



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TÍTULO:**

EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS  
FINAS MEDIANTE PRUEBAS TRIAXIALES Y DE CORTE DIRECTO.

**AUTOR:**

Merizalde Andrade, Christopher Josue

**Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:**

Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD.

**Guayaquil, Ecuador**

**20 de septiembre del 2017**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Merizalde Andrade Christopher Josue**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

### **TUTOR**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD.**

### **DIRECTOR DE LA CARRERA**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther. MSc.**

**Guayaquil, a los 20 días del mes de septiembre del año 2017**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Merizalde Andrade Christopher Josue**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación **Evaluación del Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas Finas Mediante Pruebas Triaxiales y de Corte Directo** previo a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 20 días del mes de septiembre del año 2017**

### **EL AUTOR**

f. \_\_\_\_\_

**Merizalde Andrade Christopher Josue**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Merizalde Andrade Christopher Josue**

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Evaluación del Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas Finas Mediante Pruebas Triaxiales y de Corte Directo**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 20 días del mes de septiembre del año 2017**

**EL AUTOR:**

f. \_\_\_\_\_  
**Merizalde Andrade Christopher Josue**

## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS  
ASFÁLTICAS FINAS MEDIANTE PRUEBAS TRIAXIALES Y DE  
CORTE DIRECTO..docx (D30297081)  
**Submitted:** 2017-08-30 19:08:00  
**Submitted By:** ifiuc.ucatolica@cu.ucsg.edu.ec  
**Significance:** 2 %

### Sources included in the report:

Mezclas drenantes Carvajal Chicaiza.pdf (D21060574)  
Tesis final Sebastián Gonzalez Larrea..docx (D15242178)  
TESIS 2014 - Gelo A. Cárdenas Alchundia.pdf (D10844195)

### Instances where selected sources appear:

6

## **AGRADECIMIENTO**

Le agradezco a Dios por acompañarme en cada acción que he tomado en la vida, por ayudarme a cumplir las metas que me he trazado hasta este momento; como es esta última, culminar con éxito mi carrera profesional, a pesar de los tropiezos y complicaciones. A mis padres por darme la vida, pero especialmente a mi madre quien ha sido padre y madre para mí, pilar fundamental en mi vida, quien me ha dado una excelente formación y ha hecho de mí un hombre de bien. A mis hermanos que en el transcurso de este gran periodo han aportado de distintas maneras a culminar esta meta. A la señorita Ariana Villao, una persona muy especial para mí, la mujer que he amado y siempre amare, ella, quien me dio su apoyo incondicional, impulsándome en los momentos de desilusión, quien con sus palabras y acciones se convirtió en la motivación para que avance y nunca me rinda. También le quiero agradecer al Dr. Rolando Vila por ser mi guía en esta etapa, por darme esos consejos que muchas veces por su pintoresca forma de hablar, sonaban a comentarios graciosos pero que reflejaban muchas verdades y consejos que apreciar. Le agradezco al ingeniero Jaramillo ya que prácticamente fue mi compañero de tesis, quien me apoyo en todo momento y con quien pase mis últimos momentos en la universidad. Y a todas las demás personas quienes aportaron de una u otra manera a culminar esta fase de mi vida.

**Christopher Josue Merizalde Andrade**

## **DEDICATORIA**

Le dedico este logro a mi madre, porque sin ella no habría culminado esta etapa.

**Christopher Josue Merizalde Andrade**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL  
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Stefany Esther Alcívar Bastidas. MSc.**

**DIRECTORA DE CARRERA**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Alejandra Camacho Monar.**

**DOCENTE DE LA CARRERA**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Gustavo García Caputi.**

**OPONENTE**

# ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Razones que motivaron el estudio .....	3
1.3. Justificación del tema .....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo General.....	4
1.4.2. Objetivos Específicos .....	4
1.5. Alcance.....	4
1.6. Metodología.....	5
CAPÍTULO II.....	6
2. INCIDENCIA DE LA HUMEDAD EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	
6	
2.1. Agregado mineral .....	6
2.1.1. Generalidades .....	6
2.1.2. Clasificación de agregado según su origen.....	7
2.1.2.1. Rocas ígneas.....	7
2.1.2.2. Rocas sedimentarias .....	9
2.1.2.3. Rocas metamórficas .....	10
2.1.3. Características principales de los agregados en mezclas asfálticas	
12	
2.1.4. Clasificación del agregado según su composición química.....	13
2.1.4.1. Agregados básicos .....	13
2.1.4.2. Agregado ácidos.....	13
2.1.5. Exigencias de calidad de los agregados minerales en el Ecuador.	
14	
2.2. Ligante asfáltico.....	15
2.2.1. Generalidades .....	15
2.2.2. Propiedades del cemento asfáltico.....	15
2.2.3. Exigencias de calidad del ligante asfáltico en el Ecuador .....	16



2.3.	Adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado mineral. ....	17
2.3.1.	Generalidades .....	17
2.3.2.	Mecanismo de la Adherencia .....	18
2.3.3.	Mecanismos de falla asociados al daño en aguas .....	19
2.4.	Criterios generales sobre mezclas asfálticas.....	20
2.4.1.	Introducción a los parámetros volumétricos .....	20
2.4.2.	Gravedad específica bruta o bulk (Gmb).....	21
2.4.3.	Densidad máxima teórica (Gmm).....	22
2.4.4.	Porcentaje de vacíos en la mezcla (Va) .....	22
2.5.	Pruebas para el control de la adherencia .....	23
2.5.1.	Prueba simple de corte directo .....	23
2.5.2.	Ensayo triaxial .....	23
CAPÍTULO III .....		25
3.	TRABAJO EXPERIMENTAL .....	25
3.1.	Introducción .....	25
3.2.	Caracterización de los materiales a utilizar .....	25
3.2.1.	Caracterización de los agregados utilizados. ....	25
3.2.1.1.	Gravedad específica y absorción de los agregados .....	25
3.3.	Caracterización del cemento asfáltico .....	27
3.3.1.	Clasificación por grado de viscosidad .....	27
3.3.2.	Clasificación por grado de desempeño .....	28
3.4.	Elección de la granulometría y el porcentaje de asfalto para las muestras patrón. ....	29
3.5.	Valoración de un proceso de fabricación de muestras cilíndricas	30
3.6.	Procedimiento de fabricación de las briquetas de diámetro 7.5cm 33	
3.7.	Gravedad específica bruta y porcentaje de vacíos de las muestras cilíndricas de 7.5cm de diámetro .....	37
3.8.	Proceso del ensayo triaxial.....	39
3.9.	Proceso del ensayo de corte directo. ....	41
CAPÍTULO IV.....		43
4.	Resultados obtenidos. Análisis .....	43
4.1.	Resultados del ensayo triaxial .....	43
4.2.	Resultados del ensayo de corte directo.....	49

CAPÍTULO V.....	50
5.1 Conclusiones.....	50
5.2 Recomendaciones.....	51
BIBLIOGRAFÍA.....	52
ANEXOS.....	53
Anexo 1. Preparación de muestras.....	53
Anexo 2. Ensayos realizados.....	58
Anexo 3. Clasificación del cemento asfáltico por grado de viscosidad .....	61
Anexo 4. Clasificación del cemento asfáltico por grado de desempeño PG	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Roca intrusiva .....	7
Figura 2. Roca extrusiva .....	8
Figura 3. Rocas filonianas .....	8
Figura 4. Rocas sedimentarias detríticas .....	9
Figura 5. Roca sedimentaria no detrítica .....	10
Figura 6. Rocas metamórficas .....	10
Figura 7. Clasificación de los agregados según su composición química ...	14
Figura 8. Ilustración de los parámetros de diseño volumétricos .....	21
Figura 9. Prueba simple de corte directo .....	23
Figura 10. Ensayo triaxial .....	24
Figura 11. Briquetas de $\Phi$ igual a 5 cm.....	31
Figura 12. Proceso de tamización del agregado.....	33
Figura 13. Agregado tamizado.....	34
Figura 14. Proceso de secado en el horno .....	34
Figura 15. Asfalto calentado en estufa.....	34
Figura 16. Proceso de mezclado .....	35
Figura 17. Colocación de la mezcla en el molde.....	35
Figura 18. Compactación de la briqueta por la prensa hidráulica .....	36
Figura 19. Proceso de desmoldar la briqueta .....	36
Figura 20. Briquetas de 7.5cm de diámetro por 15cm de altura .....	37
Figura 21. Colocación de la membrana a la briqueta.....	39
Figura 22. Colocación de la briqueta en la cámara de triaxial .....	39
Figura 23. Colocación de la membrana a la briqueta.....	40
Figura 24. Ensayo triaxial .....	40
Figura 25. Proceso de cortado de las briquetas.....	41
Figura 26. Proceso de lijado de las briquetas .....	41
Figura 27. Ensayo de corte directo .....	42
Figura 28. Proceso de inmersión en agua de las briquetas .....	42
Figura 29. Ensayo triaxial sin inmersión agregado calizo .....	44
Figura 30. Ensayo triaxial sin inmersión agregado aluvial .....	44

Figura 31. Ensayo triaxial sin inmersión agregado argilita .....	45
Figura 32. Ensayo triaxial con inmersión agregado calizo .....	47
Figura 33. Ensayo triaxial sin inmersión agregado aluvial .....	47
Figura 34. Ensayo triaxial sin inmersión agregado argilita .....	48

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación general de los agregados.....	11
Tabla 2. Requisitos de calidad del material mineral para carpetas .....	15
Tabla 3. Requisitos para la clasificación por viscosidad (60°C) .....	17
Tabla 4. Gravedad específica de los agregados .....	26
Tabla 5. Resultados de la clasificación por grado de viscosidad .....	27
Tabla 6. Resultados de la clasificación por grado de desempeño .....	28
Tabla 7. Granulometría .....	29
Tabla 8. Características de las muestras patrones. ....	30
Tabla 9. Dosificación de las briquetas de $\Phi$ igual a 5 cm. ....	30
Tabla 10. Resumen de briquetas de $\Phi$ igual a 5 cm. ....	31
Tabla 11. Dosificación cilindros de 7.5 cm .....	32
Tabla 12. Cargas aplicadas por la prensa .....	33
Tabla 13. Cilindros de 7.5 cm con mezcla asfáltica realizada con agregado calizo.....	37
Tabla 14. Briquetas de 7.5 cm con mezcla asfáltica realizada con agregado aluvial.....	38
Tabla 15. Briquetas de 7.5 cm con mezcla asfáltica realizada con agregado argilita .....	38
Tabla 16. Ensayos triaxiales sin inmersión .....	43
Tabla 17. Valores de C y $\Phi$ del ensayo triaxial sin inmersión .....	46
Tabla 18. Ensayo triaxial con inmersión .....	46
Tabla 19. Valores de C y $\Phi$ del ensayo triaxial con inmersión .....	48
Tabla 20. Pérdida de cohesión debido al agua. ....	49
Tabla 21. Ensayo de corte directo sin inmersión. ....	49

## RESUMEN

Uno de los problemas más importantes en la vialidad del Ecuador es la pérdida de adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado mineral, afectando a la durabilidad de la mezcla asfáltica. Efecto que se ve reflejado en la incidencia de la humedad en la poca durabilidad de nuestras capas asfálticas, lo que es preocupante y nos da la necesidad de mejorar o ampliar los criterios de control.

Debido a esta razón, se presenta este trabajo sobre la realización de un estudio del daño por humedad en mezclas asfálticas finas proveniente de 3 plantas de la región Costa del Ecuador. Detallando en este de manera organizada información sobre la adherencia entre el agregado mineral y el asfalto.

Cabe recalcar que estos tres tipos de agregados utilizados para realizar las mezclas asfálticas cuentan con distintas características mineralógicas como son agregado de procedencia aluvial, caliza y argilita. Con cada una de las mezclas se prepararon briquetas buscando estar dentro del rango del porcentaje de vacíos de una mezcla abierta.

Teniendo como objetivo determinar o evaluar el daño que produce el agua a estas mezclas empleando específicamente la prueba triaxial y la prueba de corte directo.

**Palabras claves:** agregado mineral, ligante asfáltico, adherencia, daño en agua, corte directo, triaxial.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Producto del incremento del tráfico en la vialidad en el Ecuador, es frecuente observar daños significativos en las diferentes carreteras al poco tiempo de su construcción, resaltando así la poca durabilidad de las mezclas asfálticas de nuestro país.

Claro está que el diseño y control de calidad de las mezclas asfálticas que son elaboradas en el país se realizan en función de las normativas del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), donde aparecen los criterios del diseño Marshall (Asphalt Institute, 1997); pero aún así producto del agua puede afectarse la adherencia de la mezcla disminuyendo su capacidad estructural, lo que provoca en muchos casos efectos negativos al poco tiempo de ser colocada en la calzada.

En general, los deterioros más comunes observados en nuestras capas asfálticas son el agrietamiento por fatiga y el desprendimiento o disgregación de los agregados en la superficie del pavimento, usualmente conocido como “peladura”.

Cabe recalcar que estos fenómenos se pueden observar con mayor frecuencia en las épocas de lluvia, debido al daño que produce el agua al introducirse en las mezclas asfálticas, afectando a la adherencia y la cohesión que existe entre el agregado y el ligante asfáltico. Debido a esta razón se ha decidido investigar el comportamiento de los agregados finos que son los que presentan mayor interacción con el asfalto por su mayor superficie por unidad de volumen.

En particular se consideraron tres tipos de agregados de diferente composición mineralógica y comportamientos estimados diferentes como son los procedentes de depósitos aluviales, piedra caliza y argilita, con los cuales se producen mezclas en plantas cercanas a la ciudad de Guayaquil o al menos se emplean parcialmente en las mismas.

## **1.2. Razones que motivaron el estudio**

Es conocido que la construcción de carreteras o la ampliación de la red vial es una forma de mejorar los fundamentos socio-económicos de un país, ya que permiten fomentar directamente el comercio entre los distintos lugares, aumentar el turismo y mejorar la calidad de vida de las personas. Por esta razón, el gobierno del Ecuador ha realizado una gran inversión durante los últimos años, para construir nuevas carreteras, realizar ampliaciones y llevar a cabo los respectivos mantenimientos de la red vial en servicio.

Sin embargo, la durabilidad de estas inversiones no ha sido la mejor, por lo que se ha creado un círculo vicioso de deterioros prematuros e inversiones para su corrección, que afecta la economía del país.

Se tiene claro que los deterioros mencionados se producen por diversos factores, pero uno de los más comunes es la falta de adherencia que podría existir entre el ligante y el agregado, en especial ante el efecto del agua. Por esta razón el Laboratorio de Carreteras (Suelos y Asfaltos) de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (UCSG) se motivó a realizar una investigación para poder evaluar el daño que sufren producto del agua las diferentes mezclas, tomando en consideración 3 tipos de agregados con diferentes características mineralógicas.

## **1.3. Justificación del tema**

El acelerado proceso del deterioro en los pavimentos flexibles en épocas de lluvia ha repercutido en un aumento de los trabajos de rehabilitación y mantenimiento de las carreteras o autopistas del país. Pero no solo hay que verlo desde la perspectiva del mantenimiento sino también hay que pensar en la afectación que sufren los usuarios que transitan comúnmente por esas carreteras. Por esa razón se analizan las mezclas asfálticas, específicamente la característica de la adherencia y la cohesión que existe entre el ligante y el agregado mineral, ya que producto de esta falta en este sistema se desembocan una gran serie de fallas y afectaciones que aumentan el monto de mantenimiento en las autopistas. En síntesis, se necesitan pavimentos flexibles que tengan una gran durabilidad, es decir, que además de un diseño



adecuado a las solicitudes esperadas, sus materiales constitutivos no sufran gran deterioro producto del agua.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Comparar el daño por el efecto del agua en la fracción fina de tres mezclas asfálticas procedentes de plantas y producidas con agregados minerales de diferentes canteras, mediante pruebas triaxiales y de corte directo, para establecer posibles relaciones entre estos ensayos.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Preparar las muestras correspondientes a cada planta según los parámetros volumétricos específicos en cada caso.
- Determinar la pérdida de cohesión y/o la resistencia retenida por la acción del agua en pruebas triaxiales y de corte directo sin y con inmersión.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos de acuerdo a criterios estadísticos.

## **1.5. Alcance**

Este trabajo está enmarcado dentro de un proyecto de investigación que realiza el Laboratorio de Carreteras del IIFIUC para evaluar el nivel de daño por el agua en mezclas asfálticas calientes. En este caso se compararán los resultados de pruebas triaxiales con un procedimiento experimental nuevo mediante prueba de corte directo, para analizar las relaciones existentes entre ellos.

