# UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

## FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

## MAGÍSTER EN INGENIERIA CIVIL

# TESIS SOBRE MEZCLAS GRANULARES
# ARENA DE OTTAWA MAS GRAVAS
# PRUEBA TRIAXIAL RAPIDA.


**ASESOR: ING PhD ARCESIO LIZCANO PELAEZ**

**ALUMNO : FREDY RAUL ARIZA GONZALEZ**

**CODIGO 199927394**


**Bogotá D.C. Enero 31 de 2003.**

**CONTENIDO.**

**INTRODUCCIÓN.**

**1. MATERIALES UTILIZADOS..... 11**

1.1 Arena de Ottawa..... 11
1.1.1. Descripción..... 11
1.1.2. Densidad relativa, porosidad máxima y mínima.....12
1.1.3. Granulometría arena de Ottawa..... 12

**2. GRAVEDAD ESPECIFICA.....13**
**(Referencias AASHTO T100-70, ASTM D854-58)**

2.1 Arena de Ottawa..... 13
2.1.1. Objetivos..... 13
2.1.2. Equipo..... 14
2.1.3. Gravedad Especifica..... 14
2.1.4. Procedimiento de laboratorio Gs arena de Ottawa..... 14
2.2. Gravas..... 16

**3. RELACIONES VOLUMÉTRICAS Y GRAVIMETRICAS..... 17**

3.1. Relaciones fundamentales..... 17
3.1.2. Fase arena de Ottawa mas grava..... 17
3.2 Porosidad de mezclas granulares arena de Ottawa mas grava..... 18
3.2.1. Medida de Porosidad..... 18
3.2.2. Concentración de Partículas en las Mezclas..... 18
3.2.3. Porosidad y estructuras granulares de las mezclas arena grava..... 19

**4. PROCEDIMIENTO MEZCLAS ARENA OTTAWA MAS GRAVA..... 22**

4.1. Procedimiento elaboración espécimen mezcla arena de Ottawa mas grava..... 23
4.1.1. Secuencia elaboración espécimen mezcla binaria..... 23

**5. CAMARA TRIAXIAL UTILIZADA PARA EL EXPERIMENTO..... 27**

**6. MARCO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL..... 29**

**7. PRUEBA DE COMPRESIÓN TRIAXIAL RAPIDA..... 30**
(Prueba de compresión sin drenaje).

**8. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... 31**

**8.1 ANÁLISIS RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE ..... 31**

**8.1.1 Envolvente de mohr y ángulo de fricción ..... 31**

**8.2. Análisis mezcla 100 % arena 0 % grava..... 32**
8.2.1. Convenciones plano de mohr en estado limite 100 % arena 0 % grava..... 32
8.2.2. Envolvente de mohr mezcla 100 % arena 0 % grava..... 32
8.2.3. Correlación diagrama p – q, ángulo de fricción mohr ..... 33
8.2.4. Diagrama p – q mezcla 100 % arena 0 % grava..... 33
8.2.5. Propiedades de las mezclas 100 % arena 0 % grava..... 34
8.2.6. Resultados análisis diagramas de mohr, p – q..... 34

**8.3. Análisis mezcla 80 % arena 20 % grava**. ..... 35
8.3.1. Convenciones plano de mohr en estado limite 80 % arena 20 % grava..... 35
8.3.2. Envolvente de mohr mezcla 80 % arena 20 % grava..... 35
8.3.3. Correlación diagrama p – q, ángulo de fricción mohr ..... 36
8.3.4. Diagrama p – q mezcla 80 % arena 20 % grava..... 36
8.3.5. Propiedades de las mezclas 80 % arena 20 % grava..... 37
8.3.6. Resultados análisis diagramas de mohr, p – q..... 37

**8.4. Análisis mezcla 60 % arena 40 % grava..... 38**
8.4.1 Convenciones plano de mohr en estado limite 60 % arena 40 % grava..... 38
8.4.2. Envolvente de mohr mezcla 60 % arena 40 % grava..... 38
8.4.3. Correlacion diagrama p – q, Angulo de fricción mohr..... 39
8.4.4. Diagrama p – q mezcla 60 % arena 40 % grava..... 39
8.4.5. Propiedades de las mezclas 60 % arena 40 % grava..... 40
8.4.6. Resultados análisis diagramas de mohr, p – q..... 40

**8.5. Análisis mezcla 40 % arena 60 % grava..... 41**
8.5.1. Convenciones plano de mohr en estado limite 40 % arena 60 % grava..... 41
8.5.2. Envolvente de mohr mezcla 40 % arena 60 % grava..... 41
8.5.3. Correlación diagrama p – q, ángulo de fricción mohr..... 42
8.5.4. Diagrama p – q mezcla 40 % arena 60 % grava..... 42
8.5.5. Propiedades de las mezclas 40 % arena 60 % grava..... 43
8.5.6. Resultados análisis diagramas de mohr, p – q..... 43

**8.6. Análisis mezcla 20 % arena 80 % grava..... 44**
8.6.1. Convenciones plano de mohr en estado limite 20 % arena 80 % grava..... 44
8.6.2. Envolvente de mohr mezcla 20 % arena 80 % grava..... 44
8.6.3. Correlación diagrama p – q, ángulo de fricción mohr..... 45
8.6.4. Diagrama p – q mezcla 20 % arena 80 % grava..... 45
8.6.5. Propiedades de las mezclas 20 % arena 80 % grava..... 46
8.6.6. Resultados análisis diagramas de mohr, p – q..... 46

**8.7. Análisis mezcla 0 % arena 100 % grava..... 47**
8.7.1. Convenciones plano de mohr en estado limite 0 % arena 100 % grava..... 47

8.7.2. Envolvente de mohr mezcla 0 % arena 100 % grava..... 47
8.7.3. Correlación diagrama p – q, ángulo de fricción mohr..... 48
8.7.4. Diagrama p – q mezcla 0 % arena 100 % grava..... 48
8.7.5. Propiedades de las mezclas 0 % arena 100 % grava..... 49
8.7.6. Resultados análisis diagramas de mohr, p – q..... 49

**8.8. FRICCION ENTRE PARTICULAS EN CONTACTO MEZCLAS ARENA GRAVA..... 50**

8.8.1. Resistencia al esfuerzo cortante mezclas arena de Ottawa mas gravas partículas en contacto..... 50
8.8.2. Diagrama del ángulo de fricción entre partículas en contacto arena grava..... 50
8.8.3. Consideraciones a la fricción entre partículas en contacto arena grava. ..... 51
8.8.4. Fricción entre dos partículas arena grava ( Leyes de amontons )..... 51
8.8.5. Teoría de la fricción por adherencia..... 51
8.8.6. Influencia de la rugosidad superficial en la fricción entre partículas en contacto arena grava..... 53
8.8.7. Relación entre la fricción estática y la cinética en partículas arena grava..... 53
8.8.8. Fricción en la rodadura de partículas arena grava..... 54

**8.9. FACTORES DE INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA MEZCLAS ARENA GRAVA..... 54**

8.9.1. Influencia de la relación de vacíos y la porosidad..... 55
8.9.2. Clasificación de las estructuras granulares de las mezclas arena grava basadas en su porosidad..... 57
8.9.2.1. Tipos de estructuras de soporte clasificadas de acuerdo a los datos obtenidos de los análisis de laboratorio ..... 57
8.9.2.2. Resultados estructuras de soporte..... 58
8.9.3. Relación entre la porosidad y la fuerza de corte..... 59
8.9.3.1 Diagrama q - % concentración en peso partículas gruesas..... 61
8.9.4. Influencia de la velocidad de carga..... 63
8.9.5. Influencia del contenido de humedad..... 63
8.9.6. Influencia en el ángulo de fricción por la concentración de partículas..... 63
8.9.7. Influencia del tamaño de las partículas mezcladas..... 63
8.9.8. Influencia de la granulometría de la mezcla arena grava..... 64
8.9.10. Angulosidad de las partículas..... 64
8.9.11 Tipo de Mineral..... 64

9. **ANÁLISIS ESFUERZO DEFORMACIÓN..... 65**
9.1. Esfuerzo deformación mezcla 100 % arena 0 % grava..... 65
9.2. Esfuerzo deformación mezcla 80 % arena 20 % grava..... 65
9.3. Esfuerzo deformación mezcla 60 % arena 40 % grava..... 66
9.4. Esfuerzo deformación mezcla 40 % arena 60 % grava..... 66
9.4. Esfuerzo deformación mezcla 20 % arena 80 % grava..... 67

9.5. Esfuerzo deformación mezcla 0 % arena 100 % grava..... 67

9.6. Análisis esfuerzo deformación presión de confinamiento 0.5 Kg / Cm2..... 68
9.6a. Análisis esfuerzo deformación presión de confinamiento 1 Kg / Cm2..... 68
9.7. Análisis esfuerzo deformación presión de confinamiento 1.5 Kg / Cm2..... 69
9.8. Consideraciones al análisis esfuerzo desviador deformación unitaria %..... 69

**10. CONCLUSIONES GENERALES..... 71**

**11. ANEXO LISTADO DE FOTOGRAFIAS**

**12. DOCUMENTOS DE REFERENCIA.**

**LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS.**

**Tabla 1 (Pag 12)**. Características granulométricas arena de Ottawa.

**Figura 1 (Pag 13).** Granos de arena de Ottawa 0.19 mm a 0.42 mm ( lado derecho ).

**Figura 2 (Pag 17).** Las partículas blancas representan la arena de Ottawa las partículas de grava están representadas por el color gris y los vacíos por las líneas achuradas.

**Figuras 3,4,5,6,7,8 (Pag 19).** Estructura y matriz de partículas.

**Figura 9ª, 9b, 9c (Pag 20).** Estructura grava y arena.

**Figuras 1 y 11 (Pag 52)**. La figura uno ( lado izquierdo ) es una fotografía ampliada de arena de Ottawa de 0.19 a 0.42 mm; la figura once representa una mezcla de arena de Ottawa con partículas de grava de 4.76 mm. Obsérvese los contactos entre las partículas pequeñas y grandes, el área de contacto es una fracción del área total de cada una de las partículas.

**Figura 12 (Pag 55).** Esquema ilustrativo comportamiento de mezclas sueltas y mezclas granulares en estado mas compacto, las mezclas de esta investigación son de tipo suelto.

**Figura 12ª (Pag 55)**. Tendencia de aumento del ángulo de fricción según el porcentaje de porosidad; los punto sobre la grafica provienen de los datos de laboratorio, la línea roja es teórica.

**Figura 13 (Pag 56).** Grafica de porosidad concentración relativa por peso partículas de grava.

**Figura 14 (Pag 58).** Tabla de clasificación estructuras de soporte según su porosidad, los datos provienen de los análisis de las pruebas de laboratorio efectuados para esta investigación.

**Figura 15 (Pag 59).** Esquema ilustrativo desplazamiento por corte ( obsérvese la rotación de las partículas en la dirección del desplazamiento).

**Figura 16 (Pag 59).** Esquema ilustrativo mezcla arena grava comprimida verticalmente con desplazamiento lateral de partículas.

**Figura 17 (Pag 60).** Esquema ilustrativo aplicación de la fuerza normal y desplazamiento por corte con grado de encaje ( interlocking ) de la mezcla arena grava.

**Figura 18 (Pag 60).** Encaje y deformaciones no uniformes mezcla de arena de Ottawa mas gravas, obsérvese la deformación lateral en la cámara triaxial.

.

**Figura 19 (Pag 62).** Grafica de q, concentración relativa por peso partículas gruesas

**Figura 19ª (Pag 64).** Angulosidad de las partículas finas.

**Figura 20 (Pag 65) .** Esfuerzo desviador – def unitaria %; 100 % arena 0 % grava.

**Figura 21 (Pag 65).** Esfuerzo desviador – def unitaria %; 80 % arena 20 % grava.

**Figura 23 (Pag 66).** Esfuerzo desviador – def unitaria %. 60 % arena 40 % grava.

**Figura 24 (Pag 66).** Esfuerzo desviador – def unitaria %. 40 % arena 60 % grava.

**Figura 25 (Pag 67).** Esfuerzo desviador – def unitaria %. 20 % arena 40 % grava

**Figura 26 (Pag 67).** Esfuerzo desviador – def unitaria %. 0 % arena 100 % grava.

**Figura 27 (Pag 68).** Análisis - esfuerzo deformación unitaria %, 05 Kg / Cm2.

**Figura 28 (Pag 68).** Análisis – esfuerzo deformación unitaria %, 1 Kg / Cm2.

**Figura 29 (Pag 69).** Análisis – esfuerzo deformación unitaria %, 1 Kg / Cm2.

**Figura 30 (Pag 70).** Descripción de los agregados, esta figura permite ofrecer una idea de la forma y textura de los granos de grava y arena utilizados en la investigación, los granos de arena de Ottawa son de forma redondeada con algunas asperezas en sus bordes, y los granos de grava son de forma irregular y equidimensional angulosa.

# INTRODUCCION

La resistencia de un suelo friccionante viene ligada a los contactos entre partículas, al acomodamiento y a las estructuras de soporte de acuerdo a su porosidad; es necesario estudiar los factores que gobiernan la resistencia tangencial. Una investigación en mezclas secas de arena de Ottawa con partículas de grava a diferentes concentraciones por peso permitirá ofrecer mas claridad sobre el tema.

Una aplicación practica de la fricción entre partículas, esta en el estudio de la estabilidad de las masas de suelo naturales que conforman los taludes; para comprender como la fuerza tangencial se desarrolla y como actúa; se requiere averiguar los factores que rigen la interacción entre las superficies de contacto en las partículas de la mezcla.

Como la resistencia al deslizamiento entre partículas de la mezcla de arena es de naturaleza friccional se requieren pruebas de laboratorio de tipo triaxial para estudiar como la fuerza de corte depende de la concentración relativa por peso de las gravas y de la arena de Ottawa en la mezcla.

Un estudio realizado por el Dr. Luis E Vallejo profesor asociado de la Universidad de los Andes determino que si la concentración por peso de las partículas grandes en una mezcla de suelo friccionante es mayor que el 70%, la fuerza de corte de las mezclas es controlada por la resistencia friccional de las partículas grandes. Si la concentración de las partículas grandes está entre 49 y 70%, la fuerza de corte de la mezcla es parcialmente controlada por la resistencia friccional proporcionada por las partículas grandes en las mezclas.

El estudio mencionado presenta una explicación basada en la porosidad desarrollada por las mezclas y el tipo de soporte estructural proporcionado por las partículas de arena gruesa y fina, el material mas fino en la mezcla ayuda a reducir el contacto punto a punto entre las partículas grandes, previniendo así su rotación y reorientación, la cual es

una de las causas para el prolongado asentamiento de los terraplenes; con el fin de analizar la estabilidad del terraplén o de las inclinaciones naturales es necesario construir en laboratorio mezclas de arena y roca con similares condiciones naturales de tal manera que mediante una prueba triaxial se determine su fuerza de corte.

Se han hecho algunas investigaciones dirigidas a la determinación de la fuerza de corte de las mezclas sin cohesión de arena y grava. Los ensayos usaron proporciones de mezclas que variaban entre el 0 y el 100% de grava y arena. De los resultados de los ensayos triaxiales se determinó que la fuerza de corte de las mezclas granulares fue controlada tanto por la grava como por la arena, dependiendo de su concentración relativa por peso.

Finalmente se determinó que cuando el porcentaje por peso de la grava en las mezclas granulares fue más grande que el 70% la fuerza de corte de las mezclas era básicamente aquella del solo material de grava. Quiere decir, que por el porcentaje de grava mayor al 70%, la fuerza de corte de las mezclas era controlada por la resistencia friccional entre las partículas de grava. Cuando la concentración por peso de la grava en las mezclas era menor que el 49%, la fuerza de corte de las mezclas era básicamente aquella de la arena que rodeaba a la grava. Es decir, que si el porcentaje de la grava en las mezclas era menor que el 49%, la fuerza de corte de las mezclas era controlada por la arena y era básicamente igual a aquella de arena sin grava. Para el caso en los cuales el porcentaje de material granular se encontraba entre el 49 y el 70%, la fuerza de corte de las mezclas era parcialmente controlada por la grava. Es decir, que si la concentración por peso de la grava en las mezclas estaba entre el 49 y el 70%, la fuerza de corte de las mezclas era igual a la fuerza de corte parcial proporcionada por las partículas de arena.

Según el estudio del Dr. Vallejo hasta la fecha ninguna explicación ha sido determinada para aclarar porque existen estos límites de volumen contenido de grava en las mezclas, en los cuales la grava controla total, parcialmente o de manera nula la fuerza de corte de las mezclas granulares.

Me propongo a través de mi trabajo de tesis estudiar la resistencia friccional de una arena de Ottawa mezclada con gravas a diferentes proporciones por concentración relativa por peso; averiguar como es la fricción de la masa granular, verificar si los limites que afirma el Dr. Vallejo se cumplen nuevamente o si existen nuevas variables que gobiernan lo limites de resistencia; ver como la porosidad desarrollada por las mezclas y el tipo de soporte estructural desarrollado influyen en la resistencia de la mezcla .

Para esta investigación se realizaron diez y ocho ensayos triaxiales prueba rápida no drenada durante cuatro meses en el laboratorio de suelos de la Universidad de Los Andes; las muestras fueron mezcladas en concentraciones relativas por peso con porcentajes que variaban del cien por ciento cada veinte por ciento hasta llegar a cero con el debido procedimiento de laboratorio; se obtuvieron unos resultados de estos ensayos que se expondrán en este trabajo de tesis junto con las consideraciones y el análisis mas concluyente.

## 1. MATERIALES UTILIZADOS

Para el desarrollo de las mezclas granulares se usaron dos materiales diferentes, uno fue la arena de Ottawa con 0.4 mm de diámetro y una grava con un diámetro de 4.76 mm

### 1.1 Arena de Ottawa.

**Fotografía 1.** Arena de Ottawa obsérvese las especificaciones de la norma **C778** impresas en el empaque de bolsa, arena usada para la presente investigación.

#### 1.1.1. Descripción

La arena de Ottawa significa sílice de arena enteramente compuesto de granos redondeados de casi puro cuarzo, usados para preparar morteros y en la ejecución de pruebas del cemento hidráulico.

Para las mezclas binarias se utilizo una arena que cumpliera las especificaciones de la norma **C778**; el numero indica el año de adopción original, o el año de la ultima revisión. El número entre paréntesis indica el año de la última aprobación. Un superíndice epsilon (e) indica un cambio desde la ultima revisión editorial o aprobación. Designación: **C778 - 92a$^{e1}$**

### 1.1.2. Densidad relativa, porosidad máxima y mínima.

| Descripción | Relación de vacíos | | Porosidad (%) | | Peso específico seco ($ton/m^3$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $e_{máx}$ | $e_{mín}$ | $n_{máx}$ | $n_{mín}$ | $\gamma'_{d\,mín}$ | $\gamma'_{d\,máx}$ |
| Arena de Otawa normalizada | 0.80 | 0.50 | 44 | 33 | 1.47 | 1.76 |

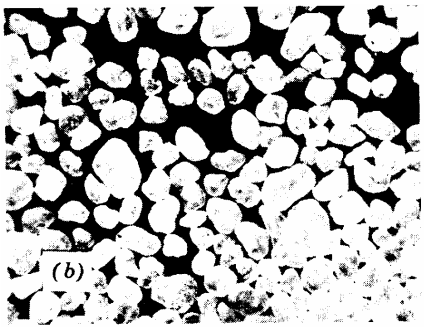
### 1.1.3. Granulometría arena de Ottawa.

La arena de Ottawa presenta características de granos redondeados casi puro cuarzo cuyos tamaños máximos van hasta 0.4 mm; la tabla anexa permite tener una idea de cómo es su granulometría.

| **Características** | **Arena 20-30** | **Arena Gradada** |
|---|---|---|
| **Gradación % que pasa el tamiz:** | | |
| **1.18 mm.(No. 16)** | **100** | **100** |
| **850 um.(No. 20)** | **85 -100** | |
| **600 um.(No. 30)** | **0-5** | **96-100** |
| **425 um.(No. 40)** | | **65-75** |
| **300 um.(No. 50)** | | **20-30** |
| **150 um.(No.100)** | | **0-4** |
| **Diferencia de aire contenido en morteros hechos con arena lavada o no-lavada, máximo % de aire** | **2.0** | **1.5 [A]** |
| **Fuentes de arena** | **Ottawa, Il o LeSuer, Mn** | **Ottawa, IL** |

**Tabla 1**. Características granulométricas arena de Ottawa.

**Figura 1**. Granos de arena de Ottawa 0.19 mm a 0.42 mm ( lado derecho ).




**Fotografía 2.** Tamizado de la arena de Ottawa.(Laboratorio U Andes).

### 1.2. Gravas

Las gravas utilizadas en esta investigación son de características angulosas, procedentes de roca dura, partículas bastante irregulares, su forma poco redondeada o esférica, la textura era de tipo estriado, el tamaño único fue de 4.76 mm.

## 2. GRAVEDAD ESPECIFICA.
## (Referencias AASHTO T100-70, ASTM D854-58)

### 2.1 Arena de Ottawa.

Para la conformación de las mezclas binarias de arena de Ottawa mas gravas es necesario conocer las relaciones de fase, por esta razón se debe obtener el Gs de la arena de Ottawa al igual el de la grava.

#### 2.1.1. Objetivos.

Obtención de la gravedad especifica de la arena de Ottawa, material compuesto por partículas pequeñas cuya gravedad especifica es mayor que el número 1.

### 2.1.2. Equipo

Frasco volumétrico de 250 ó 500 ml
Bomba de vacío o aspirador para producir vació
Mortero y mango para morterear
Balanza de precisión 0.1 g
Suministro de agua desairada con temperatura estabilizada[1]

### 2.1.3. Gravedad Especifica.

Él valor de la gravedad específica se requiere para calcular la relación de vacíos de un suelo, se utiliza también en el análisis de hidrómetro y es útil para predecir el peso unitario del suelo. .

