entre las características físicas y mecánicas de las rocas, con la finalidad de brindar una herramienta que permita a la Empresa de Holcim un mejor entendimiento y forma de predecir las características mecánicas de Cerro Minas, por medio de ensayos simples, como es la absorción.

Inicialmente se correlacionaron los parámetros entre las muestras obtenidas in situ "Voladura" y el Producto Terminado "Quebrador" correspondientemente, con el fin de efectuar una valoración de los valores de las pruebas de laboratorio de Absorción, Abrasión, Porosidad y Gravedad Específicas, contemplando que teóricamente deberá ser el mismo dato para

ambos análisis, pero por diversos factores se presentaron variaciones para una misma muestra con distinto punto de obtención.

## Correlación entre absorción de muestra in situ vrs absorción de muestra obtenida del Quebrador

El siguiente gráfico muestra el comportamiento entre los resultados de Absorción de las muestras obtenidas del Producto Terminado (Quebrador) vrs in situ (Voladuras). Se verifica la tendencia entre ambos resultados, y se procede a una validación de esta prueba.



**Gráfico 3.** Ecuación de correlación para evaluar resultados de Absorción de muestras obtenidas in situ (Voladuras) vrs Absorción del Producto Terminado (Quebrador).

$$\%Absorción(V) = 1,03x - 0,19 \dots \dots \dots \text{Ecuación 13}$$

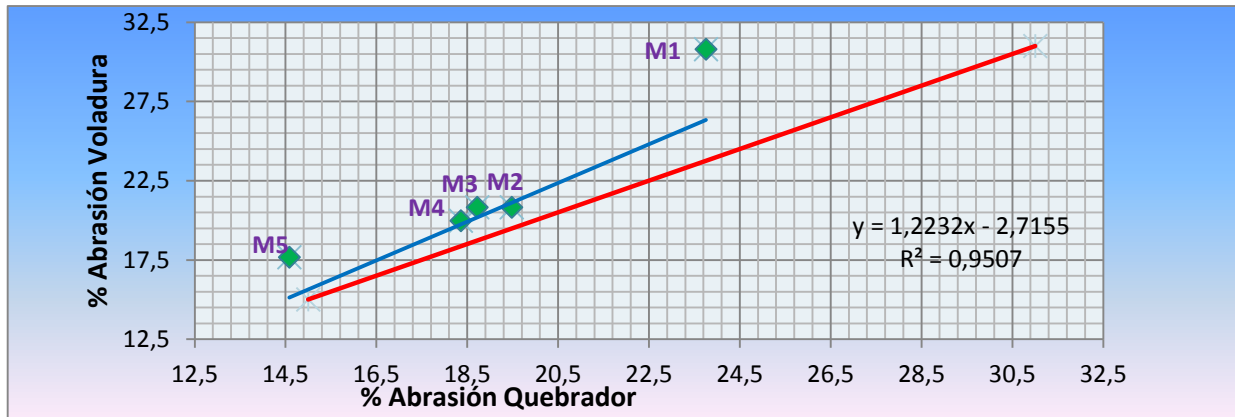
Donde:

x = % Absorción (Q)

## Correlación entre abrasión de muestra in situ vrs abrasión de muestra obtenida del Quebrador

A continuación se observa el comportamiento entre los resultados de abrasión de las muestras obtenidas in situ "Voladuras" respecto a las del Producto Terminado tomadas del apilamiento del

Quebrador. Se observa la tendencia entre ambos resultados, y se procede a una validación de esta.



**Gráfico 4.** Ecuación de correlación para evaluación entre resultados de Abrasión (Voladuras) vrs Abrasión (Quebrador).

$$\%Abrasi3n (V) = 1,22x - 2,72 \dots \dots \dots \text{Ecuaci3n 14}$$

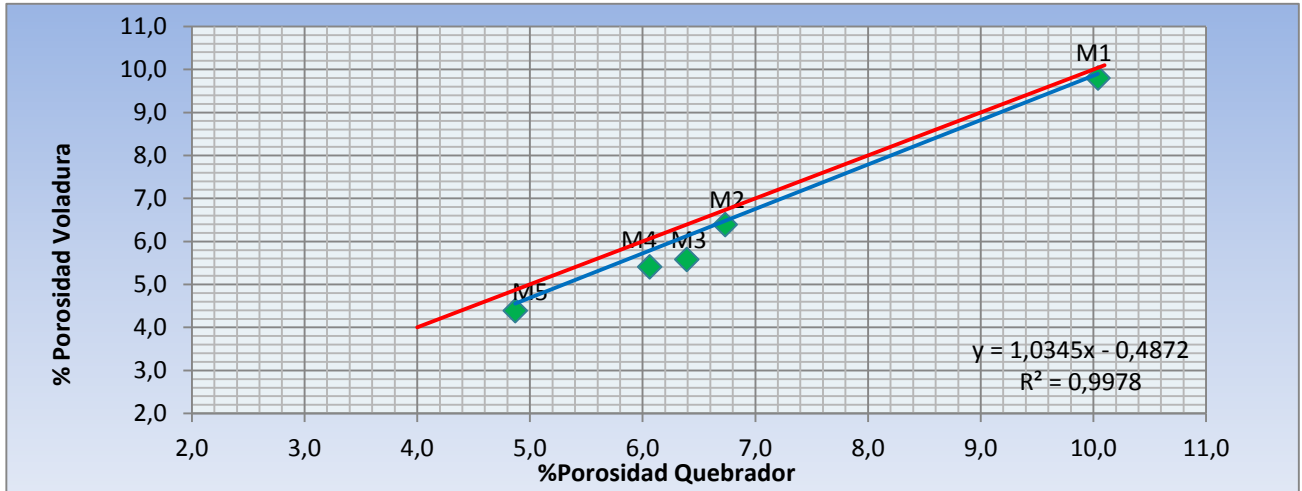
Donde:

x = %Abrasi3n(Q)

## Correlaci3n entre porosidad de muestra in situ vrs porosidad de muestra obtenida del Quebrador

El siguiente gr3fico muestra el comportamiento entre los resultados de porosidad de las muestras obtenidas in situ "Voladuras" respecto a las del Producto Terminado tomadas del apilamiento del Quebrador. Se observa la

tendencia entre ambos resultados, y se procede a una validaci3n de esta.



**Gráfico 5.** Ecuación de correlación para evaluar los resultados de Porosidad (Voladuras) vrs Porosidad (Quebrador).

$$\%Porosidad(V) = 1,035x - 0,487 \dots \dots \dots \text{Ecuación 15}$$

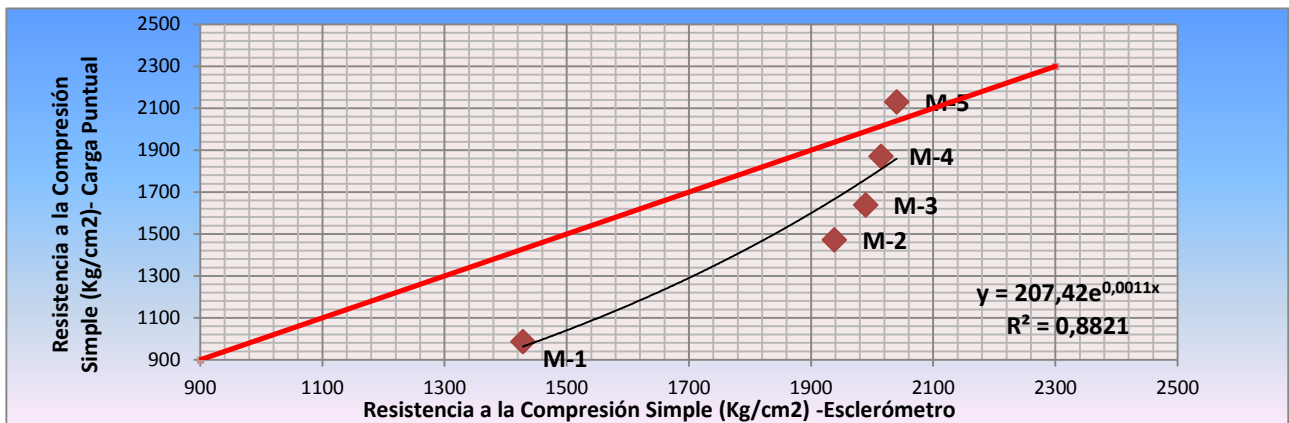
Donde:

x = %Porosidad(Q)

## Correlación entre resistencias a la compresión simple de la roca, obtenidas por distintos ensayos

En el siguiente gráfico se muestra la correlación entre los resultados de resistencia a la compresión simple de rocas "Cerro Minas". Característica determinada por los dos ensayos siguientes: Carga Puntual (Especímenes de Roca

Intacta) y Esclerómetro (Taludes en terrazas del estudio), con el fin de efectuar una validación de los resultados de resistencias de compresión simple obtenidas para cada muestra.



**Gráfico 6.** Ecuación de correlación para evaluación entre resultados de Resistencia a la Compresión Simple, para las cinco muestras analizadas.

$$\text{Resistencia a la Comp. S (Carga Puntual)} = 0,0018x^{1,8154} \dots \dots \dots \text{Ecuación 16}$$

Donde:

x = Resistencia a la Compresión Simple (Esclerómetro)



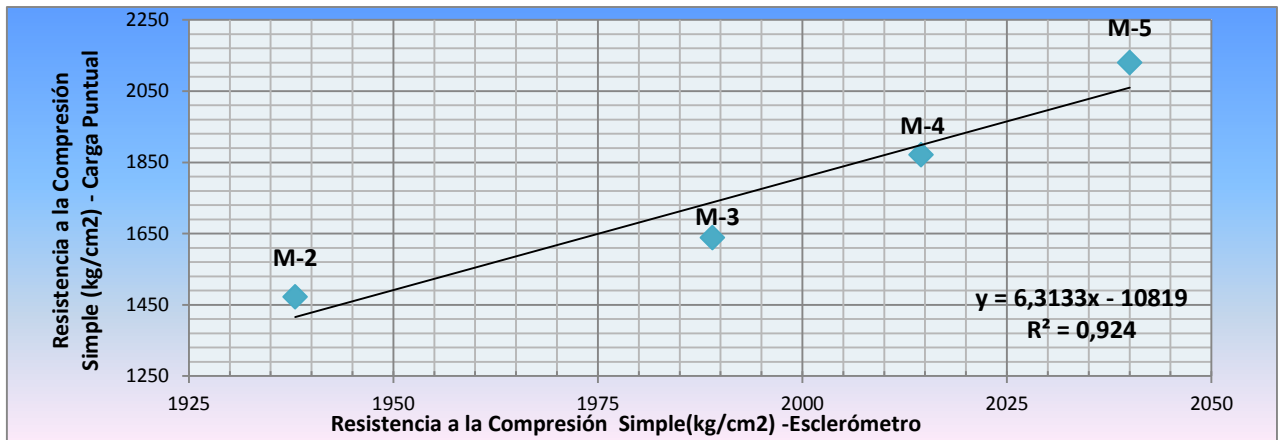


Gráfico 7. Ecuación de correlación para evaluación entre resultados de Resistencia a la Compresión Simple, omitiendo la muestra M-1.

$$\text{Resistencia a la Comp. S (Carga Puntual)} = 6,3133x - 10819 \dots \text{Ecuación 17}$$

Donde:

x = Resistencia a la Compresión Simple (Esclerómetro)

### Correlación entre absorción vrs porosidad de muestras in situ “Voladura Cerro Minas”

A continuación se observa el comportamiento entre los resultados de porosidad respecto a la absorción de las muestras obtenidas in situ

(Voladura), se muestra la tendencia entre ambos resultados, con el fin de verificar la relación entre ambos parámetros.

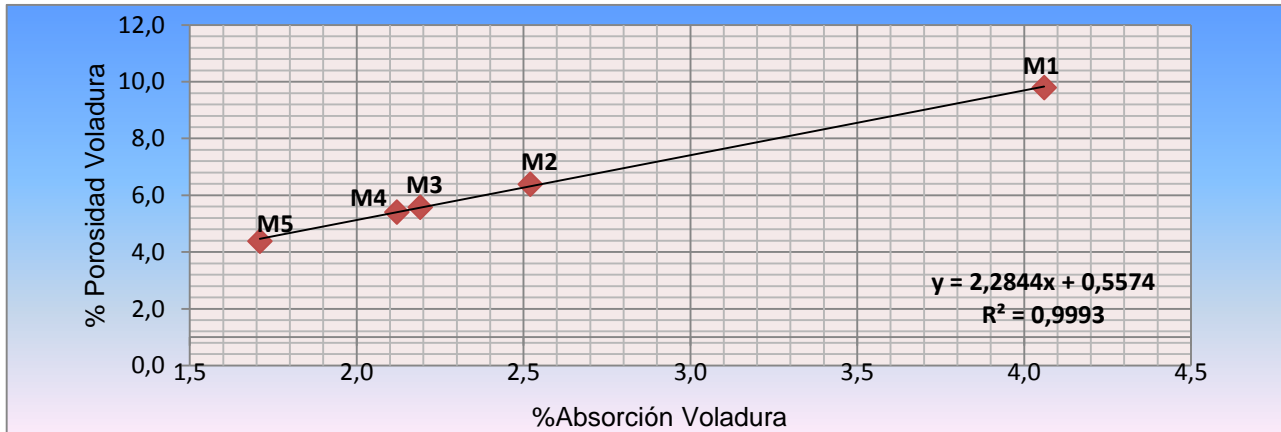


Gráfico 8. Ecuación de correlación para evaluar la relación entre resultados de Porosidad Voladura vrs Absorción Voladura.

$$\text{Porosidad (Voladura)} = 2,2844x + 0,5574 \dots \text{Ecuación 18}$$

x = % Absorción (Voladura)

## Correlación entre absorción vrs porosidad de muestras obtenidas del Quebrador

En el siguiente gráfico se observa el comportamiento entre los resultados de porosidad respecto a la absorción de las muestras obtenidas del Producto Terminado(Quebrador),

se muestra la tendencia entre ambos resultados, con el fin de verificar la relación entre ambos parámetros.

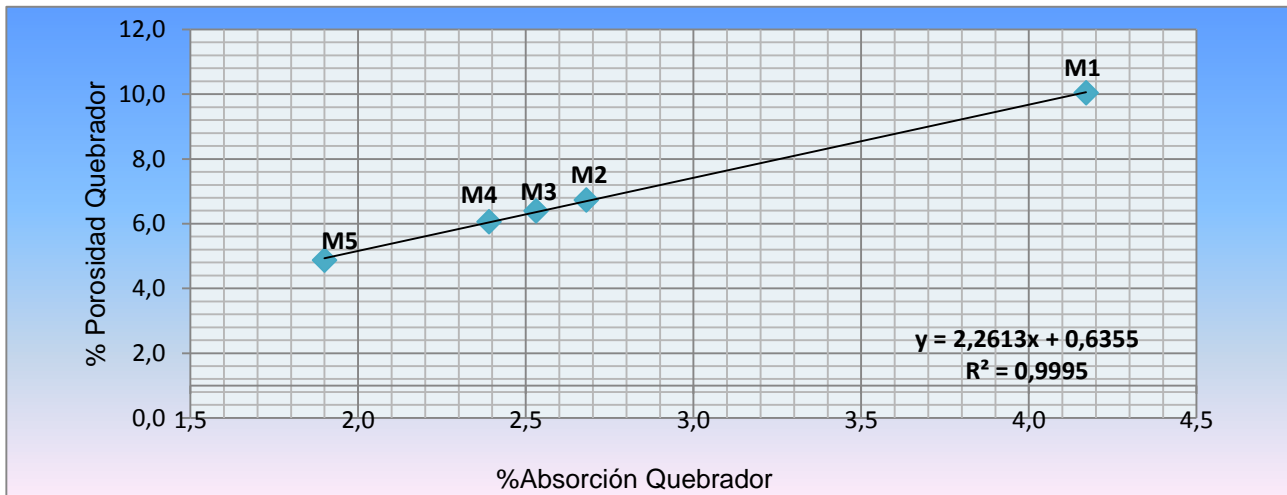


Gráfico 9. Ecuación de correlación para evaluación entre resultados de Porosidad Quebrador vrs Absorción Quebrador.

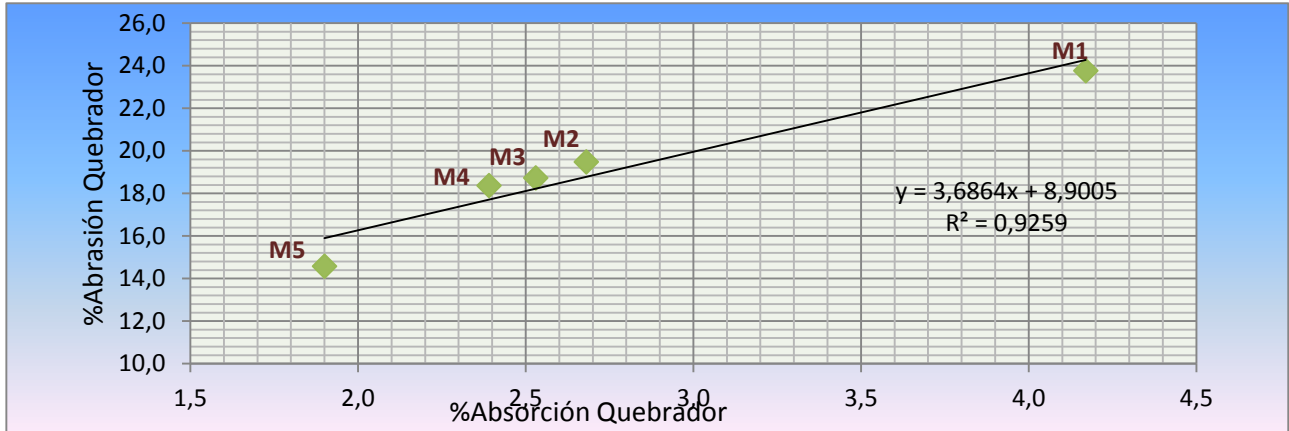
$$\text{Porosidad(Quebrador)} = 2,2613x + 0,6355 \dots \text{Ecuación 19}$$

Donde:

x = %Absorción(Quebrador)

## Correlación entre abrasión vrs absorción de muestras obtenidas del Quebrador

En el siguiente gráfico se observa el comportamiento entre los resultados de abrasión respecto a la absorción de las muestras obtenidas del Producto Terminado(Quebrador), se muestra la tendencia entre ambos resultados, con el fin de verificar la relación entre ambos parámetros.



**Gráfico 10.** Ecuación de correlación para evaluación entre resultados de Abrasión Quebrador vrs Absorción Quebrador.

$$\text{Abrasión (Quebrador)} = 3,7x + 8,9 \dots \dots \dots \text{Ecuación 20}$$

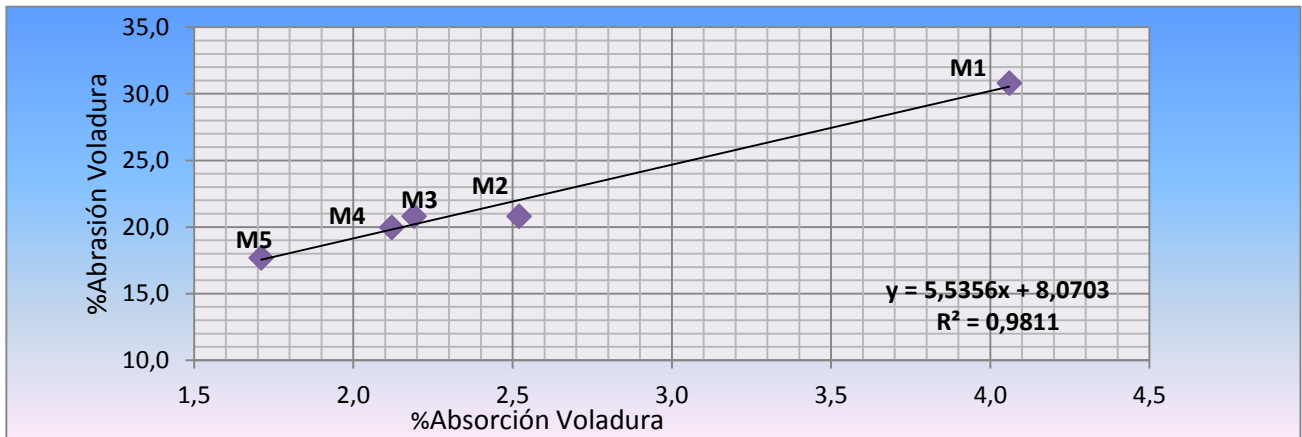
Donde:

x = %Absorción(Quebrador)

### Correlación entre abrasión vrs absorción de muestras obtenidas in situ “Cerro Minas”

En el siguiente gráfico se observa el comportamiento entre los resultados de abrasión respecto a la absorción de las muestras

obtenidas in situ (Voladura), se muestra la tendencia entre ambos resultados con el fin de verificar la relación entre ambos parámetros.



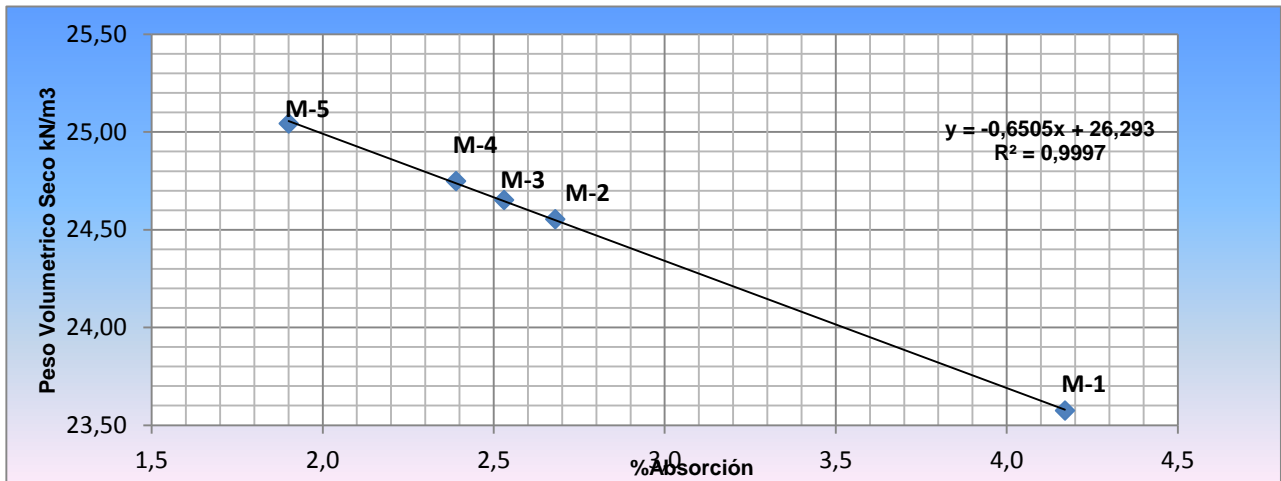
**Gráfico 11.** Ecuación de correlación para evaluación entre resultados de Abrasión Voladura vrs Absorción Voladura.

$$\text{Abrasión (Quebrador)} = -1,5951x^2 + 13,682x - 5,5726 \dots \dots \dots \text{Ecuación 21}$$

Donde:

x = %Absorción(Quebrador)

## Correlación entre peso volumétrico seco vrs absorción de muestras obtenidas quebrador Holcim



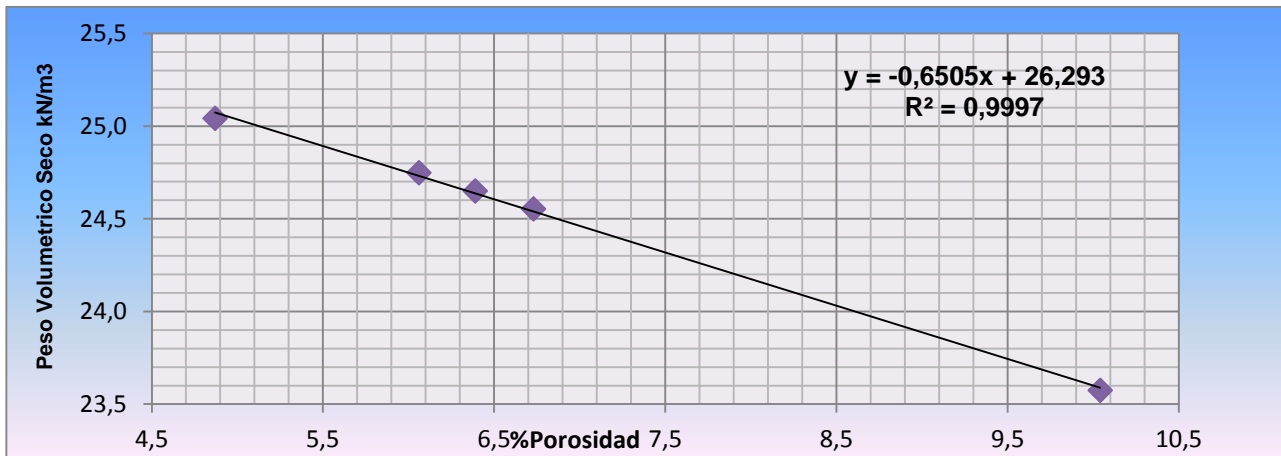
**Gráfico 12.** Ecuación de correlación para evaluación entre resultados de Peso Volumétrico Seco vrs Absorción

$$\text{Peso Volumétrico Seco} = -0,6505x + 26,293 \dots \text{Ecuación 22}$$

Donde:

x = %Absorción

## Correlación entre peso volumétrico seco vrs porosidad de muestras obtenidas quebrador Holcim



**Gráfico 13.** Ecuación de correlación para evaluación entre resultados Peso Volumétrico Seco vrs Porosidad

$$\text{Peso Volumétrico Seco} = 9095,6x^{-0,974} \dots \text{Ecuación 23}$$

Donde:

x = %Porosidad(Voladura)

## Correlación entre resistencia a la compresión simple vrs absorción de muestras obtenidas in situ” Cerro Minas”

En el siguiente gráfico se observa el comportamiento entre los resultados de absorción respecto a la resistencia a la compresión simple de las muestras obtenidas in situ (Voladura), se

muestra la tendencia entre ambos resultados con el fin de verificar la relación entre ambos parámetros.

