



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TÍTULO:**

EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA EN EL SISTEMA ASFALTO –  
AGREGADO MINERAL MEDIANTE UNA PRUEBA DE CORTE DIRECTO

**AUTORES:**

Carrión Baste, Helen Andrea  
Velásquez Solórzano, Wagner Andrés

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

**TUTOR:**

Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD.

**Guayaquil, Ecuador**

**2016**



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 **Helen Andrea Carrión Baste** y **Wagner Andrés Velásquez Solórzano**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

### **TUTOR**

---

**Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD.**

### **DIRECTOR DE LA CARRERA**

---

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

**Guayaquil, a los 29 días del mes de febrero del año 2016**



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

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Helen Andrea Carrión Baste**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación **Evaluación de la Adherencia en el Sistema Asfalto – Agregado Mineral mediante una Prueba de Corte Directo** previo a la obtención del Título de **Ingeniera Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación, de tipo **experimental e investigativo** referido.

**Guayaquil, a los 29 días del mes de febrero del año 2016**

**LA AUTORA**

---

**Helen Andrea Carrión Baste**



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

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Wagner Andrés Velásquez Solórzano**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación **Evaluación de la Adherencia en el Sistema Asfalto – Agregado Mineral mediante una Prueba 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 al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación, de tipo **experimental e investigativo** referido.

**Guayaquil, a los 29 días del mes de febrero del año 2016**

**EL AUTOR**

---

**Wagner Andrés Velásquez Solórzano**



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

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Helen Andrea Carrión Baste**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación **Evaluación de la Adherencia en el Sistema Asfalto – Agregado Mineral mediante una Prueba de Corte Directo**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 29 días del mes de febrero del año 2016**

**LA AUTORA**

---

**Helen Andrea Carrión Baste**



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

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Wagner Andrés Velásquez Solórzano**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación **Evaluación de la Adherencia en el Sistema Asfalto – Agregado Mineral mediante una Prueba de Corte Directo**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 29 días del mes de febrero del año 2016**

**EL AUTOR**

---

**Wagner Andrés Velásquez Solórzano**

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar le damos gracias a Dios por ser nuestra guía espiritual, por darnos la salud y sabiduría necesaria para lograr culminar esta etapa de estudios llena de éxitos.

A nuestros queridos y amados padres por todo el apoyo incondicional que nos han brindado durante toda nuestra existencia, por su amor, consejos de vida y valores inculcados, los cuales nos han servido para poder formarnos como unas personas de bien.

A nuestro estimado tutor, el Ing. Rolando Vila Romaní, por todo su apoyo, dedicación y sabiduría brindada durante todo este trabajo de titulación. También le agradecemos por sus consejos y mensajes de vida que nos ayudarán a crecer tanto en la vida profesional como en la personal.

Un especial agradecimiento a nuestro amigo, el Ing. José Jaramillo el cual nos ayudó durante toda esta etapa de elaboración de nuestro trabajo de titulación, dándonos su tiempo y sus conocimientos cuando se lo necesitaba.

## **DEDICATORIA**

Dedicamos este trabajo a nuestros queridos padres, ya que sin ellos no estaríamos en este punto de nuestras vidas, por su trabajo y esfuerzo que han realizado día a día para ser nuestro sustento.

Este trabajo también es dedicado para nuestros queridos hermanos, los cuales han sido nuestro empuje y ejemplo a seguir para nosotros y lo seguirán siendo a lo largo de nuestras vidas profesionales.

# ÍNDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Razones que motivaron el estudio .....	2
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 .....	5
1.6. Metodología .....	5
CAPÍTULO II. CONSIDERACIONES SOBRE EL FENÓMENO DE LA ADHERENCIA Y SU EVALUACIÓN .....	7
2.1. Agregado mineral .....	7
2.1.1. Generalidades .....	7
2.1.2. Clasificación del agregado según su origen .....	8
2.1.3. Características principales de los agregados para mezclas asfálticas	12
2.1.4. Clasificación del agregado según su composición química .....	14
2.1.4.1. Agregados básicos .....	14
2.1.4.2. Agregados ácidos .....	14
2.1.5. Exigencias de calidad de los agregados minerales en el Ecuador .....	16
2.2. Ligante asfáltico .....	16
2.2.1. Generalidades .....	16
2.2.2. Propiedades principales del ligante asfáltico .....	17
2.2.3. Exigencias de calidad del ligante asfáltico en el Ecuador .....	19
2.3. Adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado mineral .....	20
2.3.1. Generalidades .....	20
2.3.2. Mecanismos de adherencia .....	21
2.3.3. Mecanismos de falla asociados al daño en agua .....	23
2.3.4. Influencias del asfalto y del agregado mineral sobre la adherencia ...	25
2.3.4.1. Efecto de las propiedades del agregado mineral .....	25
<i>Composición mineralógica</i> .....	25

<i>Propiedades físicas del agregado que influyen en la adherencia</i> .....	26
2.3.4.2. Efecto de las propiedades del asfalto .....	28
<i>Composición química</i> .....	28
<i>Propiedades físicas del asfalto que influyen en la adherencia</i> .....	30
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	33
3.1. Introducción.....	33
3.2. Procedimiento de preparación de pastillas y ensayo de corte directo.....	34
3.3. Características de los materiales a utilizar en la prueba .....	42
3.3.1. Características de los agregados minerales .....	42
3.3.1.1. Caliza .....	42
3.3.1.2. Basalto .....	42
3.3.2. Características del cemento asfáltico .....	43
3.4. Diseño de experimento.....	43
3.4.1. Generalidades.....	43
3.4.2. Anova del diseño factorial $2^k$ .....	44
3.4.3. Programa para el análisis estadístico .....	45
3.5. Resultados de los experimentos.....	45
3.5.1. Ejemplo de procedimiento de los datos obtenidos en una prueba.....	45
3.5.2. Resumen de resultados .....	49
CAPÍTULO IV. RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTO SEGÚN EL SOFTWARE STATGRAPHICS.....	50
4.1. Análisis de la carga de rotura “CR” (Newtons) en el experimento. ....	50
4.1.1. Efectos estimados para carga de rotura (N) .....	50
4.1.2. Análisis de varianza para carga de rotura (N) .....	51
4.1.3. Análisis de varianza ajustado para carga de rotura (N) .....	53
4.1.4. Coeficientes de regresión para carga de rotura (N) .....	55
4.1.5. Gráficas de efectos principales para carga de rotura (N) .....	56
4.1.6. Resultados estimados para carga de rotura (N) .....	58
4.1.7. Gráficas de cuadros para carga de rotura (N) .....	60
4.1.8. Gráficas de cubos para carga de rotura (N).....	62
4.2. Análisis del desplazamiento “DES” (milímetros) en el experimento. ....	66
4.2.1. Efectos estimados para desplazamiento (mm) .....	66

4.2.2.	Análisis de varianza para desplazamiento (mm).....	67
4.2.3.	Análisis de varianza ajustado para desplazamiento (mm) .....	68
4.2.4.	Coeficientes de regresión para desplazamiento (mm).....	70
4.2.5.	Gráficas de efectos principales para desplazamiento (mm) .....	71
4.2.6.	Resultados estimados para desplazamiento (mm).....	73
4.2.7.	Gráfica de superficie de respuesta estimada.....	74
4.2.8.	Gráficas de cuadros para desplazamiento (mm) .....	78
4.2.9.	Gráficas de cubos para desplazamiento (mm).....	80
4.3.	Análisis del área bajo la curva CR vs DES “Área” (N.mm) en el experimento. ....	81
4.3.1.	Efectos estimados para área (N.mm) .....	81
4.3.2.	Análisis de varianza para área (N.mm).....	82
4.3.3.	Análisis de varianza ajustado para área (N.mm) .....	83
4.3.4.	Coeficiente de regresión para área (N.mm).....	85
4.3.5.	Gráficas de efectos principales para área (N.mm) .....	86
4.3.6.	Resultados estimados para área (N.mm).....	88
4.3.7.	Gráfica de superficie de respuesta estimada.....	89
4.3.8.	Gráficas de cuadros para área (N.mm) .....	91
4.3.9.	Gráficas de cubos para área (N.mm).....	95
4.4.	Optimización de la respuesta .....	96
<b>CAPÍTULO V. EVALUACIÓN DEL DAÑO POR EL EFECTO DEL AGUA EN EL SISTEMA ASFALTO - AGREGADO MINERAL .....</b>		<b>98</b>
5.1.	Introducción.....	98
5.2.	Características de los materiales.....	98
5.2.1.	Basalto UR .....	98
5.2.2.	Argilita .....	99
5.2.3.	Canto rodado (Aluviales).....	99
5.3.	Ampliación del procedimiento de ensayo para considerar el daño debido al agua 101	
5.4.	Resultados obtenidos .....	104
5.5.	Análisis de resultados.....	108
<b>CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>110</b>
6.1.	Conclusiones.....	110