La gravedad específica de cualquier sustancia se define como el peso unitario del material en cuestión dividido por el peso unitario de agua destilada a $4^0$ C.

$G = \Upsilon_{material} / \Upsilon_{agua}$ a $4^0$ C

### 2.1.4. Procedimiento de laboratorio Gs arena de Ottawa.

- Se mezclaron 499.34 gr. de arena secado al aire con agua en un recipiente evaporado hasta formar una pasta cremosa.

**Fotografía 3.** Arena de Ottawa secada al aire. ( Laboratorio U. Andes ).

- Se procedió a llenar el frasco volumétrico hasta la marca con agua desaireada, teniendo cuidado en no introducir aire nuevamente al agua por agitación excesiva. Una vez alcanzado el nivel de agua se peso el frasco y se registro el peso $W_{bws,}$ también se midió la temperatura de forma que la mezcla agua – suelo estuvieran a la misma temperatura

- Luego de 15 a 30 minutos, se introdujo la arena de Ottawa al frasco volumétrico. Se añadió suficiente agua con temperatura estabilizada para completar $^2/_3$ de la capacidad del frasco volumétrico.

- Se desaireo el frasco volumétrico durante 6 horas.

- Cumplido el proceso de desaireamiento se añadió agua desaireada con temperatura estabilizada hasta la base del menisco teniendo precaución de no introducir aire en el frasco. Se seco cuidadosamente el cuello del frasco por encima de la marca de calibración con un papel enrollado.

- Se hizo el pesaje de la botella y su contenido con una aproximación de 0.01 g (estimado) para obtener $W_{bws}$ Asegurándose de que la temperatura se encontrara dentro de 1 ºC de la temperatura utilizada para obtener $W_{bw}$

**Fotografía 4.** Pesaje del frasco volumétrico mas contenido.

- Se vacío el frasco volumétrico y su contenido en un recipiente se introdujo en el horno para secar la arena. Luego se peso el suelo secado al horno para obtener $W_s$.

- Se Calculo $G_s$ utilizando la ecuación adecuada.

**2.2. Gravas.**

Se saturaron las gravas durante 24 horas y luego se secaron superficialmente, posteriormente se siguió el mismo procedimiento usado para calcular el Gs de la arena.

**Fotografía 4a.** Saturación grava durante 24 horas. ( Laboratorio U de los Andes ).

**2.3. Resultados gravedad especifica ($G_s$).**

| **Items** | **ARENA** | **GRAVA** |
|---|---|---|
| V Vol. del frasco a 20 ºC | 500 ml | 500 ml |
| A (gr) Muestra seca | 493.2 | 499.34 |
| W Vol de agua para llenar el frasco | 309.31 | 314.25 |
| V - W | 190.69 | 185.75 |
| 500 - A | 6.8 | 0.66 |
| ( V – w ) – ( 500 – A ) | 183.89 | 185.09 |
| Gs =A/(( V – w ) – ( 500 – A ) | 2.68 | 2.69 |

.

## 3. RELACIONES VOLUMÉTRICAS Y GRAVIMETRICAS.

Los suelos están constituidos generalmente por tres fases, sólida, liquida y gaseosa. La fase sólida la constituyen los minerales del suelo, la liquida la constituye el agua, y la gaseosa la constituye el aire.

### 3.1. Relaciones fundamentales.

$$n = \frac{V_v}{V} \qquad e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$n = \frac{e}{1+e} \qquad e = \frac{n}{1-n}$$

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma_0} \qquad \gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

$$\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{G + Se}{1+e}\gamma_w = \frac{1+w}{1+e}G\gamma_w$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G}{1+e}\gamma_w = \frac{G\gamma_w}{1+wG/S} = \frac{\gamma_t}{1+w}$$

### 3.1.2. Fase arena de Ottawa mas grava.

La relación de fase para las mezclas arena de Ottawa mas grava es como se indica en el siguiente esquema.

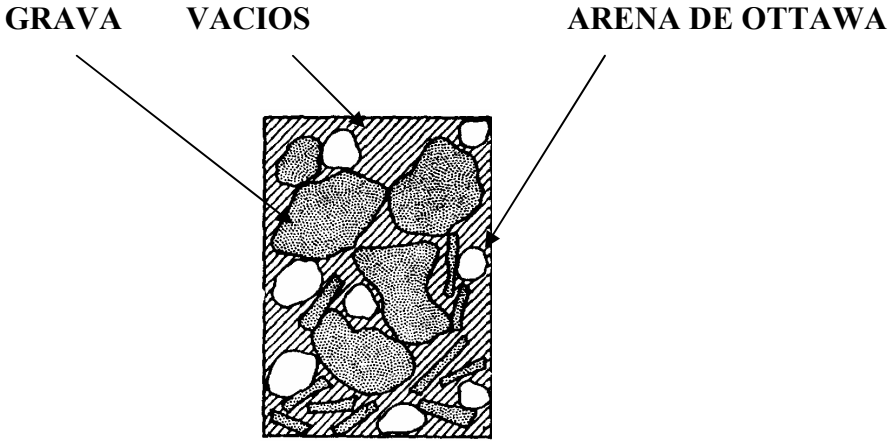



**Figura 2.** Las partículas blancas representan la arena de Ottawa las partículas de grava están representadas por el color gris y los vacíos por las líneas achuradas.

### 3.2 Porosidad de mezclas granulares arena de Ottawa mas grava.

La angulosidad de la partícula, la aspereza de superficie y el tamaño de la partícula son tres parámetros importantes que se han encontrado para influir en la porosidad en materiales granulares. En esta investigación se usaron gravas con angulosidad y aspereza de superficie lo cual influye en la porosidad de las mezclas.

#### 3.2.1. Medida de Porosidad

$$n_{mix} = \frac{V_o - (W_c / Y_c + W_f / Y_f)}{V_o} \qquad (1)$$

donde $V_O$ es el mayor volumen de la mezcla, $W_c$ y $W_f$ son los pesos de las partículas gruesas y finas en la mezcla, y $\gamma_c$ y $\gamma_f$ son sus respectivos pesos específicos unitarios.

#### 3.2.2. Concentración de Partículas en las Mezclas

Enseguida, la concentración por peso, $\omega_c$, de las partículas gruesas en las mezclas se determinó utilizando la siguiente relación:

$$W_C = \frac{W_c}{W_f + W_c} \qquad (2)$$

### 3.2.3. Porosidad y estructuras granulares de las mezclas arena grava.

La figura 3 muestra partículas gruesas rodeando un espacio vacío. Cuando las pequeñas cantidades de material granular fino de arena de Ottawa se añaden a las partículas gruesas, el volumen de partículas finas ocupará una porción de los espacios vacíos entre las partículas gruesas (Fig. 4). Si se continua añadiendo material fino a las partículas gruesas, habrá un momento en el cual los espacios en el material grueso serán completamente ocupados por el mayor volumen de las partículas finas. En este punto, la mezcla binaria desarrolla la condición de porosidad mínima ( Fig. 5. ).

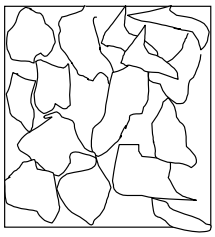


**Figura 3.**

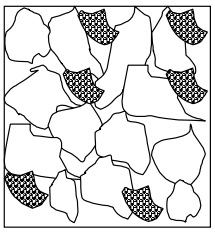


**Figura 4.**

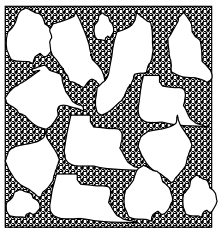


**Figura 5.**

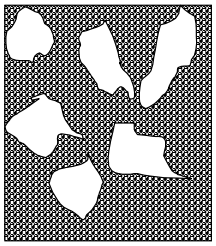


**Figura 6.**

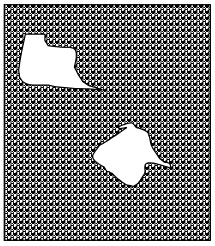


**Figura 7.**

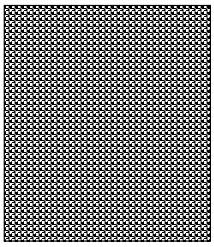


**Figura 8.**

Después de que la condición de porosidad mínima ha sido alcanzada en la mezcla granular fina-gruesa, no hay mas espacio entre las partículas gruesas para alguna porción adicional de material fino. Así, si se sigue añadiendo material fino mas allá del mínimo de condiciones de porosidad, la única forma de incrementar el volumen de partículas finas en la mezcla es separar las partículas gruesas, de forma tal que el material fino sea el material dominante de la mezcla. En esta fase las partículas gruesas flotan en la matriz de materiales finos (figs. 6 y 7).

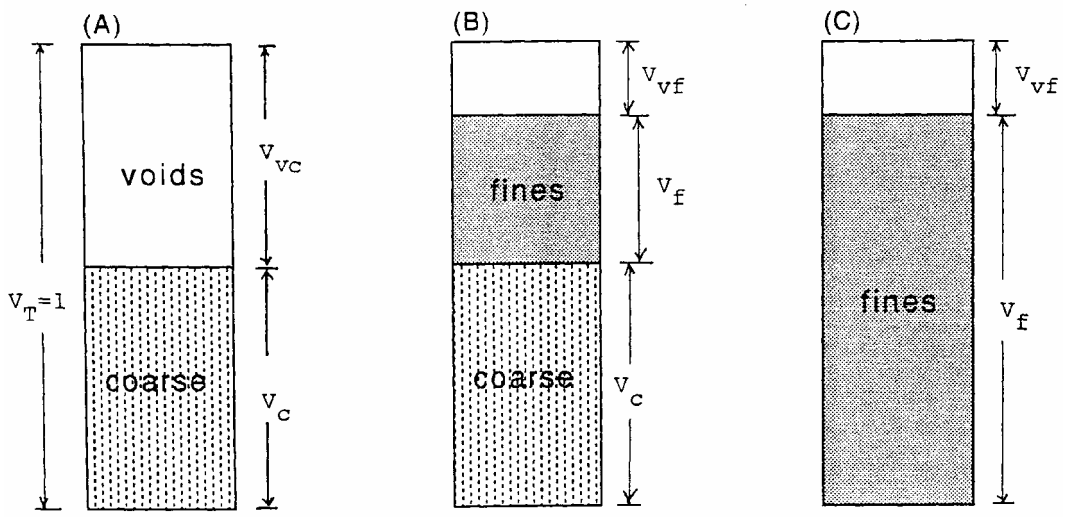



Figura 9ª, 9b, 9c.

La figura 9(A) representa el caso en el cual sola hay partículas gruesas en la mezcla. La figura 9(B) representa el caso de cuando los vacíos en el esqueleto del material grueso están llenos completamente por un gran volumen de partículas finas. La figura 9(C) representa el caso en el cual hay solamente partículas finas en la mezcla.

La porosidad de la estructura con solo partículas gruesas, $n_c$, puede ser obtenida a partir de la siguiente relación (Fig. 9 A):

$$n_C = \frac{V_{vc}}{V_t} = V_{vc} \qquad (3)$$

donde $V_{vc}$ es el volumen de los espacios dentro de las partículas gruesas, y $V_T$ es el volumen total de las partículas gruesas mas los espacios vacíos

La porosidad de la mezcla granular gruesa y fina al mínimo de porosidad, $n_{mix\text{-}min}$, puede ser obtenida a partir de la figura 9, en la cual, $V_{vf}$ representa el volumen de los espacios en el mayor volumen de partículas finas, la siguiente relación se aplica a este caso

$$\mathbf{n_c = V_{vc} = V_{vf} + V_f} \qquad \mathbf{(4)}$$

La porosidad en el mayor volumen de partículas finas puede ser obtenida a partir de la siguiente relación (Fig. 9 B)

$$\mathbf{n_f = \frac{V_{vf}}{V_{vf} + V_f}} \qquad \mathbf{(5)}$$

Usando las ecuaciones (4) y (5) se obtiene la siguiente relación a partir de $V_{vf}$

$$\mathbf{V_{vf} = n_f * n_c} \qquad \mathbf{(6)}$$

Así, la porosidad mínima de la mezcla, $n_{mix\text{-}min}$, puede ser obtenida a partir de la siguiente relación (Fig. 9 B)

$$\mathbf{N_{mix\text{-}min} = \frac{V_{vf}}{V_t} = n_f * n_c} \qquad \mathbf{(7)}$$

Por consiguiente, la porosidad mínima de la mezcla puede ser obtenida del producto de las porosidades de los materiales finos puros y de los materiales gruesos puros.

El uso de la ecuación (1). Igualmente, la ecuación (7) ha sido obtenida previamente por Kezdi (1979).

La concentración de los materiales gruesos en la mezcla, $\omega_{c\text{-}min}$, en condiciones de porosidad mínima puede ser obtenida fácilmente utilizando de las ecuaciones (2) a la (7) y las figuras 9(A) y 9(B). Esta concentración particular de materiales gruesos puede ser obtenida a partir de

$$\mathbf{W_{C\text{-}min} = \frac{(1-n_c) * y_c}{n_c * (1-n_f) * y_f + (1-n_c) * y_c}} \qquad \mathbf{(8)}$$

## 4.1. PROCEDIMIENTO MEZCLAS ARENA OTTAWA MAS GRAVA.

Las mezclas de arena de Ottawa fueron preparadas mezclando varias proporciones de grava de 4.76 mm y de arena de 0.4mm., se prepararon las muestras mezcladas por concentración relativa por peso, así del cien por ciento de arena en peso se tomaron porcentajes de veinte en veinte hasta llegar a tener diferentes muestras de mezclas binarias, se prepararon diez y ocho muestras de tal manera que se realizaron diez y ocho ensayos triaxiales , en tiempo de cuatro meses según la programación de laboratorio de la Universidad de Los Andes en el segundo semestre del año 2002.

**Fotografía 5.** Dimensiones y textura granular arena de Ottawa y grava.

Las mezclas se introdujeron en bolsas de plástico y se agitaban hasta que se aparecieran visualmente homogéneas, se tomaron sus respectivos pesos y se procedía al armado de la muestra para ser ensayada bajo la prueba triaxial .

**Fotografía 6.** Mezcla binaria de arena de Ottawa mas grava por concentración relativa por peso, visualmente homogénea.

## 4.1. Procedimiento elaboración espécimen mezcla arena de Ottawa mas grava.

El objetivo de ensayar las mezclas con la prueba triaxial rápida fue la determinación de las características esfuerzo-deformación y resistencia de las mezclas binarias sujeta a esfuerzos cortantes producidos al variar los esfuerzos principales que actúan en un espécimen cilíndrico de arena grava.

Como las arenas y las gravas son suelos friccionantes construir una muestra con estos suelos presenta el inconveniente de orden práctico de no poderse armar un espécimen apropiado, por desmoronarse el material, la preparación de la muestra resulta complicada.

Teniendo en cuenta la dificultad de construir una muestra seca evitando su desmoronamiento se utilizo un molde de aluminio con diámetro 5 cm, altura de la muestra 10 cm, volumen de la muestra 196.4 cm3. Con la muestra previamente envuelta en una membrana de hule; aplicando un vacío al molde en conjunto con un cabezal y la base inferior se logra proporcionar soporte a la mezcla impidiendo que se derrumbe.

### 4.1.1. Secuencia elaboración espécimen mezcla binaria.

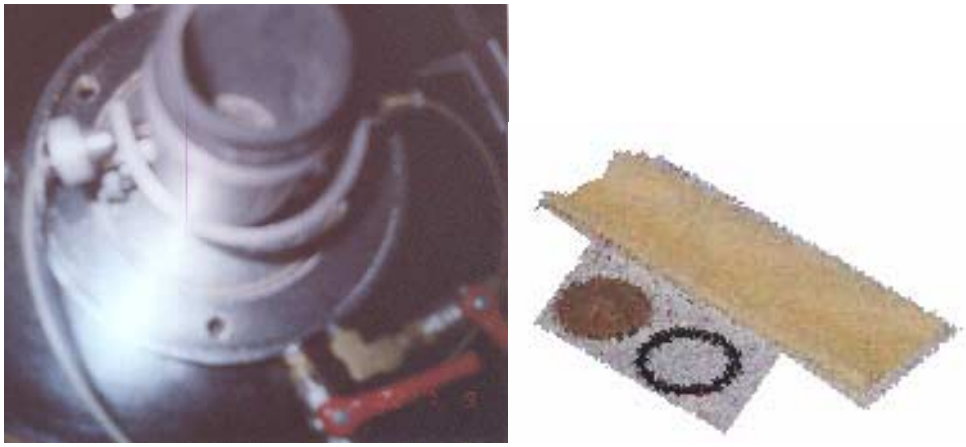
1. Se cuantifico el peso de arena seca mas grava previamente mezcladas visualmente homogéneas.

**Fotografía 7.** Pesaje mezclas arena grava.

**Fotografía 8.** Mezclas arena grava para cada cámara triaxial.

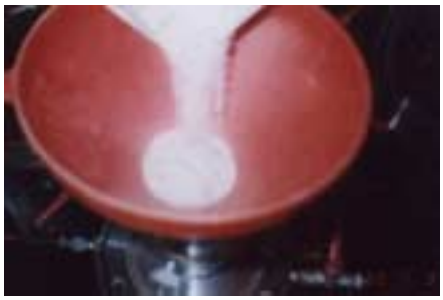
2. Sobre un molde de aluminio de diámetro 5 cm se construyo la muestra mezclada se introducía una membrana de hule de forma cilíndrica cuya finalidad era la de de servir como soporte para armar la muestra.

3. Los extremos superior e inferior de la membrana fueron doblados sobre los bordes del molde de aluminio a la vez fueron asegurados con doble aro de caucho .



**Fotografía 9.** Molde de aluminio con membrana de hule asegurada. ( Lado derecho, membrana. Piedra porosa, y aro de caucho ).

4. Se procedió a llenar el molde con la mezcla dejando que la muestra se fuera formando libremente teniendo en cuenta que la acomodación fuera de el extremo inferior del molde hasta llegar al borde superior del molde de manera uniforme.



**Fotografía 10.** Llenado del molde de aluminio con la mezcla binaria de arena de Ottawa mas gravas.

5. La muestra se lograba a ras del molde estando las paredes adheridas de la membrana al molde por causa de la bomba de vacío. Después se colocaba sobre el espécimen un cabezal; y desdoblando cuidadosamente la membrana se aseguraba el cabezal con doble aro de caucho, de igual forma se hizo en el extremo inferior del molde.

**Fotografía 11 y 12.** Colocación del cabezal mas aros de aseguramiento de la membrana.

6. Se retiraba el molde separando los semicilindros de aluminio; la muestra permanecía firme a causa del vacío aplicado.

**Fotografía 13.** Muestra firme a causa del vacío aplicado.

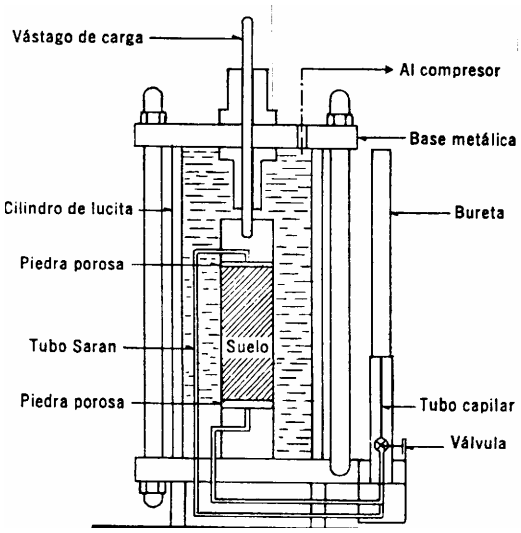
7. Estando la muestra firme y sometida a vacío se colocaba la cámara triaxial asegurándola a su base inferior, procediendo a llenar de agua totalmente .

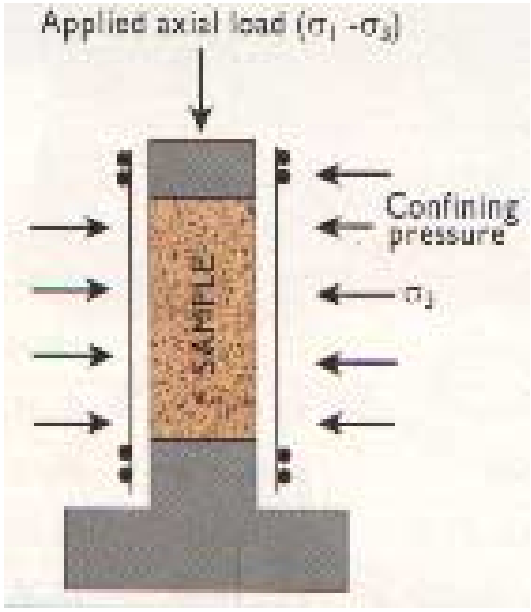
8. Una vez alcanzado el nivel de agua y colocando el pistón sobre el cabezal de la muestra, se lograba la hermeticidad de la cámara para proceder a su montaje en el banco de prueba a las presiones de confinamiento respectivas que mas adelante se expondrán como se realizo la prueba triaxial sobre el espécimen conformado.

**Fotografía 14 y 15.** Llenado de la camara triaxial ( Lado izquierdo ). Nivel agua alcanzado en la cámara triaxial lista par montar en el banco de prueba de compresión triaxial.

## 5. CAMARA TRIAXIAL UTILIZADA PARA EL EXPERIMENTO.

La cámara triaxial fue de las siguientes características como se muestra en la fotografía y en el dibujo esquemático siguientes.






**Fotografía 16.** Cámara triaxial con muestra en proceso de compresión triaxial.
( Laboratorio de la Universidad de los Andes ).