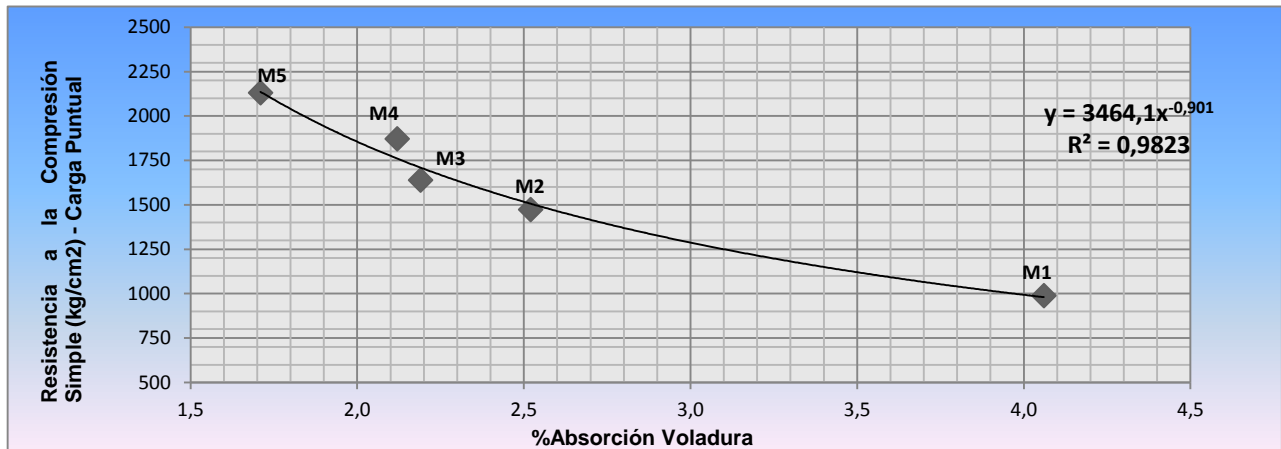


Gráfico 14. Ecuación de correlación para evaluación entre resultados de Resistencia a la Compresión Simple vrs Absorción (Voladura).

$$\text{Resistencia a la Compresión } S. = 3464,1x^{-0,901} \dots\dots\dots \text{Ecuación 24}$$

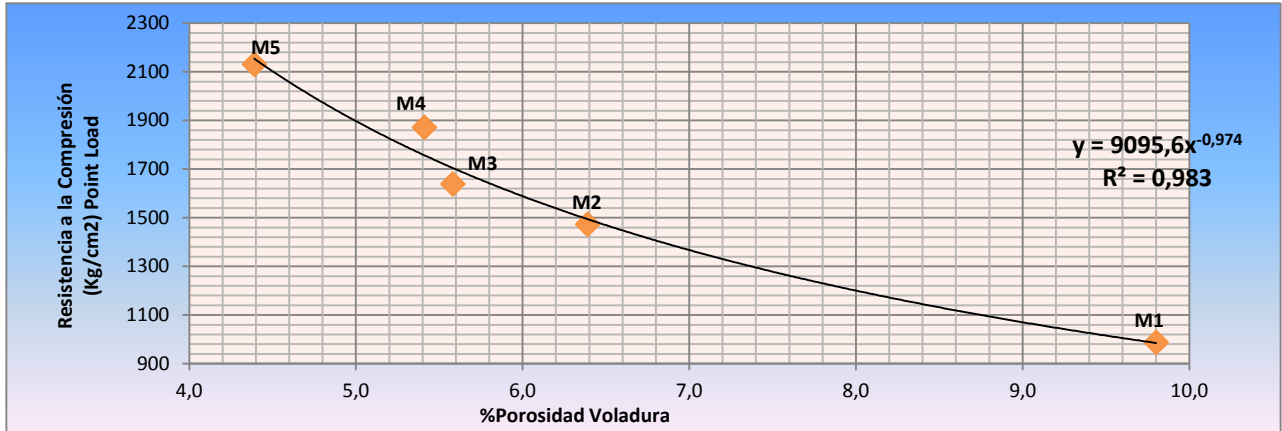
Donde:

x = %Absorción(Voladura)

## Correlación entre resistencia a la compresión simple vrs porosidad de muestras obtenidas in situ” Cerro Minas”

En el siguiente gráfico se observa el comportamiento entre los resultados de resistencia a la compresión simple respecto a porosidad de la rocas obtenidas in situ

(Voladura), se muestra la tendencia entre ambos resultados con el fin de verificar la relación entre ambos parámetros.



**Gráfico 15.** Ecuación de correlación para evaluación entre resultados de Resistencia a la Compresión Simple vrs Porosidad (Voladura).

$$\text{Resistencia a la Compresión } S. = 9095,6x^{-0,974} \dots\dots\dots \text{Ecuación 25}$$

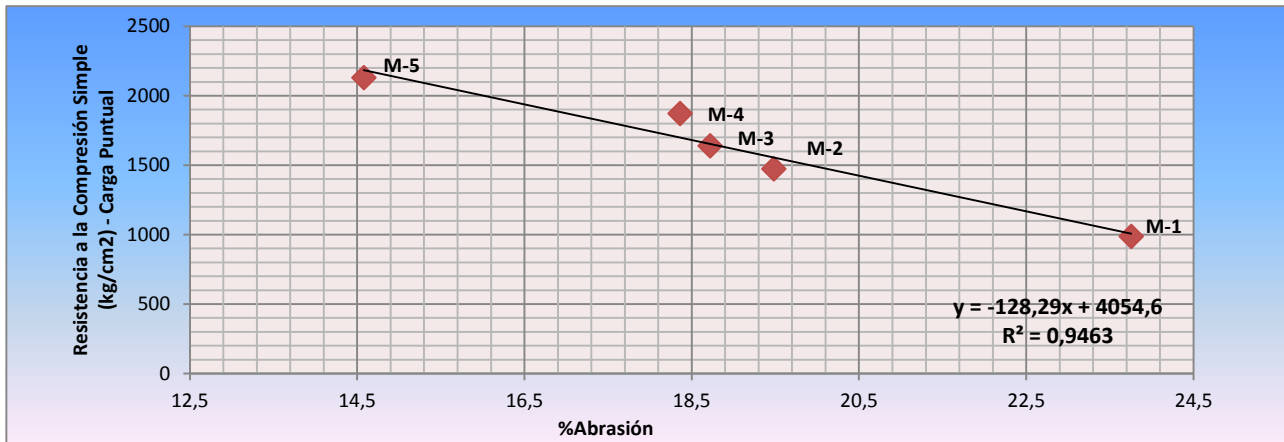
Donde:

x = %Porosidad(Voladura)

## Correlación entre resistencia a la compresión simple vrs abrasión de muestras” Cerro Minas”

En el siguiente gráfico se observa el comportamiento entre los resultados de resistencia a la compresión simple respecto a la

abrasión de las rocas, se muestra la tendencia entre ambos resultados con el fin de verificar la relación entre ambos parámetros.



**Gráfico 16.** Ecuación de correlación para evaluación entre resultados de Resistencia a la Compresión Simple vrs Abrasión

$$\text{Resistencia a la Compresión } S. = -128,29x + 4054,6 \dots\dots\dots \text{Ecuación 26}$$

Donde:

x = %Abrasión

## Correlaciones de las propiedades de la roca analizada en Cerro Minas vrs los datos teóricos de M.A Kanji y V.R Galván Leivano

A continuación se muestran los resultados determinados por la ecuación teórica de estudios efectuados por Kanji & Galván, asignando el mismo valor de la variable de porosidad de las %muestras analizadas en Cerro Minas, con el fin de determinar la absorción y conocer la variación que hay entre datos experimentales y teóricos.

La ecuación Teórica de Kanji & Galván corresponde a:

$$\%Abs = \left[ \frac{\delta w}{\delta s} \right] \times \left[ \frac{\eta}{100-\eta} \right] \times 10 \dots \text{Ecuación 27}$$

Donde

$$\delta s = 26,5 \text{ kN/m}^3$$

$\eta$  = %Porosidad

%Abs = Absorción

En el siguiente cuadro se muestra la relación entre datos experimentales (Muestras Cerro Minas) y datos teóricos (Kanji & Galván) tomados de la Figura 3, en la sección de Antecedentes.

| CUADRO 28. DATOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES PARA CORRELACIÓN POROSIDAD VRS ABSORCIÓN |                |                  |                       |                 |
|---|----------------|------------------|-----------------------|-----------------|
| Obtención de Resultado  | Muestras       | %Absorción (Abs) | %Porosidad ( $\eta$ ) | Desviación %Abs |
| Prueba de Laboratorio   | M-1            | 4,17             | 10,04                 | 0,029           |
| Ecuación Teórica  | Kanji & Galván | 4,21             | 10,04                 |                 |
| Prueba de Laboratorio   | M-2            | 2,68             | 6,73                  | 0,030           |
| Ecuación Teórica  | Kanji & Galván | 2,72             | 6,73                  |                 |
| Prueba de Laboratorio   | M-3            | 2,53             | 6,39                  | 0,032           |
| Ecuación Teórica  | Kanji & Galván | 2,58             | 6,39                  |                 |
| Prueba de Laboratorio   | M-4            | 2,39             | 6,06                  | 0,031           |
| Ecuación Teórica  | Kanji & Galván | 2,43             | 6,06                  |                 |
| Prueba de Laboratorio   | M-5            | 1,90             | 4,87                  | 0,022           |
| Ecuación Teórica  | Kanji & Galván | 1,93             | 4,87                  |                 |

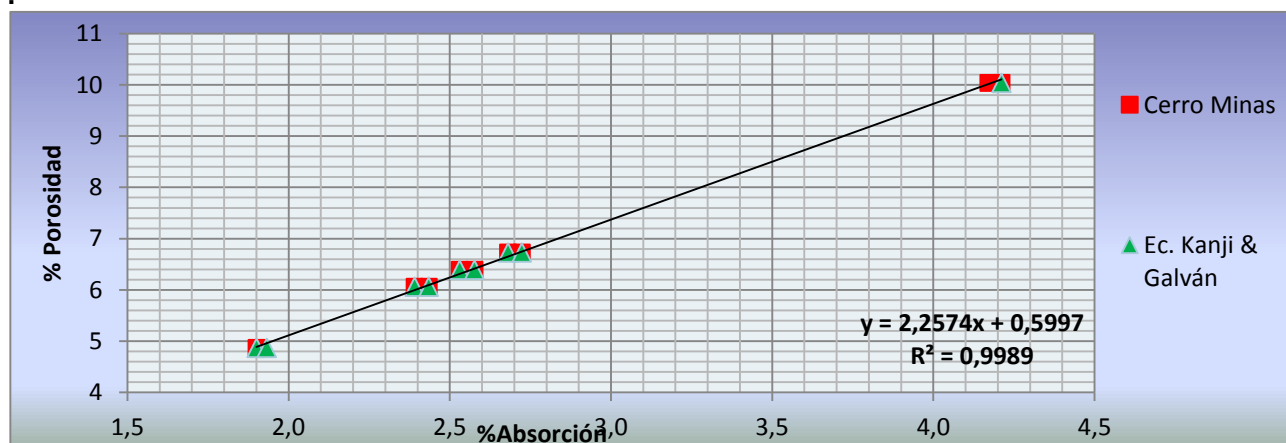
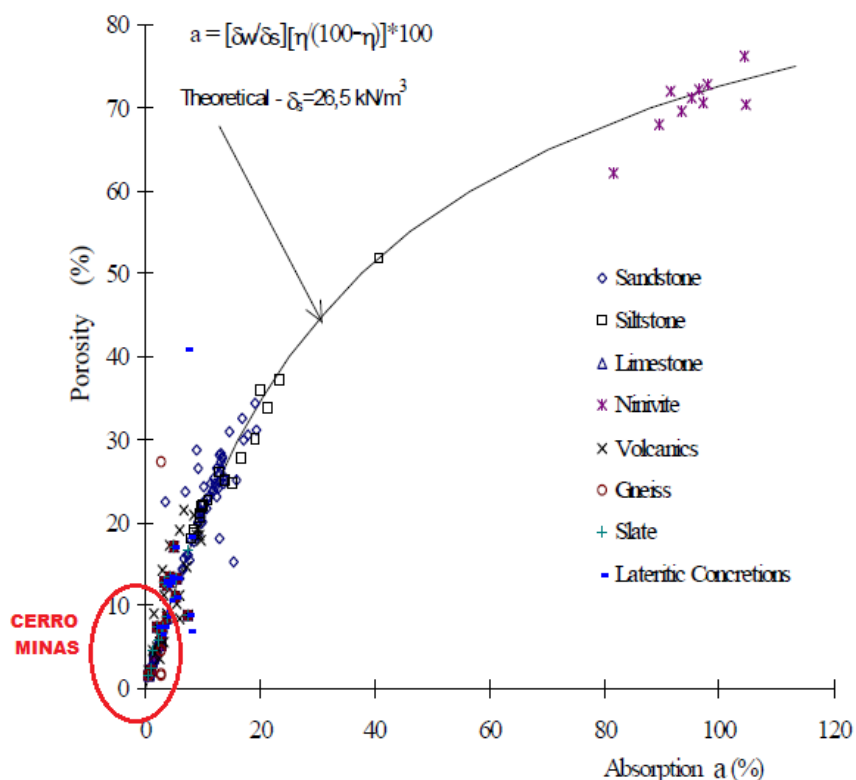


Gráfico 17. Correlación %Porosidad vrs %Absorción existentes entre resultados de estudio en Cerro Minas junto con los datos teóricos de Ec.Kanji & Galván.





**Figura 27.** Ecuación teórica determinada por Kanji & Galvan para distintos tipos de enrocados. Porosidad vrs Absorción.

A continuación se muestran los resultados determinados por la ecuación teórica de estudios efectuados por Kanji & Galván, asignando el mismo valor de la variable de porosidad de las

%muestras analizadas en Cerro Minas, con el fin de determinar el peso volumétrico seco y poder conocer la variación que hay entre datos experimentales y teóricos.

| <b>CUADRO 29. DATOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES PARA CORRELACIÓN PESO VOLUMETRICO VRS POROSIDAD</b> |                |  |                |                                    |
|---|----------------|--|----------------|------------------------------------|
| Obtención de Resultado  | Muestras       | Peso Volumétrico Seco (kN/m <sup>3</sup> ) | %Porosidad (η) | Desviación (Peso Volumétrico Seco) |
| Prueba de Laboratorio   | M-1            | 23,58                                      | 10,04          | 0,13                               |
| Ecuación Teórica  | Kanji & Galván | 23,39                                      | 10,04          |                                    |
| Prueba de Laboratorio   | M-2            | 24,55                                      | 6,73           | 0,20                               |
| Ecuación Teórica  | Kanji & Galván | 24,27                                      | 6,73           |                                    |
| Prueba de Laboratorio   | M-3            | 24,65                                      | 6,39           | 0,21                               |
| Ecuación Teórica  | Kanji & Galván | 24,36                                      | 6,39           |                                    |
| Prueba de Laboratorio   | M-4            | 24,75                                      | 6,06           | 0,21                               |
| Ecuación Teórica  | Kanji & Galván | 24,45                                      | 6,06           |                                    |
| Prueba de Laboratorio   | M-5            | 25,04                                      | 4,87           | 0,20                               |
| Ecuación Teórica  | Kanji & Galván | 24,76                                      | 4,87           |                                    |

La ecuación teórica de Kanji &Galván corresponde a

$$\gamma_d = -0,265\eta + 26,054 \dots \dots \dots \text{Ecuación 28}$$

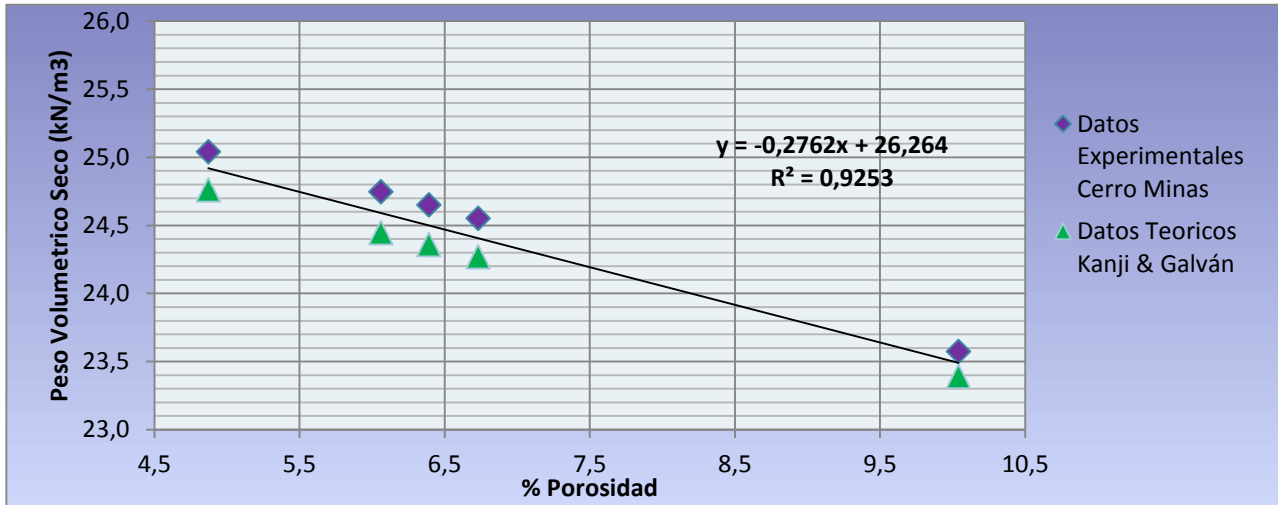
Donde

$\gamma_d$  = Peso Volumétrico Seco(kN/m<sup>3</sup>)

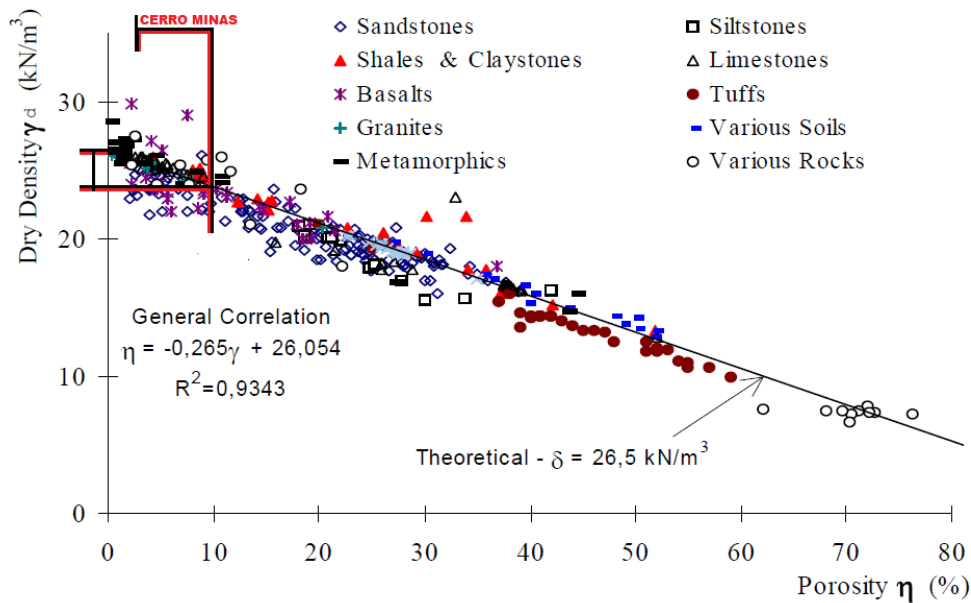
$\eta$ =%Porosidad

En el siguiente cuadro se muestra la relación entre datos experimentales (Muestras Cerro Minas) y datos teóricos (Kanji & Galván) tomados de la Figura 4, en la sección de Antecedentes. En

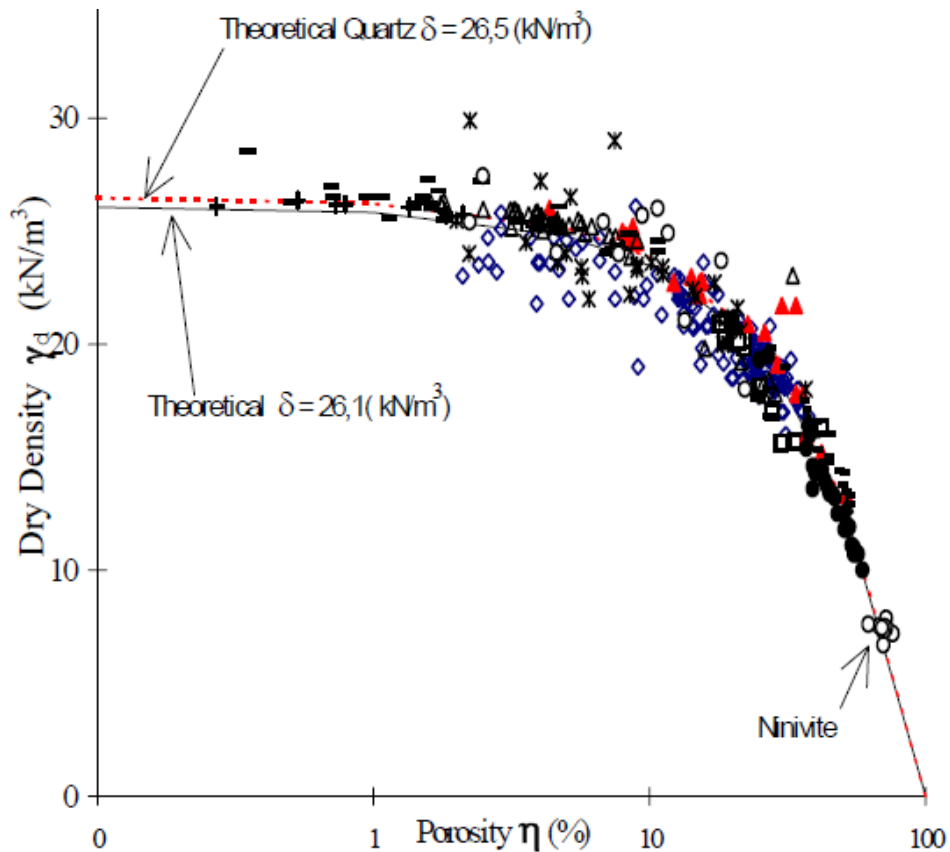
la figura existe un error de la ecuación teórica determinada que corresponde a la posición invertida de las variables. La ecuación 25 muestra la corrección de dicha ecuación.



**Gráfico 18.** Correlación Densidad Seca vrs %Porosidad existentes entre resultados de estudio en Cerro Minas junto con los datos teóricos de Ec.Kanji &Galván.



**Figura 28.** Ecuación teórica determinada por Kanji & Galván para distintos tipos de enrocados. Dry Density vrs Porosity.



**Figura 29.** Ecuación teórica determinada por Kanji & Galvan para distintos tipos de enrocados. Densidad Seca vrs el logaritmo de la Porosidad.

## Correlaciones de las propiedades de la roca analizada en Cerro Minas vrs los datos de análisis en las rocas del P.H Cariblanco

A continuación se muestran los resultados determinados por la ecuación experimental de estudios efectuados por el ingeniero Marco Tapia, del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en el P.H Cariblanco, asignando un mismo valor en la variable de absorción de las muestras analizadas en Cerro Minas, con el fin de determinar la resistencia a la compresión y conocer la variación que hay entre datos experimentales entre ambos estudios.

La ecuación experimental de la correlación de las rocas del Proyecto Hidroeléctrico de Cariblanco, mostrada en la Figura 2 en la sección de Antecedentes, corresponde a la siguiente:

➤ Lavas y Tobas:

$$qu = 82,605(Abs)^{-0,9233} \dots \dots \dots \text{Ecuación 29}$$

Donde:

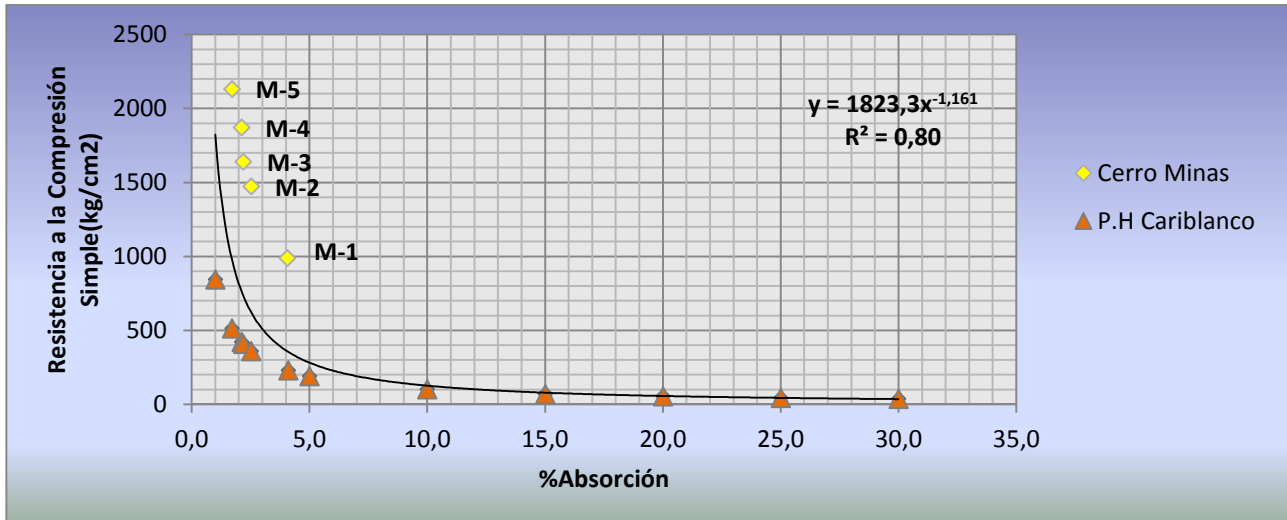
Abs: Absorción

qu: Resistencia a la Compresión simple.

**CUADRO 30. DATOS DE ESTUDIO EN CERRO MINAS CORRELACIONADOS CON LOS DATOS OBTENIDOS EN P.H CARIBLANCO**

| Muestras       | Resistencia a la Compresión Simple (kg/cm <sup>2</sup> ) | %Absorción (Abs) |
|----------------|--|------------------|
| M-1            | 987,39   | 4,06             |
| PH. Cariblanco | 231,076  | 4,06             |
| M-2            | 1472,16  | 2,52             |
| PH. Cariblanco | 358,916  | 2,52             |
| M-3            | 1638,78  | 2,19             |
| PH. Cariblanco | 408,578  | 2,19             |
| M-4            | 1871,16  | 2,12             |
| PH. Cariblanco | 421,018  | 2,12             |
| M-5            | 2129,91  | 1,71             |
| PH. Cariblanco | 513,430  | 1,71             |
| PH. Cariblanco | 842,571  | 1                |
| PH. Cariblanco | 190,655  | 5                |
| PH. Cariblanco | 100,533  | 10               |
| PH. Cariblanco | 69,139   | 15               |
| PH. Cariblanco | 53,011   | 20               |
| PH. Cariblanco | 43,141   | 25               |
| PH. Cariblanco | 36,457   | 30               |

El siguiente gráfico muestra la correlación existente de los datos mostrados en el Cuadro 23.