En las mezclas asfálticas el daño por humedad se define como la pérdida de rigidez o resistencia causada por la exposición a la humedad bajo cargas mecánicas, lo que puede acelerar varios tipos de daños en las capas asfálticas, como son los desprendimientos de agregados (peladuras), fisuras y baches. Se considera que un estudio que permita ampliar el conocimiento de los mecanismos de fallo de nuestras mezclas sería de gran importancia para mejorar la durabilidad de los pavimentos flexibles

## **1.6. Metodología**

Este trabajo se realiza a través de los ensayos de triaxial y de corte directo a mezclas asfálticas con agregados finos que contengan altos porcentajes de vacíos para poder evaluar el daño por humedad entre el ligante asfáltico y el agregado mineral. Procedimiento que esta detallado en tres partes que son el marco teórico conceptual, el desarrollo experimental y el análisis de resultados.

En la primera parte se detalla el estudio bibliográfico de la investigación que se ha realizado. En la segunda parte se determina las fases del desarrollo de la investigación el cual conlleva elaboración de distintos diseños ajustando los diversos parámetros, también se especifica la preparación de muestras y la realización de los diversos ensayos realizados en las muestras como son ensayos triaxiales y de corte directo. En la tercera parte se puntualiza el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos realizados mencionados en el punto anterior, incluyendo comparaciones de los resultados, las conclusiones y las recomendaciones respectivas a tomar.

## **CAPÍTULO II**

### **2. INCIDENCIA DE LA HUMEDAD EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

#### **2.1. Agregado mineral**

##### **2.1.1. Generalidades**

Una mezcla asfáltica está compuesta por un ligante asfáltico y por partículas de agregado pétreo con características mineralógicas definidas que en proporciones correctas dan un buen esqueleto a la mezcla asfáltica con propiedades físicas y mecánicas correctas, teniendo como consecuencia su buen comportamiento al ser puesta en servicio.

En este estudio se realizaron inicialmente briquetas tipo Marshall como modelo patrón para caracterizar a la mezcla y luego briquetas cilíndricas de dimensiones establecidas de 7.6 centímetros (3 pulgadas) de diámetro por 15.2 centímetros (6 pulgadas) de espesor, las cuales fueron compactadas a través de una prensa hidráulica para posteriormente ser ensayadas en la cámara triaxial y en el equipo de corte directo.

Es importante mencionar que el asfalto utilizado para la preparación de las briquetas es del tipo AC-30 de acuerdo a la normativa ASTM D-3381, mientras que los agregados utilizados son de procedencia aluvial, roca caliza y argilita; estos de hecho constituyen la fracción fina de mezclas fabricadas en plantas asfálticas cercanas a la ciudad de Guayaquil. Los porcentajes ajustados de asfalto para las mezclas variaron entre 5% y 6.5%.

Respecto al diseño de la mezcla se utilizó una granulometría que involucra un 0% de retenido en el tamiz #4, un 20% de retenido en el tamiz #8 y un 80% de retenido en el tamiz #30, buscando tener una mezcla abierta. Esta mezcla es similar a la empleada en estudios realizados hace algunos años por el procedimiento UCL en base a la prueba cántabro.

## 2.1.2. Clasificación de agregado según su origen

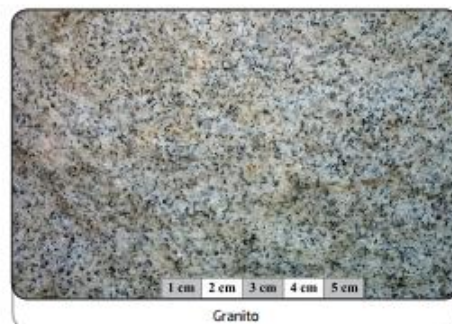
Los agregados se clasifican en función del fenómeno que los formó, distinguiendo tres grandes tipos:

### 2.1.2.1. Rocas ígneas

Este tipo de rocas son formadas a partir del enfriamiento y consolidación de una masa líquida de composición silicatada que procede del interior de la tierra, comúnmente llamada magma, según la ubicación de este enfriamiento se la puede a su vez clasificar en tres tipos de rocas.

- **Rocas intrusivas o plutónicas**

Este tipo de roca se forma bajo la superficie terrestre bajo condiciones de grandes presiones, producto de ello se tiene una roca densa no porosa, el enfriamiento de este tipo de roca se da de manera lenta por lo que los cristales de los minerales que las forman pueden ser relativamente grandes. Teniendo entre las rocas intrusivas más comunes al granito, como se puede contemplar en la Figura 1.



**Figura 1. Roca intrusiva**

Recuperado de

[http://www.ciudadciencia.es/doc/files/FICHA\\_CLASIFICACION%20DE%20ROCAS\\_CC.pdf](http://www.ciudadciencia.es/doc/files/FICHA_CLASIFICACION%20DE%20ROCAS_CC.pdf)

- **Rocas extrusivas o volcánicas**

Este tipo de roca se originan cuando producto de erupciones volcánicas o de alguna actividad geológica similar los magmas salen al exterior de la superficie de la tierra, por lo cual se produce un enfriamiento rápido en la superficie terrestre a temperaturas y presiones bajas. Debido a esta razón tenemos una masa con cristales de pequeño tamaño con un aspecto esponjoso, como se puede observar en la Figura 2. Una roca muy frecuente y fácil de reconocer por sus tonos oscuros es el basalto.



**Figura 2. Roca extrusiva**

Recuperado de

[http://www.ciudadciencia.es/doc/files/FICHA\\_CLASIFICACION%20DE%20ROCAS\\_CC.pdf](http://www.ciudadciencia.es/doc/files/FICHA_CLASIFICACION%20DE%20ROCAS_CC.pdf)

- **Rocas filonianas:**

Estas rocas se solidifican a una profundidad intermedia de los dos grupos mencionados anteriormente. (Figura 3)



**Figura 3. Rocas filonianas**

Recuperado de [http://2.bp.blogspot.com/-](http://2.bp.blogspot.com/-7iLkrl2Zlok/VfOFGgEsfpl/AAAAAAAAAko/RHjOwEZpcfE/s1600/BVCBVB.jpg)

[7iLkrl2Zlok/VfOFGgEsfpl/AAAAAAAAAko/RHjOwEZpcfE/s1600/BVCBVB.jpg](http://2.bp.blogspot.com/-7iLkrl2Zlok/VfOFGgEsfpl/AAAAAAAAAko/RHjOwEZpcfE/s1600/BVCBVB.jpg)

### 2.1.2.2. Rocas sedimentarias

Este tipo de rocas son las que se forman en la superficie producto de un proceso de metamorfismo es decir una transformación en su estado debido al cambio en las condiciones de presión, temperatura y a la presencia de fluidos químicamente activos. Las rocas sedimentarias se dividen a su vez en detríticas y no detríticas.

- **Rocas sedimentarias detríticas**

Este tipo de roca se forma producto del desprendimiento, fragmentación o sedimentación de otras rocas.

Los limos y arcillas presentan un grano inferior a 0.06mm, las areniscas tiene un tamaño intermedio entre 0.06 y 2mm, mayor a 2mm son fragmentos grandes, si son redondeados son conglomerados como se observa en la Figura 4, si están sueltos se denomina grava y si estas partículas poseen ángulos se las denomina brechas.



**Figura 4. Rocas sedimentarias detríticas**

Recuperado de

[http://www.ciudadciencia.es/doc/files/FICHA\\_CLASIFICACION%20DE%20ROCAS\\_CC.pdf](http://www.ciudadciencia.es/doc/files/FICHA_CLASIFICACION%20DE%20ROCAS_CC.pdf)

- **Rocas sedimentarias no detríticas**

Este tipo de rocas son formadas a partir de la precipitación de determinados compuestos químicos en soluciones acuosas o bien por acumulación de sustancias de origen orgánico.

Uno de los agregados más comunes es la roca caliza, mostrada en la figura 5, formada en su mayor parte por la precipitación de carbonato cálcico.



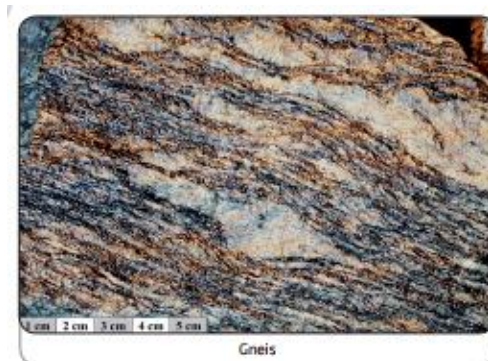
**Figura 5. Roca sedimentaria no detrítica**

Recuperado de

[http://www.ciudadciencia.es/doc/files/FICHA\\_CLASIFICACION%20DE%20ROCAS\\_CC.pdf](http://www.ciudadciencia.es/doc/files/FICHA_CLASIFICACION%20DE%20ROCAS_CC.pdf)

### 2.1.2.3. Rocas metamórficas

Estas rocas se forman a partir de rocas sedimentarias o metamórficas preexistentes, como consecuencia del incremento de presiones y aumentos considerables en la temperatura de la tierra, o por producto de reacciones químicas durante los procesos geológicos como son enterramiento, intrusión de magma, etc. Este tipo de roca se clasifica en foliadas y no foliadas. Entre las rocas más comunes tenemos a la pizarra la cual procede de la arcilla y el mármol que es una roca metamórfica que procede de la transformación de roca caliza y la dolomía. (Figura 6)



**Figura 6. Rocas metamórficas**

Recuperado de

[http://www.ciudadciencia.es/doc/files/FICHA\\_CLASIFICACION%20DE%20ROCAS\\_CC.pdf](http://www.ciudadciencia.es/doc/files/FICHA_CLASIFICACION%20DE%20ROCAS_CC.pdf)

A continuación se presenta la Tabla 1 con la clasificación de los agregados del Asphalt Institute.

**Tabla 1.** Clasificación general de los agregados

CLASE	TIPO	FAMILIA
SEDIMENTARIA	CALCÁREAS	Caliza
		Dolomita
	SILÍCEAS	Arcilla esquistosa
		Arenisca
		Horsteno
		Conglomerado
		Breccia
METAMÓRFICAS	FOLIADAS	Gneis
		Esquisto
		Anfibolita
		Pizarra
	NO FOLIADAS	Cuarcita
		Mármol
		Serpentina
ÍGNEAS	INTRUSIVAS (DE GRANO GRUESO)	Granito
		Sienita
		Diorita
		Gabbro
		Periodotita
		Piroxenita
		Hornablendita
	EXTRUSIVAS (DE GRANO FINO)	Obsidiana
		Pómez
		Tufa
		Riolita
		Traquita
		Andesita
		Basalto
		Diabasa

**Fuente:** Asphalt Institute (MS – 22)



### 2.1.3. Características principales de los agregados en mezclas asfálticas

Entre las principales características de los agregados tenemos tamaño, forma, dureza, textura superficial, limpieza, capacidad de absorción y afinidad con el asfalto.

- **Tamaño:** las diferentes dimensiones de las partículas en buenas proporciones son requeridas en las mezclas asfálticas.
  - **Filler:** partículas que tienen un tamaño de 0.075 mm es decir el pasante del tamiz #200
  - **Agregado fino:** partículas que tienen un tamaño menor de 4.75 mm es decir el pasante del tamiz #4
  - **Agregado grueso:** partículas que tienen un tamaño mayor o igual al a 4.75 mm es decir partículas retenidas en el tamiz #4
  
- **Forma:** los agregados tienen diversas formas entre las cuales tenemos redondeadas, angulares, alargadas e irregulares; cabe recalcar que la forma de la partícula puede mejorar o afectar al comportamiento de la mezcla.
  
- **Dureza:** esta es una característica muy importante, ya que los agregados deben de resistir la abrasión y degradación del mismo una vez puesto en servicio durante su vida útil.
  
- **Textura superficial:** esta característica nos da una referencia respecto al coeficiente de fricción es decir la resistencia al deslizamiento del agregado en la superficie.
  
- **Limpieza:** este es un parámetro importante ya que dependiendo de este el asfalto tendrá mayor o menor interacción con el agregado, por lo tanto de este dependerá el comportamiento del mismo. Por esto deberá de estar limpio es decir sin polvo y libre de partículas orgánicas.

- **Capacidad de absorción:** este parámetro es medido a través de la gravedad específica y la absorción del agregado, siendo muy importante ya que esta capacidad incide en la cantidad de asfalto que requerirá una partícula para que se ligue a las demás que le rodean. Si el agregado es muy poroso va a seguir absorbiendo asfalto luego de producirse la mezcla, quedando menor cantidad de asfalto en ligadura con las demás partículas, pudiendo producir posibles fallas. Por otra parte la absorción del asfalto por la piedra es un proceso selectivo, es decir, el asfalto absorbido no tendrá las mismas características que el existente en la película de ligadura entre partículas. Por ello los agregados porosos no son utilizados comúnmente.
- **Afinidad con el asfalto:** es la capacidad que tiene el agregado a retener o desplazar de su superficie al asfalto en presencia del agua. Si el agregado tiene la capacidad de retenerlo se lo llama hidrofóbico pero si no tiene esta capacidad se lo llama hidrofílicos.

#### **2.1.4. Clasificación del agregado según su composición química**

##### **2.1.4.1. Agregados básicos**

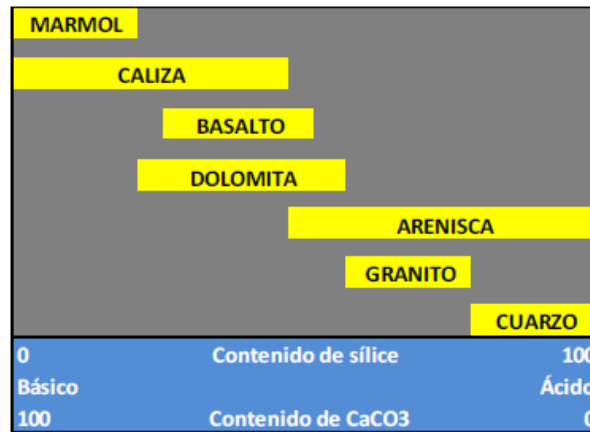
Los agregados básicos están compuestos en gran porcentaje por carbonatos como la piedra caliza. El porcentaje de cuarzo u óxido de silicio debe de ser menor a 55% para que sean considerados agregados básicos. Los agregados básicos se cargan positivamente en presencia de agua. Por ello pueden presentar cierta atracción por los ácidos libres en los ligantes y, en consecuencia una mejor adhesividad con los mismos.

##### **2.1.4.2. Agregado ácidos**

Los agregados ácidos están compuestos por más de 55% de cuarzo u óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Este tipo de agregado se carga de manera negativa en presencia del agua ya que es muy ácido, la adhesión entre el ligante y este tipo de agregado no es

buena ya que en presencia de agua se produce un desplazamiento del ligante asfáltico, perdiendo el enlace entre los dos elementos.

En la figura 7 se presenta la clasificación de los agregados según su composición química.



**Figura 7.** Clasificación de los agregados según su composición química

**Fuente:** Interacción Química del Asfalto y el Agregado, 2002

La adhesividad entre los agregados silíceos (o ácidos en general) y los ligantes asfálticos no es buena, pudiendo llegar a ser necesaria la disminución de la tensión superficial del ligante mediante procesos de activación en los que se carga electro polarmente para crear una adhesividad.

### 2.1.5. Exigencias de calidad de los agregados minerales en el Ecuador.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de las pruebas y exigencias a los agregados minerales para mezclas asfálticas de acuerdo a las especificaciones técnicas vigentes del MTOP (Especificaciones generales para construcción de caminos y puentes, 2002)

**Tabla 2.** Requisitos de calidad del material mineral para carpetas

PRUEBAS	AGREGADOS MINERALES	
	GRUESOS	FINOS
<b>FORMA</b>	Caras fracturadas (>80% - 2) Planas y alargadas (<10%)	Angularidad (>45%)
<b>DUREZA</b>	Abrasión los Angeles (<40%) Sulfatos (<12%)	Sulfatos (<12%)
<b>LIMPIEZA</b>	Deletéreos (<1%)	Deletéreos (<1%) Equivalente de arena (>50%) Índice de plasticidad (<4%)
<b>ADHERENCIA</b>	Resistencia retenida ente el agua en prueba de tracción Indirecta (>80%) Peladura de la mezcla en agua hirviendo (>95%)	

**Fuente:** Clases de Pavimentos del Ing. Rolando Vila. UCSG. 2017

## **2.2. Ligante asfáltico**

### **2.2.1. Generalidades**

El asfalto es un producto obtenido de la destilación del petróleo y químicamente está compuesto por hidrocarburos con ciertas cantidades de azufre, vanadio, níquel, silicio y nitrógeno. El asfalto es un material negro con propiedades cementante, que sufre una variación en su consistencia en función de la temperatura a la cual es sometido.