En las bases de la muestra fueron colocadas piedras porosas, cuya comunicación con una bureta exterior puede establecerse por un tubo plástico, no hubo drenaje por ser un ensayo de compresión triaxial con muestra seca no drenada.

El agua de la cámara adquirió la presión de 0.5 Kg / Cm2, 1 Kg / Cm2, 1.5 Kg / Cm2 para cada muestra, a través de un compresor comunicado con ella. La carga axial se transmitió al espécimen por medio de un vástago que atraviesa la base superior de la cámara.

## 6. MARCO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Se utilizo un marco de comprensión triaxial, como se aprecia en la siguiente fotografía ( Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad de Los Andes).

**Fotografía 17.** Banco de compresión triaxial ( Universidad de los Andes ).

La presión que se ejerce con el agua que llena la cámara es hidrostática y produce, esfuerzos principales sobre la muestra iguales en todas las direcciones, tanto lateral como axialmente. En las bases del espécimen actúa, además de la presión del agua, el efecto transmitido por el vástago de la cámara desde el exterior.

## 7. PRUEBA DE COMPRESIÓN TRIAXIAL RAPIDA.

**(Prueba de compresión sin drenaje).**

**Fotografía 18.** Montaje de la muestra en el banco de compresión triaxial del laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad de los Andes (CITEC).

La muestra construida fue de carácter cilíndrico con una altura de 10 cm y un diámetro de 5 cm envuelta en una membrana de hule sujeta a una presión lateral a traves de agua. Para lograr el debido confinamiento, la muestra se coloco en el interior de una cámara cilíndrica hermética de lucita.

Las muestras se construyeron con una relación de vacíos prefijada al igual su posoridad fue calculada no se permitió en ningún momento etapa de consolidación de la muestra. La válvula de comunicación entre el espécimen y la bureta permaneció siempre cerrada impidiendo el drenaje por ser una muestra seca; es posible que la velocidad de aplicación de la carga axial pueda haber influido en la resistencia del suelo pero minimamente.

Se aplico a la primer muestra una presión hidrostática $\sigma c$ = 0.5 Kg / Cm2, para la segunda y tercera muestra la presión hidrostática fue $\sigma c$ = 1 Kg / Cm2 y $\sigma c$ = 1.5 Kg / Cm2 , el esfuerzo $\sigma c$ actuó sobre los sólidos de la muestra de suelo. Posteriormente, la muestra se llevo a la falla por un rápido incremento de la carga axial, de manera que no se admitió cambio de volumen. y, de inmediato, se hizo fallar al suelo con la aplicación rápida de la carga axial.

# 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

## 8.1. Análisis Resistencia Al Esfuerzo Cortante

### 8.1.1 Envolvente de mohr y ángulo de fricción

La resistencia de las mezclas arena grava esta en función de los esfuerzos desarrollados en el máximo de la curva esfuerzo deformación; fue necesario representar la resistencia obtenida para cada mezcla a través del plano de falla de mohr, los datos proceden de diez y ocho pruebas triaxiales para seis mezclas de arena grava , para cada mezcla se suministraron presiones de confinamiento de 0.5 Kg / Cm2, 1 Kg / Cm2, 1.5 Kg / Cm2.

Se dibujaron los círculos de mohr con su envolvente tangente a cada circulo obtenido, para lograr representar los estados de esfuerzos en los puntos máximos de las curvas esfuerzo deformación.

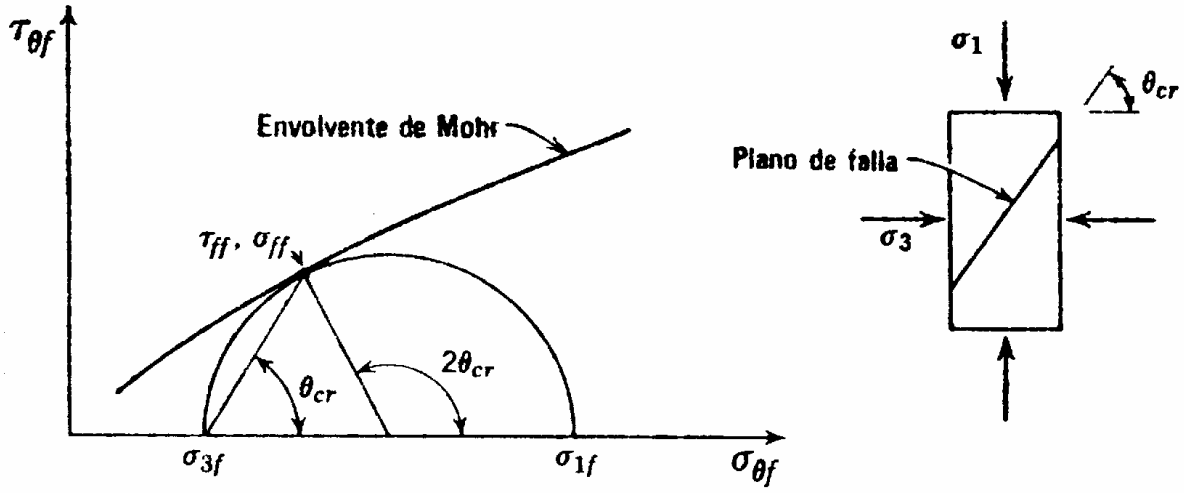
Se calculo el ángulo critico para determinar el estado limite de esfuerzos normal y tangencial alcanzados en el plano de falla .

La envolvente de mohr obtenida para los tres círculos por mezcla fue de tipo curvo, pues la mezcla ensayada es de carácter friccional influida por la presión de confinamiento, la curvatura de la envolvente se pronuncio mas cuando se concentraron mas gravas por mezcla, al incrementar la concentración de gravas por peso en cada mezcla se da una mayor carga por partícula y sucede acomodación de las partículas con una menor presión de confinamiento.

Las mezclas arena grava no tienen ningún tipo de cohesión para efectos de utilizar la ecuación $\tau = c + \sigma \tan \phi$, es necesario ajustar una línea recta a la envolvente de mohr ; entonces se dibujaron los planos de falla reales y con ayuda del diagrama q vs p se determino el ángulo de fricción interna.

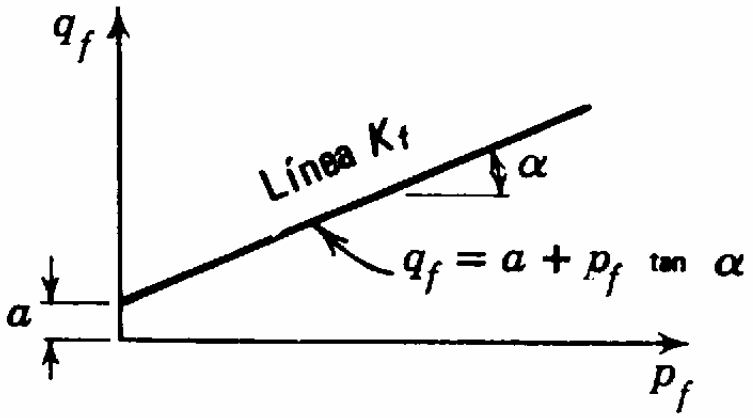
## 8.2. Análisis mezcla 100 % aren 0 % grava.

### 8.2.1. Convenciones plano de mohr en estado limite 100 % arena 0 % grava.




### 8.2.2. Envolvente de mohr mezcla 100 % arena 0 % grava.

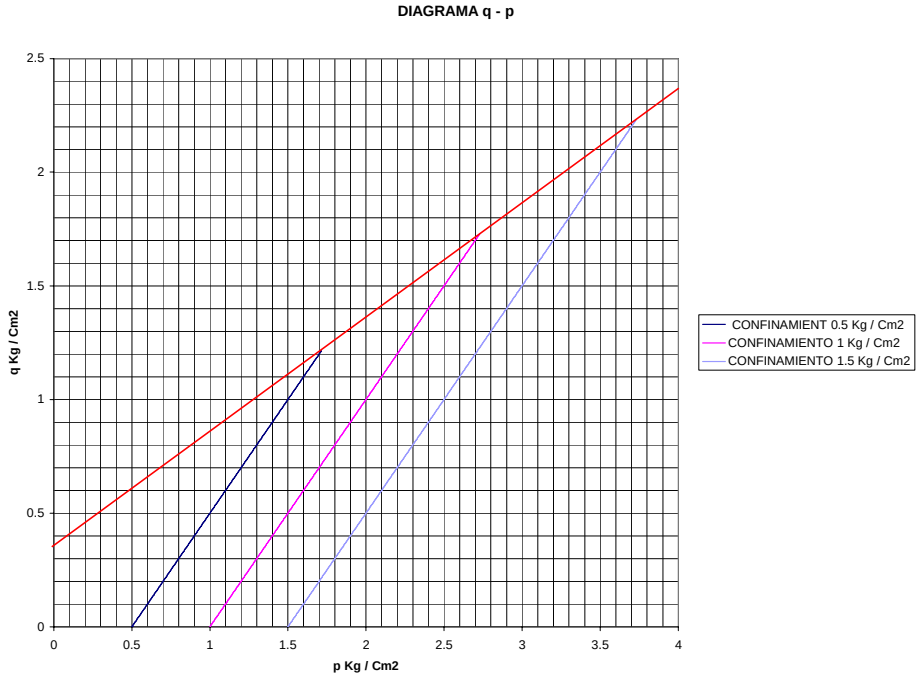
### 8.2.3. Correlación diagrama p – q, ángulo de fricción mohr .




$$\operatorname{sen} \phi = \tan \alpha$$

$$c = \frac{a}{\cos \phi}$$

### 8.2.4. Diagrama p – q mezcla 100 % arena 0 % grava.



### 8.2.5. Propiedades de las mezclas 100 % arena 0 % grava.

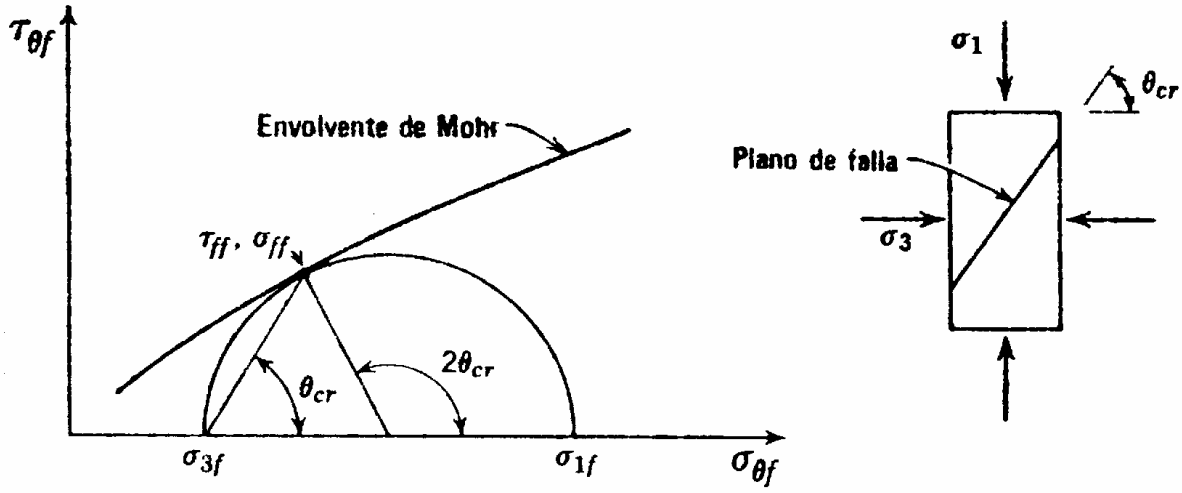
| | Arena (gr) | Grava (gr) | Ws ( gr ) 100 % | V m ( cm3 ) | γω (gr/cm3) | Gs |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **σ3 = 0.5 Kg / Cm2.** | 314.02 | | 314.02 | 196.35 | 1 | 2.7 |
| **σ3 = 1 Kg / Cm2.** | 313.98 | | 313.98 | 196.35 | 1 | 2.7 |
| **σ3 = 1.5 Kg / Cm2.** | 314.06 | | 314.06 | 196.35 | 1 | 2.7 |
| | **γ m (gr/cm3)** | **Vs (cm3)** | **V v (cm3)** | **e vacios** | **Dr ( % )** | **n ( % )** |
| **σ3 = 0.5 Kg / Cm2.** | 1.60 | 116.30 | 80.05 | 0.69 | 37.25 | 40.77 |
| **σ3 = 1 Kg / Cm2.** | 1.60 | 116.29 | 80.06 | 0.69 | 37.18 | 40.77 |
| **σ3 = 1.5 Kg / Cm2.** | 1.60 | 116.32 | 80.03 | 0.69 | 37.32 | 40.76 |

### 8.2.6. Resultados análisis diagramas de mohr, p – q.

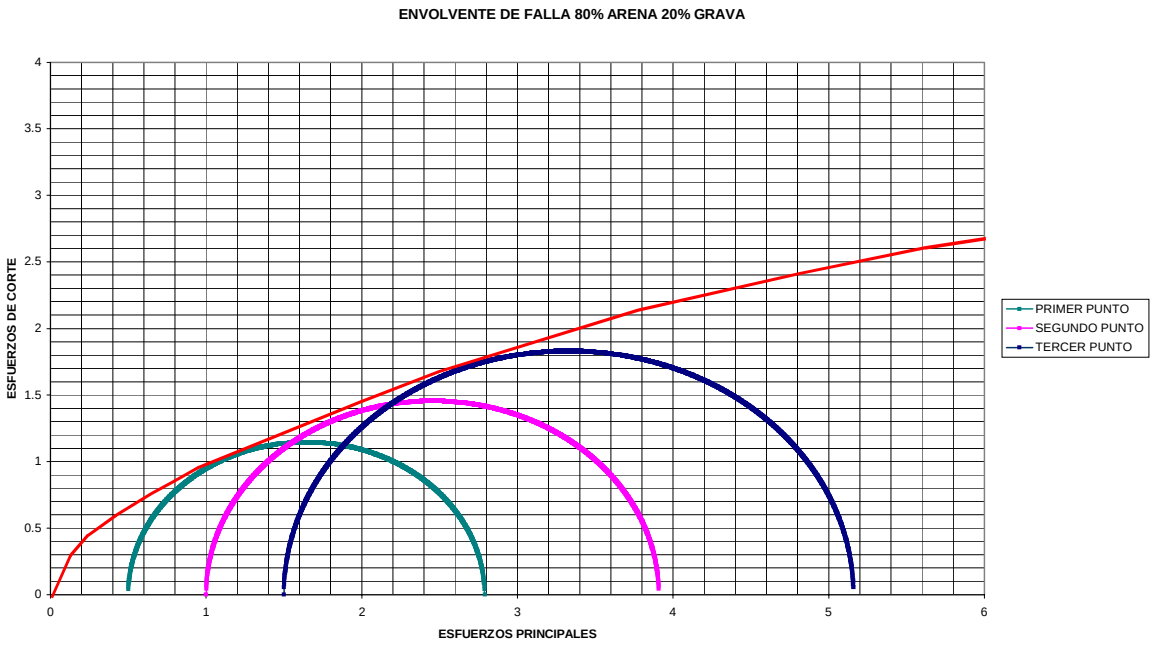
| $\sigma 1$ Kg/Cm2 | $\sigma_3$ Kg/Cm2 | $(\sigma_1-\sigma_3)/2$ $q_f$ Kg/Cm2 | $(\sigma_1+\sigma_3)/2$ $p_f$ Kg / Cm2 | $(\sigma_1/\sigma_3)$ $N_\phi$ | $\sigma_{ff}$ Kg/Cm2 | $\tau_{ff}$ Kg/Cm2 | c Kg/Cm2 | a Kg/Cm2 | $\alpha$ grados | $\theta_{cr}$ grad | $\phi$ Corr $\alpha$ grados |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.92 | 0.50 | 1.21 | 1.71 | 5.84 | 0.52 | 0.83 | 0.56 | 0.37 | 36.91 | 69.34 | 48.68 |
| 4.45 | 1.00 | 1.73 | 2.73 | 4.45 | 1.10 | 1.20 | 0.56 | 0.37 | 36.91 | 69.34 | 48.68 |
| 5.95 | 1.50 | 2.23 | 3.73 | 3.97 | 2.10 | 1.40 | 0.56 | 0.37 | 36.91 | 69.34 | 48.68 |

## 8.3. Análisis mezcla 80 % arena 20 % grava.

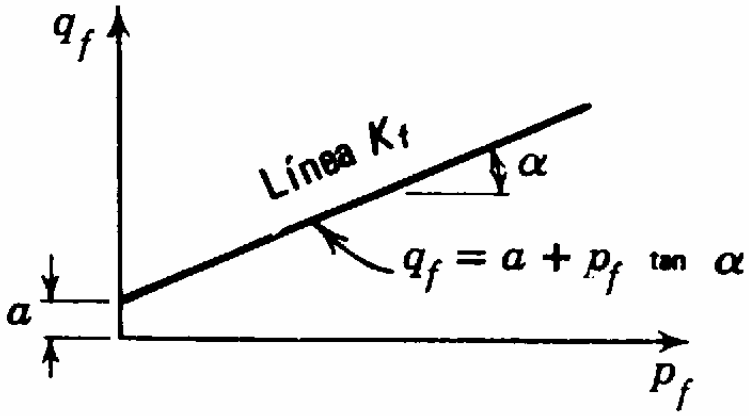
### 8.3.1. Convenciones plano de mohr en estado limite 80 % arena 20 % grava.




### 8.3.2. Envolvente de mohr mezcla 80 % arena 20 % grava.



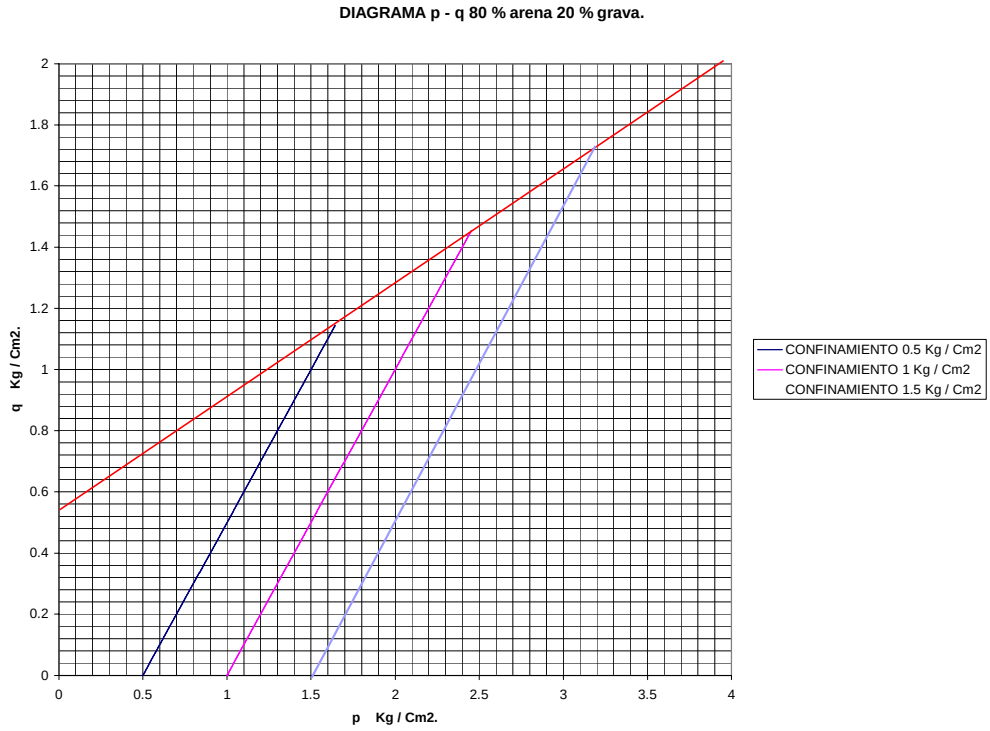
### 8.3.3. Correlación diagrama p – q, ángulo de fricción mohr .




$$\operatorname{sen} \phi = \tan \alpha$$

$$c = \frac{a}{\cos \phi}$$

### 8.3.4. Diagrama p – q mezcla 80 % arena 20 % grava.



### 8.3.5. Propiedades de las mezclas 80 % arena 20 % grava.

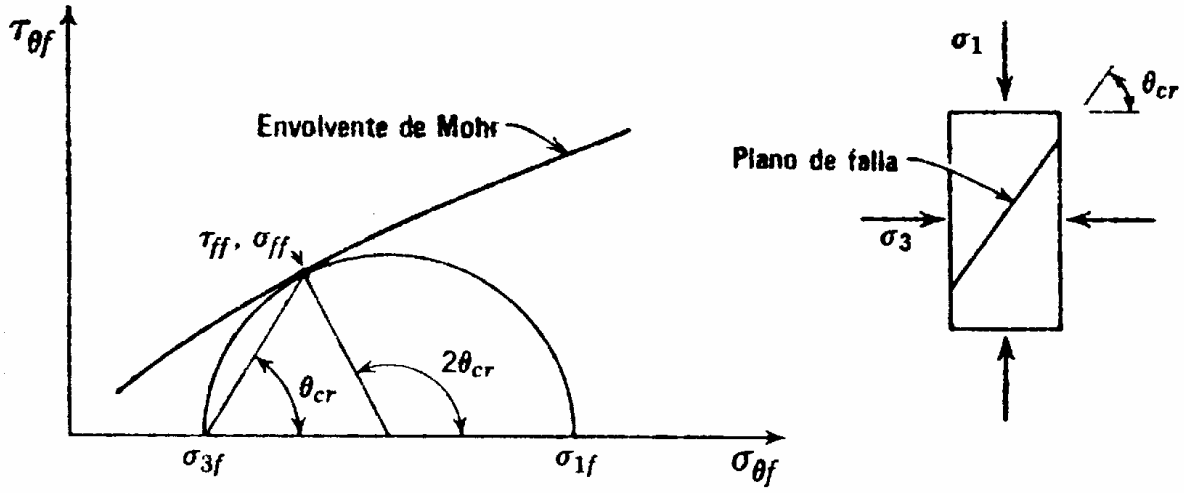
| | Arena (gr) | Grava (gr) | Ws ( gr ) 100 % | V m ( cm3 ) | $\gamma\omega$ (gr/cm3) | Gs |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma$3 = 0.5 Kg / Cm2. | 253.17 | 59.57 | 312.74 | 196.3497284 | 1 | 2.7 |
| $\sigma$3 = 1 Kg / Cm2. | 253.39 | 59.48 | 312.87 | 196.3497284 | 1 | 2.7 |
| $\sigma$3 = 1.5 Kg / Cm2. | 253.43 | 59.77 | 313.2 | 196.3497284 | 1 | 2.7 |
| | $\gamma$ m (gr/cm3) | Vs (cm3) | V v (cm3) | e vacios | Dr ( % ) | n ( % ) |
| $\sigma$3 = 0.5 Kg / Cm2. | 1.59 | 115.83 | 80.52 | 0.70 | 34.95 | 41.01 |
| $\sigma$3 = 1 Kg / Cm2. | 1.59 | 115.88 | 80.47 | 0.69 | 35.18 | 40.98 |
| $\sigma$3 = 1.5 Kg / Cm2. | 1.60 | 116.00 | 80.35 | 0.69 | 35.78 | 40.92 |