6.2. Recomendaciones .....	111
BIBLIOGRAFÍA.....	112
ANEXOS.....	114

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Requisitos de calidad del material mineral para carpetas .....	16
Tabla 2.2: Requisitos para la clasificación por viscosidad (60°C) de los cementos asfálticos en el Ecuador .....	19
Tabla 2.3: Composición SARA representativa del asfalto ecuatoriano .....	30
Tabla 3.1: Características del agregado (piedra caliza) .....	42
Tabla 3.2: Características del agregado (piedra basalto).....	42
Tabla 3.3: Características del cemento asfáltico AC-20 .....	43
Tabla 3.4: Factores y niveles para el Diseño de Experimento.....	43
Tabla 3.5: Diseño factorial $2^4$ y sus efectos de interés, $k \leq 4$ .....	44
Tabla 3.6: Desplazamiento y Carga (Basalto, Ensayo #34).....	46
Tabla 3.7: Resultados del Diseño de Experimento.....	49
Tabla 4.1: Efectos estimados para CR (N) .....	50
Tabla 4.2: Análisis de varianza para CR (N).....	51
Tabla 4.3: Análisis de varianza ajustado para CR (N) .....	53
Tabla 4.4: Coeficientes de regresión para CR (N).....	55
Tabla 4.5: Resultados estimados para CR (N).....	58
Tabla 4.6: Efectos estimados para DES (mm) .....	66
Tabla 4.7: Análisis de varianza para DES (mm) .....	67
Tabla 4.8: Análisis de varianza ajustado para DES (mm) .....	68
Tabla 4.9: Coeficientes de regresión para DES (mm).....	70
Tabla 4.10: Resultados estimados para DES (mm) .....	73
Tabla 4.11: Efectos estimados para ÁREA (N.mm) .....	81
Tabla 4.12: Análisis de varianza para ÁREA (N.mm) .....	82
Tabla 4.13: Análisis de varianza ajustado para ÁREA (N.mm) .....	83
Tabla 4.14: Coeficientes de regresión para ÁREA (mm).....	85
Tabla 4.15: Resultados estimados para ÁREA (N.mm).....	88
Tabla 4.16: Resultados óptimos de agregado caliza.....	96
Tabla 4.17: Resultados óptimos de agregado basalto .....	97
Tabla 5.1: Características del agregado (piedra basalto UR) .....	98
Tabla 5.2: Características del agregado (piedra argilita) .....	99