Para construir carreteras con pavimentos flexibles, el asfalto junto con el agregado mineral es utilizado para producir mezclas asfálticas, ya que presenta características cementantes e impermeables.

### **2.2.2. Propiedades del cemento asfáltico**

Las propiedades principales del ligante asfáltico son las siguientes: durabilidad, adhesión, cohesión, endurecimiento y susceptibilidad térmica.

- **Durabilidad:** Es una propiedad del asfalto con la cual se puede establecer tras procesos de degradación y envejecimiento las variaciones respecto a las características originales.
- **Adhesión:** Es la propiedad que brinda al asfalto la virtud de poder adherirse al agregado mineral. Cabe recalcar que para que se produzca esta propiedad debe de haber afinidad entre las moléculas del asfalto y del agregado mineral.
- **Cohesión:** es la propiedad que mantiene firmemente al asfalto y al agregado en el pavimento luego de ser puesto en servicio, definiéndose esta capacidad como el esfuerzo de tracción requerido para romper el enlace entre las moléculas del ligante bituminoso.
- **Endurecimiento:** Este proceso se realiza en dos etapas, primero en el mezclado, extensión y posterior compactación de la mezcla asfáltica y posteriormente ya puesto en servicio, debido al envejecimiento del mismo producto de la presencia de agentes atmosféricos.
- **Susceptibilidad térmica:** el asfalto puede cambiar su estado en función de la temperatura a la cual está siendo sometido. Si esta es muy elevada el asfalto presenta un estado líquido y si es la temperatura es baja el asfalto presenta un estado sólido. Para un buen mezclado se requiere que el asfalto se encuentre en un estado líquido para que este pueda cubrir a las partículas de agregado mineral de la mejor manera.

### 2.2.3. Exigencias de calidad del ligante asfáltico en el Ecuador

En la Tabla 3 puede observarse los requisitos para designar a un asfalto según la clasificación por viscosidad vigente en el Ecuador.

**Tabla 3.** Requisitos para la clasificación por viscosidad (60°C)

Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Norma de ensayo
		AC-6		AC-10		AC-20		AC-30		AC-42		
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa s	60 ± 20		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		420 ± 60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	175	..	250		300		350		400		ASTMD 2170
Punto de inflamación	°C	177	..	219		232		232		232		NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno, °	%	99	..	99		99		99		99		NTE INEN 915
Gravedad específica 25 °C/25°C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASRMD70
Indice de penetración		-1.5	a +1	-1.5	a +1	-1.5	a +1	-1.5	a +1	-1.5	a +1	ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad 60 °C	Pa s	..	300	..	500	..	800	..	1200	..	2000	ASTMD 2171
Cambio de masa	% w/w	..	1.5	..	1	..	1	..	1	..	1	ASTMD 2872
Ductilidad, 25 °C (77 °F) 5 cm/min	cm	100	..	75	..	50		40	..	25	..	NTE INEN 916
Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15.5 C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5 cm/min.												
Indice de penetración = ( 1952-500 logpen -20SP ) / ( 50 logpen -SP-120 ) donde: pen= penetración a 25°C , 100 g, 5s SP= punto de ablandamiento (°C) ASTM D36												
Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un metodo alternativo a la solubilidad en TCE												

**Fuente:** Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2515 Enmienda 1. (2014)

Si bien en la refinería de Esmeraldas se produce un asfalto catalogado como un AC-20, en realidad con frecuencia este se clasifica como AC-30.

## 2.3. Adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado mineral.

### 2.3.1. Generalidades

La adherencia está definida como el proceso en el que partículas diferentes se unen unas a otras mediante fuerzas de ligadura (ASTM D 907-96). La adhesión se puede

definir como la presencia de fuerzas de atracción molecular entre el asfalto y el agregado mineral, el tiempo que permanezcan unidas dependerá de las propiedades físicas y químicas de sus componentes.

La adherencia es una propiedad que puede ser muy susceptible ya que está en función de las características del agregado y del asfalto, por lo tanto no son criterios aislados. En el agregado se deberán de considerar la textura superficial, la limpieza, la porosidad, el porcentaje de absorción del agregado y la composición mineralógica y respecto al ligante asfáltico, la consistencia o dureza del material, la cual está en función de la temperatura, la durabilidad, la viscosidad y la elasticidad.

### 2.3.2. Mecanismo de la Adherencia

La adherencia se produce cuando el ligante recubre el agregado mineral ejerciendo fuerzas adhesivas, cabe recalcar que esta propiedad se describe de diferentes formas entre las cuales tenemos:

- **Teoría de la Adhesión Específica:** Dentro de este concepto se reúnen varios fenómenos de atracción de fuerzas intermoleculares. (Gamba, Mercado, 2004)
- **Teoría de la Polarización:** Se fundamenta en la idea de que las moléculas con distribución de carga asimétrica o dipolos, se influyen entre sí. La polaridad ocupa un papel importante en los procesos que se desarrollan en superficies de contacto. (Gamba, Mercado, 2004)
- **Teoría de la Difusión:** Explica la adherencia por medio del movimiento de las moléculas, del asfalto a un material sólido y viceversa. Existe una dependencia entre la estructura molecular y el peso molecular. (Gamba, Mercado, 2004)
- **Teoría de la Adsorción:** Parte de que la energía superficial de la fase líquida o su ángulo de cubrimiento, determina la adhesión del asfalto a la superficie

de un sólido. La energía superficial de un sólido debe ser mayor a la del asfalto. (Gamba, Mercado, 2004)

- **Teoría Mecánica:** Manifiesta que la unión existente entre el cemento asfáltico y el agregado mineral se ve afectada por una variación de las propiedades físicas de los áridos tales como la porosidad, la textura y el recubrimiento superficial. (Moraes, et al., 2010)

### 2.3.3. Mecanismos de falla asociados al daño en aguas

La interacción del agua en el sistema agregado mineral - asfalto produce alteraciones en la ligadura entre el asfalto y el agregado, mecanismo de daño conocido como desvestimiento o “stripping” y que genera pérdida de la adhesividad.

Una de las razones importantes del deterioro del pavimento asfáltico es el daño que produce el agua, ya que esta reduce la adherencia disminuyendo la capacidad estructural. Este tipo de daño se produce producto de diversos mecanismos entre los cuales tenemos:

- **Socavación hidráulica:** El agua debido a la presión que produce las cargas de tráfico, erosiona la película de asfalto.
- **Despegue:** Se produce cuando se separa el ligante del agregado debido a una capa de agua.
- **Emulsificación espontánea:** Esta se produce cuando sobre el ligante el agua provoca una disminución de la resistencia de cohesión de la película.
- **Desplazamiento:** Se produce cuando se introduce el agua a través de una rotura de la película, moviendo de la superficie al agregado.



Es importante recalcar que existen otros problemas que afectan a la calzada, y que son catalogados como daño en agua.

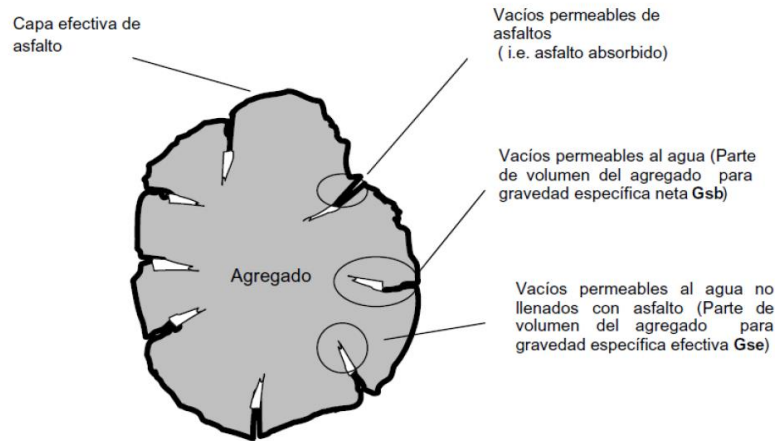
- **Presión de poros:** Es originada por el agua que se encuentra atrapada en los vacíos que existen en la mezcla, estas presiones se incrementan o se reducen debido a las cargas vehiculares que van a existir en la vía, resultando así una ruptura en la película de asfalto y en el peor de los casos en el daño de la trabazón interna del esqueleto mineral. (Cárrion & Velásquez, 2017)
- **Destrucción ambiental:** esta destrucción se puede dar por varios factores como es el cambio de temperatura que puede sufrir el agua que está atrapada en el interior de la mezcla, la cual puede sufrir una variación volumétrica afectando la estructura del mismo. Otra posible causa podría ser por el pH del agua que se encuentra inmerso en el agregado, afectando a la adherencia del mismo.

## **2.4. Criterios generales sobre mezclas asfálticas**

### **2.4.1. Introducción a los parámetros volumétricos**

El punto de partida del diseño y control de una mezcla asfáltica es la distribución de sus parámetros volumétricos, los mismos presentan cierta complejidad en su definición dada las especificidades de los agregados y los poros que presentan.

En la Figura 8 podemos observar una partícula y sus características como son la capa efectiva de asfalto que recubre al agregado, los vacíos que han absorbido asfalto y los vacíos que quedan en la partícula sin ser llenados con asfaltos.



**Figura 8.** Ilustración de los parámetros de diseño volumétricos

**Fuentes:** (Garnica, Delgado, Gómez, Alonso, & Alonso, 2004)

Los parámetros volumétricos empleados en el desarrollo de esta investigación son: la gravedad específica bruta, la densidad máxima teórica y el porcentaje de vacíos de la mezclas.

#### **2.4.2. Gravedad específica bruta o bulk ( $G_{mb}$ )**

La misma se la puede definir como la relación entre el peso de una unidad de volumen de mezcla asfáltica caliente compactada y el peso de un volumen igual de agua (incluyendo vacíos permeables como parte de dicho volumen). (Haddock, 2011)

Es importante conseguir un elevado  $G_{mb}$  en las mezclas compactadas en un pavimento terminado, puesto que se pretende alcanzar un desempeño óptimo que perdure. El  $G_{mb}$  de una mezcla se determina mediante el procedimiento ASTM D1188 o ASTM D2726. El resultado obtenido en el laboratorio se lo considera como una densidad de referencia, y es empleada como guía para verificar si la densidad de las capas asfálticas compactadas es óptima. (Asphalt Institute, 1992); (Araiza Armenta, 2002); (Salado Martínez & Estrada, 2013)

### 2.4.3. Densidad máxima teórica (Gmm)

La densidad máxima teórica representa hipotéticamente la densidad que podría alcanzarse en una mezcla al llegar a un porcentaje de vacíos igual a cero.

El ensayo RICE es utilizado para encontrar la densidad o gravedad específica máxima teórica, empleando las normas ASTM D 2041, y AASHTO T 209 sobre mezclas sueltas a una temperatura de 25°C. Parámetro que se calcula a través de la siguiente expresión:

$$G_{mm} = \frac{C}{A - (B - C)}$$

En donde:

- A: Peso de picnómetro más agua
- B: Peso del picnómetro más la mezcla rellena de agua
- E: Peso de la mezcla suelta

### 2.4.4. Porcentaje de vacíos en la mezcla (Va)

Los vacíos con aire corresponden al volumen total de las pequeñas bolsas de aire entre las partículas de agregado revestidos que conforman la mezcla de pavimentación “Va” es el porcentaje de vacíos respecto al volumen total de la muestra compactada. (Asphalt Institute, 1997)

En una mezcla es preciso que algún porcentaje de vacíos esté contenido dentro de las mezclas densamente graduadas, para que el asfalto pueda expandirse. Usualmente en los diseños Marshall los porcentajes de vacíos autorizados (en mezclas asfálticas de laboratorio) pueden variar entre 3 y 5 por ciento para capas superficiales (Asphalt Institute, 1992).

“Va” suele calcularse con la siguiente expresión:

$$Va = \frac{RICE - Densidad}{RICE}$$

## 2.5. Pruebas para el control de la adherencia

### 2.5.1. Prueba simple de corte directo

Este ensayo se realiza de manera rápida para determinar la resistencia al esfuerzo cortante que se genera en una briqueta cilíndrica, aplicando una velocidad de deformación de 0.05 mm/min.mm, que al multiplicarlo por el diámetro de la muestra cilíndrica (75 mm) nos da 3.75 mm/min. En la figura 9 se puede admirar el equipo de corte directo.



**Figura 9.** Prueba simple de corte directo

**Fuente:** Autor

### 2.5.2. Ensayo triaxial

Este ensayo fue perfeccionado y utilizado por Vaughn Smith en mezclas asfálticas, quien determinó que este método aplica a briquetas que tengan una relación 2:1 es decir su altura sea dos veces mayor a su diámetro. Cabe mencionar que la briqueta debe de estar a una cierta temperatura, en nuestro caso de 25°C y además estar envuelta en una membrana la cual proteja su integridad, antes de aplicar una

presión isotr3pica ( $\sigma_3$ ) producida por aire, mientras se aplica la carga vertical que genera esfuerzo ( $\sigma_1$ ).

Con los datos obtenidos de las presiones se procede a determinar la cohesi3n y el 3ngulo de rozamiento interno de la briqueta aplicando los criterios de Mohr – Coulomb. En la Figura 10 se observa el equipo triaxial.



**Figura 10.** Ensayo triaxial

**Fuente:** Autor

## **CAPÍTULO III**

### **3. TRABAJO EXPERIMENTAL**

#### **3.1. Introducción**

Ya que el objetivo clave de este trabajo es evaluar el comportamiento ante el agua de mezclas finas, se valoró y decidió emplear una granulometría aplicada en trabajos precedentes con el llamado método UCL que emplea el ensayo cántabro. Dicha granulometría, que se presenta en el numeral 3.4, garantiza que todo material pase por el tamiz #4 teniendo un porcentaje de vacíos elevado, donde la incidencia del agua sea notable.

#### **3.2. Caracterización de los materiales a utilizar**

Para esta investigación se escogieron 3 tipos de agregados finos con diferentes comportamientos y estructuras mineralógicas, siendo estos la argilita, el agregado calizo y el agregado de procedencia aluvial. A dichos agregados se les determinaron sus principales características y se realizaron procesos de tamizado para separar las fracciones antes de mezclado.

Como cemento asfáltico se empleó un único tipo de material procedente de la refinería de Esmeraldas.

##### **3.2.1. Caracterización de los agregados utilizados.**

###### **3.2.1.1. Gravedad específica y absorción de los agregados**

En la Tabla 4 esta detallado el proceso de obtención de las gravedades específicas y el porcentaje de absorción.

**Tabla 4.** Gravedad específica de los agregados

<b>GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS AGREGADOS</b>		
Peso del picnómetro 1 =		182.52 gr
Peso del picnómetro 2 =		181.75 gr
<b>Agregado de Argilita</b>		
<b>AGREGADO FINO</b>		
"A" = Peso en el aire de la muestra secada al horno =		480.31 gr
"V" = Volumen de la probeta =		500 gr
Peso picnómetro mas agua mas material =		973.76 gr
"W" = Peso en grámos o volumen en ml del agua añadida =		291.24 gr
Gravedad específica de masa =	$A / (V - W) =$	2.301
Gravedad específica de s.s.s. =	$500 / (V - W) =$	2.395
Gravedad específica aparente =	$A / ((V - W) - (500 - A)) =$	2.540
% de absorción =	$((500 - A)/A)*100 =$	4.099
<b>Agregado calizo</b>		
<b>AGREGADO FINO</b>		
"A" = Peso en el aire de la muestra secada al horno =		489.62 gr
"V" = Volumen de la probeta =		500 gr
Peso picnómetro mas agua mas material =		987.98
"W" = Peso en grámos o volumen en ml del agua añadida =		305.46 gr
Gravedad específica de masa =	$A / (V - W) =$	2.517
Gravedad específica de s.s.s. =	$500 / (V - W) =$	2.570
Gravedad específica aparente =	$A / ((V - W) - (500 - A)) =$	2.659
% de absorción =	$((500 - A)/A)*100 =$	2.120
<b>Agregado aluvial</b>		
<b>AGREGADO FINO</b>		
"A" = Peso en el aire de la muestra secada al horno =		490.29 gr
"V" = Volumen de la probeta =		500 gr
Peso picnómetro mas agua mas material =		992.46
"W" = Peso en grámos o volumen en ml del agua añadida =		310.71 gr
Gravedad específica de masa =	$A / (V - W) =$	2.590
Gravedad específica de s.s.s. =	$500 / (V - W) =$	2.641
Gravedad específica aparente =	$A / ((V - W) - (500 - A)) =$	2.730
% de absorción =	$((500 - A)/A)*100 =$	1.980

**Fuente:** Autor

Con respecto a la gravedad específica bruta de los tres tipos de agregados mencionados anteriormente, se obtuvo una gravedad específica de 2.301 para la roca argilita, 2.517 para el agregado calizo y 2.590 para el agregado aluvial.