### 8.3.6. Resultados análisis diagramas de mohr, p – q.

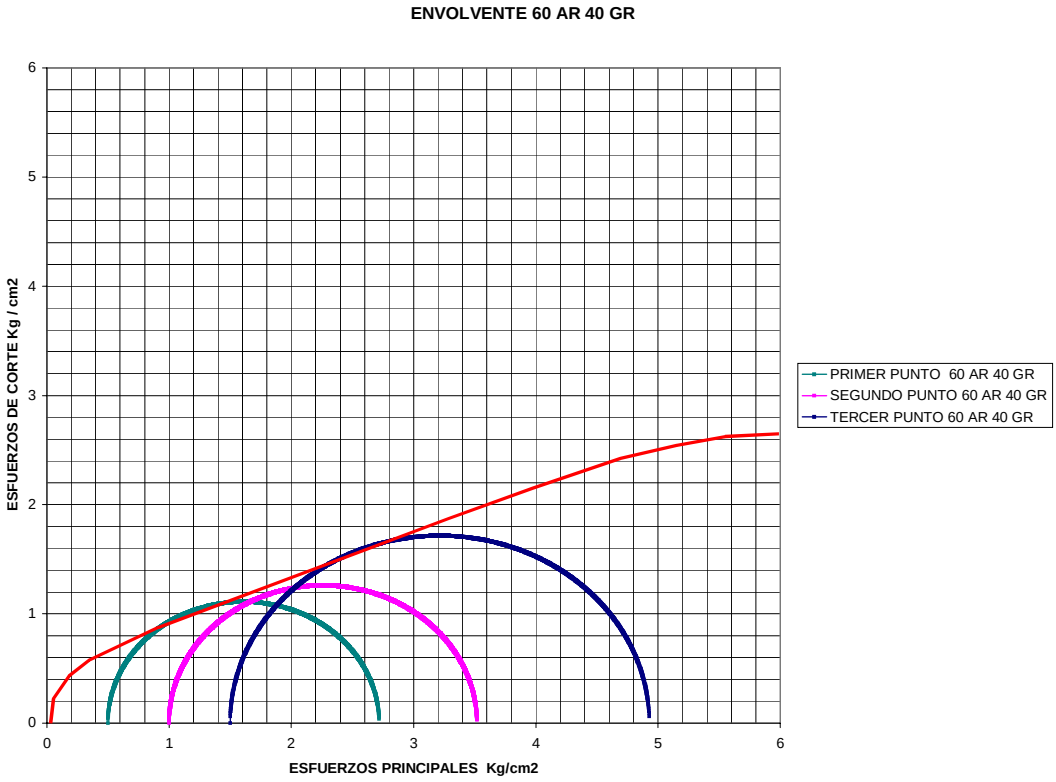
| $\sigma$1 Kg/Cm2 | $\sigma_3$ Kg/Cm2 | $(\sigma_1-\sigma_3)/2$ $q_f$ Kg/Cm2 | $(\sigma_1+\sigma_3)/2$ $p_f$ Kg / Cm2 | $(\sigma_1/\sigma_3)$ $N_\phi$ | $\sigma_{ff}$ Kg/Cm2 | $\tau_{ff}$ Kg/Cm2 | c Kg/Cm2 | a Kg/Cm2 | $\alpha$ grados | $\theta_{cr}$ grad | $\phi$ Corr $\alpha$ grados |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.79 | 0.50 | 1.15 | 1.65 | 5.58 | 0.98 | 0.90 | 0.62 | 0.56 | 22.77 | 57.41 | 24.82 |
| 3.90 | 1.00 | 1.45 | 2.45 | 3.90 | 1.62 | 1.22 | 0.62 | 0.56 | 22.77 | 57.41 | 24.82 |
| 5.15 | 1.50 | 1.83 | 3.33 | 3.43 | 2.3 | 1.55 | 0.62 | 0.56 | 22.77 | 57.41 | 24.82 |

## 8.4 Analisis mezcla 60 % arena 40 % grava.

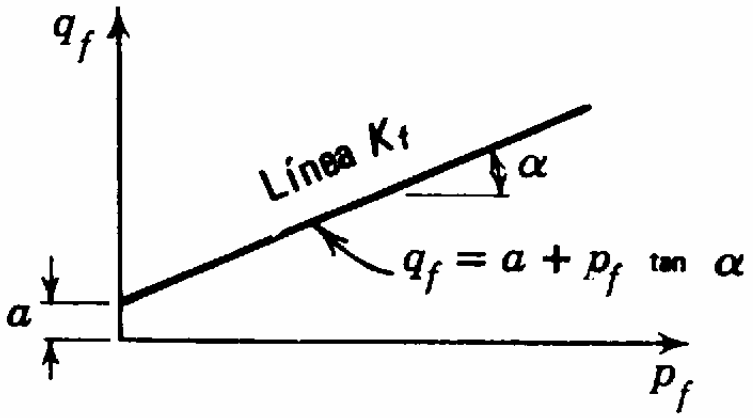
### 8.4.1 Convenciones plano de mohr en estado limite 60 % arena 40 % grava.




### 8.4.2. Envolvente de mohr mezcla 60 % arena 40 % grava.



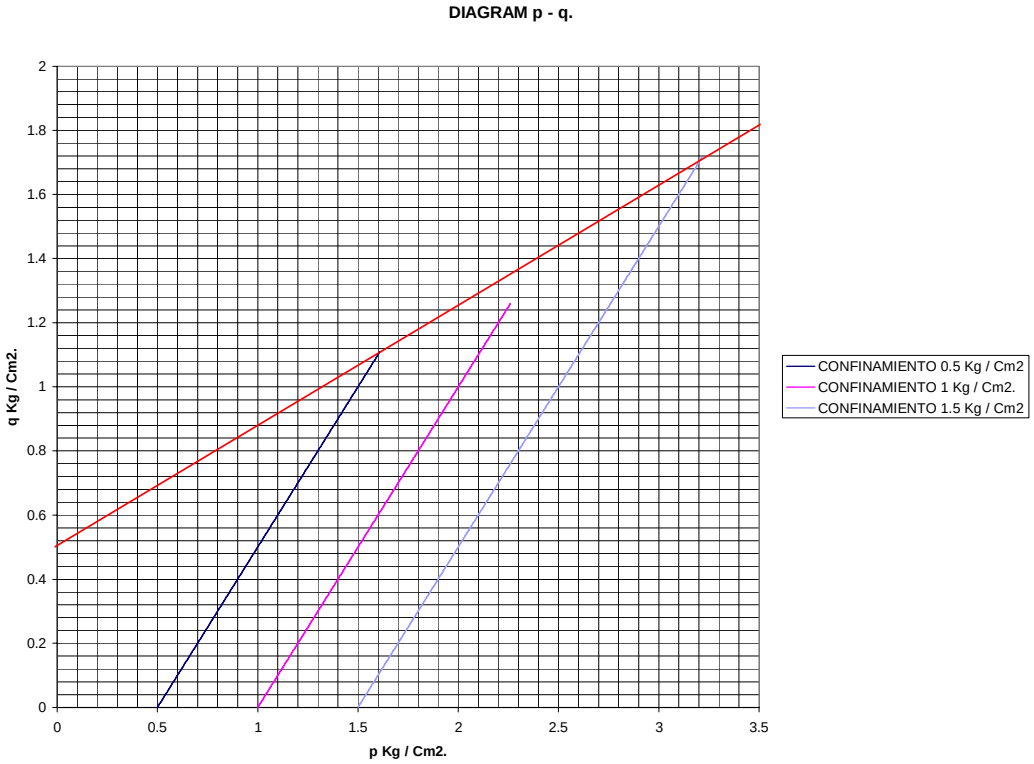
### 8.4.3. Correlacion diagrama p – q, Angulo de fricción mohr .




$$\operatorname{sen} \phi = \tan \alpha$$

$$c = \frac{a}{\cos \phi}$$

### 8.4.4. Diagrama p – q mezcla 60 % arena 40 % grava.



### 8.4.5. Propiedades de las mezclas 60 % arena 40 % grava.

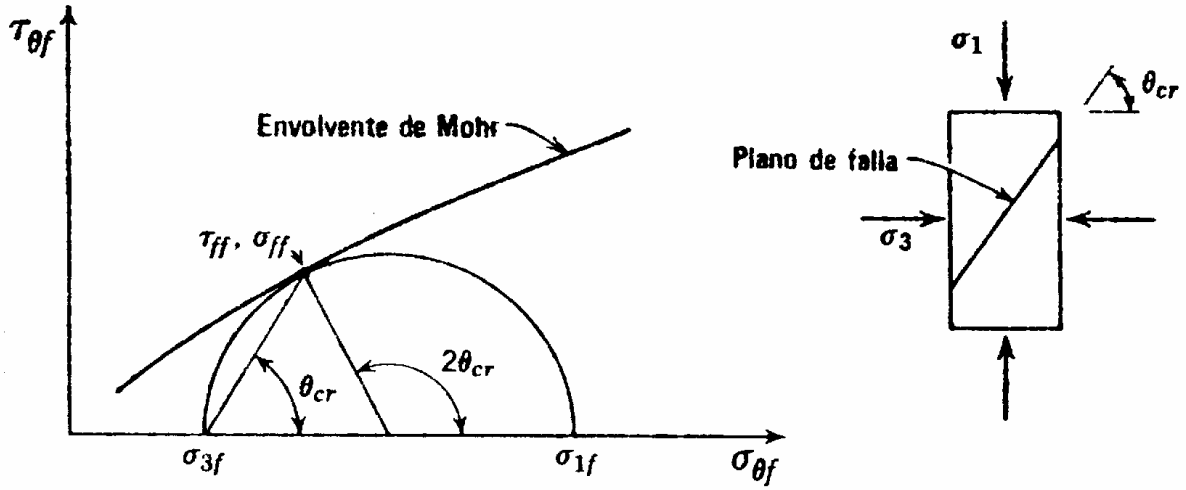
| | Arena (gr) | Grava (gr) | Ws ( gr ) 100 % | V m ( cm3 ) | $\gamma\omega$ (gr/cm3) | Gs |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma$3 = 0.5 Kg / Cm2. | 186.01 | 126.25 | 312.26 | 196.3497284 | 1 | 2.7 |
| $\sigma$3 = 1 Kg / Cm2. | 185.92 | 126.57 | 312.49 | 196.3497284 | 1 | 2.7 |
| $\sigma$3 = 1.5 Kg / Cm2. | 185.97 | 126.74 | 312.71 | 196.3497284 | 1 | 2.7 |
| | $\gamma$ m (gr/cm3) | Vs (cm3) | V v (cm3) | e vacios | Dr ( % ) | n ( % ) |
| $\sigma$3 = 0.5 Kg / Cm2. | 1.59 | 115.65 | 80.70 | 0.70 | 34.08 | 41.10 |
| $\sigma$3 = 1 Kg / Cm2. | 1.59 | 115.74 | 80.61 | 0.70 | 34.49 | 41.06 |
| $\sigma$3 = 1.5 Kg / Cm2. | 1.59 | 115.82 | 80.53 | 0.70 | 34.89 | 41.01 |

### 8.4.6. Resultados análisis diagramas de mohr, p – q.

| $\sigma$1 Kg/Cm2 | $\sigma_3$ Kg/Cm2 | $(\sigma_1-\sigma_3)/2$ $q_f$ Kg/Cm2 | $(\sigma_1+\sigma_3)/2$ $p_f$ Kg / Cm2 | $(\sigma_1/\sigma_3)$ $N_\phi$ | $\sigma_{ff}$ Kg/Cm2 | $\tau_{ff}$ Kg/Cm2 | c Kg/Cm2 | a Kg/Cm2 | $\alpha$ grados | $\theta_{cr}$ grad | $\phi$ Corr $\alpha$ grados |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.71 | 0.50 | 1.11 | 1.61 | 5.42 | 1.05 | 1.00 | 0.56 | 0.52 | 20.94 | 56.25 | 22.50 |
| 3.51 | 1.00 | 1.26 | 2.26 | 3.51 | 1.61 | 1.18 | 0.56 | 0.52 | 20.94 | 56.25 | 22.50 |
| 4.92 | 1.50 | 1.71 | 3.21 | 3.28 | 2.36 | 1.54 | 0.56 | 0.52 | 20.94 | 56.25 | 22.50 |

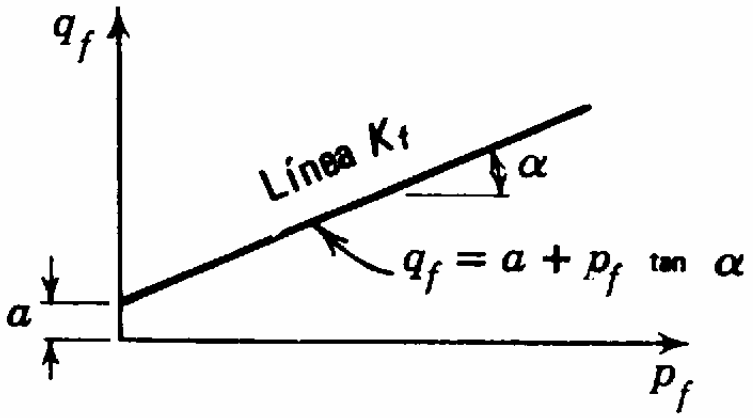
## 8.5. Análisis mezcla 40 % arena 60 % grava.

### 8.5.1. Convenciones plano de mohr en estado limite 40 % arena 60 % grava.




### 8.5.2. Envolvente de mohr mezcla 40 % arena 60 % grava.

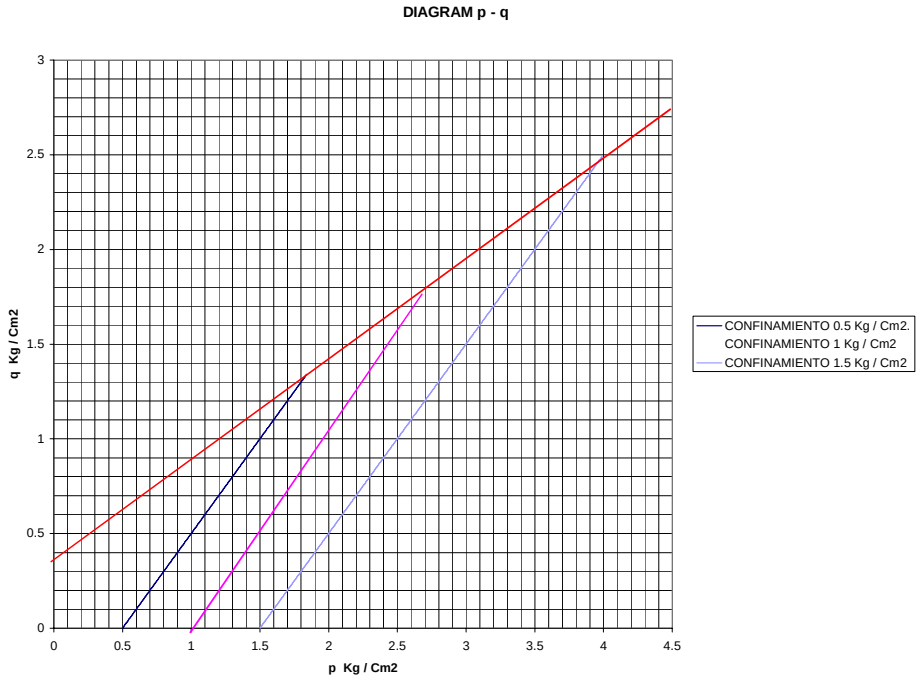
### 8.5.3. Correlación diagrama p – q, ángulo de fricción mohr .




$$\operatorname{sen} \phi = \tan \alpha$$

$$c = \frac{a}{\cos \phi}$$

### 8.5.4. Diagrama p – q mezcla 40 % arena 60 % grava.



### 8.5.5. Propiedades de las mezclas 40 % arena 60 % grava.

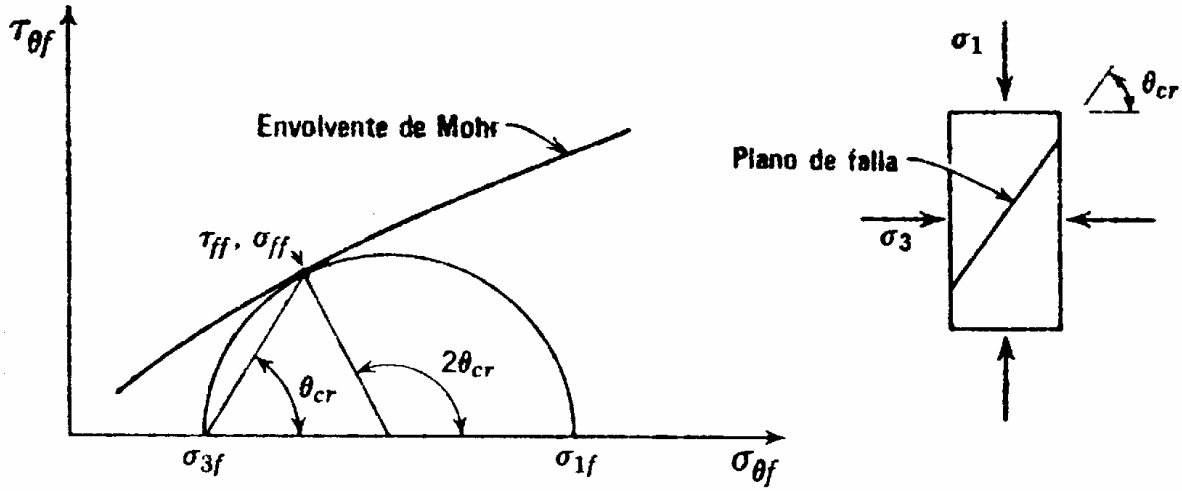
| | Arena (gr) | Grava (gr) | Ws ( gr ) 100 % | V m ( cm3 ) | $\gamma\omega$ (gr/cm3) | Gs |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **$\sigma$3 = 0.5 Kg / Cm2.** | **124.09** | **186.76** | **310.85** | **196.35** | **1** | 2.7 |
| **$\sigma$3 = 1 Kg / Cm2.** | **124.12** | **187.13** | **311.25** | **196.35** | **1** | 2.7 |
| **$\sigma$3 = 1.5 Kg / Cm2.** | **125.11** | **187.05** | **312.16** | **196.35** | **1** | 2.7 |
| | **$\gamma$ m (gr/cm3)** | **Vs (cm3)** | **V v (cm3)** | **e vacios** | **Dr ( % )** | **n ( % )** |
| **$\sigma$3 = 0.5 Kg / Cm2.** | 1.58 | 115.13 | 81.22 | 0.71 | 31.51 | 41.37 |
| **$\sigma$3 = 1 Kg / Cm2.** | 1.59 | 115.28 | 81.07 | 0.70 | 32.24 | 41.29 |
| **$\sigma$3 = 1.5 Kg / Cm2.** | 1.59 | 115.61 | 80.73 | 0.70 | 33.90 | 41.12 |

### 8.5.6. Resultados análisis diagramas de mohr, p – q.

| $\sigma$1 Kg/Cm2 | $\sigma_3$ Kg/Cm2 | $(\sigma_1-\sigma_3)/2$ $q_f$ Kg/Cm2 | $(\sigma_1+\sigma_3)/2$ $p_f$ Kg / Cm2 | $(\sigma_1/\sigma_3)$ $N_\phi$ | $\sigma_{ff}$ Kg/Cm2 | $\tau_{ff}$ Kg/Cm2 | c Kg/Cm2 | a Kg/Cm2 | $\alpha$ grados | $\theta_{cr}$ grad | $\phi$ Corr $\alpha$ grados |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3.17 | 0.50 | 1.34 | 1.84 | 6.34 | 1.01 | 1.02 | 0.45 | 0.37 | 29.21 | 62.00 | 33.99 |
| 5.09 | 1.00 | 2.05 | 3.05 | 5.09 | 1.78 | 1.62 | 0.45 | 0.37 | 29.21 | 62.00 | 33.99 |
| 6.47 | 1.50 | 2.49 | 3.99 | 4.31 | 2.4 | 2.01 | 0.45 | 0.37 | 29.21 | 62.00 | 33.99 |

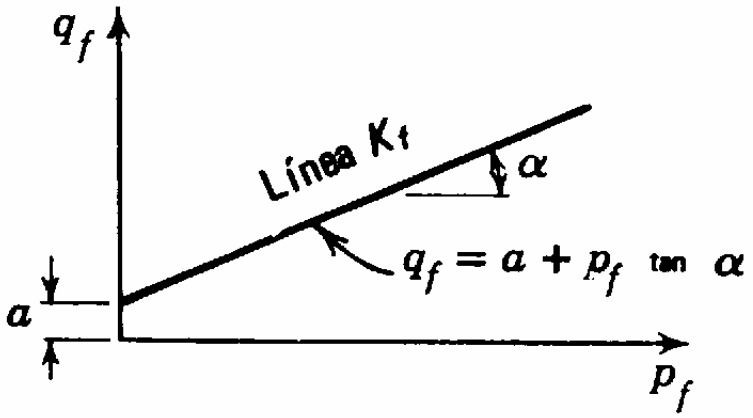
## 8.6. Análisis mezcla 20 % arena 80 % grava.