Tabla 5.3: Características del agregado (piedra canto rodado) .....	99
Tabla 5.4: Resultados de ensayos a pruebas realizadas sin inmersión .....	104
Tabla 5.5: Resultados de ensayos a pruebas realizadas con inmersión .....	104
Tabla 5.6: Resumen de resultados promedios con y sin inmersión al agua .....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipos de rocas ígneas .....	8
Figura 2.2: Roca sedimentaria (caliza) .....	9
Figura 2.3: Clasificación de las rocas metamórficas .....	10
Figura 2.4: Clasificación general de los agregados.....	11
Figura 2.5: Clasificación de los agregados según su composición química.....	15
Figura 2.6: Posibles fallas entre el asfalto y el agregado .....	18
Figura 2.7: Esquema del cubrimiento del agregado mineral por el asfalto.....	31
Figura 2.8: Representación esquemática de la influencia de la tensión superficial sobre el cubrimiento producido por un líquido.....	31
Figura 2.9: Influencia de la viscosidad del asfalto sobre el cubrimiento de un líquido sobre un sólido .....	32
Figura 3.1: Roca recién barrenada.....	34
Figura 3.2: Proceso de corte de núcleos.....	34
Figura 3.3: Lijado de pastillas de roca .....	35
Figura 3.4: Lavado manual de pastillas .....	35
Figura 3.5: Lavado con limpiador ultrasónico .....	36
Figura 3.6: Pastillas cubiertas con papel aluminio.....	36
Figura 3.7: Proceso de secado de las pastillas en el horno.....	37
Figura 3.8: Aumento de la temperatura a 150°C .....	37
Figura 3.9: Pintado de las pastillas .....	38
Figura 3.10: Pastillas con asfalto en el horno a 135°C .....	38
Figura 3.11: Pegado de las pastillas en la prensa mecánica.....	39
Figura 3.12: Sándwiches de roca en las prensas mecánicas .....	39
Figura 3.13: Retiro del alambre y papel aluminio.....	40
Figura 3.14: Muestras de roca en el NAT .....	40
Figura 3.15: Muestra en el equipo de corte .....	41
Figura 3.16: Ensayo de la muestra .....	41
Figura 3.17: Gráfica Carga (N) vs. Deformación (mm). Basalto, Ensayo #34.....	47
Figura 4.1: Diagrama de pareto estandarizada para CR.....	52
Figura 4.2: Diagrama de pareto estandarizada ajustado para CR.....	55

Figura 4.3: Gráfica de efectos principales para CR tomando en cuenta los 4 factores .....	56
Figura 4.4: Gráfica de efectos principales para CR vs. Temperaturas.....	56
Figura 4.5: Gráfica de efectos principales para CR vs. Velocidades.....	57
Figura 4.6: Gráfica de efectos principales para CR vs. Texturas .....	57
Figura 4.7: Gráfica de efectos principales para CR vs. Agregados .....	58
Figura 4.8: Gráfica de cuadro para CR (Caliza, Textura: 50) .....	60
Figura 4.9: Gráfica de cuadro para CR (Caliza, Textura: 120) .....	60
Figura 4.10: Gráfica de cuadro para CR (Basalto, Textura: 50) .....	61
Figura 4.11: Gráfica de cuadro para CR (Basalto, Textura: 120).....	61
Figura 4.12: Gráfica de cubo para CR (Basalto).....	62
Figura 4.13: Gráfica de cubo para CR (Caliza) .....	62
Figura 4.14: Gráfica de cubo para CR (Textura: 50) .....	63
Figura 4.15: Gráfica de cubo para CR (Textura: 120).....	63
Figura 4.16: Gráfica de cubo para CR (Velocidad: 25mm/min).....	64
Figura 4.17: Gráfica de cubo para CR (Velocidad: 50mm/min).....	64
Figura 4.18: Gráfica de cubo para CR (Temperatura: 10°C) .....	65
Figura 4.19: Gráfica de cubo para CR (Temperatura: 25°C) .....	65
Figura 4.20: Diagrama de pareto estandarizada para DES .....	68
Figura 4.21: Diagrama de pareto estandarizada ajustado para DES .....	70
Figura 4.22: Gráfica de efectos principales para DES tomando en cuenta los 3 factores .....	71
Figura 4.23: Gráfica de efectos principales para DES vs. Temperaturas .....	71
Figura 4.24: Gráfica de efectos principales para DES vs. Velocidades .....	72
Figura 4.25: Gráfica de efectos principales para DES vs. Agregados.....	72
Figura 4.26: Superficie de respuesta estimada (Caliza, Textura: 50).....	74
Figura 4.27: Superficie de respuesta estimada (Caliza, Textura: 120) .....	75
Figura 4.28: Superficie de respuesta estimada (Basalto, Textura: 50) .....	75
Figura 4.29: Superficie de respuesta estimada (Caliza, Velocidad: 25).....	76
Figura 4.30: Superficie de respuesta estimada (Caliza, Velocidad: 50).....	76
Figura 4.31: Superficie de respuesta estimada (Basalto, Velocidad: 25) .....	77
Figura 4.32: Superficie de respuesta estimada (Basalto, Velocidad: 50) .....	77
Figura 4.33: Gráfica de cuadro para DES (Caliza, Textura: 50).....	78