Sobre el porcentaje de absorción del agregado se puede observar que el agregado argilita tiene un 4.10% valor superior a 2.12% y 1.98% de la caliza y el agregado aluvial respectivamente. Por lo cual este tipo de agregado deberá de ser tomado en consideración al momento de realizar la mezcla aplicando un porcentaje de asfalto mayor para poder llegar a características similares a las otras mezclas.

### 3.3. Caracterización del cemento asfáltico

#### 3.3.1. Clasificación por grado de viscosidad

En la Tabla 5 esta detallada la caracterización del cemento asfáltico por su grado de viscosidad. Según la NTE INEN 2515.

**Tabla 5.** Resultados de la clasificación por grado de viscosidad

PROPIEDAD	UNIDAD	MÉTODO	ESPECIFICACIÓN		RESULTADOS
			AC-20	AC-30	
<b>LIGANTE ORIGINAL</b>					
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D 2171	200 ± 40	300 ± 60	251
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D 2170	300 mín	350 mín	370
Punto de inflamación Cleveland	°C	NTE INEN 808	232 mín	232 mín	279
Solubilidad en tricloroetileno	%	NTE INEN 915	99,0 mín	99,0 mín	NO
Gravedad específica 25°C/25°C		ASTM D 70	Informar	Informar	1.0136
Índice de penetración		ASTM D 5/D5M	-1.5 a +1.0	-1.5 a +1.0	-0.6
<b>RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)</b>					
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D 2171	800 máx	1200 máx	1080
Cambio de masa	% w/w	ASTM D 2872	1.0 máx	1.0 máx	-0.02
Ductilidad 25°C, 5 cm/min	cm	NTE INEN 916	50 mín	40 mín	41
<b>CALIFICACIÓN</b>					<b>AC-30</b>

**Fuente:** Autor

El asfalto utilizado para el presente estudio fue clasificado por su grado de viscosidad tanto en estado original, como también luego de haber pasado por el proceso de envejecimiento en el horno de película delgada (RTFOT). Luego de los respectivos ensayos para la valoración, se obtuvo una viscosidad absoluta a 60°C de



251 Pa.s que cumple la exigencia AC-30, al igual que las restantes propiedades es decir según la especificación referida este clasificaría como un asfalto con grado AC-30.

### 3.3.2. Clasificación por grado de desempeño

Al igual que en el caso de la clasificación por viscosidad, se realizó otra clasificación por grado de desempeño (Superpave) al asfalto previsto a emplear según la normativa AASHTO M320. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Resultados de la clasificación por grado de desempeño

PROPIEDAD		MÉTODO	ESPECIFICACIÓN	RESULTADOS	
<b>LIGANTE ORIGINAL</b>					
Punto de Inflamación, °C		AASHTO T 48	230 mín	279	
Viscosidad, Pa.s		AASHTO T 316	3,0 máx	0.370	
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	135°C	AASHTO T 315	1,0 mín	19.80	
	46°C			8.13	
	52°C			3.42	
	58°C			1.50	
	64°C			0.69	
<b>RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)</b>					
Pérdida de masa, %		AASHTO T 240	1,0 máx	-0.02	
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	46°C	AASHTO T 315	2,2 mín	47.20	
	52°C			22.10	
	58°C			9.61	
	64°C			4.13	
	70°C			1.94	
<b>RESIDUO ENVEJECIDO PAV (100°C, 300 psi, 20 hr)</b>					
Módulo de Corte Dinámico (G* x sinδ, 10 rad/seg), kPa	31°C	AASHTO T 315	5000 máx	881	
	28°C			1270	
	25°C			1800	
	22°C			2520	
	19°C			3550	
	16°C			4790	
	13°C			6270	
Rigidez al desplazamiento, MPa (60 sec)	-30°C	AASHTO T 313	300 máx	742	
Valor m			0,300 mín	0.184	
Rigidez al desplazamiento, MPa (60 sec)	-24°C		300 máx	541	
Valor m			0,300 mín	0.243	
Rigidez al desplazamiento, MPa (60 sec)	-18°C		300 máx	172	
Valor m			0,300 mín	0.312	
Rigidez al desplazamiento, MPa (60 sec)	-12°C		300 máx		
Valor m			0,300 mín		
<b>GRADO PG SUPERPAVE</b>			<b>AASHTO M 320</b>	<b>--</b>	<b>64-28</b>

Fuente: Autor

Los resultados de las pruebas realizadas al ligante en su estado original, envejecido después del horno RTFOT y posteriormente envejecido en la cámara de envejecimiento a presión (PAV), permiten clasificar a este asfalto como PG 64–28.

### 3.4. Elección de la granulometría y el porcentaje de asfalto para las muestras patrón.

Para establecer la granulometría se tomó en consideración la recomendada en el artículo *“Evaluación de la cohesión y susceptibilidad térmica de los ligantes bituminosos mediante el método funcional UCL, de los autores Rodrigo Miró Recasens y Félix Pérez Jiménez”*, que presenta la configuración mostrada en la Tabla 7, para obtener una mezcla abierta fina.

**Tabla 7. Granulometría**

GRANULOMETRIA			
TAMICES	#4	#8	#30
PORCENTAJE DE RETENIDO	0%	20%	80%

**Fuente:** Autor

Artículo que determina que la granulometría debe de tener esa configuración, para tener una mezcla abierta con un porcentaje de vacíos en la mezcla aceptable dentro de un rango de  $\pm 24\%$ . Con esta granulometría y con 5% de contenido de asfalto que también propone este artículo se fabricaron briquetas Marshall para cada tipo de agregado. Cabe destacar que las briquetas fueron elaboradas empleando en la compactación 50 golpes por cara con un compactador manual.

Al caracterizar las diversas briquetas se determinaron Gmb, Gmm, Va y % asfalto como se detalla en la Tabla 8, ya que en función de estas muestras patrones se realizaron los cilindros a ensayar en el equipo triaxial y en el de corte directo.

**Tabla 8.** Características de las muestras patrones.

Agregado	% Asfalto	Gmb	Gmm	Va
Calizo	5	1.757	2.373	25.90%
Aluvial	5	1.874	2.418	22.50%
Argilita	6.5	1.684	2.262	25.60%

Fuente: Autor

### 3.5. Valoración de un proceso de fabricación de muestras cilíndricas

En primera instancia, para la confección de las muestras se emplearon moldes que permiten producir briquetas de 5 cm de diámetro ( $\Phi$ ) por 10 cm de altura, llevando a cabo un proceso de compactación manual, adaptando un martillo Marshall y el número de golpes para lograr las mismas densidades que en el procedimiento convencional Marshall a briquetas de 10 cm de diámetro y 6.35 cm de altura. Dichas briquetas fueron elaboradas con un 5% de contenido de asfalto.

Para dosificar las briquetas de  $\Phi$  igual a 5 cm se toma en consideración la densidad de la biqueta Marshall de referencia y en función de esta se determinó la cantidad de mezcla que se requería para obtener un cilindro de 5 x 10 cm, buscando que la densidad sea la misma. (Tabla 9)

**Tabla 9.** Dosificación de las briquetas de  $\Phi$  igual a 5 cm.

AGREGADO CALIZO	
Gmb con 5 % de asfalto y la granulometría seleccionada	1.757 g/cm <sup>3</sup>
CARACTERISTICAS GEOMETRICAS	
Diámetro de 2" =	5.08 Cm
Altura requerida =	10 Cm
Volumen =	202.68 cm <sup>3</sup>
DOSIFICACION	
Peso =	356.1 Gr
5% de asfalto =	17.81 Gr
Total Agregado =	338.3 Gr
Fracción en retenido #8	67.66 Gr
Fracción en retenido #30	270.64 Gr

Fuente: Autor

Una incertidumbre presente al realizar la compactación era si la briqueta quedaba densificada de manera igual a lo largo de toda su altura, por tal motivo se procedió a cortar la briqueta en 3 partes iguales como se puede observar en la Figura 11, para poder calcular las densidades en dichas partes.



**Figura 11.** Briquetas de  $\Phi$  igual a 5 cm.

**Fuente:** Autor

La energía de compactación que se aplicó para la compactación de las briquetas de pruebas fueron 25 golpes, 35 golpes y 50 golpes y en los tres casos se pudo observar que las briquetas presentaban una variación en la densidad del centro respecto a sus extremos. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la siguiente Tabla 10 resumen:

**Tabla 10.** Resumen de briquetas de  $\Phi$  igual a 5 cm.

RESUMEN DE BRIQUETAS DE de $\Phi$ IGUAL A 5 cm.						
N. de Golpes	#	Peso	Espesor promedio	Volumen	Densidad	%compactacion respecto al RICE
25	Extremo superior	128.1	3.35	72.57	1.765	77.52
	Medio	115.3	3.22	69.71	1.654	72.64
	Extremo inferior	125.9	3.25	70.35	1.790	78.59
35	Extremo superior	108.6	2.70	58.50	1.856	81.53
	Medio	99.2	2.58	55.80	1.778	78.08
	Extremo inferior	108.8	2.67	57.85	1.881	82.59
50	Medio	79.4	2.06	44.59	1.781	78.20
	Extremo inferior	84.1	2.05	44.43	1.893	83.13

**Fuente:** Autor

Debido a esta razón, se tuvo que tomar en consideración otro proceso de compactación, optando por compactar las briquetas a través de una prensa hidráulica, proceso ya empleado en estudios anteriores con cilindros de  $\Phi$  igual a 7.5 cm de diámetro y 15 cm de altura, es decir, manteniendo la relación 2:1, donde se ha confirmado que la densidad tiene poca variación a lo largo de toda la altura. Todo el sistema de moldes para estos diseños ya existían en el laboratorio.

Para ajustar la fabricación de estas muestras cilíndricas de  $\Phi$  igual a 7.5 cm se hizo una dosificación con agregados calizos partiendo de la Gmb de 1.757 de la briketa Marshall de referencia. (Tabla 11)

**Tabla 11.** Dosificación cilindros de 7.5 cm

Dosificación para realizar 1 cilindro	
1165 + 55 =	1230 gr
Asfalto 5% =	61.5 gr
Agregado =	1168.5 gr
20% Agregado	234 gr
80% Agregado	935 gr

**Fuente:** Autor

Para poder compactar la briketa y poder llegar a la dimensión requerida, con una densidad aproximada a la Marshall de referencia se parte de tomar en consideración que la energía de compactación utilizada en estudios anteriores para la compactación de briquetas con mezcla para carpeta asfáltica es aproximadamente 13.8 toneladas.

En función de esta consideración se optó realizar la compactación con 12, 10 y 5 toneladas ya que nuestra mezcla es muy fina, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 12, respecto a la gravedad específica bruta y a la altura.

**Tabla 12.** Cargas aplicadas por la prensa

5 ton	
Espesor =	14.3 cm
Volumen =	652.11 cm <sup>3</sup>
Densidad =	1.785 gr/cm <sup>3</sup>

10 ton	
Espesor =	13 cm
Volumen =	592.83 cm <sup>3</sup>
Densidad =	1.964 gr/cm <sup>3</sup>

12 ton	
Espesor =	12.7 cm
Volumen =	579.15 cm <sup>3</sup>
Densidad =	2.010 gr/cm <sup>3</sup>

**Fuente:** Autor

### 3.6. Procedimiento de fabricación de las briquetas de diámetro 7.5cm

1. Buscar los distintos agregados y tamizarlos para tener separadas las fracciones en función de su tamaño. Luego dejar en el horno 24 horas a 110°C para que el agregado se seque totalmente, es decir que no contenga humedad en su interior. (Figura 12 y Figura 13)



**Figura 12.** Proceso de tamización del agregado

**Fuente:** Autor



**Figura 13.** Agregado tamizado

**Fuente:** Autor

2. Calentar las fracciones de agregados a 140°C por 3 – 4 horas en el horno y calentar el asfalto en hornilla hasta la misma temperatura. (Figura 14 Y Figura 15)



**Figura 14.** Proceso de secado en el horno

**Fuente:** Autor



**Figura 15.** Asfalto calentado en estufa

**Fuente:** Autor

3. Mezclar los agregados previamente pesados en función de la granulometría especificada con el porcentaje de asfalto correspondiente en una mezcladora buscando lograr una mezcla lo más homogénea posible. (Figura 16)



**Figura 16.** Proceso de mezclado

**Fuente:** Autor

4. Someter la mezcla a un proceso de envejecimiento en el horno por 2 horas a 135°C con la finalidad de que el agregado absorba el asfalto.
5. Engrasar los moldes previamente para evitar que se pegue el asfalto a las paredes de acero del mismo, luego rellenar el molde en cuestión con el peso requerido de mezcla ya envejecida para que la altura de mezcla una vez compactada sea aproximadamente 15 centímetros. (Figura 17)



**Figura 17.** Colocación de la mezcla en el molde

**Fuente:** Autor

6. Colocar cuidadosamente el recipiente en la base de la prensa hidráulica y aplicar la carga o energía de compactación requerida de 5 ton. (Figura 18)





**Figura 18.** Compactación de la briqueta por la prensa hidráulica

**Fuente:** Autor

7. Dejar que se enfríe la mezcla compactada dentro del molde a la temperatura ambiente por 24 horas evitando así que se deforme. Ya fría la mezcla compactada se procede a desmoldar empleando una gata hidráulica y el collarín correspondiente. (Figura 19)



**Figura 19.** Proceso de desmoldar la briqueta

**Fuente:** Autor

8. Identificar cada cilindro confeccionado mediante el número de orden y el tipo de agregado que se utilizó, con la finalidad de que no se presenten equivocaciones en la caracterización de los materiales. (Figura 20)



**Figura 20.** Briquetas de 7.5cm de diámetro por 15cm de altura

**Fuente:** Autor

### 3.7. Gravedad específica bruta y porcentaje de vacíos de las muestras cilíndricas de 7.5cm de diámetro

La caracterización de las briquetas se realizó con cada tipo de agregado, siendo estos el agregado calizo, aluvial y argilita, detalle que se presenta respectivamente en la Tabla 13, 14 y 15.

**Tabla 13.** Cilindros de 7.5 cm con mezcla asfáltica realizada con agregado calizo

BRIQUETAS DE 7.5 CENTIMETROS									
CILINDRO	PESO (gr)	ALTURA (cm)				ALT. PROMEDIO (cm)	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	VACIOS (%)
1	1233.4	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	682.9	1.806	23.9
2	1233.3	15.1	15.1	15.1	15.0	15.1	686.6	1.796	24.3
3	1233.6	15.1	15.0	15.1	15.1	15.1	686.9	1.796	24.3
4	1233.9	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	687.8	1.794	24.4
5	1233.2	15.1	15.0	15.1	15.1	15.1	686.9	1.795	24.3
6	1234.1	15.1	15.0	15.0	15.0	15.0	684.6	1.803	24.0
7	1247.6	15.0	15.0	14.9	14.9	15.0	682.0	1.829	22.9
8	1230.1	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	679.5	1.810	23.7
9	1231.4	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	682.9	1.803	24.0
								1.804	24.0

**Fuente:** Autor

**Tabla 14.** Briquetas de 7.5 cm con mezcla asfáltica realizada con agregado aluvial

BRIQUETAS DE 7.5 CENTIMETROS									
CILINDRO	PESO (gr)	ALTURA (cm)				ALT. PROMEDIO (cm)	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	VACIOS (%)
1	1275.9	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	684.1	1.865	22.9
2	1309.1	15.0	14.9	14.9	15.0	14.9	680.6	1.923	20.5
3	1275.2	14.9	14.9	14.9	15.0	14.9	680.1	1.875	22.4
4	1274.8	15.0	15.0	15.0	14.9	15.0	682.3	1.868	22.7
5	1274.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	683.8	1.864	22.9
6	1274.4	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	684.1	1.863	22.9
7	1283.3	15.2	15.1	15.2	15.2	15.1	690.3	1.859	23.1
8	1283.3	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	688.6	1.864	22.9
9	1283.2	15.2	15.1	15.2	15.2	15.2	692.0	1.854	23.3
								1.871	22.6

**Fuente:** Autor

**Tabla 15.** Briquetas de 7.5 cm con mezcla asfáltica realizada con agregado argilita

BRIQUETAS DE 7.5 CENTIMETROS									
CILINDRO	PESO (gr)	ALTURA (cm)				ALT. PROMEDIO (cm)	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	VACIOS (%)
1	1183.3	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	693.5	1.706	24.6
2	1181.3	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	694.3	1.701	24.8
3	1180	15.3	15.2	15.3	15.2	15.3	695.6	1.696	25.0
4	1181.5	15.2	15.2	15.3	15.3	15.2	695.3	1.699	24.9
5	1182.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	694.5	1.702	24.8
6	1179.9	15.4	15.3	15.3	15.3	15.3	699.4	1.687	25.4
7	1180	15.2	15.2	15.2	15.3	15.2	694.7	1.699	24.9
8	1179.8	15.2	15.2	15.3	15.2	15.2	694.5	1.699	24.9
9	1179.2	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	697.5	1.691	25.3
								1.698	24.9

**Fuente:** Autor

Para la mezcla con agregado calizo se obtuvo los siguientes valores promedio: una gravedad específica igual a 1.804 y un porcentaje de vacíos igual a 23.9%, para los cilindros de mezcla asfáltica con agregado aluvial 1.871 y 22.6% y para la mezcla asfáltica con agregado argilita 1.698 y 24.9 % respectivamente.