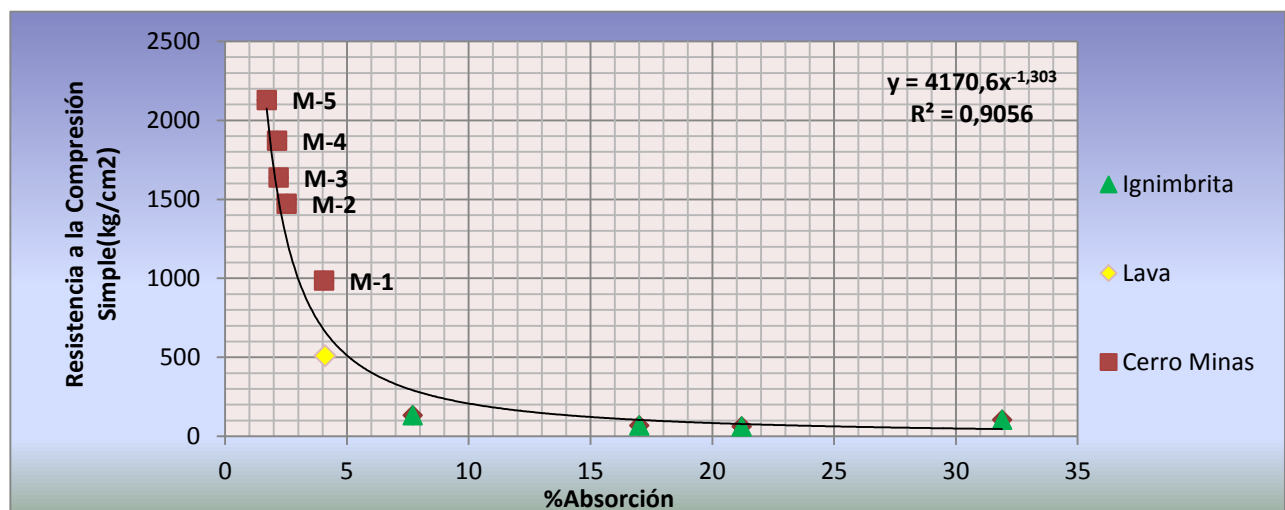
**Gráfico 19.** Correlación Resistencia a la Compresión Simple vs %Absorción, existentes entre resultados de estudio en Cerro Minas junto con los datos del estudio de Rocas de P.H Cariblanco.

## Correlaciones entre las propiedades de las rocas estudiadas en Cerro Minas vrs las rocas de Santa Ana y zonas cercanas del área de estudio de este proyecto

A continuación se muestran los datos de los resultados determinados para el estudio de rocas de Cerro Minas vinculado con los datos obtenidos del estudio de rocas blandas y moderadamente duras realizado en Santa Ana y

zonas cercanas del área de estudio de este proyecto, valores que corresponden al estudio de Karol Cruz, efectuado en el año 2005, con el fin de efectuar una caracterización geotécnica de rocas blandas del GAM.

| <b>CUADRO 31. DATOS DE ESTUDIO EN CERRO MINAS VINCULADOS CON LOS DATOS OBTENIDOS DE ESTUDIO DE ROCAS BLANDAS Y MODERADAMENTE DURAS</b> |            |            |  |
|--|------------|------------|--|
| Ubicación en GAM   | Muestreo   | %Absorción | Resistencia a la Compresión Simple (kg/cm <sup>2</sup> ) |
| Cerro Minas  | M-1        | 4,1        | 987  |
| Cerro Minas  | M-2        | 2,5        | 1472   |
| Cerro Minas  | M-3        | 2,2        | 1639   |
| Cerro Minas  | M-4        | 2,1        | 1871   |
| Cerro Minas  | M-5        | 1,7        | 2130   |
| Escazú   | Price Mark | 4,1        | 509,8  |
| Escazú   | Jaboncillo | 7,7        | 133,6  |
| Santa Ana  | Villa Real | 31,9       | 105,6  |
| Entre San Antonio y Lindora  | Electriona | 17         | 69,26  |
| Santa Ana  | KC8        | 21,2       | 62,63  |



**Gráfico 20.** Correlación Resistencia a la Compresión Simple vrs %Absorción, existentes entre resultados de estudio en Cerro Minas junto con los datos de estudio de Rocas Blandas y Moderadamente Duras en la zona de Santa Ana o cercanas a ella.

## Correlaciones entre las propiedades de la roca de estudio en Cerro Minas vrs las rocas analizadas de la formación Grifo Alto del GAM

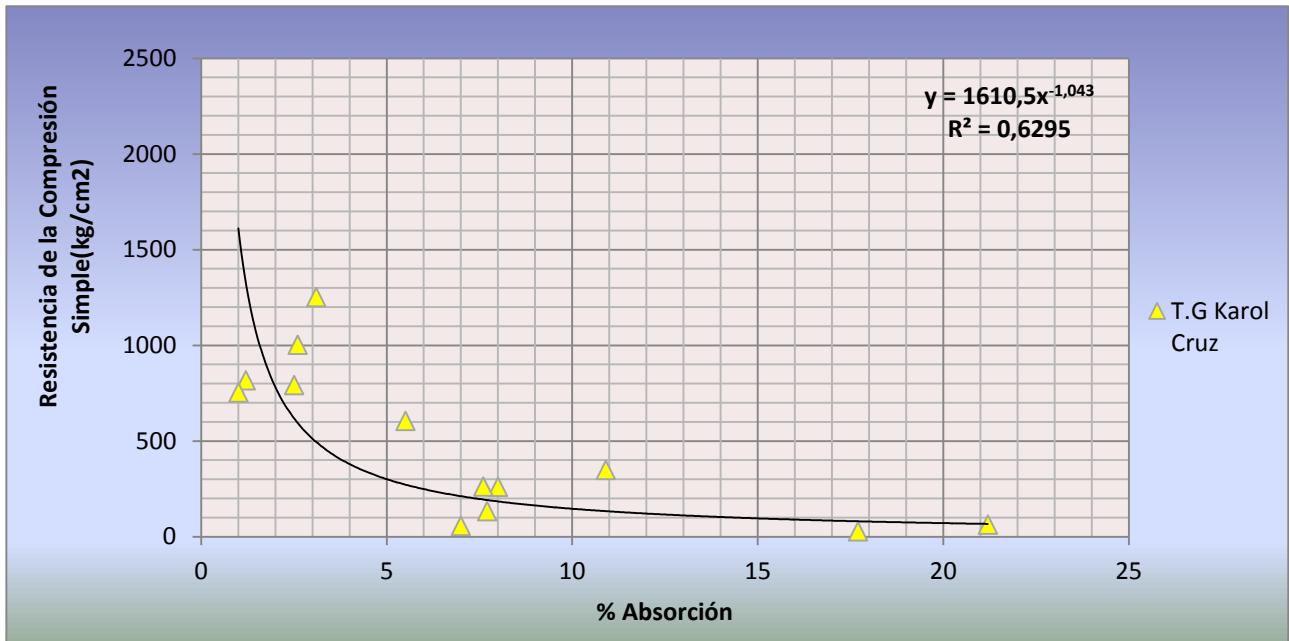
A continuación se presentan los valores del estudio de Karol Cruz, donde se analizan distintos muestreos en diversas zonas del GAM. Los valores mostrados en el siguiente cuadro corresponden únicamente a las rocas que son parte de la formación Grifo Alto, como es el caso

de Cerro Minas donde las rocas presentes en dicha cantera corresponden al mismo origen geológico. Se determina una correlación de los resultados obtenidos en este proyecto vinculado con los resultados del estudio efectuado por Cruz.

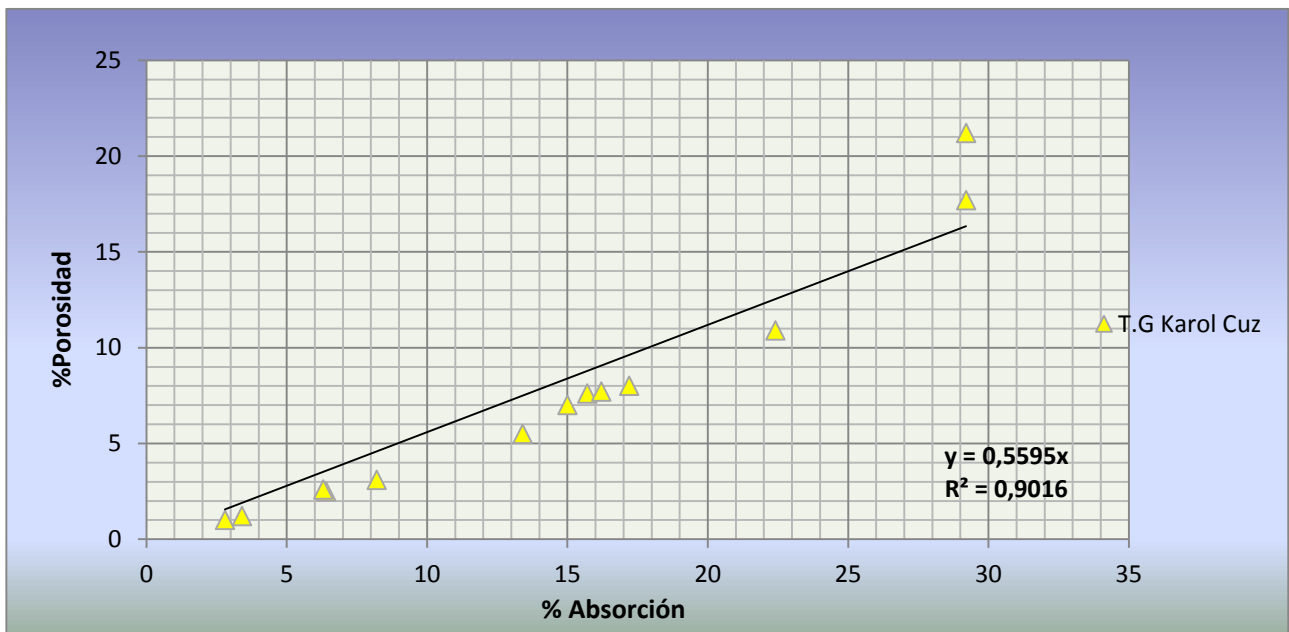
| <b>CUADRO32 .PROPIEDADES MECÁNICAS DE ROCA INTACTA DEL GRAN ÁREA METROPOLITANA ANALIZADAS POR KAROL CRUZ, QUE PRESENTAN UNA MISMA FORMACIÓN GEOLÓGICA DE CERRO MINAS</b> |           |            |        |      |                                    |                                    |
|--|-----------|------------|--------|------|------------------------------------|------------------------------------|
| Código   | Unidad    | Formación  | $\eta$ | Abs  | Resistencia a la Compresión Simple | Resistencia a la Compresión Simple |
|  | Geológica |            | (%)    | (%)  | (MPa)                              | (Kg/cm <sup>2</sup> )              |
| KC8  | TQv       | Grifo Alto | 29,1   | 21,2 | 6,14                               | 62,628                             |
| KC12   | TQv       | Grifo Alto | 17,2   | 8    | 25,46                              | 259,692                            |
| KC13   | TQv       | Grifo Alto | 6,4    | 2,5  | 77,63                              | 791,826                            |
| KC14   | TQv       | Grifo Alto | 22,4   | 10,9 | 34,15                              | 348,33                             |
| KC15   | TQv       | Grifo Alto | 15     | 7    | 5,48                               | 55,896                             |
| KC16   | TQv       | Grifo Alto | 13,2   | 5,5  | 59,24                              | 604,248                            |
| KC17   | TQv       | Grifo Alto | 3,4    | 1,2  | 80,17                              | 817,734                            |
| KC18   | TQv       | Grifo Alto | 2,8    | 1    | 73,8                               | 752,76                             |
| KC19   | TQv       | Grifo Alto | 8,2    | 3,1  | 122,7                              | 1251,54                            |
| KC20   | TQv       | Grifo Alto | 15,7   | 7,6  | 25,7                               | 262,14                             |
| KC21   | TQv       | Grifo Alto | 6,3    | 2,6  | 98,35                              | 1003,17                            |
| Cerro Minas  | TQv       | Grifo Alto | 29,2   | 17,7 | 2,64                               | 26,928                             |
| Jaboncillo   | TQv       | Grifo Alto | 16,2   | 7,7  | 13,1                               | 133,62                             |

En los siguientes gráficos se muestran las correlaciones de Resistencia a la Compresión Simple vrs %Absorción (Gráfico 19) y %Absorción vrs %Porosidad (Gráfico 20), para las muestras analizadas por Karol Cruz, con el fin de conocer la relación entre sus datos y

valorarlos a la hora de vincularlos con el presente estudio en Cerro Minas, contemplando que ambos poseen una misma formación geológica, pero con características físicas y parámetros mecánicos variables.

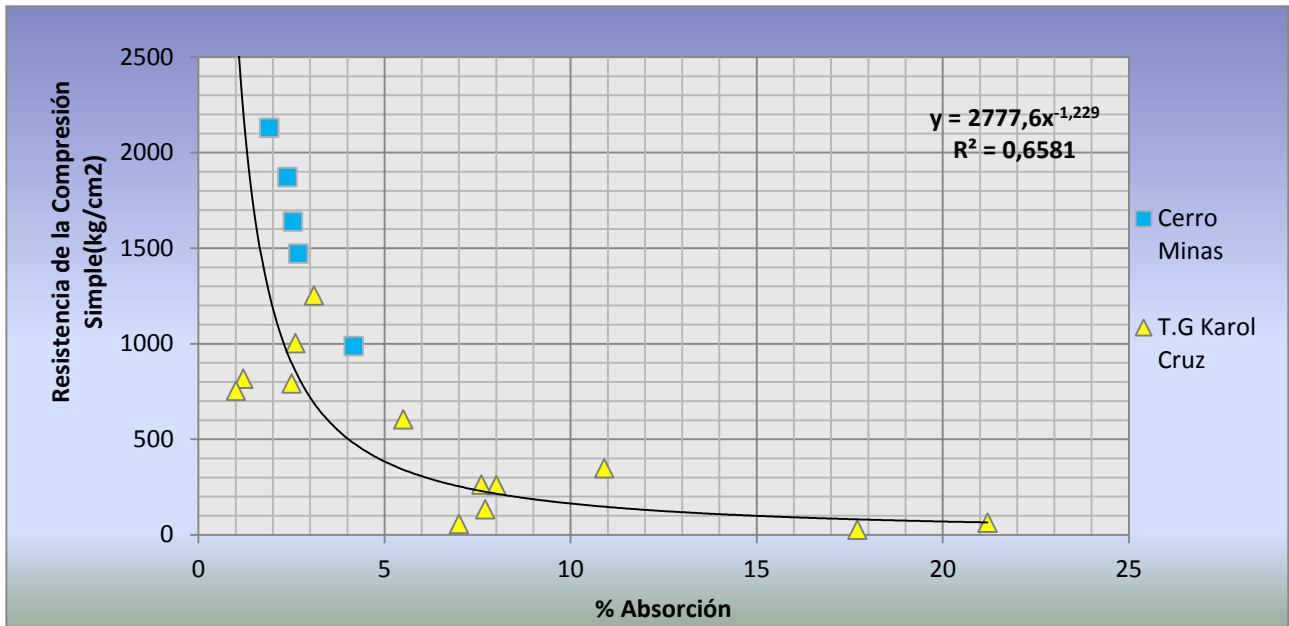


**Gráfico 21.** Correlación Resistencia a la Compresión Simple vs %Absorción, existentes entre los estudios de Karol Cruz de Formación Grifo Alto del GAM.

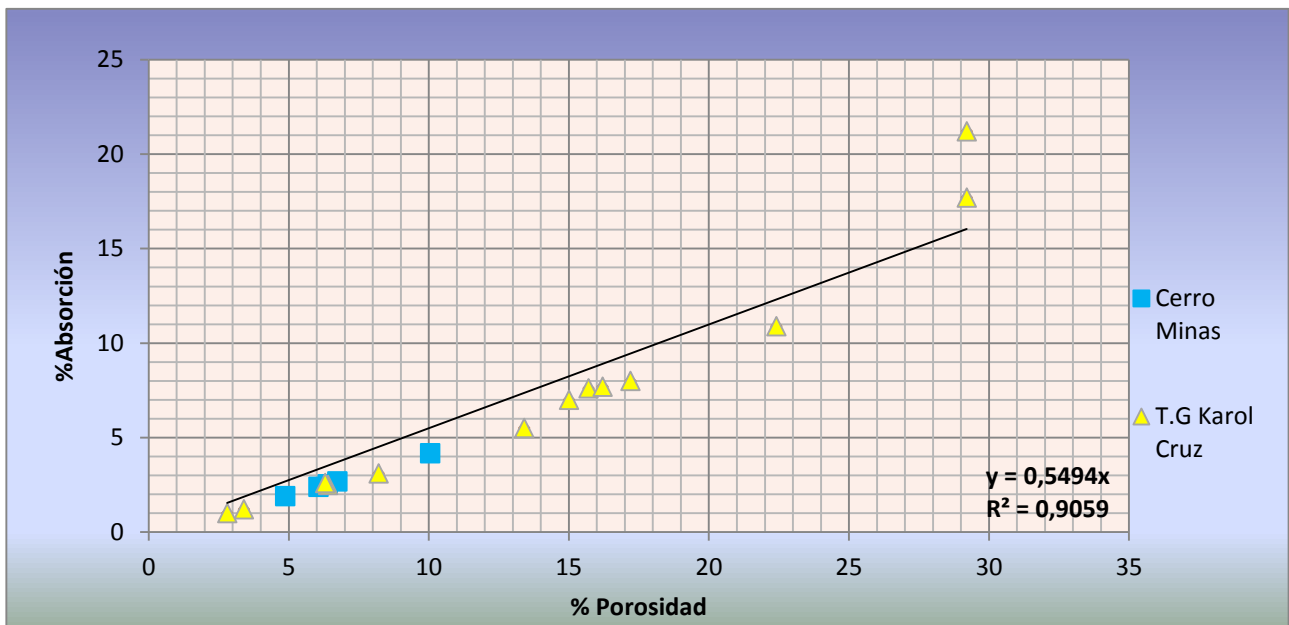


**Gráfico 22** Correlación Resistencia a la Porosidad vs %Absorción, existentes entre los estudios de Karol Cruz de Formación Grifo Alto del GAM





**Gráfico 23.** Correlación Resistencia a la Compresión Simple vs % Absorción, existentes entre resultados de estudio en Cerro Minas junto con los datos de estudio de Karol Cruz, resultados que corresponden a un Origen Geológico de Formación Grifo Alto.



**Gráfico 24.** Correlación % Porosidad vs % Absorción, existentes entre resultados de estudio en Cerro Minas junto con los datos de estudio de Karol Cruz, resultados que corresponden a un Origen Geológico de Formación Grifo Alto.

En el siguiente cuadro se muestra un resumen de los rangos de los parámetros obtenidos por muestra analizada

| <b>CUADRO 33. RESUMEN DE PARÁMETROS DETERMINADOS EN EL PRESENTE ESTUDIO RESPECTO A CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS Y GEOLÓGICAS</b> |       |                  |          |           |           |  |                   |
|--|-------|------------------|----------|-----------|-----------|--|-------------------|
| Código   | Clase | Litología        | Abrasión | Absorción | Porosidad | Resistencia a la compresión Simple (kg/cm <sup>2</sup> ) | Dureza ISRM(1981) |
| M-5  | A     | Andesita         | <15      | <2        | <5        | 2500 a 2000  | Muy Dura A        |
| M-4 y M-3  | B     | Andesita Fluidal | 15 a 20  | 2 a 2,5   | 5 a 7     | 2000 a 1500  | Muy Dura B        |
| M-2  | C     | Andesita Fluidal | 20 a 25  | 2,5 a 3   |           | 1500 a 1000  | Muy Dura C        |
| M-1  | D     | Andesita Fluidal | 25 a 35  | 3 a 4     | 7 a 10    | 1000 a 500   | Dura              |

### **Programa de ejecución para estimar las características físicas, parámetros mecánicos y aplicaciones de los materiales rocosos de Cerro Minas**

El programa que se muestra a continuación se desarrolla con el fin de efectuar una evaluación más simple de los materiales rocosos. Este fue realizado mediante las correlaciones determinadas con anterioridad, correlaciones que corresponden únicamente al estudio propio en Cerro Minas. La finalidad de la ejecución de esta herramienta es mejorar la evaluación existente de los materiales, así a futuro; no será necesario efectuar ensayos más costosos y extensos, pero se deberá complementar los resultados de este estudio con un mayor número de muestreos de la cantera y así poder caracterizar el sitio en su totalidad, garantizando resultados confiables en la determinación de las correlaciones.

Esta herramienta será una primera etapa que con el tiempo deberá ser complementada, para garantizar resultados con un mayor porcentaje de confiabilidad.

Este programa presenta dos pestañas: la primera corresponde a cálculos que arroja una estimación de los resultados de las diferentes pruebas analizadas de los materiales rocosos, con la simple introducción del resultado de la prueba de absorción; la segunda establece las aplicaciones en los que el agregado puede utilizarse según los resultados obtenidos, estos cumpliendo especificaciones vigentes en Costa Rica u otras referencias bibliográficas.



Figura 30. Programa ejecutable que estima características físicas y parámetros mecánicos de los materiales rocosos de Cerro Minas.

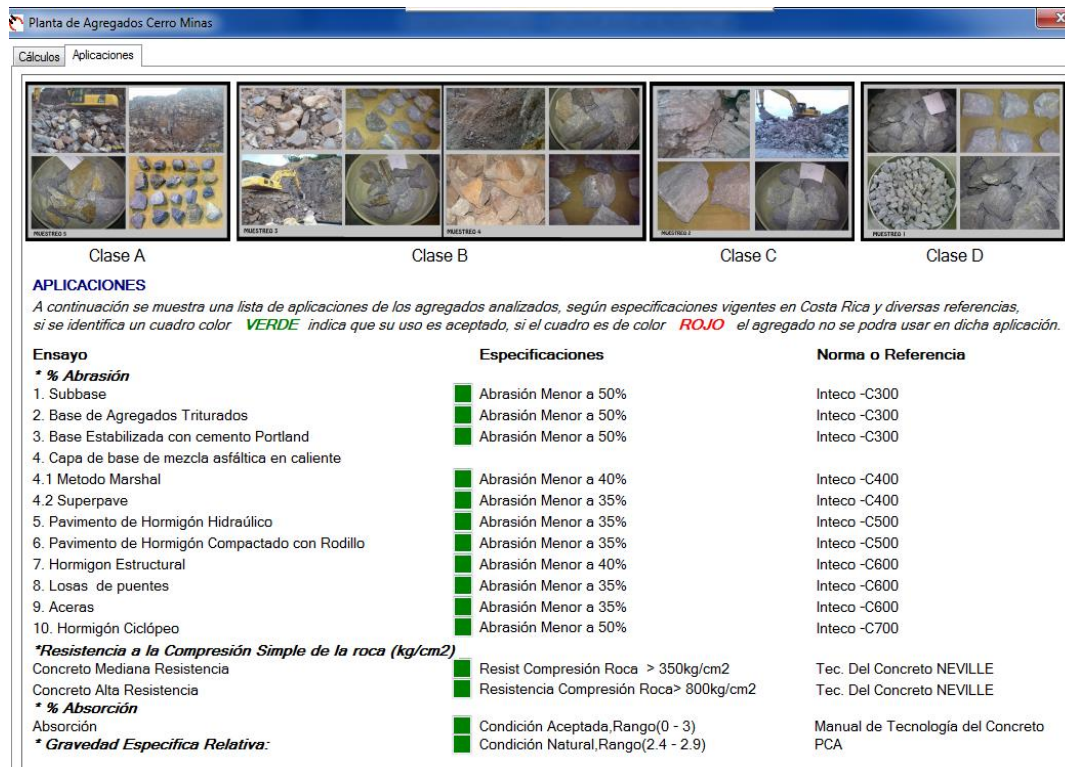


Figura 31. Programa ejecutable que determina una lista de aplicaciones del agregado, según su resultado de características físicas y mecánicas, así como sus condiciones aceptables según referencias bibliográficas o especificaciones vigentes en Costa Rica.

# Análisis de los resultados

Durante la presente investigación los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas para este estudio, fueron utilizados como parámetros para establecer correlaciones entre características físicas y mecánicas de los materiales rocosos de Cerro Minas. Así a futuro; se podrá reducir el número de ensayos. La prueba más simple analizada es la prueba de absorción, cuyo resultado se encontrará vinculado a diversos parámetros para estimar características físicas y mecánicas. La absorción fue el parámetro base del estudio donde en su metodología dio buenos resultados para rocas duras, sin embargo es importante validar este parámetro en la metodología con rocas blandas.

Dado que no es posible muestrear la totalidad del material obtenido en cada proceso de voladura y de apilamiento del producto terminado, se tomó un conjunto de muestras aleatorias con el fin de que el muestreo fuera representativo del total, garantizando que el material muestreado en la voladura corresponda al mismo, luego de que la roca fuera pasada por el proceso de trituración y criba.

A las rocas analizadas se les asignó un código según el muestreo efectuado (M-1, M-2, M-3, M-4, M-5), donde cada número representa una muestra distinta, pero con dos diferentes condiciones de obtención del material para cada una de ellas.

Se realizó una valoración de los resultados de las pruebas de laboratorio de absorción, abrasión, porosidad y gravedad específicas, entre las muestras obtenidas In situ (Voladura) y el Producto Terminado (Quebrador) correspondiente, con el fin de validar el comportamiento entre estos, contemplando que en teoría deberá ser el mismo dato para ambos análisis, pero por diversos factores se presentaron variaciones que serán analizadas a continuación.

En los Cuadros 12 y 13 se muestran los resultados de gravedades específicas y los porcentajes de absorción de las cinco muestras estudiadas. El Cuadro 12 corresponde a las muestras obtenidas propiamente de la voladura, y

el Cuadro 13 se refiere a las rocas del producto terminado del Quebrador. En ambos cuadros se nota una relación inversa entre la absorción y gravedad específica; esto es; a mayor gravedad específica seca la absorción es menor, lo cual corresponde a la condición idónea.