### 8.6.1. Convenciones plano de mohr en estado limite 20 % arena 80 % grava.




### 8.6.2. Envolvente de mohr mezcla 20 % arena 80 % grava.

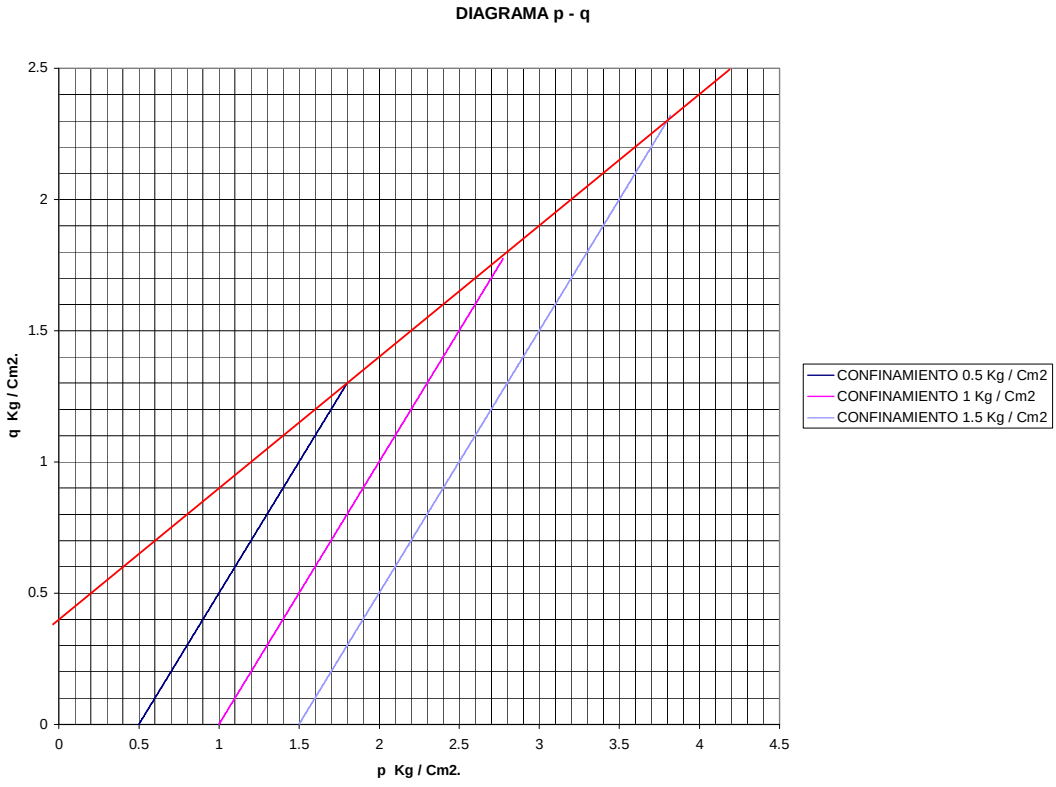
### 8.6.3. Correlación diagrama p – q, ángulo de fricción mohr .




$$\operatorname{sen} \phi = \tan \alpha$$

$$c = \frac{a}{\cos \phi}$$

### 8.6.4. Diagrama p – q mezcla 20 % arena 80 % grava.



### 8.6.5. Propiedades de las mezclas 20 % arena 80 % grava.

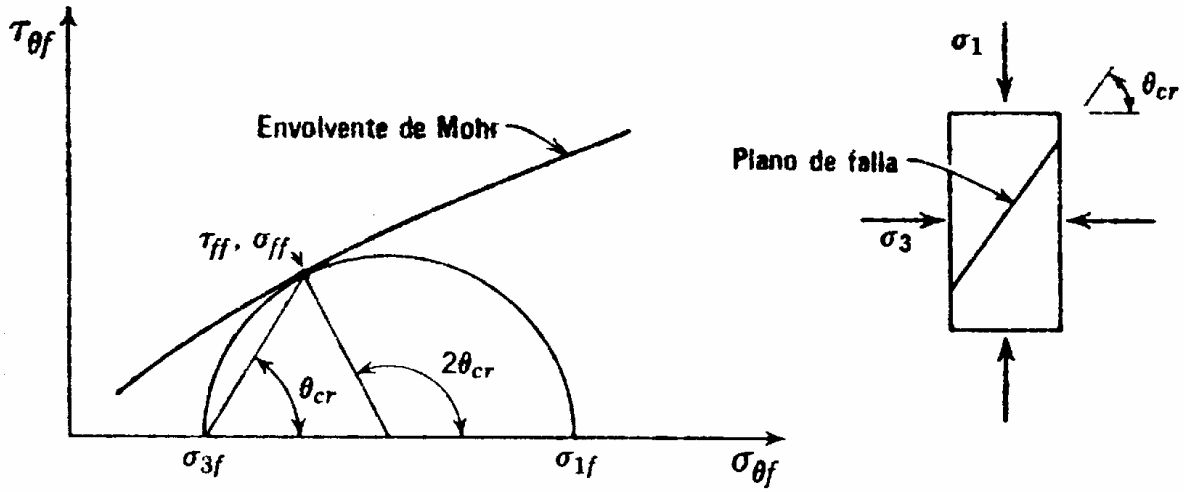
| | Arena (gr) | Grava (gr) | Ws ( gr ) 100 % | V m ( cm3 ) | γω (gr/cm3) | Gs |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **σ3 = 0.5 Kg / Cm2.** | 62.04 | 240.73 | 302.77 | 196.3497284 | 1 | 2.7 |
| **σ3 = 1 Kg / Cm2.** | 62.25 | 241.02 | 303.27 | 196.3497284 | 1 | 2.7 |
| **σ3 = 1.5 Kg / Cm2.** | 62.03 | 241.52 | 303.55 | 196.3497284 | 1 | 2.7 |
| | **γ m (gr/cm3)** | **Vs (cm3)** | **V v (cm3)** | **e vacios** | **Dr ( % )** | **n ( % )** |
| **σ3 = 0.5 Kg / Cm2.** | 1.54 | 112.14 | 84.21 | 0.75 | 16.34 | 42.89 |
| **σ3 = 1 Kg / Cm2.** | 1.54 | 112.32 | 84.03 | 0.75 | 17.30 | 42.79 |
| **σ3 = 1.5 Kg / Cm2.** | 1.55 | 112.43 | 83.92 | 0.75 | 17.84 | 42.74 |

### 8.6.6. Resultados análisis diagramas de mohr, p – q.

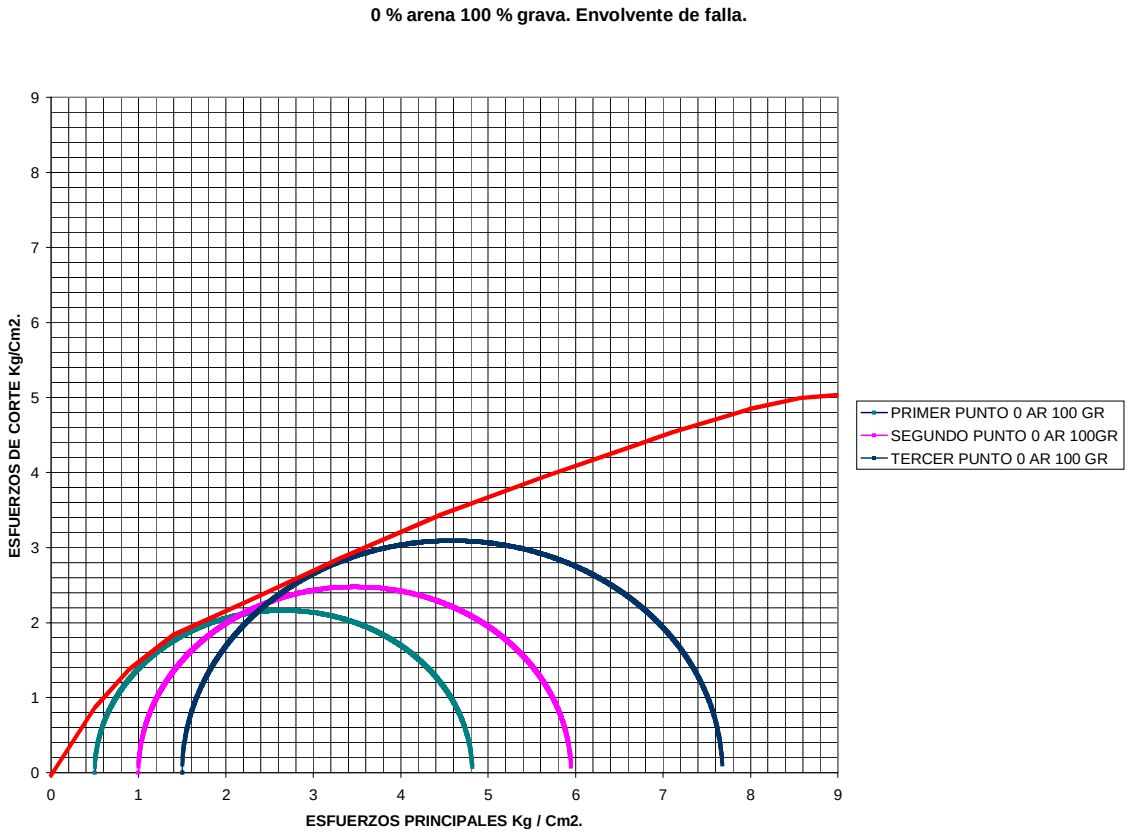
| $\sigma 1$ Kg/Cm2 | $\sigma_3$ Kg/Cm2 | $(\sigma_1-\sigma_3)/2$ $q_f$ Kg/Cm2 | $(\sigma_1+\sigma_3)/2$ $p_f$ Kg / Cm2 | $(\sigma_1/\sigma_3)$ $N_\phi$ | $\sigma_{ff}$ Kg/Cm2 | $\tau_{ff}$ Kg/Cm2 | c Kg/Cm2 | a Kg/Cm2 | $\alpha$ grados | $\theta_{cr}$ grad | $\phi$ Corr $\alpha$ grados |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3.09 | 0.50 | 1.30 | 1.80 | 6.18 | 0.98 | 1.01 | 0.46 | 0.40 | 26.56 | 60.00 | 29.99 |
| 4.54 | 1.00 | 1.77 | 2.77 | 4.54 | 1.61 | 1.30 | 0.46 | 0.40 | 26.56 | 60.00 | 29.99 |
| 6.18 | 1.50 | 2.34 | 3.84 | 4.12 | 2.37 | 1.78 | 0.46 | 0.40 | 26.56 | 60.00 | 29.99 |

## 8.7. Análisis mezcla 0 % aren 100 % grava.

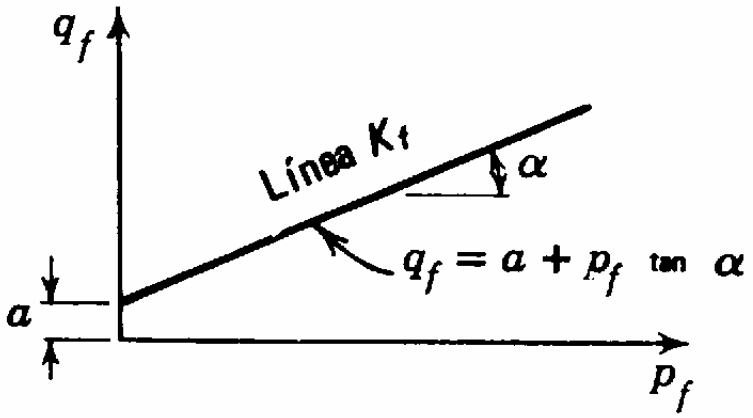
### 8.7.1. Convenciones plano de mohr en estado limite 0 % arena 100 % grava.




### 8.7.2. Envolvente de mohr mezcla 0 % arena 100 % grava.



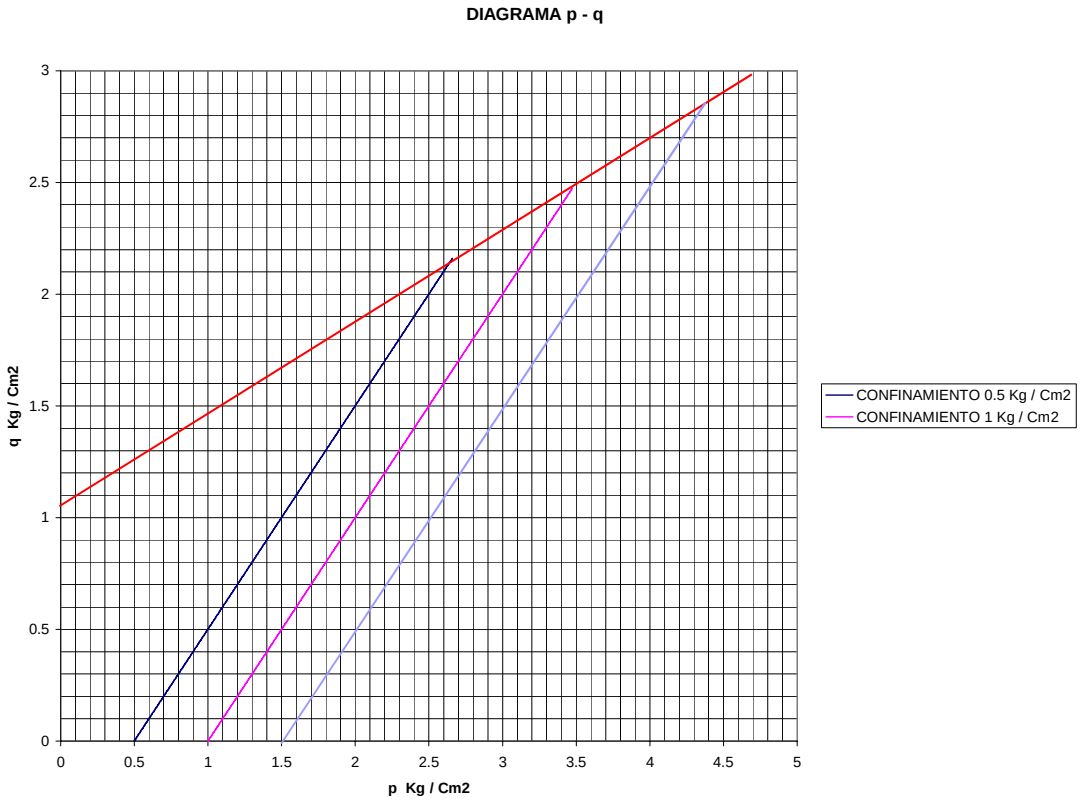
### 8.7.3. Correlación diagrama p – q, ángulo de fricción mohr.




$$\operatorname{sen} \phi = \tan \alpha$$

$$c = \frac{a}{\cos \phi}$$

### 8.7.4. Diagrama p – q mezcla 0 % arena 100 % grava.



### 8.7.5. Propiedades de las mezclas 0 % arena 100 % grava.

| | Arena (gr) | Grava (gr) | Ws ( gr ) 100 % | V m ( cm3 ) | γω (gr/cm3) | Gs |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **σ3 = 0.5 Kg / Cm2.** | 0 | 292.23 | 292.23 | 196.35 | **1** | 2.7 |
| **σ3 = 1 Kg / Cm2.** | 0 | 293.42 | 293.42 | 196.35 | **1** | 2.7 |
| **σ3 = 1.5 Kg / Cm2.** | 0 | 293.57 | 293.57 | 196.35 | **1** | 2.7 |
| | **γ m (gr/cm3)** | **Vs (cm3)** | **V v (cm3)** | **e vacios** | **Dr ( % )** | **n ( % )** |
| **σ3 = 0.5 Kg / Cm2.** | 1.49 | 108.23 | 88.12 | 0.81 | 4.71 | 44.88 |
| **σ3 = 1 Kg / Cm2.** | 1.49 | 108.67 | 87.68 | 0.81 | 2.26 | 44.65 |
| **σ3 = 1.5 Kg / Cm2.** | 1.50 | 108.73 | 87.62 | 0.81 | 1.95 | 44.62 |

### 8.7.6. Resultados análisis diagramas de mohr, p – q.

| $\sigma 1$ Kg/Cm2 | $\sigma_3$ Kg/Cm2 | $(\sigma_1-\sigma_3)/2$ $q_f$ Kg/Cm2 | $(\sigma_1+\sigma_3)/2$ $p_f$ Kg / Cm2 | $(\sigma_1/\sigma_3)$ $N_\phi$ | $\sigma_{ff}$ Kg/Cm2 | $\tau_{ff}$ Kg/Cm2 | c Kg/Cm2 | a Kg/Cm2 | $\alpha$ grados | $\theta_{cr}$ grad | $\phi$ Corr $\alpha$ grados |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4.81 | 0.50 | 2.16 | 2.66 | 9.62 | 1.58 | 1.94 | 1.21 | 1.10 | 22.71 | 57.37 | 24.74 |
| 5.94 | 1.00 | 2.47 | 3.47 | 5.94 | 2.30 | 2.25 | 1.21 | 1.10 | 22.71 | 57.37 | 24.74 |
| 7.67 | 1.50 | 3.09 | 4.59 | 5.11 | 3 | 2.78 | 1.21 | 1.10 | 22.71 | 57.37 | 24.74 |

## 8.8. FRICCION ENTRE PARTICULAS EN CONTACTO MEZCLAS ARENA GRAVA.

### 8.8.1. Resistencia al esfuerzo cortante mezclas arena de Ottawa mas gravas partículas en contacto.

La resistencia al esfuerzo cortante entre dos partículas bien sea de arena o de grava es la fuerza que debe aplicarse para producir un deslizamiento relativo entre las mismas. La causa de esta resistencia esta en las fuerzas atractivas que actúan entre los átomos superficiales de las partículas; estas fuerzas atractivas dan lugar a la formación de enlaces químicos en los puntos de contacto superficiales.

La resistencia y el número de enlaces que se forman en la cara de contacto entre dos partículas de la mezcla dependen en gran parte de la naturaleza fisicoquímica de las superficies de las mismas.

La resistencia tangencial total producto de la resistencia de cada enlace por el número total de enlaces es proporcional a la fuerza normal ejercida entre ambas partículas. Si esta fuerza normal disminuye, se reduce la resistencia o el número de enlaces, con lo cual disminuye la resistencia tangencial total.

### 8.8.2. Diagrama del ángulo de fricción entre partículas en contacto arena grava.

Si N es la fuerza normal aplicada sobre una superficie, la fuerza tangencial máxima sobre la misma es $\mathbf{T_{máx.} = N\,f}$ ; donde el ángulo de fricción **øμ** esta definido por **Tan (øμ) = f** .

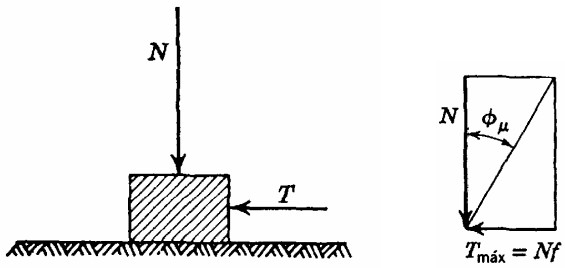



**Figura 10.** Angulo de fricción entre partículas arena grava.

### 8.8.3. Consideraciones a la fricción entre partículas en contacto arena grava.

El desplazamiento relativo entre las partículas constituye el mecanismo de deformación de las mezclas arena grava; la resistencia, a la deformación esta influenciada por la resistencia tangencial en los contactos entre partículas.

La resistencia tangencial entre las superficies de la arena y la grava constituye solamente una parte de la resistencia a la comprensión triaxial. También el acomodo entre partículas, es función directa de la compacidad de la mezcla.

### 8.8.4. Fricción entre dos partículas arena grava ( Leyes de amontons ).

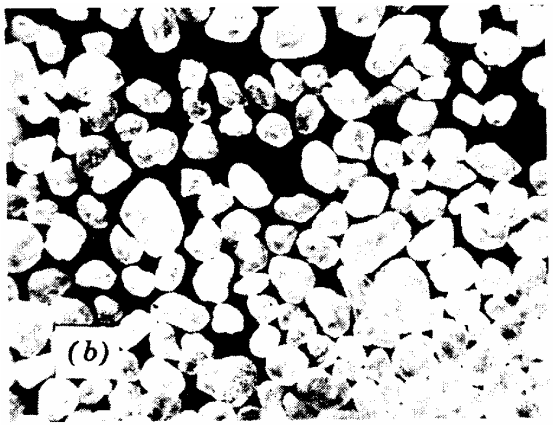
La resistencia al deslizamiento tangencial entre dos partículas de arena o grava es proporcional a la fuerza normal ejercida entre las mismas.
La resistencia al desplazamiento tangencial entre dos partículas de arena o grava es independiente de las dimensiones de ambas.