### 3.8. Proceso del ensayo triaxial.

1. Se recubre con una membrana impermeable el cilindro ya identificados, con la finalidad de proteger el ingreso del aire y confinarlo para poder someterlo a una presión lateral. Posteriormente se le coloca en la base de la cámara de triaxial, la cual se ha lubricado con aceite previamente para evitar que se pegue la superficie del cilindro a esta. (Figura 21)



**Figura 21.** Colocación de la membrana a la briqueta

**Fuente:** Autor

2. Se coloca en la cámara del triaxial el cilindro, se le pone la placa en la parte superior de esta, asegurando que la briqueta quede lo más centrada posible, se coloca la cámara de acrílico, se ubica la parte superior que contiene el medidor de presión y el pistón que transmite la carga y se ajustan los seguros laterales. (Figura 22)



**Figura 22.** Colocación de la briqueta en la cámara de triaxial

**Fuente:** Autor

3. Con una bomba de presión se aplican a los cilindros las diferentes presiones requeridas en el ensayo, es decir 0 kPa (0 psi), 138 kPa (20 psi) y 276 kPa (40 psi). (Figura 23)



**Figura 23.** Colocación de la membrana a la briqueta

**Fuente:** Autor

4. Se coloca la cámara de triaxial en la base de la prensa hidráulica y se ensaya a una velocidad de 7.50 mm / min, carga determinada de la multiplicación de la velocidad de deformación requerida para este ensayo (0.05 mm / min x mm) por la altura del cilindro, es decir 150 mm requerida para este ensayo. (Figura 24)



**Figura 24.** Ensayo triaxial

**Fuente:** Autor

### 3.9. Proceso del ensayo de corte directo.

1. Para realizar el ensayo en el equipo de corte directo se cortaron las briquetas por la mitad, obteniéndose dos cilindros de 7.5 cm de diámetro por 7.5 cm de altura. (Figura 3.15)



**Figura 25.** Proceso de cortado de las briquetas

**Fuente:** Autor

2. Posteriormente se colocaron las briquetas en el equipo de corte directo, revisando que ingrese en el agujero del mismo suavemente, lijando posibles desperfectos de la briqueta. (Figura 26)



**Figura 26.** Proceso de lijado de las briquetas

**Fuente:** Autor

3. Se ingresa cada briqueta en el molde y se ensaya a una velocidad de deformación de 3.75 mm / min, valor determinada de la multiplicación de la velocidad de la prensa de 0.05 mm/min.mm, por el diámetro del cilindro, en este caso  $\Phi$  igual a 75 mm. (Figura 27)



**Figura 27.** Ensayo de corte directo

**Fuente:** Autor

Nota:

Cabe recalcar que estos ensayos de triaxial y de corte directo se realizaron con y sin inmersión en agua para poder evaluar las incidencias de la misma. (Figura 28)



**Figura 28.** Proceso de inmersión en agua de las briquetas

**Fuente:** Autor

## CAPÍTULO IV

### 4. Resultados obtenidos. Análisis

#### 4.1. Resultados del ensayo triaxial

- **Triaxiales sin inmersión**

Se obtuvieron los siguientes resultados del ensayo triaxial sin inmersión que se muestran en la Tabla 16.

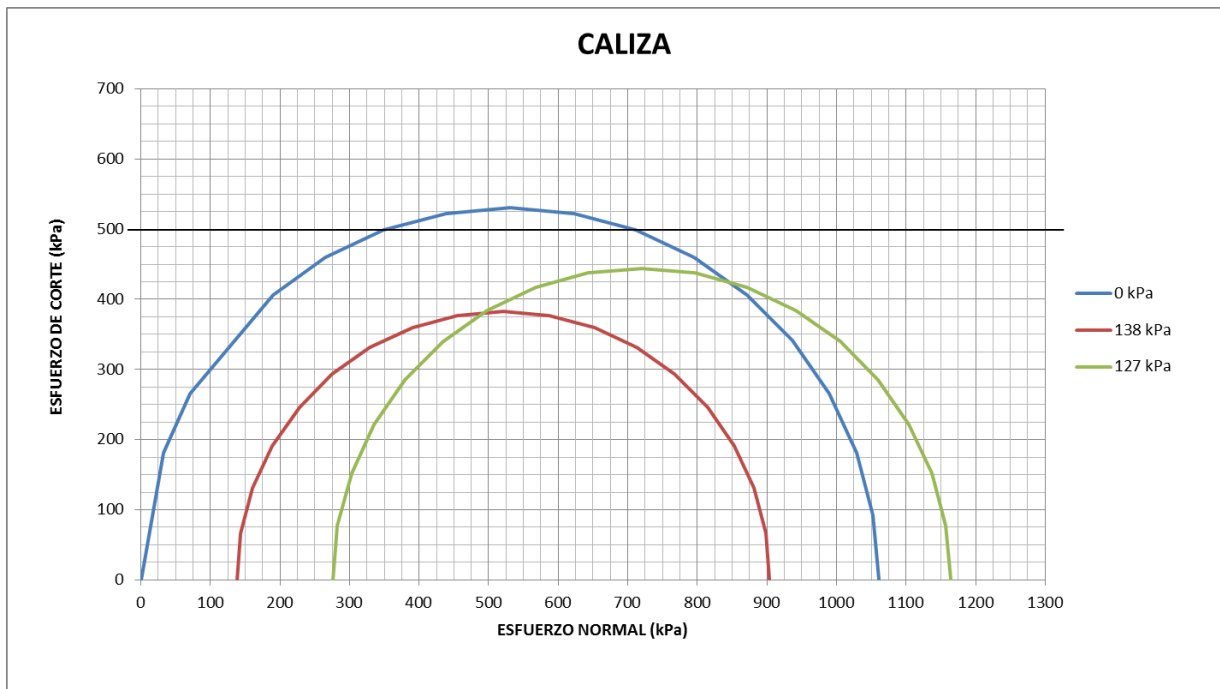
**Tabla 16.** Ensayos triaxiales sin inmersión

AGREGADO	CILINDRO	PRUEBA	$\sigma_3$ (kPa)		LA1 (0,0001")	$\sigma_1$ (kPa)
			psi	kPa		
CALIZA	1	SIN INMERSIÓN	0	0	46.5	1061
	2		20	138	39.5	904
	3		40	276	51	1164
ALUVIAL	1	SIN INMERSIÓN	0	0	34.5	792
	2		20	138	39	893
	3		40	276	44	1005
ARGILITA	1	SIN INMERSIÓN	0	0	39	893
	2		20	138	55.5	1262
	3		40	276	54.5	1241

**Fuente:** Autor

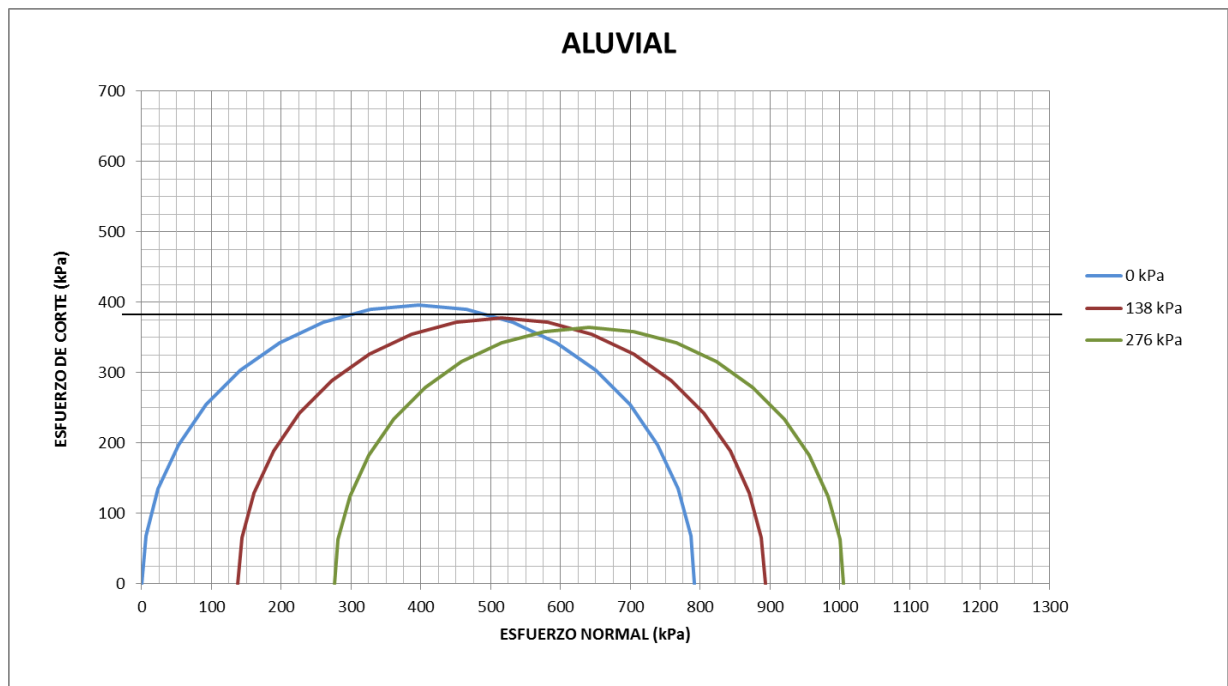
A continuación en las Figuras 29, 30 y 31 aparecen los diagramas de Mohr referente a cada tipo de mezcla, es decir con los agregados tipo caliza, aluvial y argilita respectivamente.





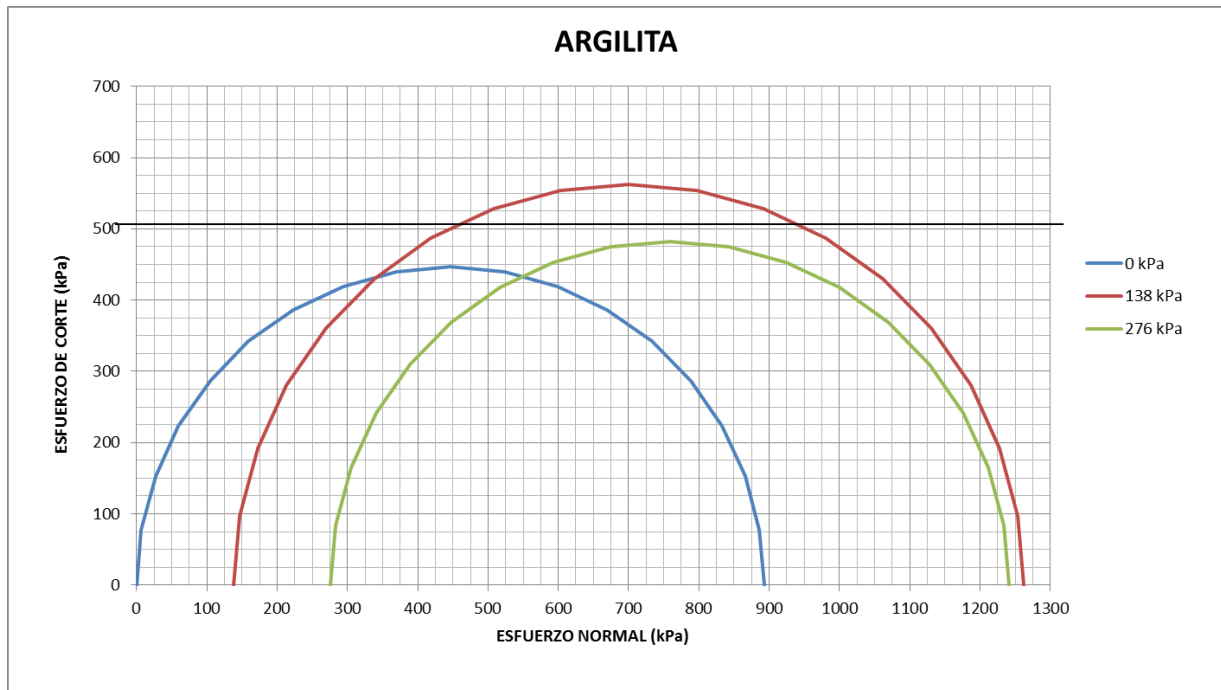
**Figura 29. Ensayo triaxial sin inmersión agregado calizo**

**Fuente: Autor**



**Figura 30. Ensayo triaxial sin inmersión agregado aluvial**

**Fuente: Autor**



**Figura 31. Ensayo triaxial sin inmersión agregado argilita**

**Fuente:** Autor

En general los círculos de Mohr presentan un comportamiento inusual por los incrementos de presiones laterales ( $\sigma_3$ ). No se observa incrementos parciales en los espesores máximos de corte de cada círculo para los diferentes escalones de carga de 0 a 276 kPa (40 psi), siendo las tendencias erráticas. Por ejemplo, para la caliza y aluviales los esfuerzos cortantes máximos los origina la presión  $\sigma_3$  igual a cero, mientras que para la argilita la  $\sigma_3$  iguala a 138 kPa (20psi).

Llama la atención que las variaciones de las cortantes máximos mencionados no son considerables en ninguno de los materiales, por lo que pudiera asumirse que dada nuestras limitaciones en el número de muestras a ensayar, que la cohesión pudiera ser el valor medio del rango de variación de dichos cortantes y que el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) pudiera considerarse igual a cero grado, dada que la mezcla es muy fina.

En la Tabla 17 se muestran los resultados obtenidos en función de los círculos de Mohr presentados en la Figura 29, 30 y 31.

**Tabla 17.** Valores de C y  $\Phi$  del ensayo triaxial sin inmersión

AGREGADO	VARIACIÓN DEL $\tau_{max}$	C (kPa)	$\Phi$ (grados)
CÁLIZA	150	455	0
ALUVIAL	30	385	0
ARGILITA	115	508	0

**Fuente:** Autor

En la mezcla con argilita la cohesión es probablemente mayor por ser más elevado el porcentaje de asfalto empleado.