Según muestran los resultados encontrados en estos dos cuadros se observa que la muestra que presenta menor absorción corresponde a la M-5 y la de mayor porosidad permeable es la M-1. Este comportamiento es ascendente, es decir; que según ascienda el número del código de las muestras se presentará un comportamiento de disminución en su absorción. Esta misma conducta se presentó con la gravedad específica seca, conforme se iba aumentando el número del código se iban encontrando rocas con mejor calidad, es decir; gravedades específicas más altas.

Se procedió a graficar los resultados Absorción Voladura vrs Absorción Quebrador (Gráfico 3), con el fin de validar los datos obtenidos. La línea roja en el gráfico representa el comportamiento esperado  $x=y$ . Sin embargo, los datos obtenidos se encuentran debajo de esta línea, presentando una tendencia casi lineal. La ecuación que los correlaciona corresponde a una regresión cuadrática muy cercana a la línea teórica. La desviación de los datos son menores a 0,25% (Cuadro 14). Dicho porcentaje es aceptable por ser tan bajo. Al valorar estas rocas del Macizo Rocosa se pudo establecer que los datos son concisos entre sí, a excepción de los datos estimados de resistencia a la compresión obtenidos mediante el ensayo: Esclerómetro y Carga Puntual, por lo cual es necesario valorar estos resultados por el ensayo de resistencia a la compresión Uniaxial. En dicha gráfica se observa un coeficiente de correlación de  $R^2=99,5\%$  lo que corrobora lo descrito anteriormente. Este coeficiente de correlación presenta un porcentaje muy alto, el cual permite valorar que los resultados determinados son confiables para el análisis de esta prueba.

En el Cuadro 15 se establece el porcentaje promedio de absorción de las muestras analizadas. Este dato corresponde a un 2,6 %, presentando una condición aceptada respecto a

la teoría de Mena, donde especifica en su *Manual de Tecnología del Concreto* que si las rocas son de muy buena calidad, la absorción del agregado no suele exceder del 3%. Para este estudio cuatro muestras obtuvieron porcentajes de absorción menor a 3%, a excepción de la muestra M-1, que presentó un valor de 4,1%.

En el Cuadro 7, ubicado en el Marco Teórico, se observa una clasificación del agregado según el % de absorción. No obstante, en la presente investigación se estudian las rocas andesitas. Al no encontrarse este tipo de roca dentro de esta clasificación, el ingeniero Laporte comenta que una andesita sana se puede comportar como un basalto o una andesita muy alterada como una ignimbrita. Laporte en su artículo titulado *Características y Comportamiento de los Agregados en Costa Rica* obtiene resultados de rocas basalto en el rango de 2 a 4%, con un porcentaje promedio de 2,6%, existiendo una diferencia de 0,1% respecto al promedio de este estudio.

La absorción es quizás la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben agua directamente en la mezcladora, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla, por lo cual el control de este parámetro es indispensable.

Al valorar la gravedad específica se obtiene un promedio de  $G_{bs}=2,5$ ,  $G_{sss}=2,6$  y  $G_s=2,7$ . Según la referencia bibliográfica *Diseño y control de mezclas de concreto (PCA)*, la mayoría de los agregados naturales tienen masas específicas relativas que varían de 2,4 a 2,9. Dicho estudio cumple dentro este rango. Si bien el peso específico aparente ( $G_s$ ) se puede tomar como indicador de la calidad del agregado, los datos obtenidos muestran que a iguales valores de pesos específicos aparentes, la absorción es diferente, por ello, el peso específico bruto seco ( $G_{bs}$ ), es un mejor indicador de la calidad del agregado para este análisis.

Al cabo de determinar los parámetros de gravedad específica de los materiales, se corrobora que las rocas analizadas obtenidas in situ, propiamente del quebrador, sí tienen valores semejantes entre sí, datos que se detallan en el Cuadro 12 y 13.

Los resultados obtenidos de peso volumétrico seco de los materiales analizados andan en el rango de 23,58 kN/m<sup>3</sup> a 25,05 kN/m<sup>3</sup>. Esta propiedad de los agregados resulta

ser de vital importancia, ya que si estos presentan una buena densidad ( $\geq 2.25$ ), el concreto resultante podría ser mayor o igualmente denso, lo cual tendrá una influencia directa sobre el peso volumétrico y la resistencia a la compresión del mismo. Al no presentar gravedades específicas bajas se espera que el agregado no sea muy poroso y débil, ni con un alto porcentaje de absorción. Este comportamiento fue válido en para este estudio, ya que los porcentajes de absorción son aceptables y la porosidad obtenida corresponde a la de una roca dura. Los resultados de este parámetro se encuentran en el Cuadro 16.

La determinación de las porosidades de las muestras analizadas se encuentra en el Cuadro 17. Su correspondiente Gráfico 5, muestra el comportamiento de los resultados de porosidad entre las muestras del quebrador vrs voladura. En este gráfico se presenta una tendencia línea que corresponde al comportamiento esperado. Sin embargo, esta relación entre los datos debería ser  $x=y$ . La línea roja representa la tendencia teórica. La línea de ajuste experimental entre los datos de estudio está muy cerca de la teórica con un coeficiente de correlación de 99%. Con este valor se puede concluir que la valoración de los resultados obtenidos de porosidad de las muestras analizadas es correcta. Los datos obtenidos tienen como máximo una porosidad de un 10%. Es importante controlar este parámetro porque afecta el comportamiento del concreto en dos posibles formas 1) el espacio de poros disminuye el volumen de sólidos en el agregado, 2) existe un espacio vacío dentro del agregado que permite el ingreso y retención de agua o sustancias agresivas.

González de Vallejo hace referencia a que la porosidad es la propiedad que más afecta a las características resistentes y mecánicas, siendo inversamente proporcional a la resistencia y a la densidad y directamente proporcional a deformidad. Al analizar los resultados (Véase este comportamiento en las gráficas 13 y 15) se obtiene que ambas presentan la misma tendencia, esto corrobora lo mencionado por González de Vallejo. En los gráficos se ilustra claramente cómo, a mayores porosidades, se obtienen menores resistencias a la compresión y menores pesos volumétricos secos, con coeficientes de correlación mayores a 0,98. Esto permite asegurar una relación existente entre los

resultados, permitiendo predecir un 98% los datos.

La prueba de abrasión de los materiales se realizó en la máquina de Los Ángeles y consistió en un tipo de prueba denominada Abrasión Tipo B. Los resultados obtenidos al realizar esta prueba, se resumen en los Cuadros 18 y 19 para la valoración de pérdida de desgaste para las muestras obtenidas tanto en voladuras como en el quebrador. En los resultados obtenidos se observa que su desviación es notable, esto debido a que el proceso de trituración fue distinto. Para la muestra de Producto Terminado el material pasó por un proceso de trituración y criba de la roca del quebrador de Holcim, dando como producto partículas con una graduación controlada, con forma angular y textura granular idóneas para la elaboración de concreto. Las muestras obtenidas in situ del material explotado por voladuras fueron fragmentadas mediante un triturador de mandíbula de la Escuela de Ingeniería en Materiales del ITCR, generando cantidades excesivas de partículas planas o elongadas. Se tomó esto como el principal factor por el cual la abrasión de las muestras in situ presentan mayor porcentaje, ya que se debe a que por su forma son partículas débiles, con mucha tendencia a fracturarse. En el Gráfico 4, se muestra la tendencia de los resultados, el comportamiento se esperaría que fuera lineal  $x=y$ , pero el hecho que las muestras presentaron un proceso de trituración diferente, es el principal factor por el cual no se dé esa conducta. En la gráfica se observa que la tendencia entre los datos es una ecuación lineal con un  $R^2=95\%$  el cual es un alto valor de correlación entre los datos. El menor porcentaje de desgaste corresponde a la M-5 con un 14,6% y un 23,8% como el porcentaje de mayor desgaste. Dichos resultados son considerados como un porcentaje apropiado en la práctica, ya que según las especificaciones de INTECO mostradas en los Apéndices se tiene que estos porcentajes que presentan las muestras de Holcim pueden ser aplicados para los distintos usos, por el hecho de que el menor puntaje permitido corresponde a un 35%. Es importante señalar que el resultado particular de la prueba de abrasión para una determinada fuente, depende de la formación de la roca madre en la naturaleza, que dará la dureza a los agregados y la posible rotura de sus partículas en sus planos de clivaje producto de su foliación, y esto se observa en el comportamiento

del macizo rocoso donde los porcentajes de pérdida de abrasión para las muestras de análisis es bajo, y a pesar de que la M-1 presenta el mayor porcentaje, este valor que obtiene es un valor aceptado en las distintas aplicaciones como agregado pétreo. Este factor cobra importancia cuando las partículas van a estar sometidas a un roce continuo como es el caso de pisos y pavimentos, para lo cual los agregados que se utilizan deben estar duros.

El ensayo de carga puntual se realiza con la finalidad de correlacionar los valores que se desprenden propiamente de este ensayo, con valores razonables que resultarían si se realizara un ensayo de compresión simple uniaxial. Este ensayo se emplea para tamaños nominales de los materiales de 1 ½ pulgadas y de 1 pulgada. En promedio, la resistencia a la compresión simple es de 20 a 25 el  $Is(50)$ . Para este estudio se utilizó un valor de 22,5 por ser el promedio de ambos datos.

Los valores arrojados de este ensayo se muestran en el Cuadro 23. En dicho estudio se analizaron, únicamente, las rocas obtenidas después de las voladuras, ya que eran las muestras que podían cumplir con el tamaño nominal, según especificaba la norma. Se realizaron al menos 20 determinaciones por tamaño nominal.

El valor promedio para el caso de la totalidad de las muestras corresponde a 1620  $kg/cm^2$ . En el Cuadro 22 se muestra la resistencia promedio para cada uno de los muestreos.

De acuerdo con los datos obtenidos y comparándolos con la clasificación de roca intacta a partir de la resistencia a la compresión de la International Society for Rock Mechanics, y otras fuentes que establecen clasificaciones de dureza según su resistencia a la compresión (Cuadro9), los resultados de cada muestreo en Cerro Minas se clasifican como rocas duras y muy duras.

Según especificación dada por González de Vallejo (Véase Cuadro 10) se conoce que para la roca Andesita se tendrá un rango de valores de 1000 a 5000  $Kg/cm^2$ , donde dichas muestras se encuentran en este rango, a excepción de la muestra M-1 que tuvo como resultado un valor de 987  $kg/cm^2$ , Sin embargo, dicho dato es muy cercano a 1000.

El ingeniero Marco Tapia estima que la resistencia a la compresión simple es 18 veces el  $Is(50)$ , basado en correlaciones realizadas en el

Instituto Costarricense de Electricidad para rocas que han sido estudiadas en Costa Rica, ICE, por el cual se procedió a determinar la resistencia a la compresión simple para las muestras de este estudio con este nuevo parámetro, dichos resultados se encuentran en el Cuadro 24.

Entre los datos analizados con este nuevo parámetro y los datos obtenidos mediante el valor de 22,5 Is(50), se tiene una desviación máxima de 301 kg/cm<sup>2</sup>, que corresponde para la M-5, como se muestra en el Cuadro 24. Para ambas determinaciones de resistencia a la compresión la roca es clasificada como roca dura y muy dura, según el Cuadro 9 del Marco Teórico.

La determinación de la resistencia a la compresión simple mediante el ensayo de carga puntual es considerada un medio simple, confiable y económico de medir la resistencia de la roca intacta y sus resultados son útiles para propósitos de clasificación de la roca. Los procedimientos para realizar este ensayo han sido desarrollados por la SIMR (Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas). Este parámetro es el indicador para establecer la dureza de las rocas Cerro Minas.

Otro método de estimación de la resistencia a la compresión simple de la roca es el esclerómetro. La dureza Schmidt está relacionada con la resistencia a la compresión de la roca intacta. El ensayo no es digno de confianza ya que se presenta una considerable variación en la resistencia estimada y, por lo tanto; se hace indispensable realizar varias lecturas en el mismo sitio.

El martillo es esencialmente un resorte cargado con un pistón. La punta del pistón se coloca contra la roca y luego se suelta el sujetador. Se mide la altura de rebote del pistón la cual es un indicador de la dureza de la roca. Se realiza luego una corrección que permite estandarizar los resultados basada en la orientación del martillo durante el ensayo. En función de la dureza de la roca, el muelle determinó valores de rebote. Estos valores obtenidos fueron correlacionados mediante un ábaco referencia de González de Vallejo (Figura 26) con la resistencia a la compresión simple, en función de la densidad de la roca y de la inclinación del plano ensayado. Para este ensayo se obtuvieron valores que sobrepasan los determinados en la prueba de carga puntual (Cuadro 26). Esta prueba fue efectuada con el fin de estimar una validación de las resistencias a la

compresión simple. El estudio de González de Vallejo no corresponde precisamente al presente estudio, por lo cual las correlaciones a las que el autor hace referencia no garantiza resultados con la mejor confiabilidad, ya que no existen estudios para afinar el gráfico. Para ello se deberá, a futuro, establecer correlaciones entre la resistencia a la compresión uniaxial y obtener así una valoración confiable de los resultados.

El ensayo de inmersión en etilenglicol fue realizado para las cinco muestras obtenidas in situ "Voladura". El fin de este ensayo es verificar la durabilidad de la roca presente en Cerro Minas. El objetivo de esta prueba fue comprobar si la roca tenía presencia de arcillas expansivas. Esto se puede observar en el Cuadro 21 en el cual se indica que no se presentó ninguna pérdida por dicha inmersión. Con el fin de validar esta prueba se efectuó un muestreo en un talud de Cerro Minas con presencia de roca arcillosa. Esta identificación se realizó con la ayuda de especialistas en geología, y para esta muestra se obtuvo un porcentaje de pérdida de 1,3 y se comprobó que las fuerzas expansivas de las arcillas excedían a las de cohesiones propias de la piedra, provocando la destrucción de la misma. Este hecho permitió observar que la resistencia mecánica de la roca era más débil cuando se producía la expansión de la arcilla que se encontraba alojada en la matriz textural, que en los casos en que se presentaba como relleno de vesículas.

## **Clasificación mineralógica**

Se establece, para el caso de las muestras analizadas, que todas corresponden a la formación grifo alto y al grupo de rocas ígneas. La clasificación mineralógica fue efectuada con base en el estudio preliminar realizado por la geóloga de Holcim, Diana Gamboa, quien analizó con sección delgada, 7 muestras de las más representativas del material presente en la cantera. Para el presente estudio se analizaron 5 muestras como se observa en el Cuadro 11. La muestra M-1 y M-5 coinciden con dos de las muestras del estudio realizado por la geóloga mencionada. Este hecho es muy importante ya que dichas muestras corresponden a la de menor y mayor calidad. La descripción de las tres muestras que no presentan un estudio petrográfico fueron caracterizadas bajo la tutela de la geóloga Gamboa, y se obtuvo que las



rocas que corresponden a M-3 y M-4 tienen una litología similar a la descrita en la M-5, razón por la cual estas últimas 3 muestras son las que presentan mejores características físicas y mecánicas, mayor resistencia y densidad seca, con menores % de absorción, abrasión, y porosidad.

La muestra M1 es más blanquizca por la presencia de calcita. El resto es más amarillento y rojizo (las otras 4 muestras) por la presencia de hierro. La M1 es de menor calidad (absorción de 4,2% y abrasión 24%). Si M1 no se incluyera, se tendrían correlaciones más precisas, pero no sería tan representativo por el poco número de datos obtenidos para el presente ensayo.

En general, las rocas ígneas poseen un grano de tamaño pequeño y alta resistencia. Esto permitió obtener tan buenos resultados en el estudio del macizo rocoso, ya que la influencia de la composición mineral tiene repercusión en las características de un agregado.

También, se presentan mineralizaciones principalmente de calcita que corresponden a la muestra M-1 y rocas con textura fluidal, producto del enfriamiento de la lava al fluir (M-2). Además se distingue, en algunas rocas, una patina de color rojiza a amarillenta debido al contenido de hematita y limonita respectivamente (M-3 y M-4). Y por último, la M-5 indica presencia de sericita y óxido de hierro.

Un aspecto importante dentro de esta clasificación fue que, conforme las muestras se iban analizando en una terraza inferior, estas obtenían mejores características, razón por la cual se encuentran mejores calidades en la base de la cantera y no se encuentran mayores alteraciones como en su parte superior.

Se concluye, por tanto, que los materiales para este estudio son de origen ígneo y de una gran calidad en cuanto a resistencia.

### **Relación entre los distintos parámetros analizados Voladura y Quebrador**

En el Gráfico 1 y 2 se notó que la gravedad específica seca (Gbs) tiene un comportamiento que tiende a ser lineal debido a la poca diferencia entre los valores de cada muestra.

Se muestra como las curvas de absorción, abrasión y porosidad tienen un patrón de

comportamiento similar. Asimismo, se puede ver que la curva de Gbs tiende al comportamiento de la curva de resistencia a la compresión, solo que por la escala del gráfico no se muestra claramente que el comportamiento de la gravedad específica seca es ascendente, según el número de las muestras.

Se observa un comportamiento semejante entre las pruebas de absorción, abrasión y porosidad, el cual es inversamente proporcional a la resistencia a la compresión y Gbs, conducta esperada según la teoría, ya que al tener mayor resistencia a la compresión de las rocas, se tendrá mayor dureza y se espera que la roca sea menos porosa, con un menor porcentaje de absorción y una menor pérdida por desgaste. Así mismo, se muestra que la roca con mejor calidad es la roca M-5. Esta calidad va descendiendo hasta llegar a la M-1, por lo que dicha muestra es la que presenta la menor calidad.

### **Correlación entre absorción vrs porosidad de muestras in situ “Voladura” y del producto terminado “Quebrador”**

Los datos graficados para esta correlación siguen muy de cerca la tendencia lineal entre los datos, con pocos especímenes que se alejan de ella. Esto indica que según el presente estudio la absorción refleja una buena aproximación de la porosidad de la roca intacta. Este comportamiento se puede observar en los Gráficos 8 y 9, donde en ambos casos se nota un coeficiente de correlación de 99,95 %, lo que implica que los resultados se pudieron predecir casi un 100%.

El ensayo de absorción es una prueba simple y fácil de realizar, por lo cual este parámetro es importante a la hora de predecir la calidad de las rocas. En ambos gráficos de esta correlación se obtiene la relación lógica y teórica entre la porosidad y absorción, donde para altos valores de porosidad se tienen altos valores de absorción.

Para este estudio se tienen rangos de porosidad que varían de  $4,4 < \eta < 10$  % y en los datos de absorción se tiene un rango de  $1,7 < Abs < 4,2$ %.

## **Correlación entre abrasión vrs absorción de muestras obtenidas del Quebrador**

Los datos graficados (Gráfico 10) para esta correlación asemejan una tendencia lineal para las últimas 4 muestras, ya que la muestra M-1 se encuentra más alejada de las demás. Este comportamiento se puede fundamentar por el hecho de que esta roca se diferencia de las demás por presentar una alteración fuerte de sericita y calcita, factor que influye en la calidad de la roca.

La línea de mejor ajuste de los datos corresponde a una ecuación lineal, con un coeficiente de correlación de un 92%, porcentaje que es alto y que permite estimar que es una buena tendencia, y que se podrán predecir los datos al 92%. Además, es importante recalcar que, según el gráfico, se hizo necesario complementar el análisis con un mayor número de muestras, y así obtener parámetros de absorción que se encuentren entre 2,5 a 4%, y corroborar la correlación determinada para este estudio, ya que dentro de ese rango no se presentó ninguna muestra durante el desarrollo del mismo. Los datos graficados de absorción se presentan en el Cuadro 13 y la prueba de abrasión corresponde al Cuadro 19.

## **Correlación entre abrasión vrs absorción de muestras obtenidas in situ “Cerro Minas”**

Los datos graficados (Gráfico 11) para esta correlación, permiten observar una tendencia lineal. La línea de mejor ajuste de los datos corresponde a una regresión lineal con un coeficiente de correlación de un 98,11%, porcentaje que es alto y que permite estimar que es una buena tendencia, por lo que se podrán predecir los datos casi al 100%. El comportamiento de los datos, según el gráfico, es el esperado, ya que teóricamente al aumentar el porcentaje de desgaste se tendrán absorciones mayores, conducta que se obtuvo en los resultados. Los datos graficados de absorción se presentan en el Cuadro 12 y la prueba de abrasión corresponde al Cuadro 18.

## **Correlación entre resistencia a la compresión simple vrs absorción de muestras in situ “Cerro Minas”**

El gráfico 14 muestra la relación lógica esperada al graficar la resistencia a la compresión vrs absorción. Según este gráfico, se puede observar cómo los datos se encuentran muy cerca de la curva de mejor ajuste, que para este caso corresponde a una regresión potencial. Aunque el comportamiento que se observa es casi lineal, esta tiene un coeficiente de correlación de 98,3%. Este valor se aproxima a un 100% por lo que se puede concluir que existe una correlación entre las pruebas. Se observa claramente el comportamiento; donde: conforme se aumenta la absorción se produce una disminución de la resistencia a la compresión. En ese mismo gráfico se presentan cuatro muestras con porcentajes de absorción menores a 2,5%, y un valor alejado, el cual corresponde a la M-1 que posee una absorción de 4%. Es importante observar cómo este valor sobrepasa el rango de absorciones aceptables, es decir el 3%, y aun así se obtienen resistencias a la compresión que determinan a la roca como dura, según lo establece el ISRM, 1981. Es esencial validar estas resistencias determinadas por carga puntual, con la prueba uniaxial, para garantizar que estas correlaciones son confiables y certificar si mantienen la misma tendencia, tanto para absorciones como para la resistencia a la compresión de la roca intacta.

## **Correlación entre resistencia a la compresión simple vrs porosidad de muestras in situ**

Los datos que establecen esta correlación (Véase Gráfico15) siguen muy de cerca la curva de mejor ajuste, que para este caso corresponde a una regresión potencial, pero el comportamiento a simple vista se observa que es casi lineal, parte de este comportamiento es al poco número de muestras analizadas. Esta correlación presenta la relación esperada entre la resistencia a la compresión vrs porosidad, al igual como se presenta en el gráfico sobre la resistencia a la compresión vrs absorción. Esto se debe a la relación que existe entre la absorción y la porosidad. Si el material es muy poroso, es por

consecuencia muy absorbente. Se cumple que, conforme la resistencia baja la roca, se da un aumento en la porosidad de la roca.

Se presenta, entonces, un coeficiente de correlación de un 98,3%, el cual corresponde a un porcentaje alto. Esto permite concluir que existe una correlación entre las pruebas.

Los datos graficados de porosidad se presentan en el Cuadro 17 y la prueba de resistencia a la compresión en el Cuadro 23.

### **Correlación entre resistencia a la compresión simple vrs abrasión de muestras “Cerro Minas”**

Al correlacionar los datos de resistencia a la compresión simple vrs abrasión (Véase Gráfico 16), se logra el comportamiento deseado, el cual corresponde a un comportamiento lineal con un coeficiente de correlación de 94,63%. Dicho coeficiente es alto y permite validar que existe una relación entre los resultados de ambas pruebas. El comportamiento que se muestra es: conforme disminuye la resistencia a la compresión simple aumenta el porcentaje de pérdida por abrasión.

Al graficar los resultados se usaron los datos de pérdida por abrasión obtenidos en el quebrador. Esto por el hecho de que las rocas que fueron utilizadas como agregado pétreo presentaron el desgaste arrojado de esta condición y no la de la voladura que fue fragmentado por un triturador de mandíbula, generando mayores porcentajes de desgaste.

### **Correlaciones de las propiedades de la roca analizada en Cerro Minas vrs los datos teóricos de M.A Kanji y V.R Galván Leivano**

Los datos obtenidos por Milton Kanji corresponden a materiales muy distintos que abarcan en su correlación: rocas, suelos duros cristalinos, rocas blandas intermedias, y productos de rocas duras meteorizadas entre otros de diferente tipo y origen.

A continuación se describen las correlaciones teóricas determinadas por el estudio de Milton Kanji & Galvan y vinculadas a los datos de esta investigación.

### **Porosidad vrs absorción**

Mediante la ecuación teórica (Ecuación 27) determinada por Kanji, se asignan los mismos valores de la variable de porosidad de las muestras analizadas en Cerro Minas. Esto para determinar la absorción y conocer la variación que hay entre datos experimentales y teóricos. Este comportamiento se muestra en el Gráfico 17, donde se puede observar una tendencia lineal con un coeficiente de correlación de 0,9989 lo que implica que este valor es casi 1, y permite concluir que los resultados determinados en Holcim son confiables ya que se ajustan casi a un 100% al estudio teórico determinado por Kanji. Es importante observar en la Figura 27, cómo el comportamiento dentro del círculo rojo; el cual corresponde a los datos de este estudio, presentan un comportamiento lineal al igual que la Gráfica 17. Dicha representación abarca únicamente el rango de resultados obtenidos en el estudio.

También se observa cómo para porcentajes de porosidad de igual magnitud a los teóricos de Kanji, se obtiene una desviación de absorción de 0,03% respecto a la absorción teórica.

### **Peso volumétrico seco vrs porosidad**

Estudios efectuados por Milton.A. Kanji y V.R. Galván Leiviano determinan una correlación entre la porosidad y el peso volumétrico seco en diferentes tipos de rocas. En la Figura 28 se destaca el rango donde se encuentran los resultados de las rocas intactas analizadas en Cerro Minas.

Se asignaron a la ecuación teórica, los mismos resultados obtenidos en la prueba de porosidad de este estudio, con el fin de determinar el peso volumétrico seco de la roca, y comparar tanto los resultados experimentales con los datos teóricos establecidos por la Ecuación 28. La relación fue la esperada: a mayor porosidad menor va ser el peso volumétrico seco de la roca. Es importante recalcar que en este gráfico, Milton Kanji cometió un error a la hora de establecer la correlación de dicho esquema, ya que presenta las variables en función inversa. Por lo tanto, para este estudio se trabajó con la

correlación modificada correctamente, donde  $y = \gamma_{seca}$  y  $x = \eta$ .

Al correlacionar los resultados experimentales con los datos teóricos (Gráfico 18), se observa que se mantiene la tendencia lineal teórica entre los resultados, con un  $R^2 = 92,53\%$ , lo que garantiza que sí existe una relación entre ambos resultados del presente estudio. Esto garantiza que los resultados obtenidos de porosidad y el peso volumétrico seco en Cerro Minas son confiables.