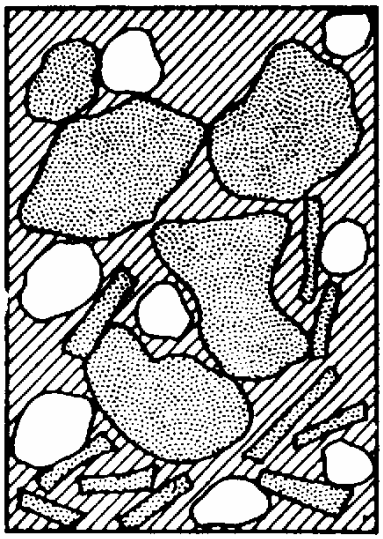
### 8.8.5. Teoría de la fricción por adherencia

.

Es necesario explicar como sucede el proceso y adherencia de fricción entre partículas arena grava con el objetivo de entender los conceptos básicos; y de esta forma poder interpretar los resultados obtenidos en esta investigación.

Las superficies de las partículas arena grava son rugosas por lo que estarán en contacto cuando se toquen los puntos más prominentes (*asperezas*) de una partícula con su vecina. Las presiones normales en los puntos prominentes son muy elevadas e, incluso bajo cargas muy ligeras, se alcanzará el límite de rotura del material en las áreas de contacto.



**Figuras 1 y 11.** La figura uno ( lado izquierdo ) es una fotografía ampliada de arena de Ottawa de 0.19 a 0.42 mm; la figura once representa una mezcla de arena de Ottawa con partículas de grava de 4.76 mm. Obsérvese los contactos entre las partículas pequeñas y grandes, el área de contacto es una fracción del área total de cada una de las partículas.

Área real de contacto: **Ac = N/qu**

Donde N es la carga normal y $q_u$ es la presión normal necesaria para producir la rotura; como $q_u$ tiene valor fijo, el aumento de la carga normal total entre ambas partículas de la mezcla significa un aumento proporcional en la superficie de contacto real; este aumento es el resultado de la deformación plástica de las asperezas.

Las superficies de las partículas se adhieran en los puntos de contacto real a causa de las elevadas presiones de contacto; ambas partículas se unen por enlaces químicos. La

resistencia tangencial se debe a la adhesión en tales puntos.

Máxima fuerza tangencial : ***Tmax = S*Ac***

Siendo S la resistencia al norte de los enlaces adheridos y Ac el área real de contacto, entonces Ac = N/qu; como S y $q_u$ son propiedades del material, Tmax es proporcional a N. el coeficiente de fricción *f* será igual a la relación $s/q_u$.

Entonces se obtiene: ***$\mu$ = T / N ; Tm / qu***

### 8.8.6. Influencia de la rugosidad superficial en la fricción entre partículas en contacto arena grava.

La fricción por adherencia implica que la fricción es independiente de la rugosidad superficial. Sin embargo, cuando las superficies son muy rugosas, el encaje de las asperezas puede dar lugar a un mayor valor de *f* .

### 8.8.7. Relación entre la fricción estática y la cinética en partículas arena grava.

La fuerza tangencial necesaria para que se inicie el deslizamiento entre dos superficies de partículas en contacto arena o grava suele ser superior a la fuerza necesaria para mantener el movimiento inicial.

Al comenzar el deslizamiento parte de la energía elástica almacenada en el mecanismo de carga se liberan, acelerando el deslizamiento y dando lugar a que la fuerza tangencial medida disminuya por debajo de la necesaria para mantener el movimiento. Cesa entonces el deslizamiento y la fuerza tangencial debe aumentarse hasta el valor correspondiente a la fricción estática para provocar de nuevo el deslizamiento.

### 8.8.8. Fricción en la rodadura de partículas arena grava.

Cuando se hace rodar una partícula de arena o de grava sobre otra se forman enlaces en los puntos de contacto, de manera análoga a cuando se comprimen una contra otra. Cuando la partícula que rueda se mueve, estos enlaces se rompen por tensión, y no por el esfuerzo tangencial. Debido a la recuperación elástica cuando la fuerza normal disminuye a cero la resistencia de los enlaces a la tensión suele ser casi nula.

Esto explica porque la adhesión de dos superficies comprimidas una contra otra no se suele observar generalmente, solo actúa cuando las superficies se encuentran sometidas a compresión.

De aquí que la fricción de la rodadura sea generalmente muy pequeña ($f << 0.1$) respecto a la fricción estática o cinética, siendo prácticamente independiente del grado de limpieza la superficie.

## 8.9. FACTORES DE INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA MEZCLAS ARENA GRAVA.

La resistencia al esfuerzo cortante de las mezclas todo el tiempo dependió de los siguientes factores:

- **Relación de vacíos de la mezcla.**
- **Porosidad de la mezcla.**
- **Compacidad.**
- **Resistencia individual de las partículas mezcladas.**
- **Grado de encaje.**
- **Tamaño de las partículas mezcladas.**
- **Forma de las partículas mezcladas.**
- **Granulometría.**
- **Presión de confinamiento.**
- **Velocidad de la carga.**

### 8.9.1. Influencia de la relación de vacíos y la porosidad.

Se observo una tendencia general en la que el ángulo de fricción aumenta cuando la mezcla arena grava tiende a comprimirse mas; la influencia de la porosidad en función de la relación de vacíos inicial sobre el ángulo de fricción es a causa también del fenómeno de acomodación y grado de encaje entre partículas de la mezcla.

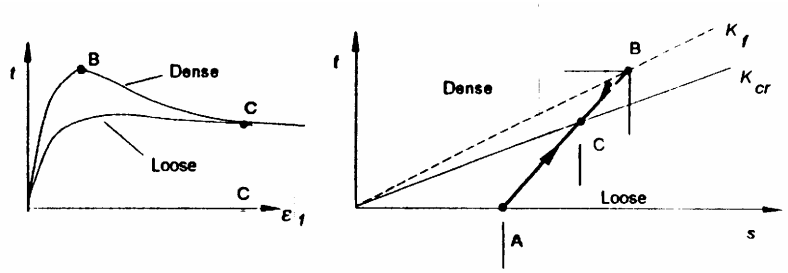



**Figura 12.** Esquema ilustrativo comportamiento de mezclas sueltas y mezclas granulares en estado mas compacto, las mezclas de esta investigación son de tipo suelto.
La siguiente grafica de porosidad ángulo de fricción permite visualizar la influencia de la porosidad en el ángulo fricción obtenido para cada mezcla arena grava.

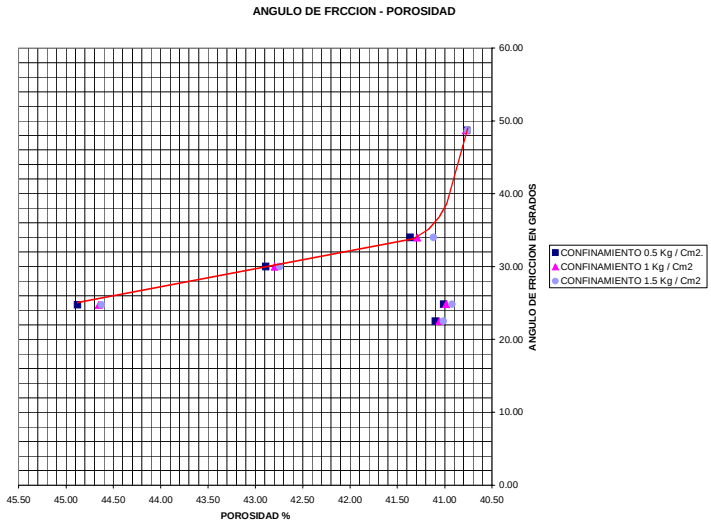



**Figura 12a**. Tendencia de aumento del ángulo de fricción según el porcentaje de porosidad; los punto sobre la grafica provienen de los datos de laboratorio, la línea roja es teórica.

Con el fin de hacer un análisis de cómo la porosidad afecta el limite de resistencia en las mezclas en estudio se elaboro un diagrama de concentración relativa por peso de los materiales arena grava y su porosidad inicial por mezcla; se observa un punto de porosidad mas bajo que corresponde al punto B pero este punto no corresponde a la porosidad mínima de la mezcla. Si se unen las porosidades de las gravas y las de la arena de Ottawa mezcladas, con los puntos de porosidad baja, se obtiene el trazo ABC del cual se obtienen las porosidades teóricas de las mezclas como una función de la concentración por peso de los materiales gruesos en las mezclas observar la siguiente figura ( La línea A,B,C es teórica ).

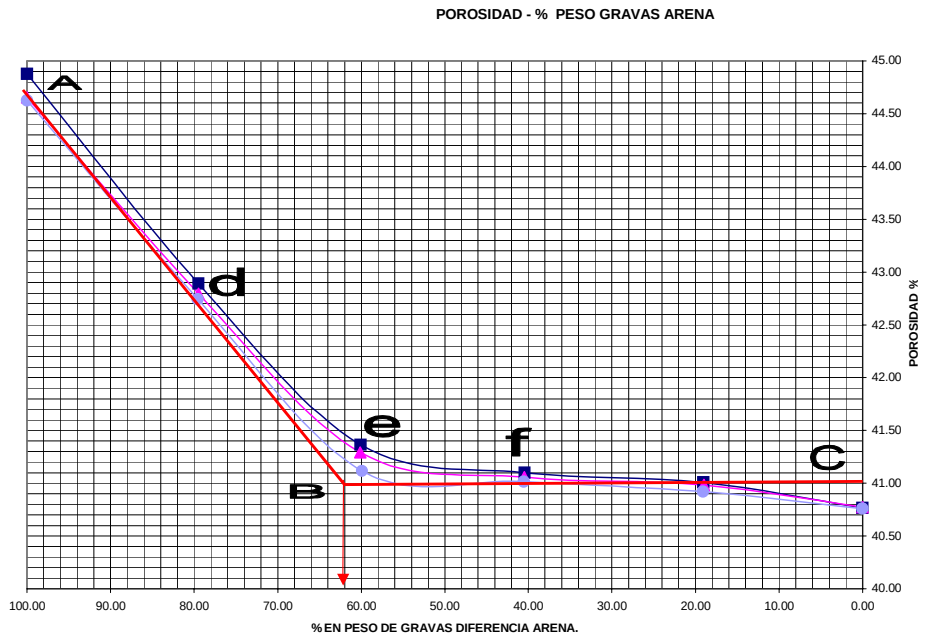



**Figura 13.** Grafica de porosidad concentración relativa por peso partículas de grava.

El tramo de línea AB representa las estructuras de porosidad controladas por las partículas de grava que influyen directamente sobre el ángulo de fricción . El tramo de línea BC representa las estructuras de porosidad controladas por las partículas de arena de Ottawa .

En las mezclas previamente conformadas se existen dos zonas de transición que son los puntos d – e y los puntos e – f . Los valores de porosidad de laboratorio para la

estructura controlada por las partículas de grava están representados por las letras A,d, e, y los valores de porosidad para las estructuras controladas por la arena de Ottawa están representados por las letras e,f,g,c.

Debido a que la estructura de las mezclas arena grava fue forzada a tener un valor exacto por concentración relativa por peso se conformaron unas estructuras de material granular de acuerdo a la porosidad y a la relación de vacíos obtenida por cada mezcla arena grava.

### 8.9.2. Clasificación de las estructuras granulares de las mezclas arena grava, basadas en su porosidad.

Teniendo la clasificación de las porosidades por mezcla y la concentración relativa por peso y el ángulo de fricción obtenido se hizo un análisis con lo datos obtenidos a través de un diagrama donde se muestra el rango de valores de la porosidad y la concentración de partícula gruesa relacionada para la estructura apoyada en material grueso, la estructura apoyada por material fino y la zona de transición de porosidad baja .

Se pueden reconocer límites muy distintivos que pueden usarse para clasificar las mezclas como claramente se describirá a continuación los tipos de estructura apoyados en materiales gruesos,en material grueso transicional, en material fino transicional, y en material fino.

#### 8.9.2.1. Tipos de estructuras de soporte clasificadas de acuerdo a los datos obtenidos de los análisis de laboratorio :

Estructura apoyada en el material de grava grueso: es la que posee cero o muy pequeñas cantidades de materiales finos en los vacíos, la concentración de material grueso por valores de peso varia entre el 100 y el 80%.

Estructura apoyada en material grueso de transición: es la que en su mayoría está apoyada por las partículas gruesas de grava, la concentración de material grueso por valores de peso varia entre el 80 y el 60% .

Estructura apoyada en material fino de transición es la que en su mayoría está apoyada en las partículas finas, la concentración de partículas gruesas por valores de peso varia entre el 60 y el 40%.

Estructura apoyada en material fino es la que tiene cero o muy pequeñas cantidades de partículas gruesas. Si las partículas gruesas están presentes "flotan" en una matriz de materiales finos, la concentración de gravas por valores de peso varían entre el 40 y el 0% .

### 8.9.2.2. Resultados estructuras de soporte.

**CLASIFICACION ESTRUCTURAS DE LA MEZCLA ARENA GRAVA**

| Clasificacion. | Rango de porosiad ( % ). | | | Rango de % particulas de arena | | | qf Kg/Cm2 | | | qf Kg/Cm2 | | | ϕ | | | ϕ | Presion de confinamiento Kg / Cm2. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Estructura soportada en las particulas de arena de Ottawa. | 40.77 | a | 41.01 | 100 | a | 80 | 1.21 | a | 1.15 | 48.68 | a | 24.82 | 0.50 |
| | 40.77 | a | 40.98 | 100 | a | 80 | 1.73 | a | 1.45 | 48.68 | a | 24.82 | 1.00 |
| | 40.76 | a | 40.92 | 100 | a | 80 | 2.23 | a | 1.83 | 48.68 | a | 24.82 | 1.50 |
| Estructura de transicion soportada en las particulas de arena de Ottawa y un minimo de gravas. | 41.01 | a | 41.10 | 80 | a | 60 | 1.15 | a | 1.11 | 24.82 | a | 22.50 | 0.50 |
| | 40.98 | a | 41.06 | 80 | a | 60 | 1.45 | a | 1.26 | 24.82 | a | 22.50 | 1.00 |
| | 40.92 | a | 41.01 | 80 | a | 60 | 1.83 | a | 1.71 | 24.82 | a | 22.50 | 1.50 |
| Estructura de transicion soportada en las particulas de grava. | 41.10 | a | 41.37 | 60 | a | 40 | 1.11 | a | 1.34 | 22.50 | a | 33.99 | 0.50 |
| | 41.06 | a | 41.29 | 60 | a | 40 | 1.26 | a | 2.05 | 22.50 | a | 33.99 | 1.00 |
| | 41.01 | a | 41.12 | 60 | a | 40 | 1.71 | a | 2.49 | 22.50 | a | 33.99 | 1.50 |
| Estructura soportada en las particulas de grava. | 41.37 | a | 44.88 | 40 | a | 0 | 1.34 | a | 2.16 | 33.99 | a | 24.74 | 0.50 |
| | 41.29 | a | 44.65 | 40 | a | 0 | 2.05 | a | 2.47 | 33.99 | a | 24.74 | 1.00 |
| | 41.12 | a | 44.62 | 40 | a | 0 | 2.49 | a | 3.09 | 33.99 | a | 24.74 | 1.50 |

**Figura 14**. Tabla de clasificación estructuras de soporte según su porosidad, los datos provienen de los análisis de las pruebas de laboratorio efectuados para esta investigación.

### 8.9.3. RELACION ENTRE LA POROSIDAD Y LA FUERZA DE CORTE

El ángulo de fricción es mayor cuando la porosidad y la relación de vacíos disminuyen, el grado de encaje de las partículas es generado por que la muestra esta con una presión de confinamiento y al aplicar el esfuerzo desviador se genera un acortamiento de la mezcla arena grava en sentido vertical; al no permitirse reversar el desplazamiento generado por el esfuerzo desviador se da lugar a un incremento en el esfuerzo cortante el cual genera encaje y acomodación de las partículas que conforman la mezcla, generándose un deslizamiento por corte.

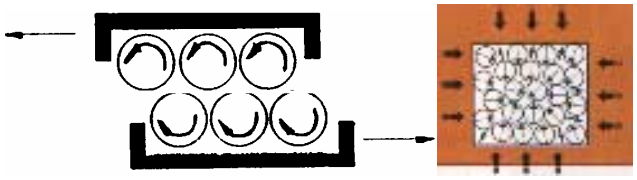


**Figura 15.** Esquema ilustrativo compresión y desplazamiento por corte ( obsérvese la rotación de las partículas en la dirección del desplazamiento).

Si se prosigue con la aplicación del esfuerzo desviador se generan deformaciones verticales y horizontales de la muestra de suelo es posible algunas fracturaciones de las partículas en contacto, el encaje de las partículas es inmediato; como la muestra se encuentra en estado seco los esfuerzos totales se transmiten directamente al esqueleto mineral.

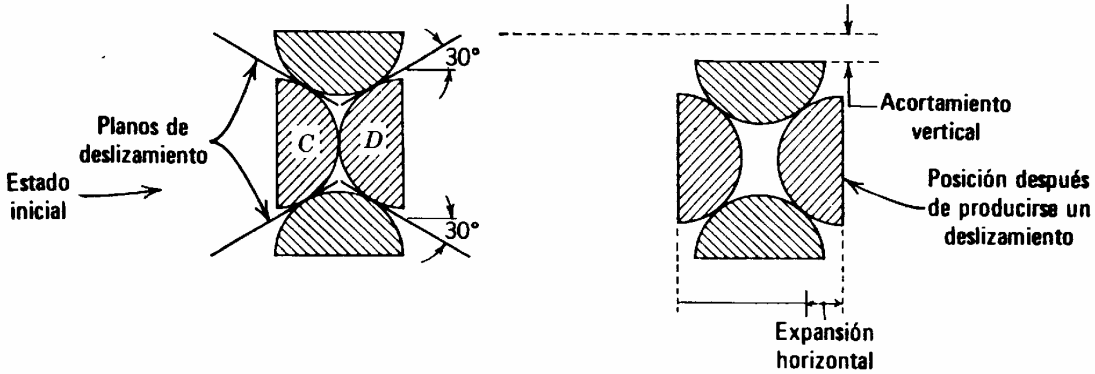



**Figura 16.** Esquema ilustrativo mezcla arena grava comprimida verticalmente con desplazamiento lateral de partículas.

La resistencia al deslizamiento en cada punto de contacto entre partículas es proporcional a la fuerza normal en dicho contacto, la resistencia total aumenta con la presión de confinamiento generándose desplazamiento tangencial por reacomodación y rotación de las partículas de la mezcla arena grava.

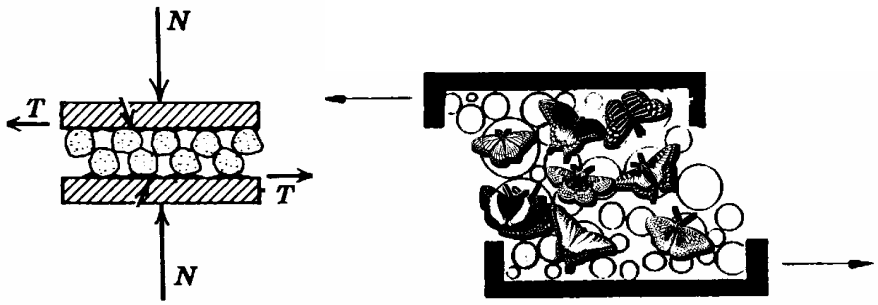



**Figura 17.** Esquema ilustrativo aplicación de la fuerza normal y desplazamiento por corte con grado de encaje ( interlocking ) de la mezcla arena grava.

La energía comunicada a la mezcla arena grava se consume venciendo la resistencia por fricción entre partículas y dilatando la muestra contra la presión de confinamiento.

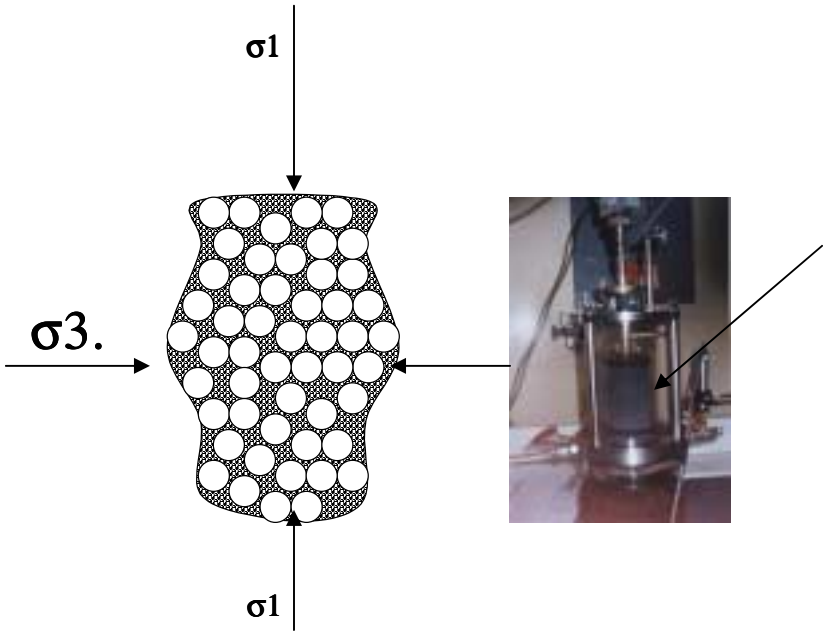



**Figura 18.** Encaje y deformaciones no uniformes mezcla de arena de Ottawa mas gravas, obsérvese la deformación lateral en la cámara triaxial.

### 8.9.3.1 Diagrama q - % concentración en peso partículas gruesas.

La porosidad alcanzada en valor promedio es del 41 % para las partículas de gravas que controlan la estructura de la mezcla cuando la concentración del material grueso es del 60%.