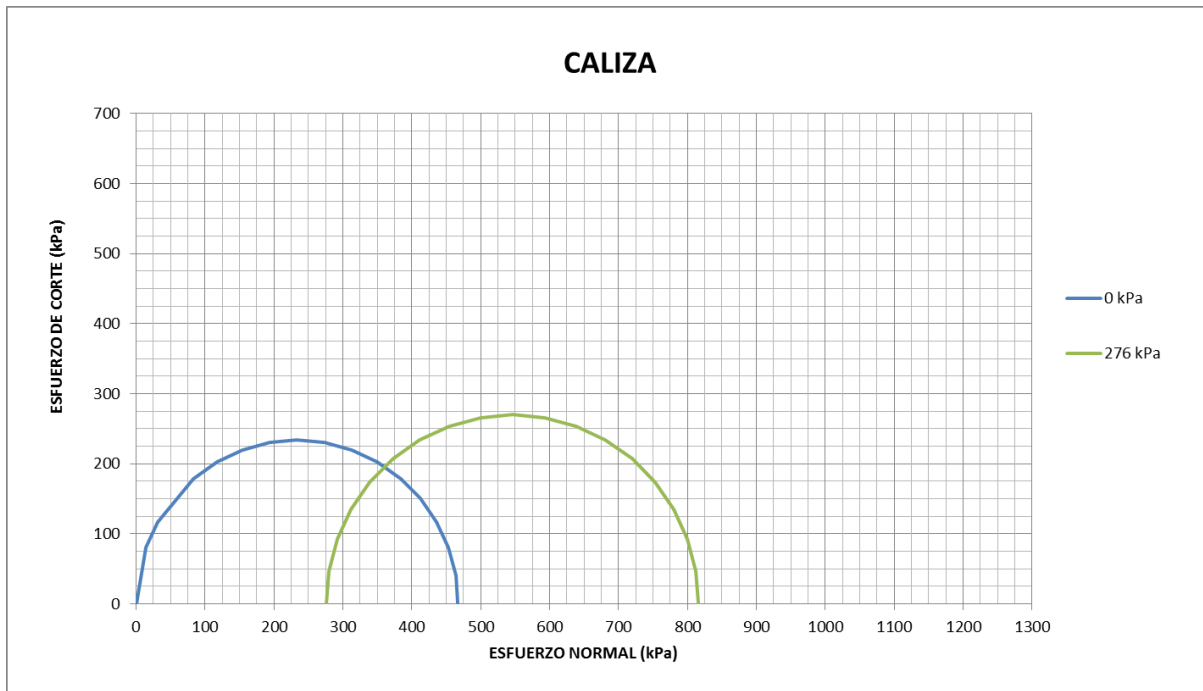
- **Triaxiales con inmersión**

Se tomó en consideración hacer los triaxiales con una inmersión en agua durante 4 días a 25°C. En la Tabla 18 se muestra los resultados obtenidos. En la Figura 32, 33 y 34 los círculos de Mohr referente a la mezcla con agregado calizo, aluvial y argilita respectivamente.

**Tabla 18.** Ensayo triaxial con inmersión

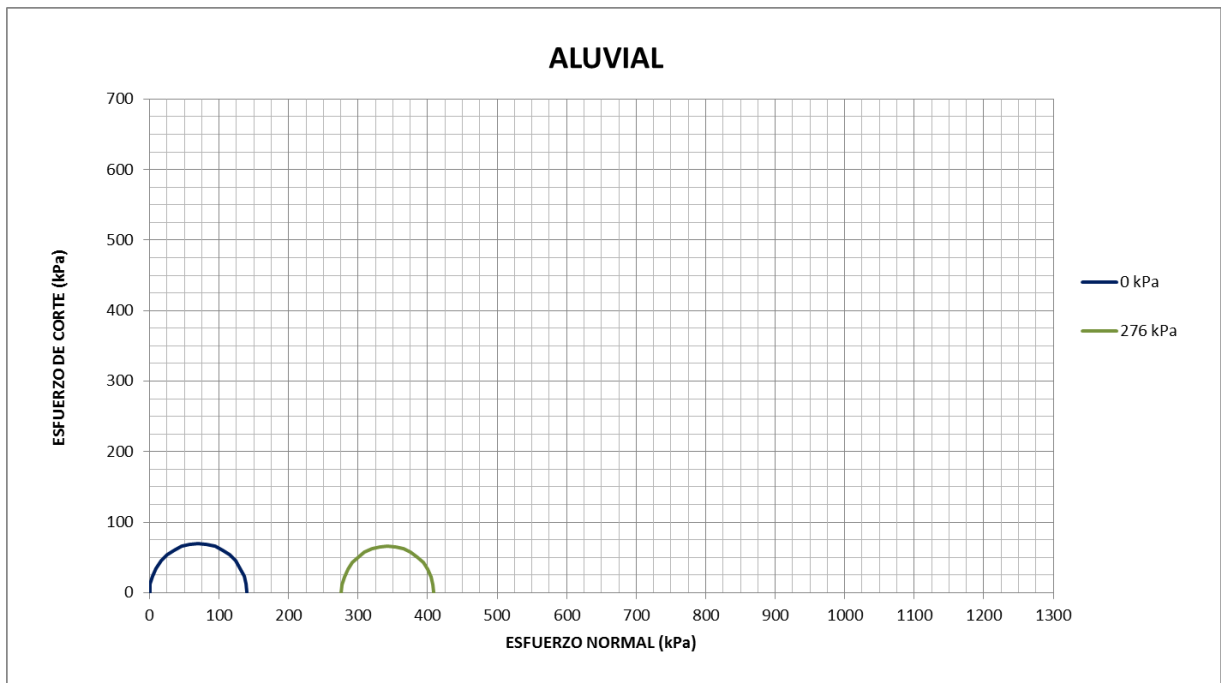
AGREGADO	CILINDRO	PRUEBA	$\sigma_3$ (kPa)		LA1 (0,0001")	$\sigma_1$ (kPa)
			Psi	kPa		
CÁLIZA	4	CON	0	0	20	467
	5	INMERSIÓN	40	276	35.5	816
ALUVIAL	4	CON	0	0	5.5	140
	5	INMERSIÓN	40	276	17.5	409
ARGILITA	4	CON	0	0	0	0
	5	INMERSIÓN	40	276	14.9	352

**Fuente:** Autor



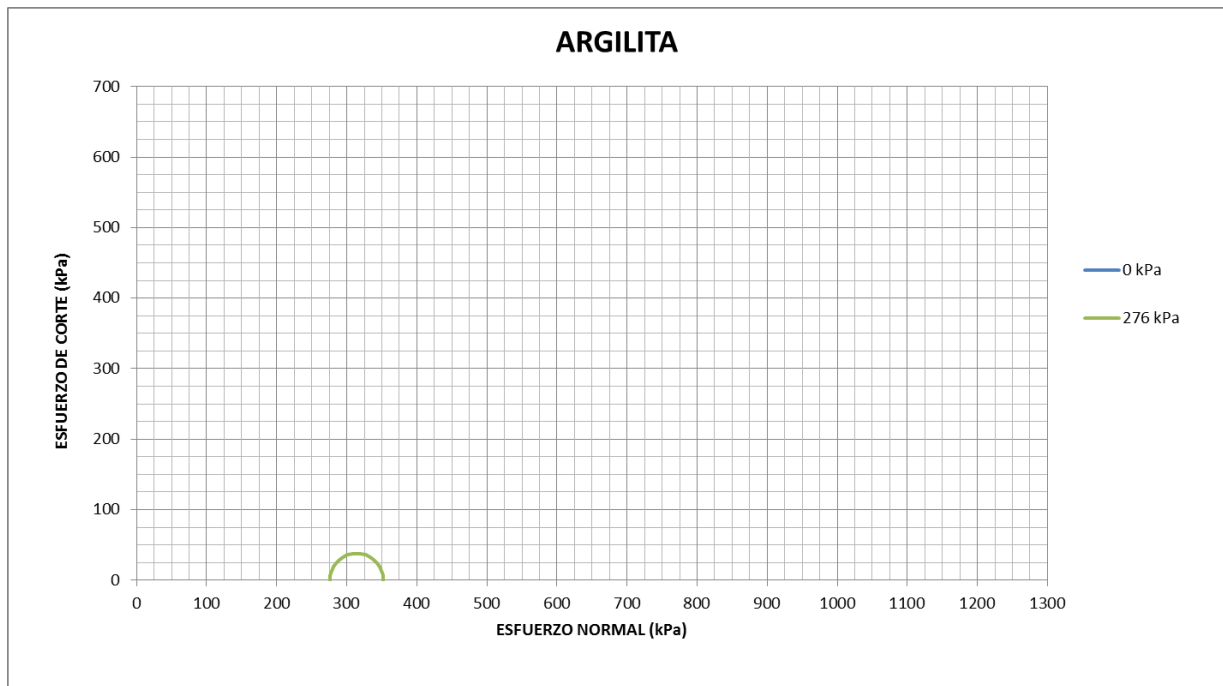
**Figura 32.** Ensayo triaxial con inmersión agregado calizo

**Fuente:** Autor



**Figura 33.** Ensayo triaxial sin inmersión agregado aluvial

**Fuente:** Autor



**Figura 34.** Ensayo triaxial sin inmersión agregado argilita

**Fuente:** Autor

Con los cilindros con inmersión se presentaron afectaciones o daños que permitieron ensayar dos muestras de los agregados caliza y aluvial y solo una de argilita. En este caso los resultados tampoco fueron los típicos de triaxiales.

En la Tabla 19 se muestra los resultados obtenidos en función de los círculos de Mohr presentados en la Figura 20, 21 y 22.

**Tabla 19.** Valores de C y  $\Phi$  del ensayo triaxial con inmersión

AGREGADO	VARIACIÓN DEL $\tau_{max}$	C (kPa)	$\Phi$ (grados)
CÁLIZA	40	250	0
ALUVIAL	6	67	0
ARGILITA	-	35	0

**Fuente:** Autor

En la Tabla 20 se presenta un detalle de los valores obtenidos en los ensayos con y sin inmersión para las tres mezclas con los 3 tipos de agregados y también se calculó la pérdida de cohesión que ha sufrido la mezcla asfáltica.

**Tabla 20.** Pérdida de cohesión debido al agua.

AGREGADO	COHESIÓN SIN INMERSIÓN (kPa)	COHESIÓN CON INMERSIÓN (kPa)	PÉRDIDA DE COHESIÓN (kPa)	% DE PÉRDIDA DE COHESIÓN
CÁLIZA	455	250	205	45.1 %
ALUVIAL	385	67	318	82.6 %
ARGILITA	508	35	473	93.1 %

**Fuente:** Autor

## 4.2. Resultados del ensayo de corte directo

- **Sin inmersión**

En la Tabla 21 se muestran los valores obtenidos en el ensayo de corte directo de las briquetas sin inmersión, a 25°C.

**Tabla 21.** Ensayo de corte directo sin inmersión.

AGREGADO	PRUEBA	LA1 (0,0001")	$\sigma$ (kPa)	$\sigma$ promedio (kPa)
CALIZA	SIN INMERSIÓN	4.5	129	129
		4.5	129	
ALUVIAL	SIN INMERSIÓN	1.5	62	57
		1	51	
ARGILITA	SIN INMERSIÓN	0.5	39	39
		0.5	39	

**Fuente:** Autor

- **Con inmersión**

En estas pruebas todos los cilindros ensayados fallaron con carga cero, no se lograron mediciones en el dial. Esto demuestra una estructura pétreo muy débil para este tipo de prueba, lo que debe considerarse a futuro.

## CAPÍTULO V

### 5.1 Conclusiones

Las pruebas triaxiales realizadas empleando la granulometría fina y abierta seleccionada motivaron que los círculos de Mohr realizados en el procesamiento de los resultados fuera un tanto inusual ante los incrementos de las presiones laterales ( $\sigma_3$ ). En este caso un incremento de  $\sigma_3$  no origina un aumento proporcional del esfuerzo de corte, probablemente debido a que dichas presiones se encuentran generando algún tipo de daño sobre una estructura muy débil. No obstante, las variaciones del esfuerzo cortante máximo de cada círculo para los distintos materiales es relativamente pequeño, siendo el rango mayor obtenido de 150 kPa (1.5 kg/cm<sup>2</sup>) para los agregados calizos y muy por debajo de este valor en todos los casos restantes.

En las pruebas triaxiales sin inmersión y considerando un ángulo de fricción interna de cero, los valores de cohesión variaron entre 508 kPa para la argilita (valor mayor) y 385 kPa para los aluviales (valor menor).

En el valor más elevado pudo incidir el empleo para dicho agregado de un contenido de asfalto mayor (6.5%).

Luego de la inmersión en agua durante 4 días a 25°C la pérdida de cohesión fue considerable en todos los agregados, siendo el porcentaje de pérdida mayor de 93.1% para el agregado tipo argilita y el porcentaje menor de 45.1% para el agregado calizo. El material aluvial sufrió también una pérdida elevada de 82.6% en ello ha incidido la granulometría empleada vinculada a un porcentaje de vacíos en la mezcla muy alto.

Las pruebas de corte directo resultaron ser mucho más agresivas que las triaxiales en la mezcla asfáltica, obteniéndose valores de resistencia al corte más bajos que en los triaxiales, sin guardar una misma proporcionalidad respecto a las diferentes mezclas confeccionadas con distintos agregados.

Las pruebas de corte directo con inmersión en estas mezclas no pueden ser consideradas, todas fallaron con carga cero, lo que indica una excesiva debilidad a las mismas para estas evaluaciones.

Se pudo concluir que la resistencia de estas 3 mezclas, está dada por la cohesión de las mismas ya que el Ángulo de fricción tiende a 0

También se puede recalcar que el agregado argilita presenta un comportamiento inadecuado, ya que su porcentaje de absorción es elevado, lo que obliga aumentar la cantidad de cemento asfáltico, parámetro que mejora la cohesión en un estado sin inmersión, pero al ser sometida ante este proceso se obtuvo como resultado que se pierde drásticamente su adherencia, producto de eso se dan las diversas fallas en la mezcla asfáltica.

Respecto al agregado procedente de la piedra caliza y de los depósitos aluviales, se puede destacar que si tienen un comportamiento similar en lo que respecta a su porcentaje de absorción y que requieren el mismo porcentaje de asfalto para lograr las características similares en lo que refiere a la densidad y porcentaje de vacíos en la mezcla, pero al referirnos a la resistencia al corte y la cohesión se observó que la mezcla con caliza se comporta mejor que la de agregado aluvial.

## **5.2 Recomendaciones**

- Se deberá afinar la granulometría a emplear, con la finalidad de lograr un esqueleto pétreo más resistente de las diferentes muestras a ensayar.
- Cambiar las dimensiones de la muestra cilíndrica con la finalidad de permitir un procedimiento más sencillo durante los ensayos triaxiales y de corte directo.
- Buscar las dimensiones del equipo de corte directo más adecuadas con la finalidad de que se pueda ejercer menor carga inicial debido al peso propio del equipo.
- Realizar dicha investigación con un mayor número de especímenes ensayados que permita obtener mayor información estadística.



## BIBLIOGRAFÍA

Asociación Mexicana del Asfalto, A. C. (2010). Resistencia al Desprendimiento del Asfalto de los Materiales Pétreos en las Mezclas Asfálticas por Acción del Agua. AMAAC.

Meng, J. (2010). Affinity of Asphalt to Mineral Aggregate: Pull-off Test Evaluation. Madison: University of Wisconsin.

Kanitpong, K; Bahia, H. (2005). Relating Adhesion and Cohesion of Asphalts to Effect of Moisture on Asphalt Mixtures. Laboratory Performance. Transportation Research Board, 33-43.

Ingeniero Álvaro Gutiérrez Muñiz. (2008). Comisión permanente del asfalto ciudad de Rosario (Santa Fe). Como saber si nuestra mezcla asfáltica será resistente a la acción del agua.

Mike Anderson (2002). Tests to Assess the Potential for Moisture Damage in Asphalt Mixtures.

Drs. Bjorn Biegisson, Reynaldo Roque, and Mang Tia, of the University of Florida, and Dr. Eyad Masad, of Texas A&M University. (2005). Development and Evaluation of test Methods to Evaluate water damage.

Airey, G (2011). Adhesion and Moisture Damage Characterisation of Asphalt Mixtures.

Romanoschi, S. (1999). Characterization of Pavement Layer Interfaces. Ph.D. Dissertation . Baton Rouge: Louisiana State University.

Terrel, R., & Shute, J. (1989). Summary Report on Water Sensitivity. Washington, D.C: National Research Council.

Terrel, Ronald L; Saleh, Al-Swailmi;. (1992). Final Report Water Sensitivity of Asphalt Aggregate Mixtures Test Development. Washington, D.C.

Gamba, G., & Mercado, J. (2004). *Concepción de un ensayo para establecer el efecto de la presión de poro en el deterioro por humedad de las mezclas asfálticas*. Bucaramanga.

Vila, R. (2009). *Prueba simple de corte directo para evaluar mezclas asfálticas*. Lisboa: CILA XV.

Vila, R., & García, G. (2015). *Resistencia de las mezclas asfálticas calientes producidas en el Ecuador ante la acción del agua*. Guayaquil: UCSG.

Asphalt Institute. (2002). *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. Lexington.