### **Peso volumétrico seco vrs el logaritmo de la porosidad**

Milton Kanji establece la relación del peso volumétrico seco vrs el logaritmo de porosidad para los distintos tipos de roca. En la Figura 29 se muestra que, para porosidades menores a un 10%, existe una muy pequeña variación entre el peso volumétrico de la roca. El peso volumétrico seco solo presenta un incremento significativo a porosidades mayores a 10%. Kanji hace referencia a que rocas con porosidades mayores a 10% corresponden a rocas blandas y suelos duros. La Figura 29 muestra un cuadro en rojo, en este se observan los correspondientes resultados para Cerro Minas, donde la porosidad máxima es 10% y los pesos volumétricos andan en el rango de 23,5 a 25  $\text{kN/m}^3$ . Con esto se valida que ambos resultados se ajustan a la curva teórica, por lo tanto; los valores obtenidos para ambas pruebas son confiables.

### **Correlaciones de las propiedades de la roca analizada en Cerro Minas vrs los datos de análisis en las rocas del P.H Cariblanco**

En el Gráfico 19 se muestra la correlación de resistencia a la compresión vrs el % de absorción, entre resultados de Cerro Minas y un conjunto de datos determinados por una correlación ya existente, de un estudio preliminar efectuado en rocas del P.H Cariblanco.

En dicho estudio, realizado por el Departamento de Geotecnia del ICE, se indica que las resistencias a la compresión fueron determinadas por el ensayo uniaxial, en cambio para el análisis de las rocas de Cerro Minas se

está utilizando la determinación de esta resistencia por medio de la carga puntual.

En ambos análisis hay presencia de lavas. Pero según muestra el Gráfico 19, las muestras analizadas en Cerro Minas con un mismo porcentaje de absorción, poseen mayor resistencia a la compresión que las rocas de Cariblanco. Un factor importante por el cual se obtuvo este comportamiento es porque el ensayo de resistencia uniaxial presenta mayor confianza que los obtenidos por carga puntual, al no existir un parámetro de la prueba uniaxial de las muestras de Holcim, no se puede concluir con toda confiabilidad que las resistencias obtenidas son las correctas y que no se encuentran sobreestimadas.

En dicho cuadro se presenta la tendencia esperada, donde a mayores porcentajes de absorción se tendrán menores resistencias a la compresión. Dicho comportamiento es notable tanto para las muestras de Holcim como para las de Cariblanco.

### **Correlaciones entre las propiedades de las rocas estudiadas en Cerro Minas vrs las rocas de Santa Ana y zonas cercanas del área de estudio de este proyecto**

En el Gráfico 20 se observa la correlación existente entre los resultados de la prueba de resistencia a la compresión simple vrs absorción, datos determinados para el estudio de rocas de Cerro Minas vinculado con los datos obtenidos del estudio de rocas blandas y moderadamente duras de estudios realizados en Santa Ana y zonas cercanas de Cerro Minas. Los sitios de préstamos analizados fueron Escazú, Santa Ana y Lindora. Se observa cómo los datos obtenidos con este estudio, se ajustan a la curva de mejor ajuste, constituyendo una buena tendencia de los datos obtenidos por los estudios de Karol Cruz, quien estudió las rocas con menor resistencia a las de Cerro Minas.

En la curva de mejor ajuste se observa una tendencia casi lineal en los datos obtenidos con el presente estudio. Dichos datos se encuentran muy cerca a la línea, a excepción de la muestra M-1, que tiende a alejarse un poco de la curva, pero de igual forma se determina un coeficiente de correlación de 0,9 el cual es un valor alto y

cercano a 1, garantizando con esto que existe una buena relación entre pruebas.

En esta correlación se obtuvo, con respecto al comportamiento idóneo, que al disminuir la resistencia a la compresión se va aumentando el porcentaje de absorción, esto porque el material, al ser menos denso, presentara mayores porosidades.

### **Correlaciones entre las propiedades de la roca de estudio en Cerro Minas vrs las rocas analizadas de la formación Grifo Alto del GAM.**

En el Cuadro 32 se presentan los valores del estudio de Karol Cruz, donde analiza distintos muestreos en diversas zonas del GAM, que corresponden a las rocas que son parte de la formación Grifo Alto, como es el caso de Cerro Minas, donde las rocas presentes en dicha cantera corresponden al mismo origen geológico. En el Gráfico 23 se observa una correlación de los resultados obtenidos en este proyecto vinculados con los resultados del estudio de Cruz que muestra el mismo comportamiento lógico, donde conforme se disminuye la resistencia a la compresión se tienen mayores porcentajes de absorción. Esto principalmente para las rocas moderadamente dura y rocas blandas, es decir; rocas con resistencias menores a 500 kg/cm<sup>2</sup>. El coeficiente de correlación para este gráfico es de un 65%, es decir; que los datos no se encuentran cercanos a la línea de mejor ajuste. La correlación de únicamente los resultados del estudio de Cruz, no presentó un alto coeficiente de correlación, ya que, como se muestra en el Gráfico 21, propiamente los datos de Cruz no presentaban una buena relación, por lo tanto se puede obtener un R<sup>2</sup> bajo al correlacionar los datos de este estudio junto con los de Cruz. Sin embargo, se muestra cómo la curva presenta el comportamiento esperado.

Así mismo se graficó la absorción vrs la porosidad vinculando los datos obtenidos para Cerro Minas junto con los del estudio de Cruz y se obtuvo un R<sup>2</sup>= 90. Esto implica que se logró una buena relación de los datos. Por consiguiente, se puede predecir con confiabilidad mediante la correlación, un 90% de los resultados. La línea de mejor ajuste corresponde a una regresión lineal con un punto de

intersección de 0, lo cual es lo razonable ya que para porosidades de 0% la absorción va ser 0%.

Al comparar este comportamiento con los datos de la Figura 27, que presenta el comportamiento teórico de estos dos parámetros, se observa cómo la tendencia lineal corresponde a la regresión teórica. En el gráfico teórico de Kanji, para este mismo rango de parámetros, se presenta una tendencia casi lineal, lo cual permite garantizar que la tendencia de dicho gráfico es correcta.

### **Comparación de resultados del presente informe respecto a rangos de estudios previos de características de los agregados**

En el Cuadro 1 de la sección de Antecedentes se observan las características del agregado grueso, según el artículo del ingeniero Gastón Laporte quien establece rangos de variación de las principales características para rocas con distinta ubicación y descripción geológica. Dichos resultados fueron utilizados para la valoración de los datos obtenidos con este estudio. Se muestra cómo los resultados de Cerro Minas G<sub>bs</sub>=2,5 y G<sub>sss</sub>= 2,6 equivalen a los valores promedios correspondientes a los parámetros para la clasificación de lavas indicadas en dicho artículo. Según Laporte las lavas presentan porcentajes de absorción de 2,8 a 3,6. En el presente estudio se obtuvieron porcentajes de absorción de 1,7 a 4,1. El rango obtenido en el presente estudio corresponde a una diferencia muy poca, a una desviación de 1%.

Para la determinación de abrasión los datos de este estudio se encuentran dentro del rango presentado por Laporte. La resistencia a la compresión de las rocas este mismo autor las describe como rocas duras según la ISRM, pero para el estudio en Cerro Minas además de rocas duras se tenían rocas muy duras principalmente. Dicho parámetro es el más significativo a la hora de comparar los resultados del presente estudio respecto del de Gastón Laporte.

El estudio de características de los agregados nacionales de la región central se efectuó en el año de 1993, con muestreos en Cerro Minas, con el fin de determinar diferentes características físicas y mecánicas de los

agregados. Este estudio es muy importante ya que se efectuó una validación de los resultados, con el fin de correlacionar los datos obtenidos en este proyecto y verificar si existen variaciones significativas en el tiempo, respecto a las características físicas y mecánicas de las rocas de la cantera. En el Cuadro 27 se observa, cómo la variación en el tiempo respecto de los resultados es poco. Por lo tanto, es necesario analizar un mayor número de muestras para caracterizar la totalidad de la cantera. Sin embargo, se efectúa esta comparación como estimación de las características de Cerro Minas.

Ahora bien, comparando los resultados, se obtuvo que el Gbs de este estudio presenta una diferencia respecto a la publicación de 0,08, el Gsss de 0,05, la absorción de 1,3% y por último la abrasión de 0,2%. De lo anterior se deduce que los datos presentan una variación muy pequeña, garantizando que los resultados obtenidos en dicho estudio son confiables.

### **Programa de ejecución para estimar las características físicas, parámetros mecánicos y aplicaciones de los materiales rocosos de Cerro Minas.**

Después de la determinación de las correlaciones y valoraciones de los resultados obtenidos en este estudio, se procedió a establecer un programa con el fin de estimar las características físicas y parámetros mecánicos, mediante los muestreos analizados.

Primeramente se elige la prueba que va a correlacionar los diversos resultados para estimar valores aproximados de las pruebas de laboratorio analizadas. En consecuencia, se establece la prueba de absorción como la determinante para correlacionar los datos. Se elige esta prueba por ser un ensayo fácil y simple de realizar y porque, además, en Cerro Minas esta prueba se efectúa semanalmente. Un factor importante para elegir este parámetro como el primordial para la determinación de correlaciones, es el hecho de que el análisis efectuado para este parámetro, al vincularlo con la ecuación teórica de Milton Kanji, se obtiene un coeficiente de correlación de 99,9% porcentaje que es sumamente alto, y que permite afirmar que por medio de esta prueba se pueden estimar valores de peso volumétrico seco y porosidad con una confiabilidad de resultados de un 100 %, tomando

como referencia el estudio teórico de Kanji and Galvan.

La ejecución de este programa consiste en que el usuario efectúe la prueba de absorción de muestras de Cerro Minas, y mediante las correlaciones establecidas pueda estimar características físicas y mecánicas. El resultado de la prueba de absorción deberá encontrarse en el rango de dentro 1,9 y 4,2%, para que así los datos obtenidos mediante este parámetro sean confiables y con base en ese mismo resultado se obtengan las siguientes características:

- Abrasión
- Porosidad
- Peso volumétrico seco
- Resistencia a la compresión
- Clasificación de dureza

Un aspecto muy importante de contemplar es que este programa es una herramienta que constituye una etapa inicial de la caracterización del macizo rocoso de Cerro Minas, ya que es necesario efectuar un mayor número de muestreos, con el fin de valorar la totalidad de la cantera y así asegurar resultados más confiables.

Las correlaciones determinadas para estimar las diferentes características físicas y mecánicas poseen coeficientes de correlación mayores a 0,95, lo que garantiza que se podrá predecir más de un 95%, los resultados.

En la figura de la primera pestaña (Figura 30) se muestran los valores de los parámetros que estima el programa y se especifica la correspondiente norma de la prueba.

Las correlaciones para la estimación de los parámetros son las siguientes:

$$\text{Abs V} = 1,03(\text{AbsQ})$$

Donde:

Abs V=% Absorción Voladura

Abs Q=%Absorción Quebrador

$$R^2 = 0,9947$$

$$\text{Porosidad V} = 2,2844 \text{ AbsV} + 0,5574$$

Donde:

Porosidad V=%Porosidad Voladura

Abs=% Absorción Voladura

$$R^2 = 0,9993$$

$$\text{Porosidad Q} = 2,2613\text{AbsQ} + 0,6355$$

Donde:

Porosidad Q=%Porosidad Quebrador

Abs Q=%Absorción Quebrador  
 $R^2 = 0,9995$

Abra Q= 3,6864(AbsQ) + 8,9  
Donde:

Abra=% Pérdida por Abrasión Quebrador  
Abs=%Absorción Quebrador.  
 $R^2 = 0,92$

$Y_{seca} = -0,6505Abs + 26,293$   
 $Y_{seca}$ =Peso Volumétrico Seco  
 $x$ =%Absorción  
 $R^2 = 0,9997$

$RCS = 3464,1(AbsV)^{-0,901}$   
Donde

RCS= Resistencia a la compresión Simple por medio de Carga Puntual  
Abs =Absorción Voladura  
 $R^2 = 0,9823$

Con la determinación de los parámetros mediante las correlaciones anteriores se establece, en el programa, una nueva pestaña que consiste en describir en cuáles aplicaciones puede ser usado el agregado, según su parámetro; o hacer referencia a si el resultado obtenido cumple o no con las referencias o especificaciones nacionales e internacionales.

En la segunda pestaña se indican las diferentes aplicaciones respecto de las especificaciones de porcentajes de abrasión. Se indica mediante un cuadro de color verde si el porcentaje obtenido en la primera pestaña cumple con las especificaciones vigentes. Si el cuadro se muestra de color rojo significa que el agregado no podrá ser utilizado. Las aplicaciones según la abrasión corresponden a especificaciones de INTECO, vigentes en Costa Rica. Estas son:

1. Subbase
2. Base de Agregados Triturados
3. Base Estabilizada con cemento Portland
4. Capa de base de mezcla asfáltica en caliente
  - 4.1 Método Marshal
  - 4.2 Superpave
5. Pavimento de Hormigón Hidráulico
6. Pavimento de Hormigón Compactado con Rodillo
7. Hormigón Estructural
8. Losas de puentes
9. Aceras
10. Hormigón Ciclópeo

Respecto a la resistencia a la compresión del agregado, según el libro *Tecnologías del concreto*, de Neville, un agregado que presente resistencias a la compresión mayores a 350 kg/cm<sup>2</sup> podrá ser usado en concretos de mediano desempeño y si presenta un valor mayor a 800kg/cm<sup>2</sup> podría ser usado en concretos de alto desempeño. Es importante recalcar que sobre concretos de baja resistencia no se hará ninguna mención, por el hecho de que, si los agregados presentan resistencias muy bajas y son usados en concretos de baja resistencia, no será considerado como un factor determinante, a como si lo sería la resistencia de la pasta de cemento y la adherencia con las partículas del agregado.

Para la absorción, como no existe ninguna especificación que determine si un agregado cumple o no por su porcentaje, se debe tomar en cuenta como referencia el *Manual de Tecnología del Concreto*, donde se menciona que los agregados que tienen un porcentaje de absorción menor a un 3% presentan una condición aceptada. Esta condición será identificada en el programa para el parámetro de absorción. Para los datos obtenidos en el estudio la muestra M-1 no presenta una condición aceptada.

En la determinación de la gravedad específica, el usuario deberá introducir este valor. Por otra parte, el libro *Diseño y control de mezclas de concreto* constituye una investigación de la Asociación de Cemento Portland y en este se establece que las gravedades específicas relativas en condiciones normales oscilan en rangos de 2,4 a 2,9. Por lo tanto y con base en lo anterior, se puede decir que los resultados del presente estudio se encuentran en esa categoría.

## Apreciaciones finales sobre los resultados

- La valoración de los resultados de la correlación de Absorción Quebrador vrs Voladura, presentaron desviaciones menores a 0,25% entre ellos. Por lo tanto, los resultados arrojados por esta prueba garantizan confiabilidad, ya que existe una relación muy cercana a la teórica  $x=y$ , donde “x” corresponde a la muestra del quebrador y “y” a la muestra de la voladura. El coeficiente de



correlación entre estos parámetros es de 0,995.

- La relación entre la abrasión vrs absorción es óptima, presentando un coeficiente de correlación de 0,9962. Esta correlación es importante ya que permite facilitar la predicción de la pérdida por desgaste que presentará el agregado grueso.
- La relación entre la resistencia a la compresión simple vrs absorción es buena, y presenta un coeficiente de correlación de 0,983. Esta relación es muy importante pues podría facilitar la estimación de la dureza de la roca a partir de su valor de absorción.
- La relación entre la resistencia a la compresión simple vrs porosidad, es buena y además equivalente a la tendencia entre los datos de resistencia a la compresión vrs porosidad, debido a la relación existente entre porosidad y absorción.
- Con el presente estudio se obtuvo una buena relación entre el peso volumétrico seco vrs la porosidad y porosidad vrs absorción, valorando estos datos con la ecuación teórica propuesta por Milton Kanji, correlaciones que poseen  $R^2=0,999$  y  $R^2=0,9253$  correspondientemente. La ventaja de obtener esta correlación es que la porosidad puede ser estimada de la absorción y el peso volumétrico seco, características que interfieren en la resistencia de la roca, pues al tener mayores pesos volumétricos secos se tendrán mayores resistencias. Además se concluye que a mayor porosidad hay menor peso volumétrico seco.

# Conclusiones

A continuación se exponen las conclusiones del presente estudio luego de analizar los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas al sitio de préstamo Cerro Minas.

- Los materiales del estudio son de origen ígneo. La M-1 corresponde a una andesítica porfírica silicificada sin textura fluidal, y las muestras M-2, M-3, M4 y M-5 tienen presencia de textura fluidal.
- Se obtuvieron comportamientos óptimos entre los parámetros de Voladura vs Quebrador, garantizando confiabilidad de las pruebas realizadas.
- Las gravedades específicas determinadas se encuentran dentro del rango que se establece en el libro *Diseño y control de mezclas de concreto* (PCA), (2,4 a 2,9), caracterizando el agregado en condición normal.
- La porosidad obtenida en las muestras es menor a 10 %, parámetro que corresponde según Milton Kanji a rocas duras.
- Los datos obtenidos de pérdida de abrasión son menores al 25%, resultados que son considerados como un porcentaje apropiado en la práctica, ya que según las especificaciones de INTECO pueden ser aplicados para los distintos usos, dado que se permite hasta un máximo de 35 % de desgaste.
- La absorción, como el ensayo más simple, permitió extrapolar los datos de otras pruebas. Con el análisis de las características físicas y los parámetros mecánicos de las muestras, complementados con los datos de recolección del presente estudio, se podrá calificar y zonificar el macizo rocoso.
- La resistencia a la compresión simple obtenida por el ensayo de carga puntual, permite caracterizar la roca intacta utilizando el criterio según ISRM 1981. Las rocas analizadas se clasifican como rocas muy duras y duras.
- Para la ejecución de la prueba de inmersión en etilenglicol no hubo disgregación por el hecho de tener altas resistencias a la compresión en la roca.
- Las propiedades físicas como absorción, porosidad, peso volumétrico seco, demostraron excelentes correlaciones entre ellas, comportamiento que se corrobora con las tendencias que establece la teoría.
- Las muestras analizadas en Cerro Minas indicaron valores consistentes con los diferentes materiales estudiados por Kanji and Galván en su artículo *Correlation of Properties of Soft Rocks*, ya que se demostró en las correlaciones cómo los datos obtenidos se ajustan al gráfico teórico.
- Los agregados analizados presentaron buenas características físicas y mecánicas, lo cual es importante ya que el uso de agregados adecuados garantiza la calidad en las diferentes obras de infraestructura y asegura un comportamiento óptimo de los agregados en los diseños que se efectúen para obras civiles.

- La resistencia a la compresión y a la abrasión son índices que pueden ser usados en la escogencia de agregados para producir concretos de mediana y alta resistencia.
- Esta valoración de Cerro Minas permitió conocer las propiedades físicas y mecánicas presentes en dicho macizo rocoso, con la limitación del número de datos.
- Se generó un programa que permite, mediante el resultado de la prueba de absorción, estimar los distintos parámetros como la porosidad, peso volumétrico seco, % de pérdida por desgaste, resistencia a la compresión y clasificación por dureza.

# Recomendaciones

- Es importante continuar con el estudio de los diferentes tipos de agregados disponibles en Cerro Minas y realizar más muestreos que abarquen la totalidad de la cantera para asegurar la tendencia. También es necesario comprobar si la tendencia se mantiene en el tiempo; es decir, si existe una estabilidad con el fin de determinar una caracterización de todo el macizo rocoso y estimar con mayor confiabilidad las características mecánicas y físicas del agregado pétreo.
- Una recomendación significativa es extender esta investigación con análisis de rocas blandas presentes en Cerro Minas. Se sabe que las rocas blandas no son utilizadas para la producción y venta de agregados pétreos; pero permitirá valorar y verificar el presente estudio con rocas de distinta dureza. Desde rocas muy duras a rocas blandas.
- La prueba de absorción, por ser un ensayo tan simple y fácil de realizar, fue el parámetro determinante para establecer correlaciones con los distintos parámetros analizados en el presente estudio, sin embargo es importante validar este parámetro en la metodología con rocas blandas.
- En este estudio se realizó el ensayo de carga puntual para estimar la resistencia a la compresión simple en las muestras extraídas, sería recomendable que en futuros estudios se determine la resistencia a la compresión mediante el ensayo uniaxial, con la única finalidad de validar los resultados obtenidos en este estudio, y así poder garantizar que los parámetros determinados son confiables.

El point load test se caracteriza como una prueba fácil, rápida y ventajosa porque reduce el tiempo de trabajo y el costo es menor, pero es necesario asegurar que los resultados arrojados en este ensayo son confiables.

- Realizar un análisis probabilístico al tener un número significativo de muestreos estudiados, con el fin de medir la variabilidad de los parámetros determinados en el presente estudio.

# Apéndices

Se presentan cuadros y figuras que surgieron de las diferentes pruebas realizadas en los ensayos practicados a los materiales

M-1 (QUEBRADOR)

GRAVEDAD ESPECÍFICA, ABSORCIÓN Y POROSIDAD DE LOS MATERIALES GRUESOS OBTENIDOS DE MUESTRAS DEL APILAMIENTO QUEBRADOR

**CUADRO 1. PESOS DE LA MUESTRA M-1 DEL QUEBRADOR EN DISTINTAS CONDICIONES**

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| Peso Muestra Seca (A) grs = | 3.068 |
| Peso Muestra SSS (B) grs=   | 3.196 |
| Peso Sumergido (W) grs=     | 1.921 |

**CUADRO 2. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS**

|                                      |      |
|--------------------------------------|------|
| Gravedad Específica Bruta de Gruesos | 2,41 |
| Gravedad Específica Bruta s.s.s =    | 2,51 |
| Gravedad Específica Aparente=        | 2,67 |
| Porcentaje de Absorción de Gruesos   | 4,2% |
| Densidad Seca [kg/m3] =              | 2400 |
| Densidad SSS [kg/m3] =               | 2500 |
| Densidad Aparente [kg/m3]=           | 2668 |

**CUADRO 3. RESULTADOS DE POROSIDAD DE AGREGADOS GRUESOS DE MUESTRA M-1 QUEBRADOR**

|                                    |       |   |
|------------------------------------|-------|---|
| Peso Muestra SSS (B)=              | 3.196 | g |
| Peso Muestra Seca (A)=             | 3.068 | g |
| Peso Sumergido - Peso Muestra SSS= | 1.275 | g |
| Porosidad ( $\eta$ )=              | 10,0% |   |

M-1 (VOLADURA)

GRAVEDAD ESPECÍFICA, ABSORCIÓN Y POROSIDAD DE LOS MATERIALES GRUESOS OBTENIDOS DE MUESTRAS IN SITU

| <b>CUADRO 4. PESOS DE LA MUESTRA M-1 DE LA VOLADURA EN DISTINTAS CONDICIONES</b> |       |
|--|-------|
| Peso Muestra Seca (A) grs =  | 3.600 |
| Peso Muestra SSS (B) grs=  | 3.746 |
| Peso Sumergido (W) grs=  | 2.255 |

| <b>CUADRO 5. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS</b> |      |
|---|------|
| Gravedad Específica Bruta de Gruesos  | 2,41 |
| Gravedad Específica Bruta s.s.s =   | 2,51 |
| Gravedad Específica Aparente=   | 2,68 |
| Porcentaje de Absorción de Gruesos  | 4,1% |
| Densidad Seca [kg/m <sup>3</sup> ] =  | 2408 |
| Densidad SSS [kg/m <sup>3</sup> ] =   | 2506 |
| Densidad Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]=                                     | 2670 |

| <b>CUADRO 6. RESULTADOS DE POROSIDAD DE AGREGADOS GRUESOS DE MUESTRA M-1 VOLADURA</b> |       |   |
|---|-------|---|
| Peso Muestra SSS (B)=   | 3.746 | g |
| Peso Muestra Seca (A)=  | 3.600 | g |
| Peso Sumergido-Peso Muestra SSS (V)=  | 1.491 | g |
| Porosidad ( $\eta$ )=   | 9,8%  |   |

M-2 (VOLADURA)

GRAVEDAD ESPECÍFICA, ABSORCIÓN Y POROSIDAD DE LOS MATERIALES GRUESOS OBTENIDOS DE MUESTRAS IN SITU

| <b>CUADRO 7. PESOS DE LA MUESTRA M-2 DE LA VOLADURA EN DISTINTAS CONDICIONES</b> |       |
|--|-------|
| Peso Muestra Seca (A) grs =  | 4.440 |
| Peso Muestra SSS (B) grs=  | 4.552 |
| Peso Sumergido (W) grs=  | 2.800 |

| <b>CUADRO 8. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS</b> |      |
|---|------|
| Gravedad Específica Bruta de Gruesos  | 2,53 |
| Gravedad Específica Bruta s.s.s =   | 2,60 |
| Gravedad Específica Aparente=   | 2,71 |
| Porcentaje de Absorción de Gruesos  | 2,5% |
| Densidad Seca [kg/m <sup>3</sup> ] =  | 2528 |
| Densidad SSS [kg/m <sup>3</sup> ] =   | 2592 |
| Densidad Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]=                                     | 2701 |

| <b>CUADRO 9. RESULTADOS DE POROSIDAD DE AGREGADOS GRUESOS DE MUESTRA M-2 VOLADURA</b> |       |   |
|---|-------|---|
| Peso Muestra SSS (B)=   | 4.552 | g |
| Peso Muestra Seca (A)=  | 4.440 | g |
| Peso Sumergido - Peso Muestra SSS (V)=  | 1.752 | g |
| Porosidad ( $\eta$ )=   | 6,4%  |   |



M-2 (QUEBRADOR)

GRAVEDAD ESPECÍFICA, ABSORCIÓN Y POROSIDAD DE LOS MATERIALES GRUESOS OBTENIDOS DE MUESTRAS DEL APILAMIENTO QUEBRADOR

| <b>CUADRO 10. PESOS DE LA MUESTRA M-2 DEL QUEBRADOR EN DISTINTAS CONDICIONES</b> |       |
|--|-------|
| Peso Muestra Seca (A) grs =  | 4.702 |
| Peso Muestra SSS (B) grs=  | 4.828 |
| Peso Sumergido (W) grs=  | 2.957 |

| <b>CUADRO 11. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS</b> |      |
|--|------|
| Gravedad Específica Bruta de Gruesos   | 2,51 |
| Gravedad Específica Bruta s.s.s =  | 2,58 |
| Gravedad Específica Aparente=  | 2,69 |
| Porcentaje de Absorción de Gruesos   | 2,7% |
| Densidad Seca [kg/m <sup>3</sup> ] =   | 2507 |
| Densidad SSS [kg/m <sup>3</sup> ] =  | 2574 |
| Densidad Aparente [kg/m <sup>3</sup> ] =                                     | 2688 |

| <b>CUADRO 12. RESULTADOS DE POROSIDAD DE AGREGADOS GRUESOS DE MUESTRA M-2 QUEBRADOR</b> |       |   |
|---|-------|---|
| Peso Muestra SSS (B)=   | 4.828 | G |
| Peso Muestra Seca (A)=  | 4.702 | G |
| Peso Sumergido - Peso Muestra SSS (V)=  | 1.871 | G |
| Porosidad (η)=  | 6,7%  |   |