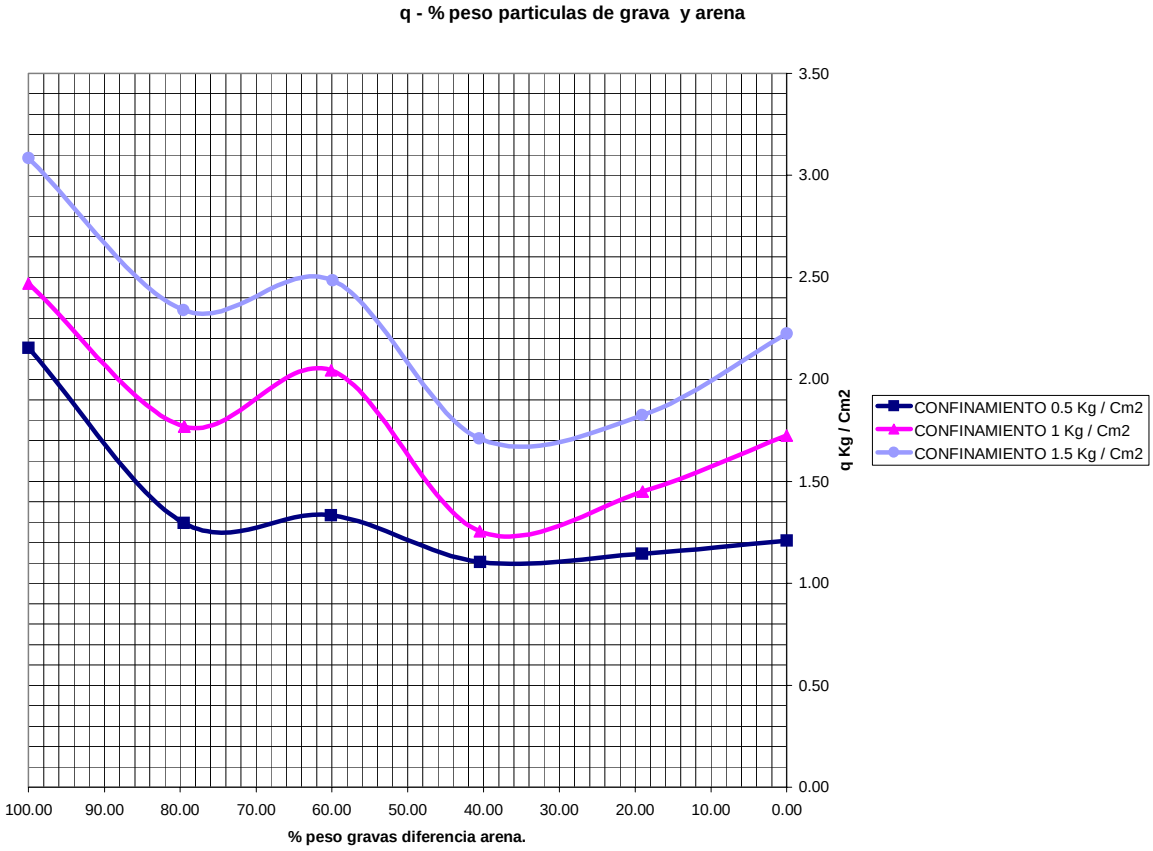
El diagrama de q contra concentración relativa por peso refleja el control de las partículas gruesas cuando el peso de las gravas supera el 60 % por concentración relativa por peso. Un análisis de los resultados de las pruebas triaxiales indica que cuando la concentración de material grueso fue menor que el 60%, la fuerza de corte de las mezclas era básicamente aquella de solo las partículas finas.

La pruebas triaxiales en las mezclas con concentraciones de material grueso por el orden de 60% y 40% reflejan que la resistencia estuvo controlada por las partículas de arena de Ottawa.

La figura 19 indica que la fuerza de corte decreció del 100 % al 80 % por peso de gravas, y entre el 80 % y 60 % de gravas empieza un incremento de fuerza de corte es posible por el acomodamiento y grado de encaje de las partículas gruesas, se aprecia que cuando las gravas están concentradas en un 60 % de peso la arena de Ottawa incrementa la fuerza de corte, es muy lógico si se piensa en una rápida acomodación de las partículas finas hacia los espacios vacíos, al suceder la acomodación de las partículas finas suceden los desplazamientos en la masa granular y el desplazamiento por corte se hace mas grande.

A partir del 60 % de concentración por peso de las partículas de grava y hasta un 20 % de concentración por peso de las partículas de grava la fuerza de corte se ve en descenso por que las muestras están en proceso de compresión y los espacios vacíos son menores que cuando existía mas gravas concentradas, este fenómeno de acomodación de los granos finos genera densificacion de la muestra; con una tendencia a que la fuerza de

corte disminuya sustancialmente; en este instante se aprecia que la resistencia del 60 % en peso al 0 % en peso de las partículas gruesas en las mezclas arena grava es gobernada por las partículas finas de arena de Ottawa.




.

**Figura 19.** Grafica de q, concentración relativa por peso partículas gruesas

Un análisis de las estructuras de soporte y la porosidad contra la concentración por peso de partículas gruesas indica que cuando la concentración de partícula gruesa en las mezclas es menor al 40%, las porosidades de las mezclas son controladas por la matriz de material fino que rodea las partículas gruesas dispersas.

La figura 19, de hecho, indica que cuando las mezclas tenían concentraciones de material grueso más pequeñas que el 40%, la fuerza de corte de las mezclas era controlada por los materiales de arena de Ottawa ( finos ).

Entonces es posible detectar los posibles límites de fuerza de corte para las las mezclas granulares arena grava en las cuales la fracción de material grueso controla total, parcialmente o no controla la fuerza de corte.

### 8.9.4. Influencia de la velocidad de carga

Teóricamente la velocidad de carga podría afectar el ángulo de fricción de la mezcla arena grava en 1-2% en valor.

### 8.9.5. Influencia del contenido de humedad

La mezcla arena grava fue secada totalmente al horno y las mezclas se protegieron con bolsas plásticas, es posible que hayan absorbido una pequeña humedad en el momento del montaje de la probeta. La presencia de esta humedad puede tener un efecto muy mínimo sobre el ángulo de fricción entre las partículas minerales.

### 8.9.6. Influencia en el ángulo de fricción por la concentración de partículas mezcladas

Existe influencia sobre la relación de vacíos para construir la probeta y el ángulo de fricción depende de la relación de vacíos de la mezcla .

### 8.9.7. Influencia del tamaño de las partículas mezcladas.

Se observo que la concentración relativa por peso de las partículas influye en los puntos de contacto entre las mismas, entre mas concentración de grava menor fue el contacto entre partículas de arena y grava, pero fue mayor la presión de contacto en estos granos. Se observo también que a mayor concentración relativa por peso de la arena de Ottawa se genero un mejor contacto entre las partículas de arena grava, debido a una buena distribución por tamaños.

### 8.9.8. Influencia de la granulometría de la mezcla arena grava.

Se observo que una mezcla con porcentaje de arena de Ottawa del 60 % por concentración relativa por peso experimenta menos deformación axial que una mezcla de grava con 80 % por concentración relativa por peso en la primer mezcla existen muchos contactos por partículas y la carga por contacto es, por tanto, menor que en la mezcla de grava. La distribución y mezclaje visual homogéneo de las mezclas generaban también una menor relación de vacíos y un ángulo de fricción mas grande y un mejor encaje entre partículas.

Para las mezclas con 80 % por concentración relativa por peso de grava y 20 % por concentración relativa por peso las arenas no presentan poca o ninguna influencia sobre el ángulo de fricción ya que se encuentran sueltas y no establecen contacto directo con las caras de las partículas gruesas de grava.

### 8.9.10. Angulosidad de las partículas

Cuanto mayor angulosidad se genera un mayor ángulo de fricción .

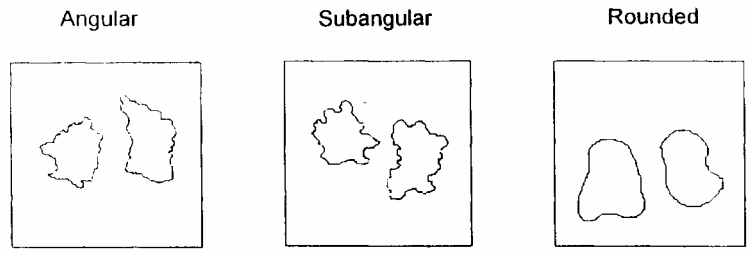



**Figura 19ª.** Angulosidad de las partículas finas .

### 8.9.11 Tipo de Mineral

La arena utilizada para conformar las mezclas contenía principalmente cuarzo, y feldespatos y el origen de la grava es de naturaleza dura.

## 9. ANÁLISIS ESFUERZO DEFORMACIÓN.

Los niveles de esfuerzo y el tipo de prueba triaxial influyeron en la obtención del ángulo de resistencia para cada mezcla según la presión de confinamiento.

### 9.1. Esfuerzo deformación mezcla 100 % arena 0 % grava.

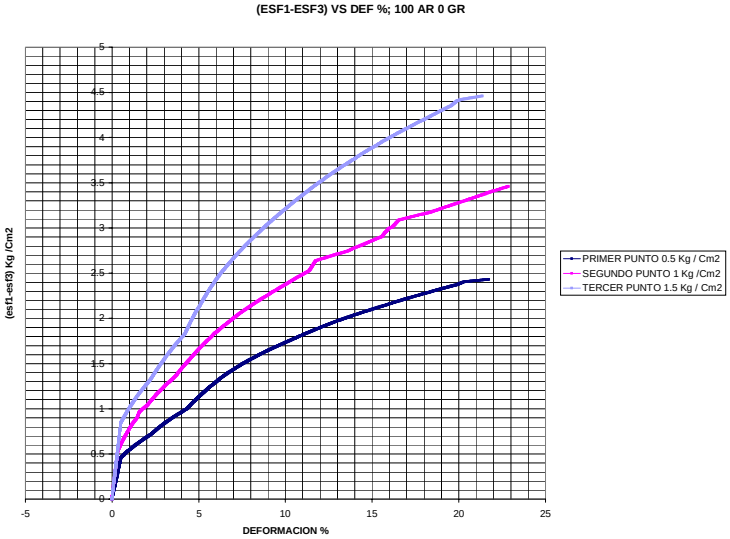



**Figura 20**. Esfuerzo desviador – deformación unitaria %. 100 % arena 0 % grava.

### 9.2. Esfuerzo deformación mezcla 80 % arena 20 % grava.

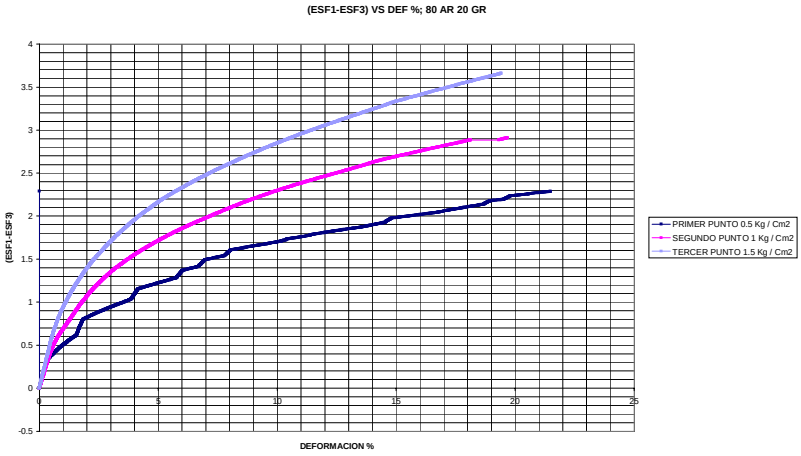



**Figura 21**. Esfuerzo desviador – deformación unitaria %.. 80 % arena 20 % grava.

## 9.3. Esfuerzo deformación mezcla 60 % arena 40 % grava.

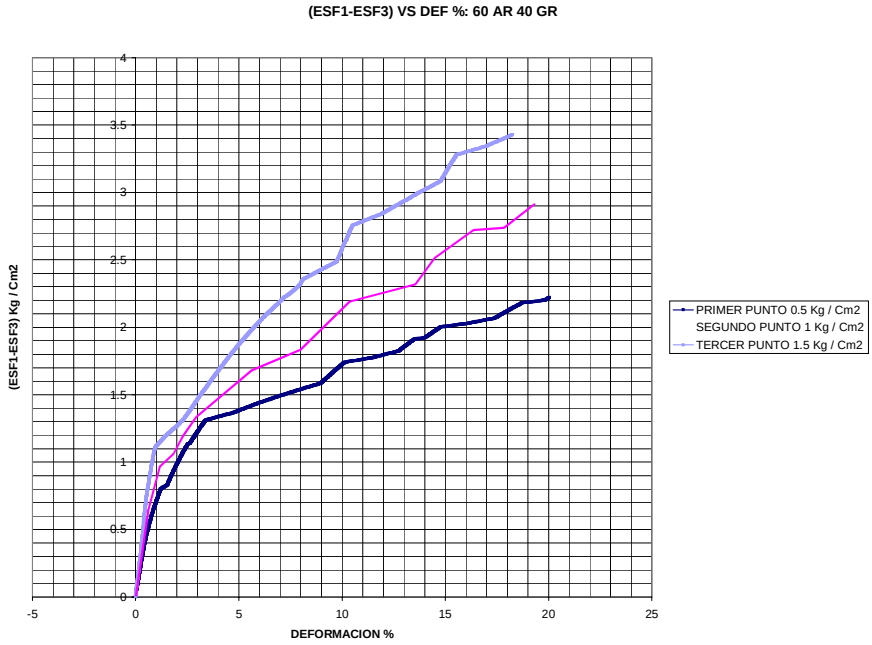



**Figura 23.** Esfuerzo desviador – deformación unitaria %. 60 % arena 40 % grava.

## 9.4. Esfuerzo deformación mezcla 40 % arena 60 % grava.

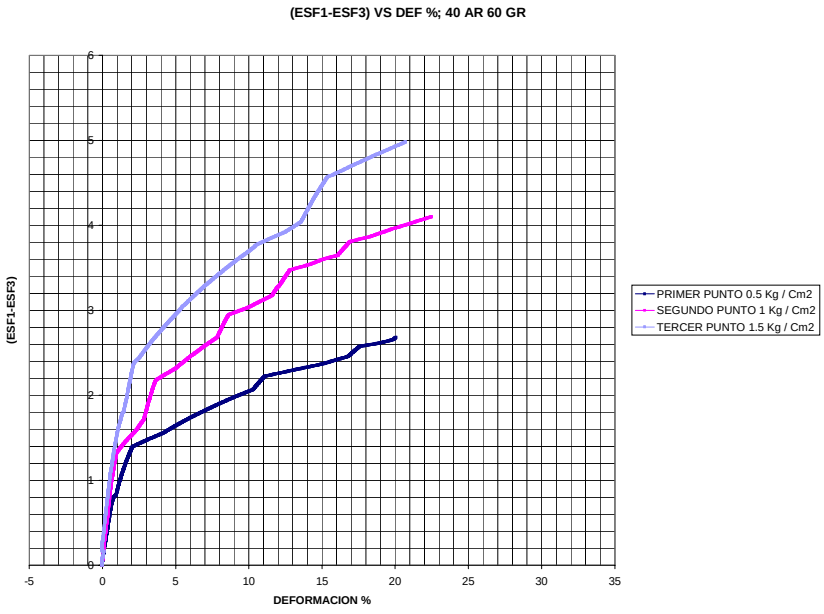



**Figura 24.** Esfuerzo desviador – deformación unitaria %. 40 % arena 60 % grava

## 9.4. Esfuerzo deformación 20 % arena 80 % grava.

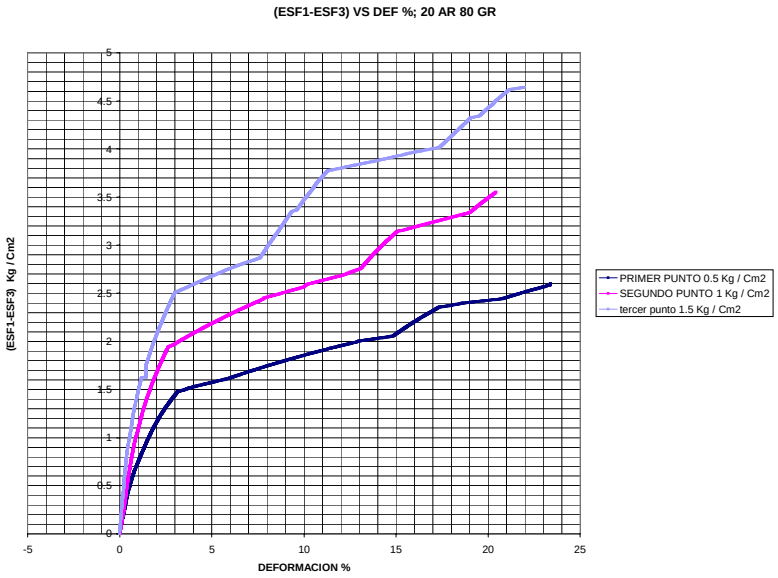



**Figura 25.** Esfuerzo desviador – deformación unitaria %. 20 % arena 80 % grava.

## 9.5. Esfuerzo deformación 0 % arena 100 % grava.

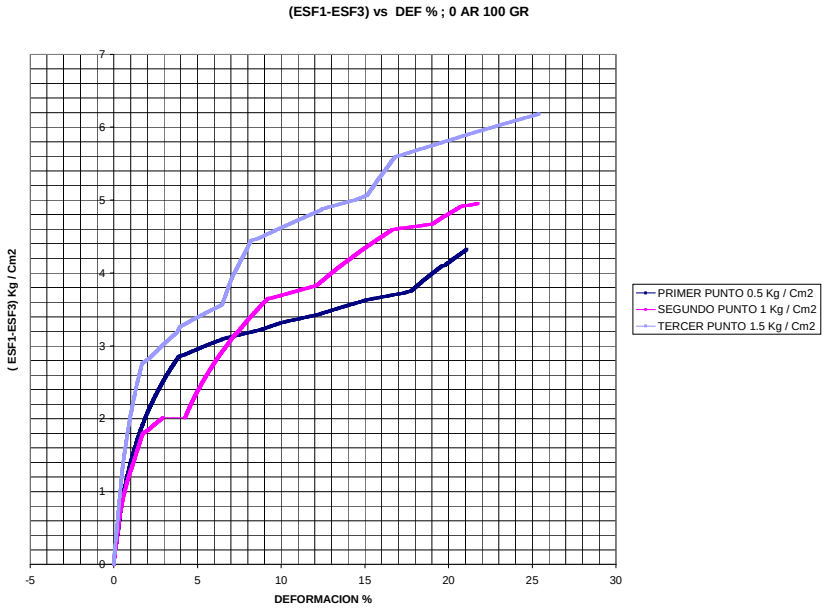



**Figura 26.** Esfuerzo desviador – deformación unitaria %. 0 % arena 100 % grava.

## 9.6. Análisis esfuerzo deformación presión de confinamiento 0.5 Kg / Cm2.

| σ3 = 0.5 Kg / Cm2. | OBSERVACIONES EFUERZO DESVIADOR VS DEFORMACION % | CARACTERISTICA | $(\sigma_1-\sigma_3)$ $q_f$ Kg/Cm2 | $\sigma_{ff}$ Kg/Cm2 | $\tau_{ff}$ Kg/Cm2 | $\theta_{cr}$ grad | $\phi$ grados |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MEZCLA N 1 100 % Ar 0 % Gr. | No presenta cresta maxima y el esfuerzo desviador permanece practicamente constante con un valor de 2.42 Kg / Cm2 entre el 20 % al 22 % de la deformacion, tiende a seguir constante si se prosiguiera la deformacion; una vez alcanzada la resistencia maxima | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 2.42 | 0.52 | 0.83 | 69.34 | 48.68 |
| MEZCLA N 2 80 % Ar 20 % Gr. | No presenta cresta maxima y el esfuerzo toma un valor de 2.3 Kg / Cm2 para 21.5 % de la deformacion, tiende a seguir constante si se prosiguiera la deformacion. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 2.29 | 0.98 | 0.90 | 57.41 | 24.82 |
| MEZCLA N 3 60 % Ar 40 % Gr. | El esfuerzo desviador alcanza un valor maximo de 2.2 Kg / Cm2 para una deformacion del 20 %, la tendencia de la curva en este punto se muestra constante. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 2.21 | 1.05 | 1.00 | 56.25 | 22.50 |
| MEZCLA N 4 40 % Ar 60 % Gr. | El esfuerzo deviador toma un valor de 2.67 Kg / Cm2 para una deformacion del 22.5 %, la tendencia de la curva si prosiguiera la deformacion es de tipo constante propia de las mezclas granulares de tipo suelto. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 2.67 | 1.01 | 1.02 | 62.00 | 33.99 |
| MEZCLA N 5 20 % Ar 80 % Gr. | La curva toma tendencia constante para un esfuerzo desviador de 2.6 Kg / Cm2 para una deformacion del 23.5 %. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 2.59 | 0.98 | 1.01 | 60.00 | 29.99 |
| MEZCLA N 6 0 % Ar 100 % Gr. | La cuerva tiene una tendencia pronunciada a ser constante mostrandose una mezcla de tipo muy suelta, con un esfuerzo desviador alcanzado de 4.3 Kg / Cm2, para uan deformacion de 21 %. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 4.31 | 1.58 | 1.94 | 57.37 | 24.74 |