**ANEXOS**

**Anexo 1. Preparación de muestras**



Foto 1: Recolección de material



Foto 2: Tamización



Foto 3: Fracciones de los agregados



Foto 4: Proceso de mezclado

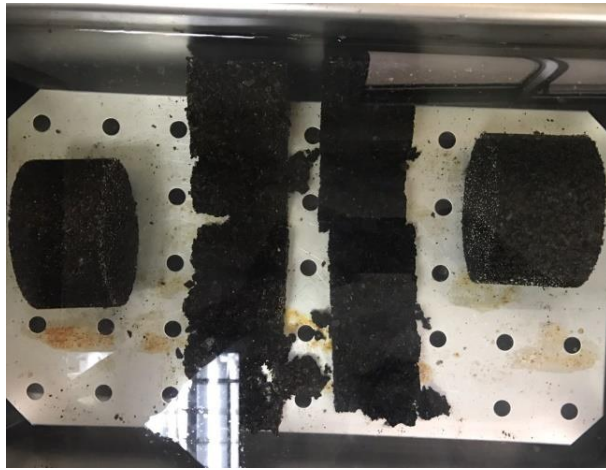


Foto 5: Proceso de inmersión a 60 grados centígrados



Foto 6: Mezcla asfáltica abierta



Foto 7: Equipo para realizar el ensayo RICE



Foto 8: Horno a 135 grados



Foto 9: Mezcla asfáltica



Foto 10: Molde para muestra cilíndrica de  $\Phi$  5 cm



Foto 11: Muestra cilíndrica de 5 cm



Foto 12: Cilindros inmersos en agua





Foto 13: Muestra cilíndrica para ensayo de corte directo



Foto 14: Balanza para la determinación de los pesos



Foto 15: Muestras cilíndricas

## Anexo 2. Ensayos realizados



Foto 1: Velocidad de deformación de la prensa hidráulica



Foto 2: Equipo de corte directo



Foto 3: Ensayo triaxial con 0 kPa de carga lateral



Foto 4: Membrana utilizada para confinar las muestras cilíndricas



Foto 5: Equipo del ensayo triaxial



Foto 6: Suministro de carga lateral





Foto 7: Equipo del ensayo triaxial con presión lateral



Foto 8: Muestra cilíndrica deformada



Foto 9: Muestras cilíndricas ya ensayadas en ensayo de corte directo

### Anexo 3. Clasificación del cemento asfáltico por grado de viscosidad



Foto 1: Viscosímetro Brookfield



Foto 2: Ensayo de punto de ablandamiento



Foto 3: Ensayo de ductilidad



Foto 4: Ensayo de penetración



Foto 5: Determinación de gravedad específica del cemento asfáltico



Foto 6: Envejecimiento en el horno rotatorio de película delgada (RTFOT)

## Anexo 4. Clasificación del cemento asfáltico por grado de desempeño PG



Foto 1: Ensayo en equipo DSR



Foto 2: Ensayo en equipo BBR

Grade Results

**PG64**

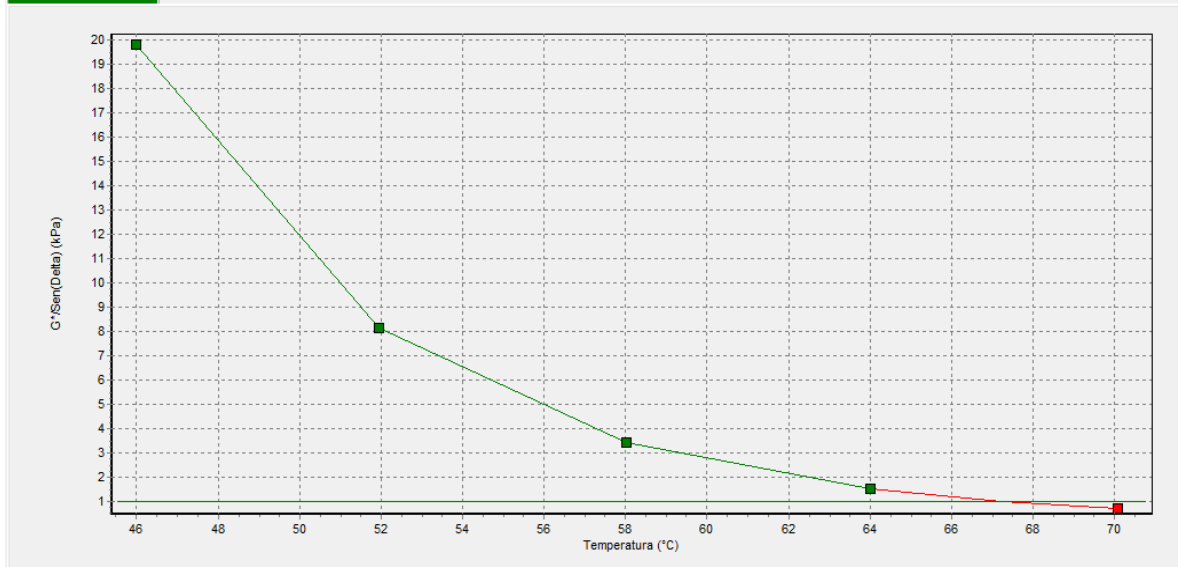
Temperatura TruGrade = 67.23 °C  
Cálculo exitoso

	1	2	3	4	5
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*/Sen(Delta) (kPa)	19.8	8.13	3.42	1.5	0.699
Notas					
Angulo de fase (°)	71.8	75.4	78.8	81.6	83.3
Módulo complejo (kPa)	18.8	7.86	3.35	1.49	0.694
Temperatura (°C)	46.00	51.96	58.03	64.00	70.08
Deformación (%)	12.17	11.91	12.43	12.06	12.04
Esfuerzo cortante (Pa)	2286.97	935.562	415.875	178.6	83.0568
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	22/05/201	22/05/201	22/05/201	22/05/201	22/05/201

Tabla 1: Salida de resultados del ensayo DSR en asfalto original

**PG64**

Temperatura TruGrade = 67.23 °C  
Cálculo exitoso



Gráfica 1: Resultados del ensayo DSR en asfalto original

Grade Results

**PG64**

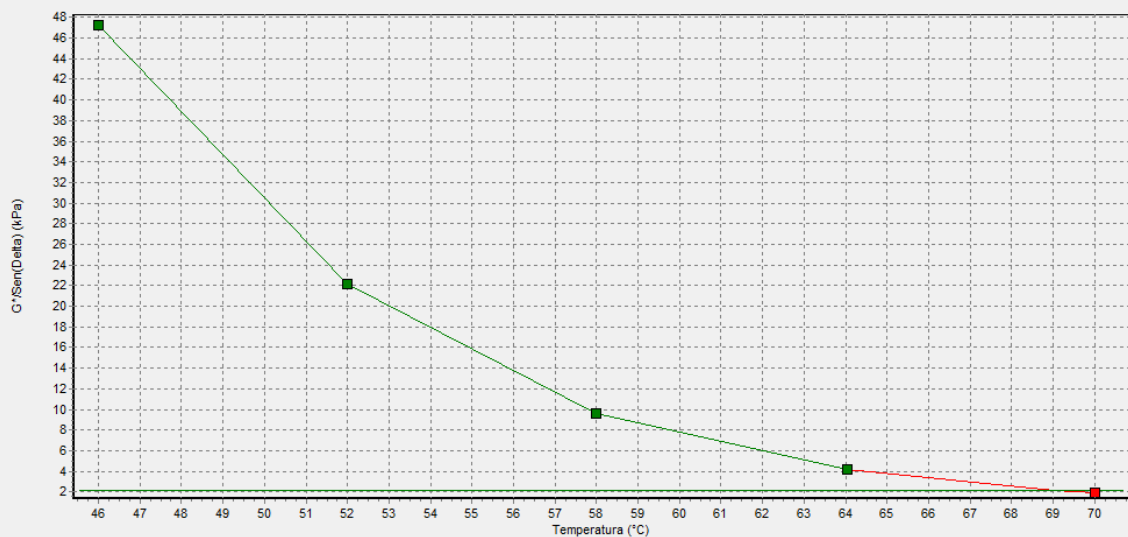
Temperatura TruGrade = 69.03 °C  
Cálculo exitoso

	1	2	3	4	5
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*/Sen(Delta) (kPa)	47.2	22.1	9.61	4.13	1.94
Notas	21		21	21	
Angulo de fase (°)	63.0	66.5	70.5	74.6	77.7
Módulo complejo (kPa)	42.1	20.3	9.06	3.98	1.9
Temperatura (°C)	46.01	51.99	58.00	64.05	70.01
Deformación (%)	7.74	10.08	9.34	3.11	9.82
Esfuerzo cortante (Pa)	3255.6	2042.77	844.764	123.603	185.567
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	25/05/201	25/05/201	25/05/201	25/05/201	25/05/201

Tabla 2: Salida de resultados del ensayo DSR en asfalto con envejecimiento primario (RTFOT)

**PG64**

Temperatura TruGrade = 69.03 °C  
Cálculo exitoso



Gráfica 2: Resultados del ensayo DSR en asfalto con envejecimiento primario (RTFOT)

Grade Results

**PAV**

Temperatura TruGrade = 15.52 °C  
Cálculo exitoso

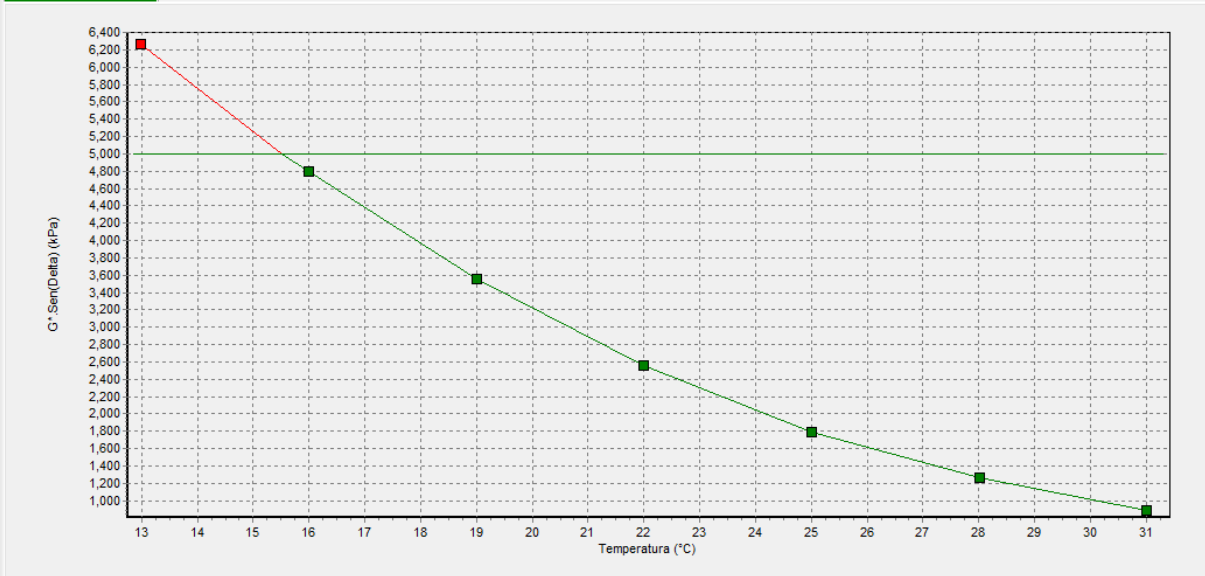
	1	2	3	4	5	6	7
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*.Sen(Delta) (kPa)	881	1.27E3	1.8E3	2.55E3	3.55E3	4.79E3	6.27E3
Notas							21
Angulo de fase (°)	44.8	42.9	41.0	39.2	37.2	35.4	33.6
Módulo complejo (kPa)	1.25E3	1.86E3	2.74E3	4.04E3	5.88E3	8.28E3	1.13E4
Temperatura (°C)	31.01	28.01	25.00	21.99	19.00	15.99	12.99
Deformación (%)	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.02	0.88
Esfuerzo cortante (Pa)	12517.3	18727.7	27460.8	40684.8	59496.2	84174.1	99368.7
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	31/05/201	31/05/201	31/05/201	31/05/201	31/05/201	31/05/201	31/05/201

Tabla 3: Salida de resultados del ensayo DSR en asfalto con envejecimiento secundario (PAV)

Grade Results

**PAV**

Temperatura TruGrade = 15.52 °C  
Cálculo exitoso



Gráfica 3: Resultados del ensayo DSR en asfalto con envejecimiento secundario (PAV)



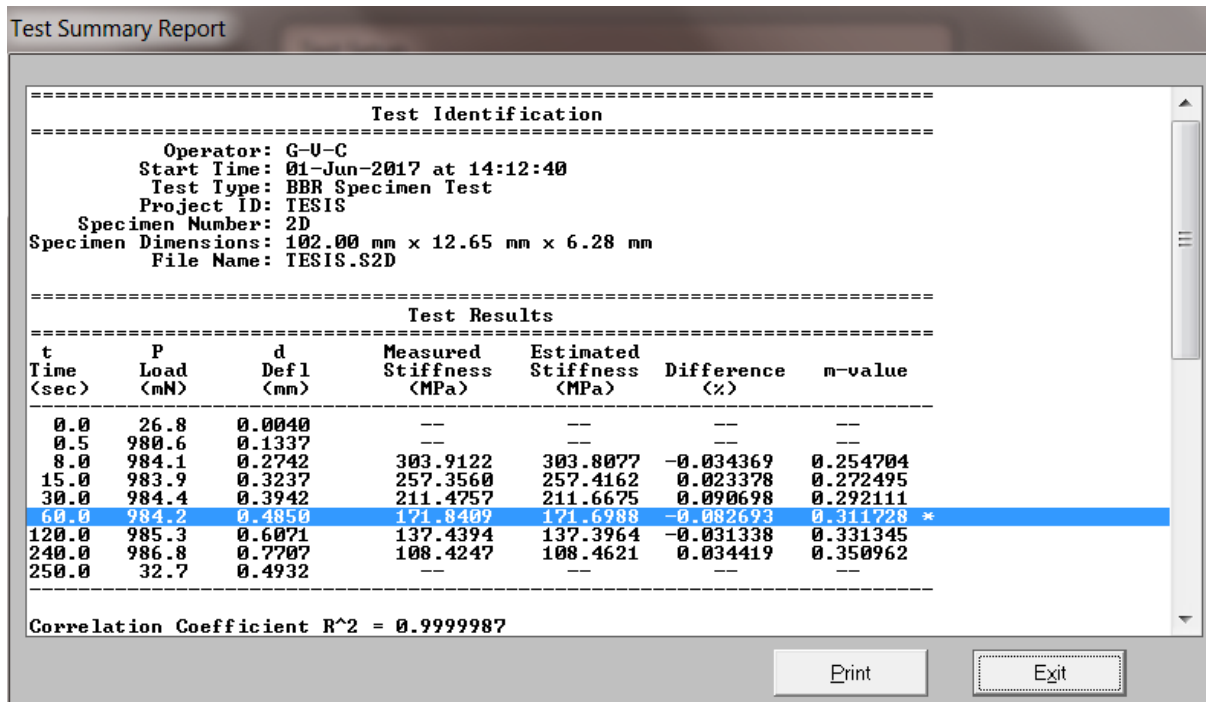
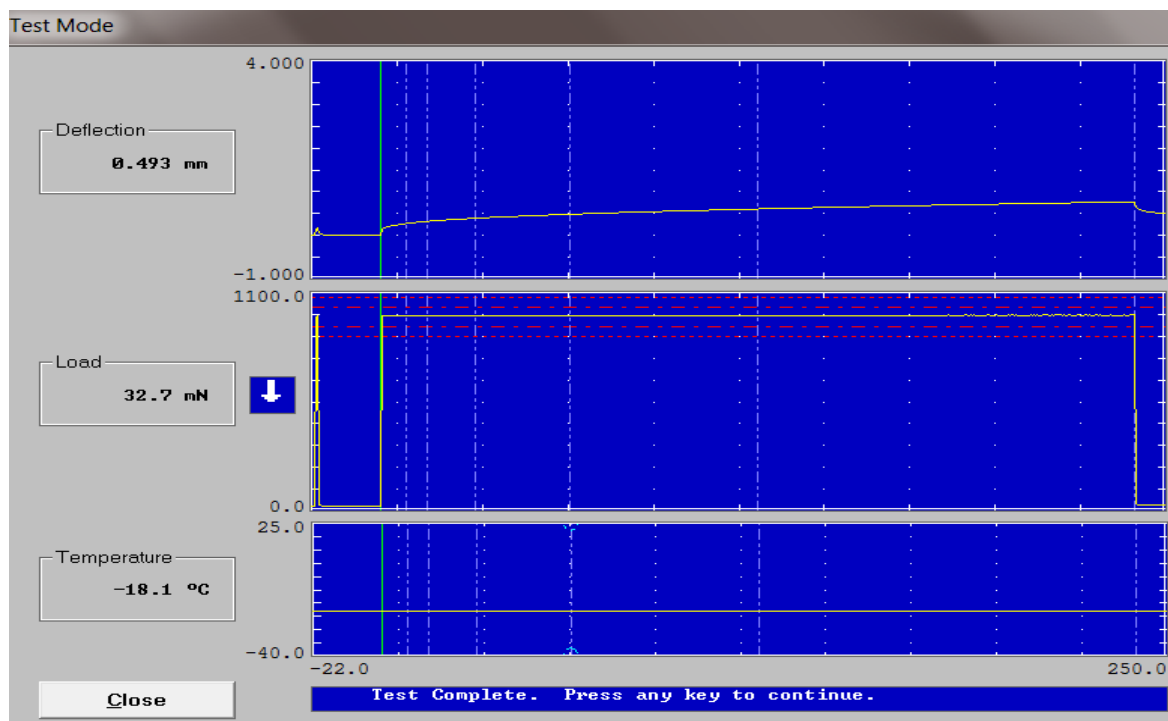