M-3 QUEBRADOR

GRAVEDAD ESPECÍFICA, ABSORCIÓN Y POROSIDAD DE LOS MATERIALES GRUESOS OBTENIDOS DE MUESTRAS IN SITU

| <b>CUADRO 13. PESOS DE LA MUESTRA M-3 DEL QUEBRADOR EN DISTINTAS CONDICIONES</b> |       |
|--|-------|
| Peso Muestra Seca (A) grs =  | 4.186 |
| Peso Muestra SSS (B) grs=  | 4.292 |
| Peso Sumergido (W) grs=  | 2.633 |

| <b>CUADRO 14. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS</b> |      |
|--|------|
| Gravedad Específica Bruta de Gruesos   | 2,52 |
| Gravedad Específica Bruta s.s.s =  | 2,59 |
| Gravedad Específica Aparente=  | 2,70 |
| Porcentaje de Absorción de Gruesos   | 2,5% |
| Densidad Seca [kg/m <sup>3</sup> ] =   | 2517 |
| Densidad SSS [kg/m <sup>3</sup> ] =  | 2581 |
| Densidad Aparente [kg/m <sup>3</sup> ] =                                     | 2689 |

| <b>CUADRO 15. RESULTADOS DE POROSIDAD DE AGREGADOS GRUESOS DE MUESTRA M-3 QUEBRADOR</b> |       |   |
|---|-------|---|
| Peso Muestra SSS (B)=   | 4.292 | g |
| Peso Muestra Seca (A)=  | 4.186 | g |
| Peso Sumergido - Peso Muestra SSS (V)=  | 1.659 | g |
| Porosidad (η)=  | 6,4%  |   |

M-3 (VOLADURA)

GRAVEDAD ESPECÍFICA, ABSORCIÓN Y POROSIDAD DE LOS MATERIALES GRUESOS OBTENIDOS DE MUESTRAS IN SITU

| <b>CUADRO 16. PESOS DE LA MUESTRA M-3 DEL QUEBRADOR EN DISTINTAS CONDICIONES</b> |       |
|--|-------|
| Peso Muestra Seca (A) grs =  | 3.886 |
| Peso Muestra SSS (B) grs=  | 3.971 |
| Peso Sumergido (W) grs=  | 2.447 |

| <b>CUADRO 17. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS</b> |      |
|--|------|
| Gravedad Específica Bruta de Gruesos   | 2,55 |
| Gravedad Específica Bruta s.s.s =  | 2,61 |
| Gravedad Específica Aparente=  | 2,70 |
| Porcentaje de Absorción de Gruesos   | 2,2% |
| Densidad Seca [kg/m <sup>3</sup> ] =   | 2543 |
| Densidad SSS [kg/m <sup>3</sup> ] =  | 2599 |
| Densidad Aparente [kg/m <sup>3</sup> ] =                                     | 2694 |

| <b>CUADRO 18. RESULTADOS DE POROSIDAD DE AGREGADOS GRUESOS DE MUESTRA M-3 VOLADURA</b> |       |   |
|--|-------|---|
| Peso Muestra SSS (B)=  | 3.971 | g |
| Peso Muestra Seca (A)=   | 3.886 | g |
| Peso Sumergido - Peso Muestra SSS (V)=   | 1.524 | g |
| Porosidad ( $\eta$ )=  | 5,6%  |   |

M-4 (VOLADURA)

GRAVEDAD ESPECÍFICA, ABSORCIÓN Y POROSIDAD DE LOS MATERIALES GRUESOS OBTENIDOS DE MUESTRAS IN SITU

**CUADRO 19. PESOS DE LA MUESTRA M-4 DE VOLADURA EN DISTINTAS CONDICIONES**

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| Peso Muestra Seca (A) grs = | 4.028 |
| Peso Muestra SSS (B) grs=   | 4.114 |
| Peso Sumergido (W) grs=     | 2.533 |

**CUADRO 20. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS**

|  |      |
|--|------|
| Gravedad Específica Bruta de Gruesos     | 2,55 |
| Gravedad Específica Bruta s.s.s =        | 2,60 |
| Gravedad Específica Aparente=            | 2,69 |
| Porcentaje de Absorción de Gruesos       | 2,1% |
| Densidad Seca [kg/m <sup>3</sup> ] =     | 2542 |
| Densidad SSS [kg/m <sup>3</sup> ] =      | 2596 |
| Densidad Aparente [kg/m <sup>3</sup> ] = | 2688 |

**CUADRO 21. RESULTADOS DE POROSIDAD DE AGREGADOS GRUESOS DE MUESTRA M-4 VOLADURA**

|  |       |   |
|--|-------|---|
| Peso Muestra SSS (B)=                  | 4.114 | g |
| Peso Muestra Seca (A)=                 | 4.028 | g |
| Peso Sumergido - Peso Muestra SSS (V)= | 1.581 | g |
| Porosidad ( $\eta$ )=                  | 5,4%  |   |

M-4 (QUEBRADOR)

GRAVEDAD ESPECÍFICA, ABSORCIÓN Y POROSIDAD DE LOS MATERIALES GRUESOS OBTENIDOS DEL APILAMIENTO DEL QUEBRADOR

**CUADRO 22. PESOS DE LA MUESTRA M-4 QUEBRADOR EN DISTINTAS CONDICIONES**

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| Peso Muestra Seca (A) grs = | 4.282 |
| Peso Muestra SSS (B) grs=   | 4.384 |
| Peso Sumergido (W) grs=     | 2.692 |

**CUADRO 23. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS**

|  |      |
|--|------|
| Gravedad Específica Bruta de Gruesos     | 2,53 |
| Gravedad Específica Bruta s.s.s =        | 2,59 |
| Gravedad Específica Aparente=            | 2,69 |
| Porcentaje de Absorción de Gruesos       | 2,4% |
| Densidad Seca [kg/m <sup>3</sup> ] =     | 2524 |
| Densidad SSS [kg/m <sup>3</sup> ] =      | 2585 |
| Densidad Aparente [kg/m <sup>3</sup> ] = | 2687 |

**CUADRO 24. RESULTADOS DE POROSIDAD DE AGREGADOS GRUESOS DE MUESTRA M-4 QUEBRADOR**

|  |       |   |
|--|-------|---|
| Peso Muestra SSS (B)=                  | 4.384 | g |
| Peso Muestra Seca (A)=                 | 4.282 | g |
| Peso Sumergido - Peso Muestra SSS (V)= | 1.692 | g |
| Porosidad ( $\eta$ )=                  | 6,1%  |   |

M-5 (VOLADURA)

GRAVEDAD ESPECÍFICA, ABSORCIÓN Y POROSIDAD DE LOS MATERIALES GRUESOS OBTENIDOS DE MUESTRAS IN SITU

**CUADRO 25. PESOS DE LA MUESTRA M-5 DE VOLADURA EN DISTINTAS CONDICIONES**

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| Peso Muestra Seca (A) grs = | 3.882 |
| Peso Muestra SSS (B) grs=   | 3.948 |
| Peso Sumergido (W) grs=     | 2.432 |

**CUADRO 26. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS**

|  |      |
|--|------|
| Gravedad Específica Bruta de Gruesos     | 2,56 |
| Gravedad Específica Bruta s.s.s =        | 2,60 |
| Gravedad Específica Aparente=            | 2,68 |
| Porcentaje de Absorción de Gruesos       | 1,7% |
| Densidad Seca [kg/m <sup>3</sup> ] =     | 2553 |
| Densidad SSS [kg/m <sup>3</sup> ] =      | 2597 |
| Densidad Aparente [kg/m <sup>3</sup> ] = | 2670 |

**CUADRO 27. RESULTADOS DE POROSIDAD DE AGREGADOS GRUESOS DE MUESTRA M-5 VOLADURA**

|  |       |   |
|--|-------|---|
| Peso Muestra SSS (B)=                  | 3.948 | g |
| Peso Muestra Seca (A)=                 | 3.882 | g |
| Peso Sumergido - Peso Muestra SSS (V)= | 1.517 | g |
| Porosidad ( $\eta$ )=                  | 4,4%  |   |

M-5(QUEBRADOR)

GRAVEDAD ESPECÍFICA, ABSORCIÓN Y POROSIDAD DE LOS MATERIALES GRUESOS OBTENIDOS DEL APILAMIENTO DEL QUEBRADOR

**CUADRO 28. PESOS DE LA MUESTRA M-5 QUEBRADOR EN DISTINTAS CONDICIONES**

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| Peso Muestra Seca (A) grs = | 4.622 |
| Peso Muestra SSS (B) grs=   | 4.710 |
| Peso Sumergido (W) grs=     | 2.902 |

**CUADRO 29. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS**

|  |      |
|--|------|
| Gravedad Específica Bruta de Gruesos     | 2,56 |
| Gravedad Específica Bruta s.s.s =        | 2,61 |
| Gravedad Específica Aparente=            | 2,69 |
| Porcentaje de Absorción de Gruesos       | 1,9% |
| Densidad Seca [kg/m <sup>3</sup> ] =     | 2550 |
| Densidad SSS [kg/m <sup>3</sup> ] =      | 2599 |
| Densidad Aparente [kg/m <sup>3</sup> ] = | 2681 |

**CUADRO 30. RESULTADOS DE POROSIDAD DE AGREGADOS GRUESOS DE MUESTRA M-5 QUEBRADOR**

|  |       |   |
|--|-------|---|
| Peso Muestra SSS (B)=                  | 4.710 | g |
| Peso Muestra Seca (A)=                 | 4.622 | g |
| Peso Sumergido - Peso Muestra SSS (V)= | 1.808 | g |
| Porosidad ( $\eta$ )=                  | 4,9%  |   |

**CUADRO 31.RESULTAODS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL PARA LA MUESTRA M-1**

| Tamaño | N° | Forma Ruptura | B (cm) | D (cm) | W <sub>1</sub> (cm) | W <sub>2</sub> (cm) | Área (cm <sup>2</sup> ) | De (cm) | De <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> ) | Carga P (kg) | Factor Corrección (F) | Factor Calibración (k) | Is (50) | Resistencia Compresión (qu) 22,5* Is (50) | Promedio |
|--------|----|---------------|--------|--------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------|------------------------------------|--------------|-----------------------|------------------------|---------|---|----------|
| 1"     | 1  | Trapezoidal   | 2,41   | 3,50   | 1,41                | 3,41                | 8,42                    | 3,27    | 10,72                              | 20           | 0,83                  | 13,916                 | 21,5    | 482,91                                    | 883,99   |
| 1"     | 2  | Rectangular   | 4,00   | 3,30   | 0,00                | 0,00                | 13,20                   | 4,10    | 16,81                              | 40           | 0,91                  | 13,916                 | 30,3    | 681,51                                    |          |
| 1"     | 3  | Rectangular   | 5,16   | 2,80   | 0,00                | 0,00                | 14,46                   | 4,29    | 18,41                              | 63           | 0,93                  | 13,916                 | 44,1    | 992,26                                    |          |
| 1"     | 4  | Trapezoidal   | 3,54   | 2,30   | 3,13                | 3,95                | 8,15                    | 3,22    | 10,37                              | 23           | 0,82                  | 13,916                 | 24,8    | 557,16                                    |          |
| 1"     | 5  | Rectangular   | 2,77   | 3,00   | 0,00                | 0,00                | 8,31                    | 3,25    | 10,58                              | 20           | 0,82                  | 13,916                 | 21,7    | 487,75                                    |          |
| 1"     | 6  | Rectangular   | 4,27   | 2,60   | 0,00                | 0,00                | 11,09                   | 3,76    | 14,12                              | 15           | 0,88                  | 13,916                 | 13,0    | 292,52                                    |          |
| 1"     | 7  | Romboide      | 3,86   | 2,20   | 0,00                | 0,00                | 8,49                    | 3,29    | 10,80                              | 43           | 0,83                  | 13,916                 | 45,3    | 1.019,82                                  |          |
| 1"     | 8  | Triangular    | 4,44   | 2,60   | 0,00                | 0,00                | 5,77                    | 2,71    | 7,34                               | 35           | 0,76                  | 13,916                 | 50,4    | 1.133,12                                  |          |
| 1"     | 9  | Rectangular   | 3,16   | 2,10   | 0,00                | 0,00                | 6,64                    | 2,91    | 8,45                               | 30           | 0,78                  | 13,916                 | 38,7    | 870,96                                    |          |
| 1"     | 10 | Rectangular   | 3,72   | 2,40   | 0,00                | 0,00                | 8,93                    | 3,37    | 11,37                              | 30           | 0,84                  | 13,916                 | 30,8    | 691,91                                    |          |
| 1"     | 11 | Rectangular   | 3,04   | 3,2    | 0,00                | 0,00                | 9,73                    | 3,52    | 12,39                              | 40           | 0,85                  | 13,916                 | 38,4    | 863,37                                    |          |
| 1"     | 12 | Trapezoidal   | 2,87   | 3,00   | 2,20                | 3,53                | 8,60                    | 3,31    | 10,94                              | 35           | 0,83                  | 13,916                 | 37,0    | 831,54                                    |          |
| 1"     | 13 | Trapezoidal   | 3,11   | 3,70   | 2,20                | 4,02                | 11,51                   | 3,83    | 14,65                              | 45           | 0,89                  | 13,916                 | 37,9    | 852,75                                    |          |
| 1"     | 14 | Triangular    | 2,72   | 2,70   | 0,00                | 0,00                | 3,67                    | 2,16    | 4,67                               | 50           | 0,69                  | 13,916                 | 102,1   | 2.297,59                                  |          |
| 1"     | 15 | Rectangular   | 3,675  | 2,7    | 0,00                | 0,00                | 9,92                    | 3,55    | 12,63                              | 50           | 0,86                  | 13,916                 | 47,2    | 1.062,78                                  |          |
| 1"     | 16 | Trapezoidal   | 3,06   | 2,10   | 2,27                | 3,85                | 6,43                    | 2,86    | 8,18                               | 35           | 0,78                  | 13,916                 | 46,3    | 1.041,63                                  |          |
| 1"     | 17 | Triangular    | 3,25   | 3,29   | 0,00                | 0,00                | 5,33                    | 2,61    | 6,79                               | 38           | 0,75                  | 13,916                 | 57,3    | 1.289,35                                  |          |
| 1"     | 18 | Triangular    | 2,52   | 2,40   | 0,00                | 0,00                | 3,02                    | 1,96    | 3,85                               | 38           | 0,66                  | 13,916                 | 89,0    | 2.001,87                                  |          |
| 1 1/2" | 1  | Circular      | -      | 3,50   | 0,00                | 0,00                | 38,48                   | 7,00    | 62,50                              | 63           | 1,16                  | 13,916                 | 16,2    | 364,30                                    |          |
| 1 1/2" | 2  | Rectangular   | 5,24   | 2,9    | 0,00                | 0,00                | 15,20                   | 4,40    | 19,35                              | 70           | 0,94                  | 13,916                 | 47,5    | 1.069,17                                  |          |
| 1 1/2" | 3  | Elipse        | 4,36   | 3,35   | 0,00                | 0,00                | 11,46                   | 3,82    | 14,60                              | 65           | 0,89                  | 13,916                 | 54,9    | 1.235,36                                  |          |
| 1 1/2" | 4  | Romboide      | 2,37   | 3,10   | 0,00                | 0,00                | 7,35                    | 3,06    | 9,36                               | 45           | 0,80                  | 13,916                 | 53,6    | 1.206,56                                  |          |



|        |    |             |       |      |      |      |       |      |       |    |      |        |      |          |          |
|--------|----|-------------|-------|------|------|------|-------|------|-------|----|------|--------|------|----------|----------|
| 1 1/2" | 5  | Triangular  | 4,51  | 3,40 | 0,00 | 0,00 | 7,67  | 3,12 | 9,76  | 50 | 0,81 | 13,916 | 57,7 | 1.298,12 | 1.090,80 |
| 1 1/2" | 6  | Trapezio    | 3,46  | 3,62 | 0,00 | 0,00 | 9,96  | 3,56 | 12,68 | 50 | 0,86 | 13,916 | 47,1 | 1.059,58 |          |
| 1 1/2" | 7  | Elipse      | 5,51  | 3,20 | 0,00 | 0,00 | 13,84 | 4,20 | 17,62 | 43 | 0,92 | 13,916 | 31,0 | 698,09   |          |
| 1 1/2" | 8  | Trapezio    | 3,39  | 4,10 | 4,59 | 2,19 | 13,89 | 4,20 | 17,68 | 60 | 0,93 | 13,916 | 43,7 | 982,86   |          |
| 1 1/2" | 9  | Trapezio    | 1,98  | 4,10 | 2,46 | 1,49 | 8,11  | 3,21 | 10,32 | 50 | 0,82 | 13,916 | 55,2 | 1.243,12 |          |
| 1 1/2" | 10 | Elipse      | 2,64  | 4,20 | 0,00 | 0,00 | 8,69  | 3,33 | 11,07 | 45 | 0,83 | 13,916 | 47,1 | 1.059,86 |          |
| 1 1/2" | 11 | Triangular  | 5,56  | 3,10 | 0,00 | 0,00 | 8,62  | 3,31 | 10,98 | 36 | 0,83 | 13,916 | 37,9 | 853,17   |          |
| 1 1/2" | 12 | Triangular  | 4,39  | 3,20 | 0,00 | 0,00 | 7,02  | 2,99 | 8,94  | 68 | 0,79 | 13,916 | 84,0 | 1.890,46 |          |
| 1 1/2" | 13 | Triangular  | 4,16  | 3,25 | 0,00 | 0,00 | 6,76  | 2,93 | 8,61  | 40 | 0,79 | 13,916 | 50,9 | 1.144,31 |          |
| 1 1/2" | 14 | Triangular  | 5,52  | 3,38 | 0,00 | 0,00 | 9,32  | 3,44 | 11,87 | 46 | 0,85 | 13,916 | 45,6 | 1.026,39 |          |
| 1 1/2" | 15 | Elipse      | 4,96  | 3,00 | 0,00 | 0,00 | 11,69 | 3,86 | 14,88 | 63 | 0,89 | 13,916 | 52,4 | 1.179,60 |          |
| 1 1/2" | 16 | Trapezio    | 3,94  | 2,80 | 5,18 | 2,70 | 11,03 | 3,75 | 14,05 | 42 | 0,88 | 13,916 | 36,5 | 822,25   |          |
| 1 1/2" | 17 | Rectangular | 3,708 | 2,9  | 0,00 | 0,00 | 10,75 | 3,70 | 13,69 | 90 | 0,87 | 13,916 | 79,9 | 1.797,45 |          |

| <b>CUADRO 32. VALORES PROMEDIO POR TAMAÑO NOMINAL Y GENERAL DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL</b> |   |
|---|---|
| Tamaño Nominal  | Resistencia Compresión Promedio (kg/cm <sup>2</sup> ) |
| 1"  | 883,99  |
| 1 1/2"  | 1.090,80  |
| Promedio  | 987,39  |

**CUADRO 33. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL PARA LA MUESTRA M-2**

| Tamaño | Nº | Forma Ruptura | B (cm) | D (cm) | W <sub>1</sub> (cm) | W <sub>2</sub> (cm) | Área (cm <sup>2</sup> ) | De (cm) | De <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> ) | Carga P (kg) | Factor Corrección (F) | Factor Calibración (k) | Is (50) | Resistencia Compresión (qu) 22,5* Is (50) | Promedio |
|--------|----|---------------|--------|--------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------|------------------------------------|--------------|-----------------------|------------------------|---------|---|----------|
| 1"     | 1  | Rectangular   | 3,78   | 1,90   | 0,00                | 0,00                | 7,17                    | 3,02    | 9,13                               | 70,00        | 0,80                  | 13,916                 | 85,02   | 1.913,02                                  | 1.560,4  |
| 1"     | 2  | Rectangular   | 3,20   | 2,00   | 0,00                | 0,00                | 6,41                    | 2,86    | 8,16                               | 65,00        | 0,78                  | 13,916                 | 86,19   | 1.939,38                                  |          |
| 1"     | 3  | Rectangular   | 3,74   | 2,10   | 0,00                | 0,00                | 7,86                    | 3,16    | 10,00                              | 57,50        | 0,81                  | 13,916                 | 65,10   | 1.464,66                                  |          |
| 1"     | 4  | Rectangular   | 3,41   | 2,80   | 0,00                | 0,00                | 9,55                    | 3,49    | 12,16                              | 95,00        | 0,85                  | 13,916                 | 92,46   | 2.080,40                                  |          |
| 1"     | 5  | Trapezoidal   | 3,55   | 3,40   | 2,64                | 4,46                | 12,07                   | 3,92    | 15,37                              | 50,00        | 0,90                  | 13,916                 | 40,57   | 912,87                                    |          |
| 1"     | 6  | Rectangular   | 3,61   | 3,30   | 0,00                | 0,00                | 11,93                   | 3,90    | 15,18                              | 75,00        | 0,89                  | 13,916                 | 61,44   | 1.382,38                                  |          |
| 1"     | 7  | Trapezoidal   | 3,48   | 2,10   | 3,76                | 3,21                | 7,32                    | 3,05    | 9,32                               | 75,00        | 0,80                  | 13,916                 | 89,71   | 2.018,54                                  |          |
| 1"     | 8  | Trapezoidal   | 2,49   | 3,20   | 2,04                | 2,94                | 7,97                    | 3,18    | 10,14                              | 75,00        | 0,82                  | 13,916                 | 84,00   | 1.889,90                                  |          |
| 1"     | 9  | Rectangular   | 2,84   | 2,80   | 0,00                | 0,00                | 7,94                    | 3,18    | 10,11                              | 50,00        | 0,82                  | 13,916                 | 56,12   | 1.262,73                                  |          |
| 1"     | 10 | Rectangular   | 3,12   | 2,20   | 0,00                | 0,00                | 6,86                    | 2,95    | 8,73                               | 50,00        | 0,79                  | 13,916                 | 62,90   | 1.415,15                                  |          |
| 1"     | 11 | Rectangular   | 2,57   | 3,10   | 0,00                | 0,00                | 7,95                    | 3,18    | 10,12                              | 50,00        | 0,82                  | 13,916                 | 56,08   | 1.261,76                                  |          |
| 1"     | 12 | Trapezoidal   | 3,59   | 2,00   | 4,03                | 3,15                | 7,18                    | 3,02    | 9,14                               | 45,00        | 0,80                  | 13,916                 | 54,65   | 1.229,59                                  |          |
| 1"     | 13 | Rectangular   | 3,04   | 3,2    | 0,00                | 0,00                | 9,73                    | 3,52    | 12,39                              | 55           | 0,85                  | 13,916                 | 52,76   | 1.187,13                                  |          |
| 1"     | 14 | Trapezoidal   | 3,74   | 3,10   | 3,31                | 4,18                | 11,60                   | 3,84    | 14,78                              | 55,00        | 0,89                  | 13,916                 | 46,02   | 1.035,43                                  |          |
| 1"     | 15 | Rectangular   | 3,07   | 2      | 0,00                | 0,00                | 6,13                    | 2,79    | 7,80                               | 75           | 0,77                  | 13,916                 | 102,91  | 2.315,45                                  |          |
| 1"     | 16 | Romboide      | 4,61   | 2,20   | 0,00                | 0,00                | 10,14                   | 3,59    | 12,92                              | 55,00        | 0,86                  | 13,916                 | 51,08   | 1.149,21                                  |          |
| 1"     | 17 | Trapezoidal   | 2,93   | 2,40   | 3,11                | 2,75                | 7,04                    | 2,99    | 8,96                               | 55,00        | 0,79                  | 13,916                 | 67,82   | 1.526,02                                  |          |
| 1"     | 18 | Trapezoidal   | 2,04   | 2,20   | 2,61                | 1,47                | 4,49                    | 2,39    | 5,71                               | 72,50        | 0,72                  | 13,916                 | 126,69  | 2.850,59                                  |          |
| 1"     | 19 | Romboide      | 4,34   | 2,50   | 0,00                | 0,00                | 10,85                   | 3,72    | 13,82                              | 85,00        | 0,88                  | 13,916                 | 74,91   | 1.685,54                                  |          |
| 1 1/2" | 1  | Trapezoidal   | 3,95   | 3,55   | 4,72                | 3,17                | 14,00                   | 4,22    | 17,83                              | 94,00        | 0,93                  | 13,916                 | 67,99   | 1.529,75                                  |          |
| 1 1/2" | 2  | Rectangular   | 2,03   | 2,9    | 0,00                | 0,00                | 5,87                    | 2,73    | 7,48                               | 62           | 0,76                  | 13,916                 | 87,95   | 1.978,83                                  |          |
| 1 1/2" | 3  | Romboide      | 5,60   | 3,30   | 0,00                | 0,00                | 18,46                   | 4,85    | 23,51                              | 34,00        | 0,99                  | 13,916                 | 19,85   | 446,62                                    |          |
| 1 1/2" | 4  | Rectangular   | 4,52   | 3,2    | 0,00                | 0,00                | 14,45                   | 4,29    | 18,40                              | 62           | 0,93                  | 13,916                 | 43,77   | 984,91                                    |          |

|        |    |             |      |      |      |      |       |      |       |        |      |        |        |          |          |
|--------|----|-------------|------|------|------|------|-------|------|-------|--------|------|--------|--------|----------|----------|
| 1 1/2" | 5  | Trapezoidal | 3,40 | 4,80 | 3,91 | 2,89 | 16,31 | 4,56 | 20,77 | 48,00  | 0,96 | 13,916 | 30,85  | 694,12   | 1.383,95 |
| 1 1/2" | 6  | Rectangular | 3,74 | 3,6  | 0,00 | 0,00 | 13,46 | 4,14 | 17,14 | 30     | 0,92 | 13,916 | 22,38  | 503,45   |          |
| 1 1/2" | 7  | Trapezoidal | 3,04 | 3,60 | 2,10 | 3,99 | 10,95 | 3,73 | 13,94 | 78,00  | 0,88 | 13,916 | 68,26  | 1.535,91 |          |
| 1 1/2" | 8  | Triangular  | 4,05 | 3,90 | 0,00 | 0,00 | 7,90  | 3,17 | 10,06 | 126,00 | 0,81 | 13,916 | 142,07 | 3.196,47 |          |
| 1 1/2" | 9  | Triangular  | 5,04 | 3,30 | 0,00 | 0,00 | 8,32  | 3,25 | 10,59 | 76,00  | 0,82 | 13,916 | 82,29  | 1.851,55 |          |
| 1 1/2" | 10 | Trapezoidal | 3,33 | 3,30 | 4,82 | 1,83 | 10,98 | 3,74 | 13,97 | 58,00  | 0,88 | 13,916 | 50,67  | 1.140,11 |          |
| 1 1/2" | 11 | Trapezoidal | 3,69 | 3,50 | 5,13 | 2,24 | 12,90 | 4,05 | 16,43 | 52,00  | 0,91 | 13,916 | 40,07  | 901,64   |          |
| 1 1/2" | 12 | Rectangular | 3,24 | 4,8  | 0,00 | 0,00 | 15,53 | 4,45 | 19,78 | 70     | 0,95 | 13,916 | 46,73  | 1.051,32 |          |
| 1 1/2" | 13 | Rectangular | 3,33 | 4,8  | 0,00 | 0,00 | 15,97 | 4,51 | 20,33 | 70     | 0,95 | 13,916 | 45,73  | 1.028,96 |          |
| 1 1/2" | 14 | Trapezoidal | 3,12 | 3,90 | 2,75 | 3,50 | 12,18 | 3,94 | 15,51 | 108,00 | 0,90 | 13,916 | 87,02  | 1.957,96 |          |
| 1 1/2" | 15 | Elipse      | 4,59 | 3,00 | 0,00 | 0,00 | 10,81 | 3,71 | 13,76 | 92,00  | 0,87 | 13,916 | 81,36  | 1.830,49 |          |
| 1 1/2" | 16 | Rectangular | 3,33 | 4,8  | 0,00 | 0,00 | 15,97 | 4,51 | 20,33 | 70     | 0,95 | 13,916 | 45,73  | 1.028,96 |          |
| 1 1/2" | 17 | Triangular  | 4,60 | 3,00 | 0,00 | 0,00 | 6,90  | 2,96 | 8,79  | 102,00 | 0,79 | 13,916 | 127,65 | 2.872,11 |          |
| 1 1/2" | 18 | Rectangular | 6,36 | 2,9  | 0,00 | 0,00 | 18,45 | 4,85 | 23,49 | 86     | 0,99 | 13,916 | 50,23  | 1.130,20 |          |
| 1 1/2" | 19 | Trapezoidal | 3,88 | 3,20 | 4,09 | 3,67 | 12,41 | 3,97 | 15,80 | 52,00  | 0,90 | 13,916 | 41,31  | 929,48   |          |
| 1 1/2" | 20 | Trapezoidal | 2,94 | 3,40 | 1,79 | 4,09 | 10,00 | 3,57 | 12,73 | 74,00  | 0,86 | 13,916 | 69,51  | 1.563,94 |          |
| 1 1/2" | 21 | Elipse      | 4,60 | 3,00 | 0,00 | 0,00 | 10,84 | 3,72 | 13,81 | 102,00 | 0,87 | 13,916 | 89,96  | 2.023,99 |          |
| 1 1/2" | 22 | Romboide    | 6,26 | 3,40 | 0,00 | 0,00 | 21,28 | 5,20 | 27,09 | 90,00  | 1,02 | 13,916 | 47,07  | 1.059,17 |          |