**Figura 27.** Análisis - esfuerzo deformación unitaria %, 05 Kg / Cm2.

## 9.6. Análisis esfuerzo deformación presión de confinamiento 1 Kg / Cm2.

| σ3 = 1 Kg / Cm2. | OBSERVACIONES EFUERZO DESVIADOR VS DEFORMACION | CARACTERISTICA | $(\sigma_1-\sigma_3)$ $q_f$ Kg/Cm2 | $\sigma_{ff}$ Kg/Cm2 | $\tau_{ff}$ Kg/Cm2 | $\theta_{cr}$ grad | $\phi$ grados |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MEZCLA N 1 100 % Ar 0 % Gr. | El esfuerzo desviador alcanza su valor maximo de 3.45 Kg / Cm2, pero la curva no presenta cresta maxima cuando la deformacion es del 22.8 %, lo cual demuestra una mezcla de tipo suelto. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 3.45 | 1.10 | 1.20 | 69.34 | 48.68 |
| MEZCLA N 2 80 % Ar 20 % Gr. | El esfuerzo desviador alcanza su valor maximo de 2.9 Kg / Cm2, la curva no presenta tendencia a seguir constante entre el 18 % al 20 % de la deformacion, lo cual demuestra una mezcla de tipo suelto. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 2.90 | 1.62 | 1.22 | 57.41 | 24.82 |
| MEZCLA N 3 60 % Ar 40 % Gr. | Se observa un asecenso de la cuerva, tomando el esfuerzo desviador un valor de 2.5 Kg / Cm2 para una deformacion del 19.3 %. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 2.51 | 1.61 | 1.18 | 56.25 | 22.50 |
| MEZCLA N 4 40 % Ar 60 % Gr. | El esfuerzo desviador demuestra tendencia al ascenso entre el 17% al 23 % de la deformacion tomando un valor final en 23 % de 4.1 Kg / Cm2 para el esfuerzo desviador. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 4.09 | 1.78 | 1.62 | 62.00 | 33.99 |
| MEZCLA N 5 20 % Ar 80 % Gr. | La curva toma tendencia propia de una mezcla suelta para un esfuerzo desviador de 3.54 Kg / Cm2 y una deformacion del 20.5 %. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 3.54 | 1.61 | 1.30 | 60.00 | 29.99 |
| MEZCLA N 6 0 % Ar 100 % Gr. | La cuerva tiene una tendencia pronunciada a ser constante mostrandose una mezcla de tipo muy suelta, con un esfuerzo desviador alcanzado de 4.94 Kg / Cm2 para una deformacion del 22 %. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 4.94 | 2.30 | 2.25 | 57.37 | 24.74 |

**Figura 28.** Análisis – esfuerzo deformación unitaria %, 1 Kg / Cm2.

## 9.7. Análisis esfuerzo deformación presión de confinamiento 1.5 Kg / Cm2.

| σ3 = 1.5 Kg / Cm2. | OBSERVACIONES EFUERZO DESVIADOR VS DEFORMACION | CARACTERISTICA | $(\sigma_1-\sigma_3)$ $q_f$ Kg/Cm2 | $\sigma_{ff}$ Kg/Cm2 | $\tau_{ff}$ Kg/Cm2 | $\theta_{cr}$ grad | $\phi$ grados |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MEZCLA N 1 100 % Ar 0 % Gr. | El esfuerzo desviador alcanza su valor maximo de 4.45 Kg / Cm2, pero la curva no presenta cresta maxima cuando la deformacion es del 21.3 %, lo cual demuestra una mezcla de tipo suelto. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 4.45 | 2.10 | 1.40 | 69.34 | 48.68 |
| MEZCLA N 2 80 % Ar 20 % Gr. | El esfuerzo desviador alcanza su valor maximo de 3.65 Kg / Cm2, pero la curva no presenta cresta maxima cuando la deformacion es del 19.4 %, lo cual demuestra una mezcla de tipo suelto. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 3.65 | 2.3 | 1.55 | 57.41 | 24.82 |
| MEZCLA N 3 60 % Ar 40 % Gr. | Se observa tendencia en ascenso de la curva tomando el esfuerzo desviador un valor de 3.42 Kg /Cm2 para una deformacion del 18.2 %, se demuestra una mezcla de tipo suelto por la tendencia de la curva. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 3.42 | 2.36 | 1.54 | 56.25 | 22.50 |
| MEZCLA N 4 40 % Ar 60 % Gr. | La curva es de tipo mezcla suelta tomando el esfuerzo desviador un valor de 4.97 Kg / Cm2. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 4.97 | 2.4 | 2.01 | 62.00 | 33.99 |
| MEZCLA N 5 20 % Ar 80 % Gr. | No se observan picos, tendencia contante para un esfuerzo desviador de 4.68 Kg / Cm2. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 4.68 | 2.37 | 1.78 | 60.00 | 29.99 |
| MEZCLA N 6 0 % Ar 100 % Gr. | La cuerva tiene una tendencia pronunciada a ser constante mostrandose una mezcla de tipo muy suelta, con un esfuerzo desviador alcanzado de 6.17 Kg / Cm2, para una deformacion del 25.5 %. | Particulas de mezcla arena grava redondeadas duras, sueltas | 6.17 | 3 | 2.78 | 57.37 | 24.74 |

**Figura 29.** Análisis – esfuerzo deformación unitaria %, 1 .5 Kg / Cm2.

## 9.8. Consideraciones al análisis esfuerzo desviador deformación unitaria %.

Puede observarse que, las gráficas esfuerzo-deformación es del tipo de falla plástica, en la que al aumentar el esfuerzo desviador, la deformación crece, tendiendo aquél a un valor límite que se conserva aunque se prosiguiera la deformación este comportamiento de la grafica indica que las mezclas son de tipo arena grava sueltas.

En la mezcla arena grava suelta, puede afirmarse, que cuando tiende a ocurrir un desplazamiento a lo largo de un plano interno en la masa, las partículas no se fracturan, por lo que la resistencia que se opone a la deformación es sólo fricción con muy poco grado de encaje. En las mezclas arena grava , la deformación por esfuerzo cortante produce un mejor acomodo de los granos, que se manifiesta por un acortamiento vertical de la mezcla y un desplazamiento horizontal, el volumen se mantiene constante.

La influencia del tamaño de las partículas y distribución granulométrica se manifiesta en la relación de las resistencias máxima a última por que decrece al aumentar el

tamaño de las partículas y decrece igualmente al no tener una distribución granulométrica adecuada, es decir, al ser el material más uniforme en la dimensión de sus partículas ( arena de Ottawa ).

Una observación muy importante de los experimentos con mezclas de arena grava fue ver que la deformabilidad decrece y la resistencia crece al variar la forma de los granos de una forma redonda hacia una forma equidimensional angulosa. (Ver figura sig.)

**Figura 30.** Descripción de los agregados, esta figura permite ofrecer una idea de la forma y textura de los granos de grava y arena utilizados en la investigación, los granos de arena de Ottawa son de forma redondeada con algunas asperezas en sus bordes, y los granos de grava son de forma irregular y equidimensional angulosa.

## CONCLUSIONES

Realizando un análisis teórico e investigativo de las mezclas arena-grava, de acuerdo a los resultados obtenidos de las pruebas triaxiales desarrolladas en el laboratorio se puede concluir los siguientes aspectos:

### A. RESISTENCIA FRICCIONAL.

1. El ángulo de fricción aumenta cuando la mezcla arena-grava se comprime.

2. El ángulo de fricción se ve influido por la relación de vacíos y el grado de acomodación y encaje entre partículas de la mezcla.

    a. La figura 14 presenta los valores obtenidos del ángulo de fricción para cada porcentaje de mezcla en función de la concentración relativa por peso. Se puede observar que si el porcentaje de los materiales, finos (arena de Ottawa) en la mezcla arena-grava está entre un 80 % y el 100% de concentración relativa por peso, la estructura de la mezcla es soportada totalmente por las partículas finas, y el ángulo de fricción tiene variación entre 24.82º a 48.68º.

    b. Cuando la concentración relativa por peso de la arena de Ottawa se encontraba entre el 60% al 80 % la estructura de la mezcla arena- grava es soportada en forma transicional por las partículas finas. El ángulo de fricción alcanza un valor de 22.5º a 24.82º.

    c. Por consiguiente cuando la concentración de partículas por peso de arena de Ottawa se encuentra entre 40% a 60% la estructura de la mezcla es soportada parcialmente por las partículas gruesas y cuando la mezcla

alcanza totalmente el 60% de concentración relativa por peso de grava la estructura de la mezcla es soportada por las partículas gruesas.

d. Así cuando la concentración relativa por peso de arena de Ottawa se encuentra entre el 0% y 40% de concentración relativa por peso, la estructura de la mezcla; es soportada totalmente por las partículas de grava.

3. De los argumentos expuestos en los numerales anteriores se concluye que si existen los limites de resistencia y estos dependen de la concentración relativa por peso de las partículas mezcladas pudiéndose identificar 4 tipos de estructuras.

- Estructura de soporte en las partículas finas
- Estructura de transición soportada en las partículas finas y un mínimo de gruesas. .
- Estructura de transición soportada en partículas gruesas.
- Estructura soportada totalmente en las partículas gruesas.

**B. INFLUENCIA DE LA POROSIDAD**

1. La porosidad obtenida en cada prueba triaxial, tiene influencia directa sobre el ángulo de fricción; debido a las estructuras conformadas por mezcla y al fenómeno de acomodación y reorientación de las partículas mezcladas.

2. La porosidad afecta el limite de resistencia de las mezclas, sometidas a este estudio porque esta en función de la relación de vacíos y al comprimirse las mezclas, las partículas concentradas por peso, influyen en los contactos entre las mismas; es decir, en la transmisión de la presión de contacto entre granos.

3. Cuando la concentración de las partículas gruesas (gravas) alcanzan un valor promedio de porosidad del 41%; la estructura de la mezcla es controlada por las

partículas gruesas; es decir, se aprecia un control sobre el ángulo de fricción y la estructura conformada.

4. La medida de la porosidad en las mezclas de arena de Ottawa y grava depende de la concentración relativa por peso de los materiales finos y de los materiales gruesos.

5. A menor porosidad se aprecia un mayor ángulo de fricción como se puede observar en la figura Nº 14.

6. Los limites de resistencia dependen de la porosidad conformada en las mezclas granulares – porque según la estructura y la relación de vacíos, el ángulo de fricción se hace más grande o más pequeño; es decir, esta en función de la relación, volumen de vacíos / volumen de sólidos.

## C. COMPORTAMIENTO DE LA FUERZA DE CORTE

1. Un análisis de los resultados de las pruebas triaxiales deduce que cuando la concentración relativa por peso de las partículas de grava está entre el 60% al 100% la fuerza de corte es básicamente la generada entre las partículas de grava en contacto.

2. Entre el 80% y el 100% de concentración relativa por peso de grava, existe una estructura de soporte de partículas gruesas que controla la fricción entre partículas en contacto. En las gravas además se generan desplazamientos más grandes, debido a que la mezcla tiene una porosidad mayor y al ser sometida a esfuerzos de compresión se genera un grado de encaje y acomodación de las partículas ocasionándose un mayor desplazamiento en este rango de porcentaje por concentración relativa por peso.

3. Entre un rango del 60% al 80,% de `porcentaje en peso en partículas de grava se experimento una estructura controlada transitoriamente por las gravas.

4. Cuando se alcanza el 60% de concentración relativa por peso de gravas, se presenta un notorio desplazamiento por corte de las partículas gruesas porque existe una rápida acomodación de las partículas finas hacia los espacios vacíos. Al suceder dicha acomodación de partículas finas se genera el desplazamiento en la masa granular y esta a su vez presenta desplazamiento horizontal y acortamiento vertical.

5. Entre el 60% y el 40% de concentración relativa, por peso de partículas finas la fuerza de corte va disminuyendo que en los casos anteriores y los espacios vacíos se van reduciendo disminuyéndose los desplazamientos por corte. En este instante si hay desplazamiento por fuerza de corte pero va en descenso, conformándose así una estructura de transición soportada en material fino (arena de Ottawa).

6. Para una concentración relativa por peso de partículas gruesas entre el 40 y el 0% la fuerza de corte se genera en en su totalidad entre las partículas finas, identificándose un limite de resistencia controlado por la arena de Ottawa, la fuerza de corte entre las partículas gruesas no tienen influencia directa sobre estos porcentajes de mezcla.

7. Se han comprobado 4 tipos de estructuras soportadas según los valores de la fuerza alcanzados, que son los siguientes:

- Estructura de soporte en las partículas finas. (entre el 40% y el 0% de concentración relativa por peso de las partículas gruesas).
- Estructura de transición soportada en las partículas finas y un mínimo de gruesas (esta entre el 60% y 40% de concentración relativa de partículas gruesas).

- Estructura de transición soportada en partículas gruesas (va del 80 % al 60% de concentración relativa de partículas gruesas).
- Estructura de soportada en partículas gruesas (va del 100 % al 80% de concentración relativa por peso de partículas gruesas).

## D. CONSIDERACIONES ESTUDIO DR VALLEJO Y LOS RESULTADOS INVESTIGATIVOS OBTENIDOS.

Teniendo en cuenta los estudios realizados por el Dr. Vallejo donde se hizo la investigación de mezclas granulares binarias analizadas desde el punto de vista teórico y de laboratorio; donde los cambios de porosidad experimentados por la mezcla granular están sujetos a la prueba de compactación estática y fuerza de corte directo el estudio determino que:

Cuando la concentración de material grueso es mayor que el 70% la estructura de la mezcla es soportada totalmente por los materiales gruesos , y cuando la concentración de materiales gruesos se encuentra entre el 70 y 49% los materiales gruesos controlan parcialmente la estructura de la mezcla y por último cuando la concentración de material grueso era menor que el 49% la mezcla se apoya totalmente en la estructura conformada por el material fino.

El Dr. Vallejo basa su teoría en la fuerza de corte generada para la mezcla lo cual permite determinar los límites de concentración que generan las estructuras del material mezclado influidas por la porosidad obtenida.

Al respecto se puede concluir que los limites determinados por el Dr. Vallejo en las mezclas granulares que utilizó para partículas redondeadas de 5 mm y 0.4 mm de diámetro completamente lisas ( sin tener en cuenta la angulosidad y la aspereza de superficie que influyen directamente sobre la porosidad de las mezclas y los limites de soporte), obtuvo los limites ya mencionados haciendo esta consideración y teniendo en cuenta el tamaño y acomodación de las partículas, los resultados de esta

investigación difieren con el estudio del Dr. Vallejo porque el material granular utilizado fue de características equidimensiónal angulosa para las partículas gruesas y forma redondeada lisa para las partículas finas (arena Ottawa). Entonces prevaleció la influencia de la presión de contacto generada por las partículas y el ángulo de fricción obtenido para cada mezcla granular.

Luego, el análisis concluye que si existen las estructuras de soporte que comprobó el Dr. Vallejo ya anteriormente mencionadas pero los límites que controlan las estructuras de soporte si varían a causa de la fricción entre partículas

**CLASIFICACION ESTRUCTURAS DE LA MEZCLA ARENA GRAVA**

| Clasificacion. | Rango de porosiad ( % ). | | | Rango de % particulas de arena | | | qf Kg/Cm2 | | | qf Kg/Cm2 | | | ϕ | | | ϕ | Presion de confinamiento Kg / Cm2. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Estructura soportada en las particulas de arena de Ottawa. | 40.77 | a | 41.01 | 100 | a | 80 | 1.21 | a | | 1.15 | | | 48.68 | a | | 24.82 | 0.50 |
| | 40.77 | a | 40.98 | 100 | a | 80 | 1.73 | a | | 1.45 | | | 48.68 | a | | 24.82 | 1.00 |
| | 40.76 | a | 40.92 | 100 | a | 80 | 2.23 | a | | 1.83 | | | 48.68 | a | | 24.82 | 1.50 |
| Estructura de transicion soportada en las particulas de arena de Ottawa y un minimo de gravas. | 41.01 | a | 41.10 | 80 | a | 60 | 1.15 | a | | 1.11 | | | 24.82 | a | | 22.50 | 0.50 |
| | 40.98 | a | 41.06 | 80 | a | 60 | 1.45 | a | | 1.26 | | | 24.82 | a | | 22.50 | 1.00 |
| | 40.92 | a | 41.01 | 80 | a | 60 | 1.83 | a | | 1.71 | | | 24.82 | a | | 22.50 | 1.50 |
| Estructura de transicion soportada en las particulas de grava. | 41.10 | a | 41.37 | 60 | a | 40 | 1.11 | a | | 1.34 | | | 22.50 | a | | 33.99 | 0.50 |
| | 41.06 | a | 41.29 | 60 | a | 40 | 1.26 | a | | 2.05 | | | 22.50 | a | | 33.99 | 1.00 |
| | 41.01 | a | 41.12 | 60 | a | 40 | 1.71 | a | | 2.49 | | | 22.50 | a | | 33.99 | 1.50 |
| Estructura soportada en las particulas de grava. | 41.37 | a | 44.88 | 40 | a | 0 | 1.34 | a | | 2.16 | | | 33.99 | a | | 24.74 | 0.50 |
| | 41.29 | a | 44.65 | 40 | a | 0 | 2.05 | a | | 2.47 | | | 33.99 | a | | 24.74 | 1.00 |
| | 41.12 | a | 44.62 | 40 | a | 0 | 2.49 | a | | 3.09 | | | 33.99 | a | | 24.74 | 1.50 |

**Figura 14**. Tabla de clasificación estructuras de soporte según su porosidad, los datos provienen de los análisis de las pruebas de laboratorio efectuados para esta investigación.

## 11. ANEXO LISTADO DE FOTOGRAFIAS.

**Fotografía 1**. Arena de Ottawa obsérvese las especificaciones de la norma C778 impresas en el empaque de bolsa, arena usada para la presente investigación.

**Fotografía 2.** Tamizado de la arena de Ottawa.(Laboratorio U Andes).

**Fotografía 3.** Arena de Ottawa secada al aire. ( Laboratorio U. Andes ).

**Fotografía 4.** Pesaje del frasco volumétrico mas contenido.

**Fotografía 4a.** Saturación grava durante 24 horas. ( Laboratorio U de los Andes ).

**Fotografía 5.** Dimensiones y textura granular arena de Ottawa y grava.

**Fotografía 6.** Mezcla binaria de arena de Ottawa mas grava por concentración relativa por peso, visualmente homogénea.

**Fotografía 7.** Pesaje mezclas arena grava.

**Fotografía 8.** Mezclas arena grava para cada cámara triaxial.

**Fotografía 9.** Molde de aluminio con membrana de hule asegurada.

**Fotografía 10.** Llenado del molde de aluminio con la mezcla binaria de arena de Ottawa mas gravas.

**Fotografía 11 y 12.** Colocación del cabezal mas aros de aseguramiento de la membrana.

**Fotografía 13.** Muestra firme a causa del vacío aplicado.

**Fotografía 14.** Llenado de la cámara triaxial.

**Fotografía 15.** Nivel agua alcanzado en la cámara triaxial lista par montar en el

**Fotografía 16**. Cámara triaxial con muestra en proceso de compresión triaxial.
( Laboratorio de la Universidad de los Andes ).

**Fotografía 17**. Banco de compresión triaxial ( Universidad de los Andes ).

**Fotografía 18**. Montaje de la muestra en el banco de compresión triaxial del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad de los Andes (CITEC).

## 12. DOCUMENTO DE REFERENCIA.


Normas ASTM :

C 109 / C 109M Método de la prueba para la Fuerza de compresión de cementos Hidráulicos y Cementos Morteros (Usando 2" . o especimenes de Cubo de 50-mm)

El C 127 Método de la Prueba para la Gravedad Específica y Absorción de Agregado Tosco

El C 136 Método o Tes. para el Análisis del Tamiz de Finos y los Agregados Gruesos.

El C 150 Especificación para Pórtland Cemento

El C 185 Método de la Prueba para el Volumen de Aire de Cemento Hidráulico y Mortero

El C 595 Especificación para Cementos Hidráulicos Mezclados

El C 1005 Especificación para los Pesos y Pesajes de los Dispositivos para el Uso en la Comprobación Física del cemento Hidráulico.

E 11 Especificación para tamices de Alambre - Tela para diferentes propósitos

Rutledge, P.C. –Theories of Failure of Materials Applied to the Skearing Resistance of Soils – Porc. Purdue Conference on Soil Mechanics and its applications – 1940.

Mohr, O. – Technishe Mechanik – W. Ernest – Berlin – 1928.

Westergaard, H. M. – Einfache Ableitung der von Mohr Gegebenen Graphischen Darstellung des Dreiachigen Spannunggszustander – ZAMM – Vol. IV – 1924.

Nadai, A. – Theories of Strength – Journal Applied Mechanics, Vol. I – 1933.

Bridgman, P. W. – Considerations on Rupture Under Triaxial Stress – Mech. Eng., Vol. 61 – 1931.

Newmark, N.M. – Failure Hypotheses for Soils – A.S.C.E. Research Conference on shear strength of cohesive soils – Colorado – 1960.

Kirkpatrick, W. M. – The Condition of Failure for Sands – Proc. Fourth, International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering – Vol. I – Londres

Rutledge, P.C. –Theories of Failure of Materials Applied to the Skearing Resistance of Soils – Porc. Purdue Conference on Soil Mechanics and its applications – 1940.

Mohr, O. – Technishe Mechanik – W. Ernest – Berlín – 1928.

Westergaard, H. M. – Einfache Ableitung der von Mohr Gegebenen Graphischen Darstellung des Dreiachigen Spannunggszustander – ZAMM – Vol. IV – 1924.

Nadai, A. – Theories of Strengh – Journal Applied Mechanics, Vol. I – 1933.

Bridgman, P. W. – Considerations on Rupture Under Triaxial Stress – Mech. Eng., Vol. 61 – 1931.

Newmark, N.M. – Failure Hypotheses for Soils – A.S.C.E. Research Conference on shear strength of cohesive soils – Colorado – 1960.

Kirkpatrick, W. M. – The Condition of Failure for Sands – Proc. Fourth, International Conference on Soil Mechanics and Foundatios Engineering – Vol. I – Londres – 1957.

T. William Lambe, Robert V. Whitman – Soil Mechanics, Jhon Wiley & Sons, INC. E.E.U.U.1997.