Tabla 4: Salida de resultados del ensayo BBR a -18°C



Gráfica 4: Resultados del ensayo BBR a -18°C



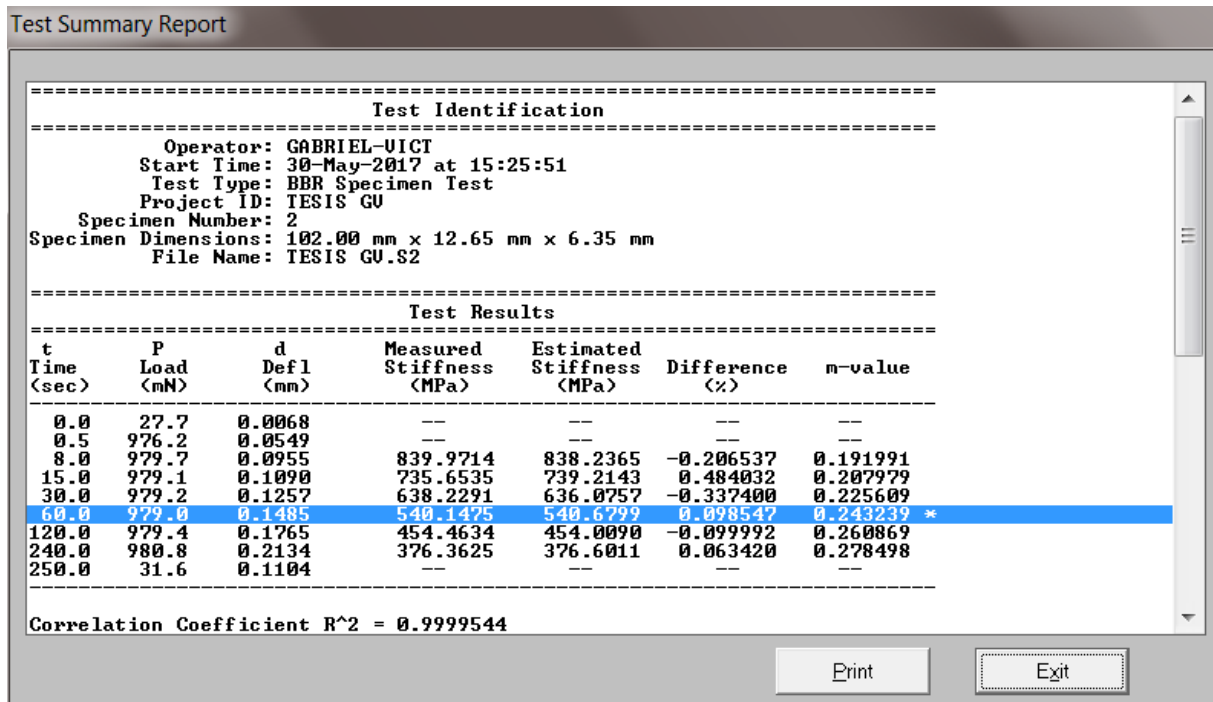
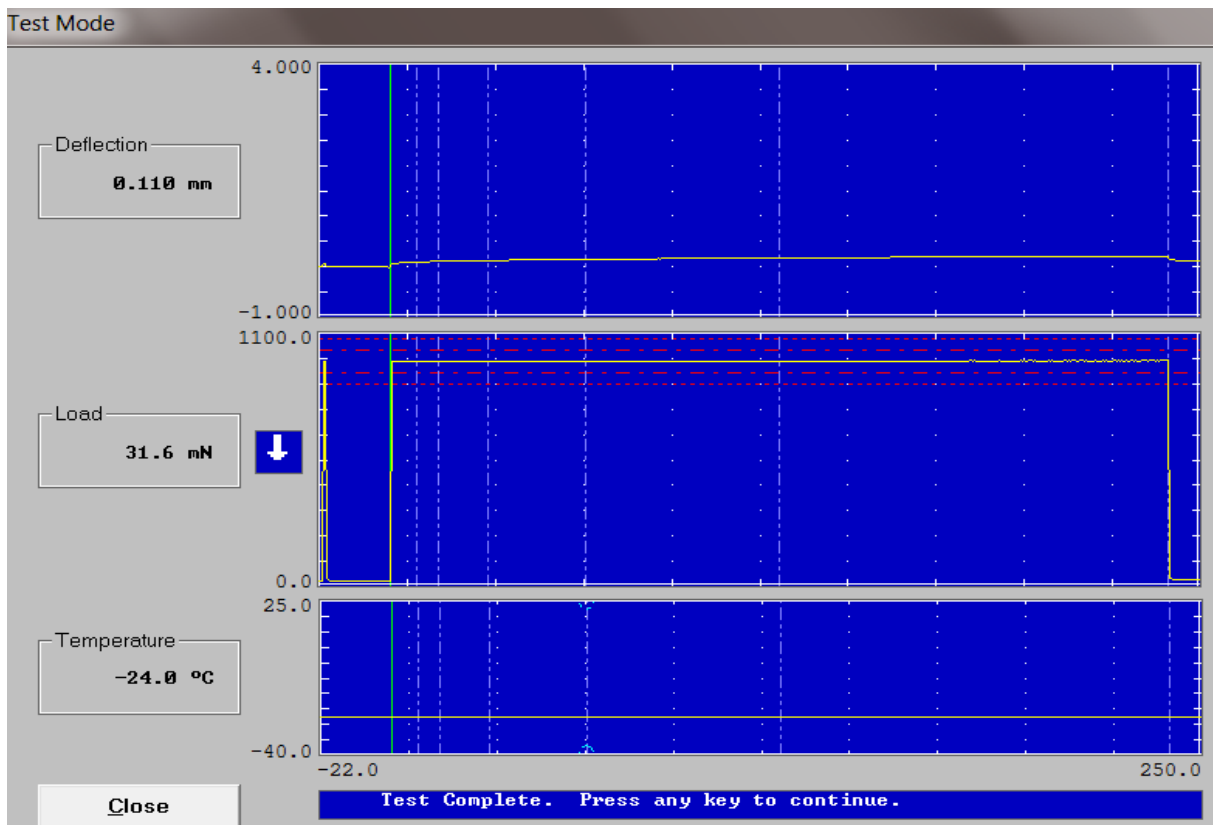


Tabla 5: Salida de resultados del ensayo BBR a -24°C



Gráfica 5: Resultados del ensayo BBR a -24°C

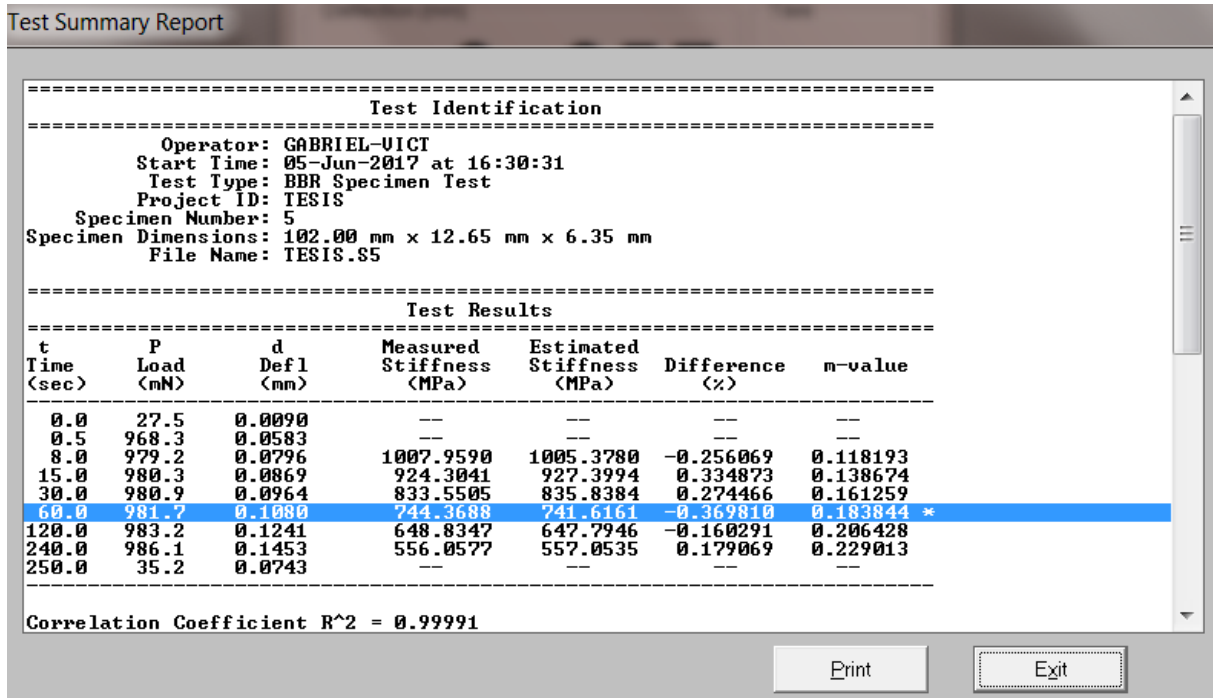
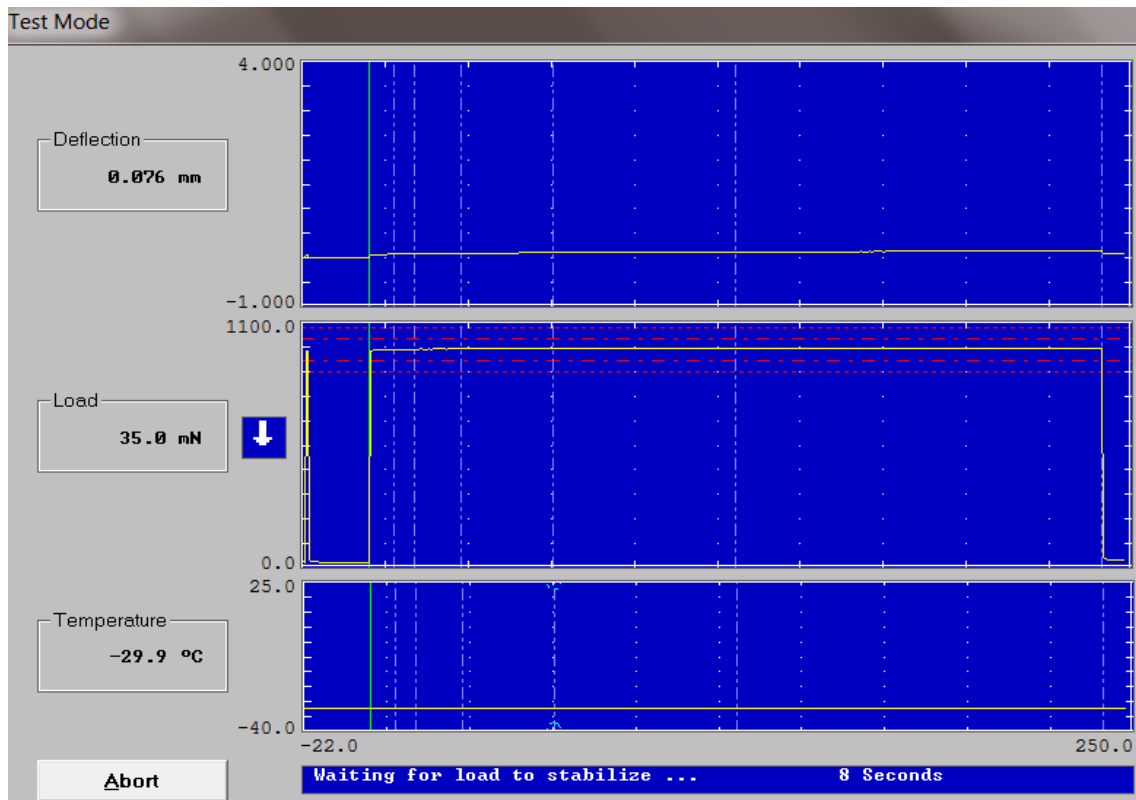


Tabla 6: Salida de resultados del ensayo BBR a -30°



Gráfica 6: Resultados del ensayo BBR a -24°C



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Merizalde Andrade, Christopher Josue**, con C.C: # **0940780968** autor del trabajo de titulación: **Evaluación del Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas Finas Mediante Pruebas Triaxiales y de Corte Directo**, previo a la obtención del título de **INGENIERO CIVIL** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 20 de septiembre del 2017.

f. \_\_\_\_\_

Nombre : Merizalde Andrade Christopher Josue

C.C: 0940780968



## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	EVALUACION DEL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFALTICAS FINAS MEDIANTE PRUEBAS TRIAXIALES Y DE CORTE DIRECTO		
<b>AUTOR(ES)</b>	MERIZALDE ANDRADE CHRISTOPHER JOSUE		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	VILA ROMANÍ ROLANDO		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL		
<b>FACULTAD:</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA		
<b>CARRERA:</b>	INGENIERÍA CIVIL		
<b>TITULO OBTENIDO:</b>	INGENIERO CIVIL		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	20 DE SEPTIEMBRE DE 2017	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	69
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	INGENIERIA EN PAVIMENTOS		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	ADHERENCIA, CEMENTO ASFÁLTICO, AGREGADO MINERAL, ENSAYO DE TRACCIÓN, DISEÑO EXPERIMENTAL		
<p><b>RESUMEN/ABSTRACT:</b> UNO DE LOS PROBLEMAS MÁS IMPORTANTES EN LA VIALIDAD DEL ECUADOR ES LA PÉRDIDA DE ADHERENCIA ENTRE EL LIGANTE ASFÁLTICO Y EL AGREGADO MINERAL, AFECTANDO A LA DURABILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA. EFECTO QUE SE VE REFLEJADO EN LA INCIDENCIA DE LA HUMEDAD EN LA POCA DURABILIDAD DE NUESTRAS CAPAS ASFÁLTICAS, LO QUE ES PREOCUPANTE Y NOS DA LA NECESIDAD DE MEJORAR O AMPLIAR LOS CRITERIOS DE CONTROL. DEBIDO A ESTA RAZÓN, SE PRESENTA ESTE TRABAJO SOBRE LA REALIZACIÓN DE UN ESTUDIO DEL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS FINAS PROVENIENTE DE 3 PLANTAS DE LA REGIÓN COSTA DEL ECUADOR. DETALLANDO EN ESTE DE MANERA ORGANIZADA INFORMACIÓN SOBRE LA ADHERENCIA ENTRE EL AGREGADO MINERAL Y EL ASFALTO. CABE RECALCAR QUE ESTOS TRES TIPOS DE AGREGADOS UTILIZADOS PARA REALIZAR LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CUENTAN CON DISTINTAS CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS COMO SON AGREGADO DE PROCEDENCIA ALUVIAL, CALIZA Y ARGILITA. CON CADA UNA DE LAS MEZCLAS SE PREPARARON BRIQUETAS BUSCANDO ESTAR DENTRO DEL RANGO DEL PORCENTAJE DE VACÍOS DE UNA MEZCLA ABIERTA. TENIENDO COMO OBJETIVO DETERMINAR O EVALUAR EL DAÑO QUE PRODUCE EL AGUA A ESTAS MEZCLAS EMPLEANDO ESPECÍFICAMENTE LA PRUEBA TRIAXIAL Y LA PRUEBA DE CORTE DIRECTO.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-958722857	<b>E-mail:</b> cristopher.merizalde@gmail.com	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b>	<b>Nombre:</b> ING. CLARA GLAS CEVALLOS		
	<b>Teléfono:</b> +593-4-206950		
	<b>E-mail:</b> clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			