**CUADRO 34. VALORES PROMEDIO POR TAMAÑO NOMINAL Y GENERAL DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL**

| Tamaño Nominal | Resistencia Compresión Promedio (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|----------------|---|
| 1"             | 1.560,36  |
| 1 1/2"         | 1.383,95  |
| Promedio       | 1.472,16  |

**CUADRO 35. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL PARA LA MUESTRA M-3**

| Tamaño | Nº | Forma Ruptura | B (cm) | D (cm) | W <sub>1</sub> (cm) | W <sub>2</sub> (cm) | Area (cm <sup>2</sup> ) | De (cm) | De <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> ) | Carga P (kg) | Factor Corrección (F) | Factor Calibración (k) | Is (50) | Resistencia Compresión (qu) 22,5* Is (50) | Promedio |
|--------|----|---------------|--------|--------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------|------------------------------------|--------------|-----------------------|------------------------|---------|---|----------|
| 1"     | 1  | Trapezoidal   | 2,58   | 2,10   | 2,17                | 2,98                | 5,4                     | 2,62    | 6,89                               | 42,50        | 0,75                  | 13,916                 | 64,25   | 1.445,58                                  | 1.888,04 |
| 1"     | 2  | Trapezoidal   | 3,00   | 2,30   | 2,53                | 3,47                | 6,9                     | 2,97    | 8,79                               | 55,00        | 0,79                  | 13,916                 | 68,81   | 1.548,21                                  |          |
| 1"     | 3  | Trapezoidal   | 2,14   | 1,50   | 1,93                | 2,35                | 3,2                     | 2,02    | 4,09                               | 35,00        | 0,67                  | 13,916                 | 79,23   | 1.782,66                                  |          |
| 1"     | 4  | Elipse        | 4,03   | 2,30   | 0,00                | 0,00                | 7,3                     | 3,05    | 9,28                               | 55,00        | 0,80                  | 13,916                 | 66,01   | 1.485,33                                  |          |
| 1"     | 5  | Elipse        | 3,96   | 1,90   | 0,00                | 0,00                | 5,9                     | 2,74    | 7,52                               | 70,00        | 0,76                  | 13,916                 | 98,85   | 2.224,24                                  |          |
| 1"     | 6  | Triangular    | 2,39   | 1,60   | 0,00                | 0,00                | 1,9                     | 1,56    | 2,43                               | 45,00        | 0,59                  | 13,916                 | 152,31  | 3.427,00                                  |          |
| 1"     | 7  | Triangular    | 3,58   | 2,10   | 0,00                | 0,00                | 3,8                     | 2,19    | 4,78                               | 60,00        | 0,69                  | 13,916                 | 120,32  | 2.707,16                                  |          |
| 1"     | 8  | Rectangular   | 2,81   | 2,40   | 0,00                | 0,00                | 6,7                     | 2,93    | 8,57                               | 90,00        | 0,79                  | 13,916                 | 114,84  | 2.583,96                                  |          |
| 1"     | 9  | Trapezoidal   | 2,45   | 1,70   | 2,82                | 2,09                | 4,2                     | 2,30    | 5,31                               | 50,00        | 0,71                  | 13,916                 | 92,51   | 2.081,37                                  |          |
| 1"     | 10 | Triangular    | 3,10   | 3,00   | 0,00                | 0,00                | 4,7                     | 2,43    | 5,92                               | 60,00        | 0,72                  | 13,916                 | 101,94  | 2.293,58                                  |          |
| 1"     | 11 | Trapezoidal   | 2,76   | 1,90   | 3,48                | 2,04                | 5,2                     | 2,59    | 6,68                               | 50,00        | 0,74                  | 13,916                 | 77,37   | 1.740,93                                  |          |
| 1"     | 12 | Rectangular   | 2,63   | 2,7    | 0,00                | 0,00                | 7,1                     | 3,01    | 9,04                               | 57,5         | 0,80                  | 13,916                 | 70,42   | 1.584,45                                  |          |
| 1"     | 13 | Rectangular   | 3,65   | 2,1    | 0,00                | 0,00                | 7,7                     | 3,12    | 9,76                               | 55           | 0,81                  | 13,916                 | 63,45   | 1.427,67                                  |          |
| 1"     | 14 | Rectangular   | 2,86   | 2      | 0,00                | 0,00                | 5,7                     | 2,70    | 7,27                               | 50           | 0,76                  | 13,916                 | 72,49   | 1.630,92                                  |          |
| 1"     | 15 | Trapezoidal   | 2,37   | 1,90   | 2,80                | 1,94                | 4,5                     | 2,39    | 5,73                               | 50,00        | 0,72                  | 13,916                 | 87,19   | 1.961,76                                  |          |
| 1"     | 16 | Trapezoidal   | 2,94   | 1,60   | 3,28                | 2,61                | 4,7                     | 2,45    | 5,99                               | 67,50        | 0,73                  | 13,916                 | 113,64  | 2.556,88                                  |          |
| 1"     | 17 | Elipse        | 3,52   | 1,80   | 0,00                | 0,00                | 5,0                     | 2,52    | 6,33                               | 35,00        | 0,73                  | 13,916                 | 56,46   | 1.270,33                                  |          |
| 1"     | 18 | Elipse        | 3,75   | 1,60   | 0,00                | 0,00                | 4,7                     | 2,45    | 6,00                               | 55,00        | 0,73                  | 13,916                 | 92,49   | 2.081,02                                  |          |
| 1"     | 19 | Trapezoidal   | 2,08   | 1,60   | 2,44                | 1,72                | 3,3                     | 2,06    | 4,24                               | 40,00        | 0,67                  | 13,916                 | 88,06   | 1.981,44                                  |          |
| 1"     | 20 | Elipse        | 3,95   | 2,00   | 0,00                | 0,00                | 6,2                     | 2,81    | 7,89                               | 57,50        | 0,77                  | 13,916                 | 78,21   | 1.759,64                                  |          |
| 1"     | 21 | Rectangular   | 3,60   | 1,6    | 0,00                | 0,00                | 5,8                     | 2,71    | 7,34                               | 52,5         | 0,76                  | 13,916                 | 75,56   | 1.700,20                                  |          |
| 1"     | 22 | Rectangular   | 3,40   | 1,6    | 0,00                | 0,00                | 5,4                     | 2,63    | 6,92                               | 50           | 0,75                  | 13,916                 | 75,34   | 1.695,24                                  |          |
| 1"     | 23 | Elipse        | 3,35   | 1,30   | 0,00                | 0,00                | 3,4                     | 2,09    | 4,36                               | 37,50        | 0,68                  | 13,916                 | 80,80   | 1.817,92                                  |          |

|        |    |             |      |      |      |      |      |      |       |        |      |        |       |          |          |
|--------|----|-------------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|------|--------|-------|----------|----------|
| 1 1/2" | 1  | Trapezoidal | 4,17 | 3,20 | 3,46 | 4,89 | 13,4 | 4,12 | 17,00 | 124,00 | 0,92 | 13,916 | 93,07 | 2.094,01 | 1.389,53 |
| 1 1/2" | 2  | Trapezoidal | 3,37 | 2,70 | 2,96 | 3,77 | 9,1  | 3,40 | 11,57 | 52,00  | 0,84 | 13,916 | 52,58 | 1.183,01 |          |
| 1 1/2" | 3  | Trapezoidal | 3,76 | 2,70 |      |      | 7,8  | 3,15 | 9,94  | 46,00  | 0,81 | 13,916 | 52,31 | 1.177,05 |          |
| 1 1/2" | 4  | Rectangular | 5,04 | 2,2  | 0,00 | 0,00 | 11,1 | 3,76 | 14,12 | 48     | 0,88 | 13,916 | 41,60 | 935,98   |          |
| 1 1/2" | 5  | Rectangular | 4,91 | 2,15 | 0,00 | 0,00 | 10,6 | 3,67 | 13,44 | 68     | 0,87 | 13,916 | 61,25 | 1.378,08 |          |
| 1 1/2" | 6  | Trapezoidal | 2,91 | 3,40 | 3,54 | 2,28 | 9,9  | 3,55 | 12,58 | 40,00  | 0,86 | 13,916 | 37,90 | 852,80   |          |
| 1 1/2" | 7  | Trapezoidal | 4,70 | 2,10 | 5,56 | 3,84 | 9,9  | 3,54 | 12,56 | 38,00  | 0,86 | 13,916 | 36,06 | 811,41   |          |
| 1 1/2" | 8  | Trapezoidal | 2,93 | 2,80 | 3,93 | 1,94 | 8,2  | 3,23 | 10,46 | 56,00  | 0,82 | 13,916 | 61,24 | 1.377,89 |          |
| 1 1/2" | 9  | Trapezoidal | 2,71 | 3,20 | 2,63 | 2,79 | 8,7  | 3,32 | 11,03 | 60,00  | 0,83 | 13,916 | 62,97 | 1.416,89 |          |
| 1 1/2" | 10 | Trapezoidal | 4,40 | 2,30 |      |      | 8,2  | 3,23 | 10,45 | 54,00  | 0,82 | 13,916 | 59,11 | 1.329,97 |          |
| 1 1/2" | 11 | Trapezoidal | 4,79 | 2,70 |      |      | 10,6 | 3,67 | 13,48 | 87,00  | 0,87 | 13,916 | 78,14 | 1.758,16 |          |
| 1 1/2" | 12 | Rectangular | 3,24 | 2    | 0,00 | 0,00 | 6,5  | 2,87 | 8,24  | 72     | 0,78 | 13,916 | 94,74 | 2.131,75 |          |
| 1 1/2" | 13 | Triangular  | 4,66 | 3,00 | 0,00 | 0,00 | 7,0  | 2,98 | 8,90  | 80,00  | 0,79 | 13,916 | 99,12 | 2.230,13 |          |
| 1 1/2" | 14 | Trapezoidal | 3,61 | 2,70 | 3,24 | 3,98 | 9,8  | 3,52 | 12,42 | 56,00  | 0,85 | 13,916 | 53,62 | 1.206,50 |          |

**CUADRO 36. VALORES PROMEDIO POR TAMAÑO NOMINAL Y GENERAL DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL**

| Tamaño Nominal | Resistencia Compresión Promedio (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|----------------|---|
| 1"             | 1.888,04  |
| 1 1/2"         | 1.389,53  |
| Promedio       | 1.638,78  |

**CUADRO 37 . RESULTAODS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL PARA LA MUESTRA M-4**

| Tamaño | N° | Forma Ruptura | B (cm) | D (cm) | W <sub>1</sub> (cm) | W <sub>2</sub> (cm) | Área (cm <sup>2</sup> ) | De (cm) | De <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> ) | Carga P (kg) | Factor Corrección (F) | Factor Calibración (k) | Is (50) | Resistencia Compresión (qu) 22,5* Is (50) | Promedio |
|--------|----|---------------|--------|--------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------|------------------------------------|--------------|-----------------------|------------------------|---------|---|----------|
| 1"     | 1  | Trapezoidal   | 2,79   | 2,1    |                     |                     | 7,578                   | 3,11    | 9,65                               | 105          | 0,81                  | 13,916                 | 122,23  | 2.750,19                                  | 2.066,34 |
| 1"     | 2  | Trapezoidal   | 2,51   | 2,30   | 2,37                | 2,65                | 5,78                    | 2,71    | 7,35                               | 95,00        | 0,76                  | 13,916                 | 136,51  | 3.071,56                                  |          |
| 1"     | 3  | Rectangular   | 2,73   | 3,10   | 0,00                | 0,00                | 8,47                    | 3,28    | 10,78                              | 90,00        | 0,83                  | 13,916                 | 96,15   | 2.163,43                                  |          |
| 1"     | 4  | Trapezoidal   | 3,20   | 2,50   | 2,64                | 3,77                | 8,01                    | 3,19    | 10,19                              | 92,50        | 0,82                  | 13,916                 | 103,19  | 2.321,88                                  |          |
| 1"     | 5  | Trapezoidal   | 3,19   | 2,40   | 2,21                | 4,18                | 7,67                    | 3,12    | 9,76                               | 90,00        | 0,81                  | 13,916                 | 103,83  | 2.336,26                                  |          |
| 1"     | 6  | Trapezoidal   | 2,75   | 3,10   | 1,99                | 3,51                | 8,52                    | 3,29    | 10,85                              | 110,00       | 0,83                  | 13,916                 | 116,96  | 2.631,51                                  |          |
| 1"     | 7  | Trapezoidal   | 2,42   | 2,30   | 2,17                | 2,68                | 5,58                    | 2,66    | 7,10                               | 50,00        | 0,75                  | 13,916                 | 73,83   | 1.661,13                                  |          |
| 1"     | 8  | Trapezoidal   | 3,05   | 2,70   | 2,21                | 3,88                | 8,22                    | 3,24    | 10,47                              | 75,00        | 0,82                  | 13,916                 | 81,97   | 1.844,29                                  |          |
| 1"     | 9  | Trapezoidal   | 2,87   | 1,80   | 2,08                | 3,66                | 5,16                    | 2,56    | 6,57                               | 50,00        | 0,74                  | 13,916                 | 78,38   | 1.763,46                                  |          |
| 1"     | 10 | Trapezoidal   | 2,05   | 3,20   | 1,60                | 2,49                | 6,55                    | 2,89    | 8,34                               | 45,00        | 0,78                  | 13,916                 | 58,65   | 1.319,65                                  |          |
| 1"     | 11 | Romboide      | 3,61   | 2,30   | 0,00                | 0,00                | 8,31                    | 3,25    | 10,58                              | 100,00       | 0,82                  | 13,916                 | 108,37  | 2.438,23                                  |          |
| 1"     | 12 | Rectangular   | 2,02   | 2,70   | 0,00                | 0,00                | 5,46                    | 2,64    | 6,95                               | 110,00       | 0,75                  | 13,916                 | 165,11  | 3.715,01                                  |          |
| 1"     | 13 | Rectangular   | 3,40   | 1,90   | 0,00                | 0,00                | 6,46                    | 2,87    | 8,23                               | 50,00        | 0,78                  | 13,916                 | 65,87   | 1.482,16                                  |          |
| 1"     | 14 | Elipse        | 4,53   | 2,80   | 0,00                | 0,00                | 9,97                    | 3,56    | 12,69                              | 125,00       | 0,86                  | 13,916                 | 117,66  | 2.647,43                                  |          |
| 1"     | 15 | Trapezoidal   | 2,25   | 3,10   | 1,67                | 2,82                | 6,96                    | 2,98    | 8,86                               | 60,00        | 0,79                  | 13,916                 | 74,61   | 1.678,84                                  |          |
| 1"     | 16 | Rectangular   | 1,85   | 3,10   | 0,00                | 0,00                | 5,72                    | 2,70    | 7,29                               | 40,00        | 0,76                  | 13,916                 | 57,89   | 1.302,51                                  |          |
| 1"     | 17 | Trapezoidal   | 4      | 2,4    |                     |                     | 8,188                   | 3,23    | 10,43                              | 115          | 0,82                  | 13,916                 | 126,08  | 2.836,87                                  |          |
| 1"     | 18 | Triangular    | 3,39   | 2,30   | 0,00                | 0,00                | 3,90                    | 2,23    | 4,96                               | 70,00        | 0,70                  | 13,916                 | 136,40  | 3.069,08                                  |          |
| 1"     | 19 | Trapezoidal   | 3,71   | 2,1    |                     |                     | 6,057                   | 2,78    | 7,71                               | 75           | 0,77                  | 13,916                 | 103,86  | 2.336,92                                  |          |
| 1"     | 20 | Trapezoidal   | 2,53   | 2,10   | 3,12                | 1,94                | 5,31                    | 2,60    | 6,76                               | 50,00        | 0,75                  | 13,916                 | 76,70   | 1.725,65                                  |          |
| 1"     | 21 | Triangular    | 3,24   | 2,90   | 0,00                | 0,00                | 4,70                    | 2,45    | 5,98                               | 50,00        | 0,72                  | 13,916                 | 84,34   | 1.897,56                                  |          |

|        |    |             |      |      |      |      |       |      |       |        |      |        |        |          |          |
|--------|----|-------------|------|------|------|------|-------|------|-------|--------|------|--------|--------|----------|----------|
| 1 1/2" | 1  | Trapezoidal | 2,50 | 2,50 | 5,12 | 3,06 | 6,25  | 2,82 | 7,96  | 88,00  | 0,77 | 13,916 | 118,95 | 2.676,28 | 1.675,99 |
| 1 1/2" | 2  | Rectangular | 3,5  | 2,58 | 0,00 | 0,00 | 9,04  | 3,39 | 11,51 | 98     | 0,84 | 13,916 | 99,51  | 2.238,89 |          |
| 1 1/2" | 3  | Rectangular | 2,45 | 3,97 | 0,00 | 0,00 | 9,73  | 3,52 | 12,39 | 64     | 0,85 | 13,916 | 61,39  | 1.381,29 |          |
| 1 1/2" | 4  | Triangular  | 3,30 | 3,85 | 0,00 | 0,00 | 6,36  | 2,85 | 8,10  | 84,00  | 0,78 | 13,916 | 112,03 | 2.520,59 |          |
| 1 1/2" | 5  | Trapezoidal | 2,50 | 3,10 | 3,00 | 1,82 | 7,75  | 3,14 | 9,87  | 70,00  | 0,81 | 13,916 | 80,09  | 1.801,96 |          |
| 1 1/2" | 6  | Trapezoidal | 3,16 | 3,00 | 3,69 | 2,64 | 9,49  | 3,48 | 12,08 | 42,00  | 0,85 | 13,916 | 41,07  | 924,18   |          |
| 1 1/2" | 7  | Rectangular | 2,67 | 2,65 | 0,00 | 0,00 | 7,07  | 3,00 | 9,00  | 44     | 0,79 | 13,916 | 54,07  | 1.216,53 |          |
| 1 1/2" | 8  | Trapezoidal | 2,83 | 3,30 | 1,95 | 3,70 | 9,33  | 3,45 | 11,88 | 78,00  | 0,85 | 13,916 | 77,29  | 1.739,10 |          |
| 1 1/2" | 9  | Rectangular | 3,98 | 2,6  | 0,00 | 0,00 | 10,36 | 3,63 | 13,19 | 58     | 0,87 | 13,916 | 52,99  | 1.192,19 |          |
| 1 1/2" | 10 | Rectangular | 4,83 | 3    | 0,00 | 0,00 | 14,49 | 4,30 | 18,45 | 58     | 0,93 | 13,916 | 40,86  | 919,30   |          |
| 1 1/2" | 11 | Elipse      | 4,77 | 2,90 | 0,00 | 0,00 | 10,87 | 3,72 | 13,84 | 56,00  | 0,88 | 13,916 | 49,29  | 1.108,99 |          |
| 1 1/2" | 12 | Elipse      | 5,40 | 2,70 | 0,00 | 0,00 | 11,44 | 3,82 | 14,57 | 48,00  | 0,89 | 13,916 | 40,60  | 913,43   |          |
| 1 1/2" | 13 | Elipse      | 5,59 | 2,50 | 0,00 | 0,00 | 10,98 | 3,74 | 13,98 | 100,00 | 0,88 | 13,916 | 87,33  | 1.964,86 |          |
| 1 1/2" | 14 | Rectangular | 4,08 | 2,4  | 0,00 | 0,00 | 9,80  | 3,53 | 12,48 | 102    | 0,86 | 13,916 | 97,28  | 2.188,77 |          |
| 1 1/2" | 15 | Triangular  | 5,09 | 2,30 | 0,00 | 0,00 | 9,00  | 3,38 | 11,46 | 80,00  | 0,84 | 13,916 | 81,53  | 1.834,52 |          |
| 1 1/2" | 16 | Triangular  | 4,49 | 2,00 | 0,00 | 0,00 | 8,26  | 3,24 | 10,52 | 102,00 | 0,82 | 13,916 | 111,03 | 2.498,23 |          |

**CUADRO 38. VALORES PROMEDIO POR TAMAÑO NOMINAL Y GENERAL DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL**

| Tamaño Nominal | Resistencia Compresión Promedio (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|----------------|---|
| 1"             | 2.066,34  |
| 1 1/2"         | 1.675,99  |
| Promedio       | 1.871,16  |