Figura 4.34: Gráfica de cuadro para DES (Caliza, Textura: 120).....	78
Figura 4.35: Gráfica de cuadro para DES (Basalto, Textura: 50).....	79
Figura 4.36: Gráfica de cuadro para DES (Basalto, Textura: 120) .....	79
Figura 4.37: Gráfica de cubo para DES (Caliza).....	80
Figura 4.38: Gráfica de cubo para DES (Basalto) .....	80
Figura 4.39: Diagrama de pareto estandarizada para ÁREA.....	83
Figura 4.40: Diagrama de pareto estandarizada ajustado para ÁREA .....	85
Figura 4.41: Gráfica de efectos principales para ÁREA tomando en cuenta los 3 factores .....	86
Figura 4.42: Gráfica de efectos principales para ÁREA vs. Temperaturas .....	86
Figura 4.43: Gráfica de efectos principales para ÁREA vs. Velocidades .....	87
Figura 4.44: Gráfica de efectos principales para ÁREA vs. Agregados.....	87
Figura 4.45: Superficie de respuesta estimada (Caliza, Textura: 50).....	89
Figura 4.46: Superficie de respuesta estimada (Caliza, Textura: 120) .....	90
Figura 4.47: Superficie de respuesta estimada (Basalto, Textura: 50) .....	90
Figura 4.48: Superficie de respuesta estimada (Basalto, Textura: 120) .....	91
Figura 4.49: Gráfica de cuadro para ÁREA (Caliza, Textura: 50) .....	91
Figura 4.50: Gráfica de cuadro para ÁREA (Caliza, Textura: 120).....	92
Figura 4.51: Gráfica de cuadro para ÁREA (Basalto, Textura: 50).....	92
Figura 4.52: Gráfica de cuadro para ÁREA (Basalto, Textura: 120).....	93
Figura 4.53: Gráfica de cuadro para ÁREA (Caliza, Temperatura: 10°C) .....	93
Figura 4.54: Gráfica de cuadro para ÁREA (Caliza, Temperatura: 25°C) .....	94
Figura 4.55: Gráfica de cuadro para ÁREA (Basalto, Temperatura: 10°C) .....	94
Figura 4.56: Gráfica de cuadro para ÁREA (Basalto, Temperatura: 25°C) .....	95
Figura 4.57: Gráfica de cubo para ÁREA (Caliza) .....	95
Figura 4.58: Gráfica de cubo para ÁREA (Basalto).....	96
Figura 5.1: Tipo de rocas según mapa geológico de provincia de Guayas .....	100
Figura 5.2: Tipo de rocas según mapa geológico de provincia de Manabí .....	100
Figura 5.3: Muestras preparadas para ser ensayadas .....	101
Figura 5.4: Muestras en el NAT .....	102
Figura 5.5: Muestras en Baño María.....	102
Figura 5.6: Muestras en baño en agua a 10°C en el NAT.....	103

Figura 5.7: Ensayo de corte .....	103
Figura 5.8: Gráfica de promedios de carga de rotura .....	106
Figura 5.9: Gráfica de promedios de desplazamientos.....	106
Figura 5.10: Gráfica de promedios de esfuerzo cortante.....	107
Figura 5.11: Gráfica de promedios de área .....	107