**CUADRO 39. RESULTAODS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL PARA LA MUESTRA M-5**

| Tamaño | N° | Forma Ruptura | B (cm) | D (cm) | W1 (cm) | W2 (cm) | Área (cm2) | De (cm) | De2 (cm2) | Carga P (kg) | Factor Corrección (F) | Factor Calibración (k) | Is (50) | Resistencia Compresión (qu) 22,5* Is (50) | Promedio |
|--------|----|---------------|--------|--------|---------|---------|------------|---------|-----------|--------------|-----------------------|------------------------|---------|---|----------|
| 1"     | 1  | Rectangular   | 2,09   | 3,30   | 0,00    | 0,00    | 6,89       | 2,96    | 8,78      | 60,00        | 0,79                  | 13,916                 | 75,17   | 1.691,24                                  | 2.058,72 |
| 1"     | 2  | Rectangular   | 2,03   | 3,40   | 0,00    | 0,00    | 6,91       | 2,97    | 8,80      | 100,00       | 0,79                  | 13,916                 | 125,02  | 2.812,89                                  |          |
| 1"     | 3  | Trapezoidal   | 2,61   | 2,60   | 3,33    | 1,89    | 6,78       | 2,94    | 8,64      | 85,00        | 0,79                  | 13,916                 | 107,83  | 2.426,06                                  |          |
| 1"     | 4  | Trapezoidal   | 4,00   | 1,80   | 3,33    | 1,89    | 9,83       | 3,54    | 12,51     | 90,00        | 0,86                  | 13,916                 | 85,65   | 1.927,06                                  |          |
| 1"     | 5  | Rectangular   | 2,79   | 2,50   | 0,00    | 0,00    | 6,97       | 2,98    | 8,87      | 40,00        | 0,79                  | 13,916                 | 49,71   | 1.118,54                                  |          |
| 1"     | 6  | Trapezoidal   | 2,83   | 3,20   | 2,23    | 3,43    | 9,06       | 3,40    | 11,54     | 80,00        | 0,84                  | 13,916                 | 81,08   | 1.824,24                                  |          |
| 1"     | 7  | Romboide      | 4,50   | 2,60   | 0,00    | 0,00    | 11,7       | 3,86    | 14,90     | 85,00        | 0,89                  | 13,916                 | 70,67   | 1.590,12                                  |          |
| 1"     | 8  | Rectangular   | 2,85   | 2,90   | 0,00    | 0,00    | 8,27       | 3,24    | 10,52     | 125,00       | 0,82                  | 13,916                 | 136,06  | 3.061,27                                  |          |
| 1"     | 9  | Trapezoidal   | 2,40   | 2,80   | 2,38    | 2,43    | 6,72       | 2,93    | 8,56      | 87,50        | 0,79                  | 13,916                 | 111,79  | 2.515,25                                  |          |
| 1"     | 10 | Rectangular   | 2,25   | 3,30   | 0,00    | 0,00    | 7,43       | 3,07    | 9,45      | 60,00        | 0,80                  | 13,916                 | 70,96   | 1.596,68                                  |          |
| 1"     | 11 | Elipse        | 4,08   | 2,24   | 0,00    | 0,00    | 7,17       | 3,02    | 9,13      | 95,00        | 0,80                  | 13,916                 | 115,47  | 2.598,04                                  |          |
| 1"     | 12 | Rectangular   | 3,00   | 1,80   | 0,00    | 0,00    | 5,40       | 2,62    | 6,88      | 80,00        | 0,75                  | 13,916                 | 121,10  | 2.724,83                                  |          |
| 1"     | 13 | Semicírculo   | 0      | 1,9    | 0,00    | 0,00    | 5,67       | 2,69    | 7,22      | 50           | 0,76                  | 13,916                 | 72,88   | 1.639,70                                  |          |
| 1"     | 14 | Rectangular   | 3,38   | 4,00   | 0,00    | 0,00    | 13,5       | 4,15    | 17,19     | 70,00        | 0,92                  | 13,916                 | 52,09   | 1.172,05                                  |          |
| 1"     | 15 | Rectangular   | 3,34   | 2,50   | 0,00    | 0,00    | 8,36       | 3,26    | 10,64     | 65,00        | 0,83                  | 13,916                 | 70,16   | 1.578,56                                  |          |
| 1"     | 16 | Romboide      | 4,50   | 2,70   | 3,14    | 2,90    | 12,2       | 3,93    | 15,47     | 100,00       | 0,90                  | 13,916                 | 80,75   | 1.816,81                                  |          |
| 1"     | 17 | Triangular    | 3,43   | 3,00   | 0,00    | 0,00    | 5,15       | 2,56    | 6,55      | 50,00        | 0,74                  | 13,916                 | 78,56   | 1.767,68                                  |          |
| 1"     | 18 | Trapezoidal   | 2,88   | 2,60   | 2,23    | 3,52    | 7,48       | 3,09    | 9,52      | 100,00       | 0,80                  | 13,916                 | 117,64  | 2.646,96                                  |          |
| 1"     | 19 | Rectangular   | 3,60   | 2,70   | 0,00    | 0,00    | 9,72       | 3,52    | 12,38     | 90,00        | 0,85                  | 13,916                 | 86,39   | 1.943,82                                  |          |
| 1"     | 20 | Trapezoidal   | 2,80   | 2,80   | 3,19    | 2,41    | 7,84       | 3,16    | 9,99      | 97,50        | 0,81                  | 13,916                 | 110,51  | 2.486,48                                  |          |
|        |    |               |        |        |         |         |            |         |           |              |                       |                        |         |   |          |
| 1 1/2" | 1  | Trapezoidal   | 4,63   | 2,80   | 5,78    | 3,48    | 12,9       | 4,06    | 16,49     | 154,00       | 0,91                  | 13,916                 | 118,33  | 2.662,53                                  | 2.201,10 |
| 1 1/2" | 2  | Trapezoidal   | 4,14   | 3,10   | 4,62    | 3,66    | 12,8       | 4,04    | 16,35     | 126,00       | 0,91                  | 13,916                 | 97,49   | 2.193,43                                  |          |



|        |    |             |      |      |      |      |      |      |       |        |      |        |        |          |
|--------|----|-------------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|------|--------|--------|----------|
| 1 1/2" | 3  | Trapezoidal | 3,76 | 2,90 | 3,87 | 4,59 | 7,81 | 3,15 | 9,94  | 60,00  | 0,81 | 13,916 | 68,23  | 1.535,28 |
| 1 1/2" | 4  | Rectangular | 3,96 | 3,3  | 0,00 | 0,00 | 13,1 | 4,08 | 16,65 | 90     | 0,91 | 13,916 | 68,66  | 1.544,78 |
| 1 1/2" | 5  | Trapezoidal | 3,76 | 2,70 | 4,41 | 3,30 | 7,81 | 3,15 | 9,94  | 84,00  | 0,81 | 13,916 | 95,53  | 2.149,40 |
| 1 1/2" | 6  | Trapezoidal | 3,76 | 2,90 | 3,99 | 3,45 | 7,81 | 3,15 | 9,94  | 100,00 | 0,81 | 13,916 | 113,72 | 2.558,81 |
| 1 1/2" | 7  | Rectangular | 4,52 | 2,7  | 0,00 | 0,00 | 12,2 | 3,94 | 15,55 | 90     | 0,90 | 13,916 | 72,37  | 1.628,40 |
| 1 1/2" | 8  | Triangular  | 3,28 | 4,30 | 0,00 | 0,00 | 7,06 | 3,00 | 8,99  | 80,00  | 0,79 | 13,916 | 98,40  | 2.214,09 |
| 1 1/2" | 9  | Trapezoidal | 4,80 | 2,80 |      |      | 10,7 | 3,70 | 13,66 | 130,00 | 0,87 | 13,916 | 115,60 | 2.601,04 |
| 1 1/2" | 10 | Trapezoidal | 2,34 | 3,30 | 2,99 | 1,69 | 7,71 | 3,13 | 9,82  | 42,00  | 0,81 | 13,916 | 48,23  | 1.085,11 |
| 1 1/2" | 11 | Trapezoidal | 3,12 | 3,10 | 3,69 | 2,55 | 9,66 | 3,51 | 12,30 | 118,00 | 0,85 | 13,916 | 113,78 | 2.560,05 |
| 1 1/2" | 12 | Rectangular | 4,25 | 2,4  | 0,00 | 0,00 | 8,70 | 3,33 | 11,08 | 116    | 0,83 | 13,916 | 121,35 | 2.730,29 |
| 1 1/2" | 13 | Trapezoidal | 2,86 | 3,90 | 3,83 | 1,89 | 11,1 | 3,77 | 14,19 | 132,00 | 0,88 | 13,916 | 113,97 | 2.564,28 |
| 1 1/2" | 14 | Trapezoidal | 3,24 | 3,70 | 3,68 | 2,80 | 12,0 | 3,91 | 15,25 | 72,00  | 0,89 | 13,916 | 58,77  | 1.322,41 |
| 1 1/2" | 15 | Triangular  | 3,88 | 3,20 | 0,00 | 0,00 | 6,20 | 2,81 | 7,90  | 110,00 | 0,77 | 13,916 | 149,55 | 3.364,89 |

| <b>CUADRO 40. VALORES PROMEDIO POR TAMAÑO NOMINAL Y GENERAL DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL</b> |   |
|---|---|
| Tamaño Nominal  | Resistencia Compresión Promedio (kg/cm <sup>2</sup> ) |
| 1"  | 2.058,72  |
| 1 1/2"  | 2.201,10  |
| Promedio  | 2.129,91  |

**CUADRO 41. VALORES DE REBOTE DETERMINADO POR EL ESCLEROMETRO EN LOS TALUDES CORRESPONDIENTES DE LA MUESTRA**

| Muestra |                  | Valor de Rebote |     |     |     |     |    |     |    |     |     |     |        |     |     | Promedio | Resistencia a la Compresión Kg/cm <sup>2</sup> |        |
|---------|------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|----------|--|--------|
| M-1     | TALUD voladura 1 | 55              | 48  | 58  | 60  | 50  | 60 | 48  | 60 | 40  |     |     |        |     |     |          | 58,6   | 1530   |
| M-2     | TALUD voladura 2 | 55              | 55  | 50  | 65  | 60  | 58 | 58  | 60 | 60  | 58  | 58  | 1938   |     |     |          | 60,5   | 1938   |
| M-3     | TALUD voladura 3 | 56              | 44  | 100 | 50  | 100 | 54 | 60  | 62 | 58  | 100 | 50  | 1989   | 60  | 45  |          | 77   | 1989   |
| M-4     | TALUD voladura 4 | 60              | 50  | 45  | 70  | 70  | 55 | 65  | 63 | 100 | 100 | 100 | 2014,5 | 100 | 100 |          | 96   | 2014,5 |
| M-5     | TALUD voladura 5 | 60              | 100 | 100 | 100 | 60  | 70 | 100 | 70 | 80  | 60  |     |        |     |     |          | 94   | 2040   |

Correlacionando el número de rebote, respecto a la densidad seca de la roca y la posición del esclerómetro (horizontal) se determina la resistencia a la compresión de acuerdo a la figura 26, del Diagrama de clasificación de rocas basado en la dureza de Schmidt, intervalo de confianza del 75%.

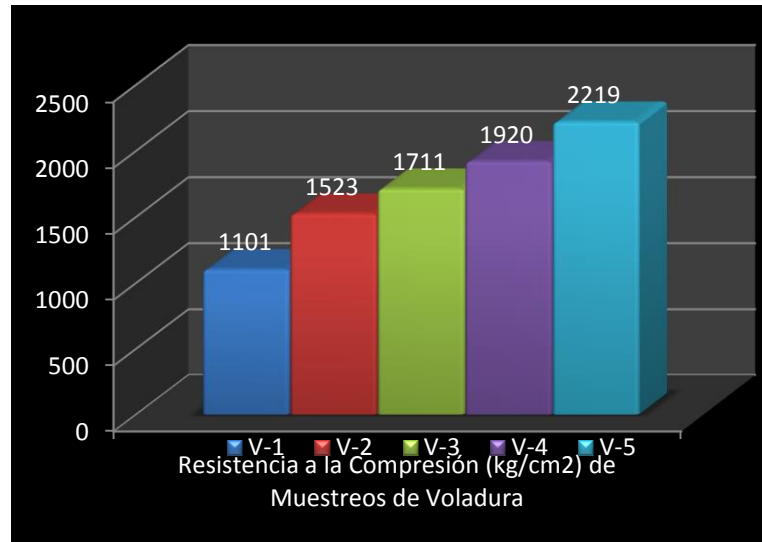
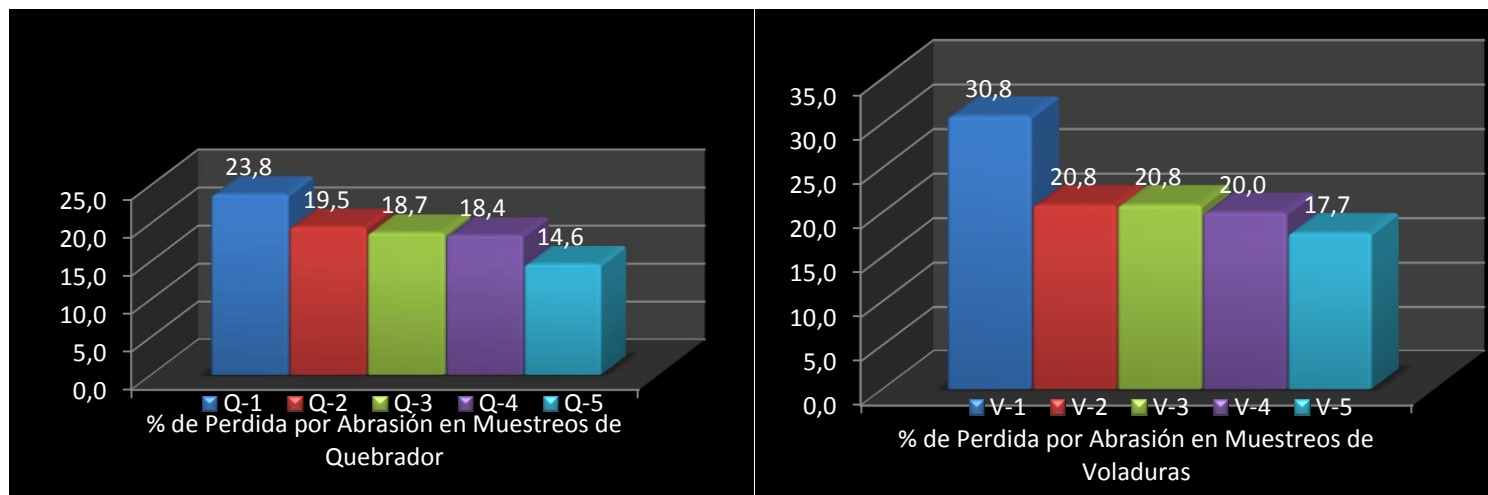
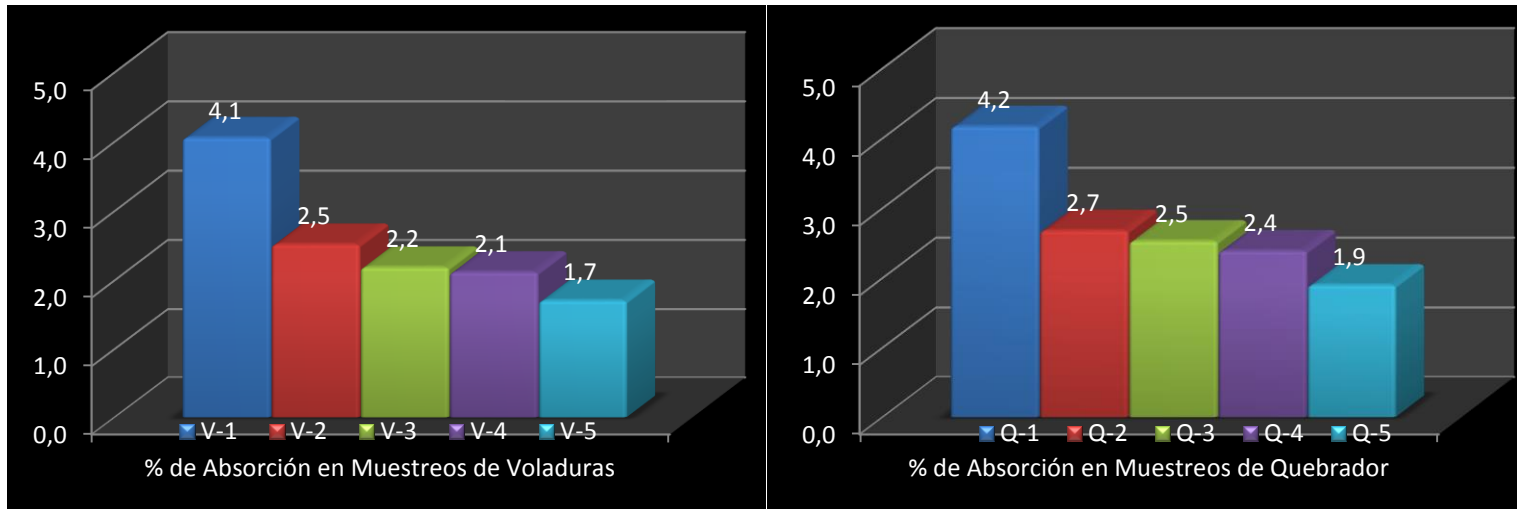


Gráfico 1. Las resistencias a la Compresión determinadas por el ensayo de Carga Puntual.



**Gráfico 2.** Porcentajes de Pérdida por Abrasión para muestras in situ y Quebrador



**Gráfico 3.** Porcentajes de Absorción para muestras in situ y Quebrador

# Anexos

## Ilustraciones de los Ensayos

A continuación se muestran un conjunto de fotografías que detallan el conjunto de pruebas que se efectuaron para alcanzar los resultados de este proyecto.



**Figura 1.** Recolección de muestras in situ, posterior a una voladura. Fuente: autora.



**Figura 2.** Cerro Minas, Santa Ana. Fuente: autora



**Figura 3.** Material en Apilamiento posterior por el proceso de trituración y criba de la roca. Fuente: autora.



**Figura 4.** Trituradora de mandíbula de la Escuela de Ing. Materiales I.T.C.R, usada para el material obtenido in situ. Fuente: Autora.





**Figura 5.** Mandíbula de trituración Fuente: Autora



**Figura 6.** Ilustración de cuarteo mecanizado de material a analizar. Fuente: Autora.



**Figura 7.** Cuarteo de material obtenido en Cerro Minas. Fuente:Autora



**Figura 8.** Máquina de Los Angeles donde se realizó la abrasión de los materiales. Fuente: Autora



**Figura 9.** Ilustración de los 11 balines, Clase B. Fuente: Aurora



**Figura10.** Material posterior del ensayo de la máquina de los Ángeles. M-1. Fuente: Autora.



**Figura11.** Material posterior del ensayo en la máquina de los Ángeles. M-2 Fuente:Autora



**Figura 12.** Material posterior al ensayo en la máquina de los Ángeles. M-3. Fuente: Autora.



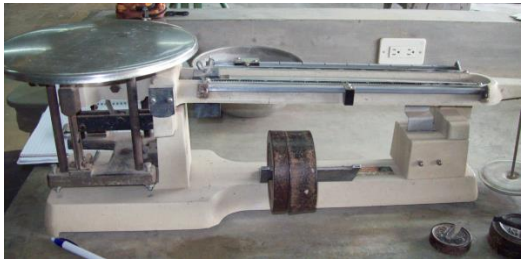
**Fuente 15.** Material sumergido 24 Horas, Agregado saturado Fuente: Autora.



**Figura 13.** Material posterior al ensayo en la máquina de los Ángeles. M-5. Fuente: Autora.



**Figura 16.** Material en proceso de Saturado Superficie Seca. Fuente: Autora



**Figura 14.** Balanza utilizada para la prueba de Absorción. Fuente: Autora



**Figura 17.** Fotografía que ilustra cuando se obtiene el peso de la canasta sumergida sin el agregado. Fuente: Autora.





**Figura 18.** Ilustración del Material en la canasta donde se determina el peso sumergido. Fuente:Autora



**Figura 19.** Material en el horno para determinar la condición de Peso seco del agregado. Fuente: Autora.



**Figura 20.** Algunos Especímenes a fallar en la prueba de Carga Puntual M-1, Ret 1 ½". Fuente: Autora



**Figura 21.** Algunos Especímenes a fallar en la prueba de Carga Puntual M-2, Ret 1 ½". Fuente: Autora





**Figura 22.** Algunos Especímenes a fallar en la prueba de Carga Puntual M-3, Ret 1" Fuente: Autora



**Figura 22.** Algunos Especímenes a fallar en la prueba de Carga Puntual M-4, Ret 1" Fuente: Autora



**Figura 22.** Algunos Especímenes a fallar en la prueba de Carga Puntual M-4, Ret 1 1/2" Fuente: Autora



**Figura 23.** Roca fragmentada por carga puntual mediante un par de puntas cónicas. M-1. Fuente: Autora



**Figura 24.** Roca fragmentada por carga puntual mediante un par de puntas cónicas. M-2. Fuente: Autora



**Figura 25.** Roca fragmentada por carga puntual mediante un par de puntas cónicas. M-3. Fuente: Autora



**Figura 27.** Roca fragmentada por carga puntual mediante un par de puntas cónicas. M-5. Fuente: Autora



**Figura 26.** Roca fragmentada por carga puntual mediante un par de puntas cónicas. M-4 Fuente: Autora





**Figura 28.** Esclerómetro utilizado en los taludes de Cerro Minas analizados Fuente: Autora



**Figura 29,** Ilustración del número de rebote de 100, el cual este corresponde al máximo valor del esclerómetro. Fuente: Autora



**Figura 31.** Determinación del Número de rebote con el esclerómetro en uno de los taludes de análisis. Fuente: Autora.



**Figura 30.** Análisis del talud con el esclerómetro por parte de la Geóloga Mauren Carrilo de Holcim Fuente: Autora



**Figura 32.** Talud donde analizado mediante el ensayo del Esclerómetro. Fuente: Autora.



**Figura 31.** Determinación del Número de rebote con el esclerómetro en uno de los taludes de análisis. Fuente: Autora.



**Figura 34.** Muestra M-1, preliminar a su inmersión en Etilenglicol. Fuente: Autora.



**Figura 32.** Ilustración de uno de los taludes analizados en el presente estudio. Fuente: Autora.



**Figura 35.** Muestra M-2, preliminar a su inmersión en Etilenglicol. Fuente: Autora.



**Figura 33.** Análisis del Talud para determinar el número de rebote con el esclerómetro. Fuente: Autora.



**Figura 36.** Muestra M-3, preliminar a su inmersión en Etilenglicol. Fuente: Autora.

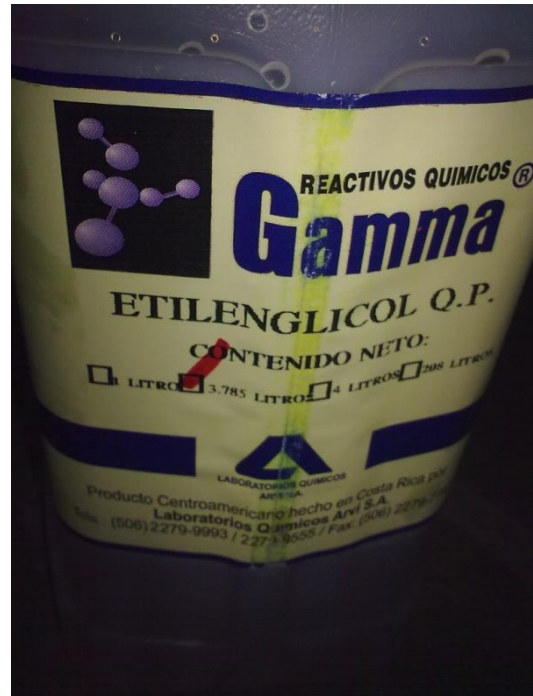




**Figura 37.** Muestra M-4, preliminar a su inmersión en Etilenglicol. Fuente: Autora.



**Figura 38.** Muestra M-5, preliminar a su inmersión en Etilenglicol. Fuente: Autora.



**Figura 39.** Etilenglicol utilizado para la prueba en su inmersión. Fuente: Autora.



**Figura 40.** Muestra M-1, en su inmersión en Etilenglicol por un periodo de un mes. Fuente: Autora.



**Figura 41.** Muestra M-1, inmersión por un periodo de un mes. Fuente: Autora.



**Figura 43.** Muestra M-2, inmersión por un periodo de un mes. Fuente: Autora



**Figura 42.** Muestra M-2, en su inmersión en Etilenglicol. Fuente: Autora.



**Figura 44.** Muestra M-3, en su inmersión en Etilenglicol. Fuente: Autora.





**Figura 45.** Muestra M-3, inmersión por un periodo de un mes. Fuente: Autora



**Figura 47.** Muestra M-4, inmersión por un periodo de un mes. Fuente: Autora



**Figura 46.** Muestra M-4, en su inmersión en Etilenglicol. Fuente: Autora.



**Figura 48.** Muestra M-4, en su inmersión en Etilenglicol. Fuente: Autora.



**Figura 49.** Muestra M-4, inmersión por un periodo de un mes. Fuente: Autora



**Figura 50.** Muestra Adicional analizada en inmersión en etilenglicol, por periodo un periodo de 22 días. Fuente: Autora



**Figura 51.** Muestra Adicional con presencia de arcilla. Fuente: Autora.



**Figura 52.** Pérdida por Inmersión en Etilenglicol, en muestra adicional. Fuente: Autora.



# Bibliografía

- Alaejos P.; Fernández M. 1996. **High-performance concrete: requirements for constituent materials and mix proportioning.** "ACI Materials journal," (U.S.A.), 93 (3), p. 236.
- Alfaro B. 1984. **Influencia del agregado en la producción de concretos de mediana resistencia.** Tesis. Ingeniería Civil. San José. Universidad de Costa Rica.
- Araya. 2009. **Consultas técnicas referentes a las diferentes pruebas de laboratorio practicadas a los materiales.** Cartago. Comunicación Personal.
- Araya M. 2008. **Manual Teórico de Concreto.** ITCR. Material de apoyo.
- Cascarrillo, R.L, Nilson, A.H, Slate, F.O,"**Microcracking and Engineering Properties of High Strength Concrete**", **Department Report No. 80-1**, Structural Engineering Department, Cornell University, New York, feb 1980, 254 pp.
- Cerón M., Duarte F., Castillo W. 1996. **Propiedades físicas de los agregados pétreos de la ciudad de Mérida.** "Boletín académico FIUADY," (México), (31), p. 27.
- Cruz K. 2005. **Caracterización geotécnica de rocas volcánicas blandas en el GAM.** Tesis. Ingeniería Civil. San José. Universidad Latina.
- Denyer & Kussmaul. 1994. **Atlas geológico del Gran Área Metropolitana.** Cartago. Editorial Tecnológica. 109:187-p
- Denyer & Kussmaul. 2000. **Geología de Costa Rica.** Cartago. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 365: 351-p
- Gamboa D. 2008. **Informe preliminar de Geología en Cerro Minas.**
- Kanji &Galván. 1998 **Correlation of Properties of Soft Rocks.** University of S.Paulo, Brazil
- Laporte G. **Características y comportamientos de los agregados en Costa Rica.**
- Laporte G. **Consultas técnicas referentes a resultados obtenidos en el proyecto.** San José. Comunicación Personal
- Mena M., 1994. **Manual de tecnología del concreto.** México DF. Editorial LIMUSA S.A. 123:130-p
- Mezerville J.2000. **Influencia del agregado grueso de cuatro fuentes nacionales en mezclas de concreto.** Tesis. Ingeniería Civil. San José. Universidad de Costa Rica.
- Milanés J. 1990. **Nuevas fuentes de agregados para la producción de concretos de mediana resistencia.** Tesis. Ingeniería Civil. San José. Universidad de Costa Rica.

- Mora & Valverde, 1990. **La geología y sus procesos**. Costa Rica: Editorial Tecnológica. 10:47-p
- Neville A. 1988. **Tecnología del concreto Tomo 1**. México DF: Editorial LIMUSA S.A. 169:192-p
- González V. 2002. **Ingeniería Geológica**. Pearson Educación Madrid. 715pp.
- Instituto de Ingeniería. UNAM. **Manual de Tecnología del Concreto Tomo 1**, editorial Limusa. México D.F.1994
- Ramírez O. 2009. **Consultas respecto a la caracterización del macizo rocoso**. Cartago. Comunicación Personal.
- Ramírez O. 2007. Material didáctico de Geología. Escuela de Ingeniería en Construcción. ITCR
- Solano J. 2010. **Consulta sobre las aplicaciones de agregados según parámetros obtenidos en el laboratorio**. Cartago. Comunicación Personal.
- Suarez, J.2009. **Deslizamientos, Análisis Geotécnico 1**. Colombia. Editorial Universidad Industrial de Santander, UIS 340:341pp
- Tapia, M. **Introducción a la mecánica de rocas y a la ingeniería de rocas**. Departamento de Geotecnia. Instituto Costarricense de Electricidad.
- Tapia, M. 2010. **Consulta respecto a evaluación de parámetros de caracterización física y mecánica de rocas**. San José. Comunicación personal.
- Torres R. 2010. **Características del sistema de medición y consulta sobre correlaciones y coeficientes**. Cartago. Comunicación Personal.
- Ulate F. 2001. **Influencia del agregado grueso de cuatro fuentes nacionales en mezclas de concreto**. Tesis. Ingeniería Civil. San José. Universidad de Costa Rica.
- Valverde, M. 1988. Resistencia al corte del material limpio de la presa San Miguel. **IV Seminario Nacional de Geotecnia**. San José, Costa Rica.