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Rocas caliza y basalto.....	114
Anexo 2: Núcleos extraídos de rocas .....	114
Anexo 3: Pastillas de rocas .....	115
Anexo 4: Muestra (sándwich) de piedra caliza.....	115
Anexo 5: Muestra (sándwich) de piedra basalto .....	116
Anexo 6: Muestra (sándwich) de piedra basalto UR .....	116
Anexo 7: Muestra (sándwich) de piedra argilita .....	117
Anexo 8: Muestra (sándwich) de canto rodado.....	117
Anexo 9: Lavado de pastillas en limpiador ultrasónico .....	118
Anexo 10: Proceso de recubrir pastillas con papel aluminio.....	118
Anexo 11: Pastillas luego de cubrirlas con papel aluminio.....	119
Anexo 12: Pastillas previo a ser colocadas en el horno.....	119
Anexo 13: Pastillas dentro del horno .....	119
Anexo 14: Proceso de pintado de pastillas .....	120
Anexo 15: Proceso de pintado de pastillas .....	120
Anexo 16: Proceso de unión de pastillas .....	121
Anexo 17: Muestras (sándwiches) en las prensas mecánicas .....	121
Anexo 18: Muestras (sándwiches) en Baño María .....	122
Anexo 19: Muestras (sándwiches) dentro del NAT .....	122
Anexo 20: Muestras (sándwiches) dentro del NAT bajo inmersión .....	123
Anexo 21: Colocación de la muestra dentro de la máquina de corte .....	123
Anexo 22: Ensayo de corte a muestra (caliza).....	124
Anexo 23: Ensayo de corte a muestra (basalto) .....	124
Anexo 24: Tabla del ensayo #1 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante.....	125
Anexo 25: Gráfica de ensayo #1 (Caliza grano 120, 50mm/min, 25°C).....	125
Anexo 26: Tabla del ensayo #2 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante.....	126
Anexo 27: Gráfica de ensayo #2 (Caliza grano 120, 50mm/min, 25°C).....	126
Anexo 28: Tabla del ensayo #3 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante.....	127

Anexo 29: Gráfica de ensayo #3 (Caliza grano 120, 50mm/min, 25°C).....	127
Anexo 30: Tabla del ensayo #4 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	128
Anexo 31: Gráfica de ensayo #4 (Caliza grano 120, 50mm/min, 10°C).....	128
Anexo 32: Tabla del ensayo #5 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	129
Anexo 33: Gráfica de ensayo #5 (Caliza grano 120, 50mm/min, 10°C).....	129
Anexo 34: Tabla del ensayo #6 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	130
Anexo 35: Gráfica de ensayo #6 (Caliza grano 120, 50mm/min, 10°C).....	130
Anexo 36: Tabla del ensayo #7 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	131
Anexo 37: Gráfica de ensayo #7 (Caliza grano 120, 25mm/min, 25°C).....	131
Anexo 38: Tabla del ensayo #8 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	132
Anexo 39: Gráfica de ensayo #8 (Caliza grano 120, 25mm/min, 25°C).....	132
Anexo 40: Tabla del ensayo #9 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	133
Anexo 41: Gráfica de ensayo #9 (Caliza grano 120, 25mm/min, 25°C).....	133
Anexo 42: Tabla del ensayo #10 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	134
Anexo 43: Gráfica de ensayo #10 (Caliza grano 120, 25mm/min, 10°C) .....	135
Anexo 44: Tabla del ensayo #11 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	136
Anexo 45: Gráfica de ensayo #11 (Caliza grano 120, 25mm/min, 10°C) .....	137
Anexo 46: Tabla del ensayo #12 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	138
Anexo 47: Gráfica de ensayo #12 (Caliza grano 120, 25mm/min, 10°C) .....	139
Anexo 48: Tabla del ensayo #13 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	140
Anexo 49: Gráfica de ensayo #13 (Caliza grano 50, 50mm/min, 25°C).....	140
Anexo 50: Tabla del ensayo #14 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	141
Anexo 51: Gráfica de ensayo #14 (Caliza grano 50, 50mm/min, 25°C).....	141

Anexo 52: Tabla del ensayo #15 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	142
Anexo 53: Gráfica de ensayo #15 (Caliza grano 50, 50mm/min, 25°C).....	142
Anexo 54: Tabla 4 del ensayo #16 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	143
Anexo 55: Gráfica de ensayo #16 (Caliza grano 50, 50mm/min, 10°C).....	144
Anexo 56: Tabla 4 del ensayo #17 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	145
Anexo 57: Gráfica de ensayo #17 (Caliza grano 50, 50mm/min, 10°C).....	146
Anexo 58: Tabla del ensayo #18 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	147
Anexo 59: Gráfica de ensayo #18 (Caliza grano 50, 50mm/min, 10°C).....	147
Anexo 60: Tabla del ensayo #19 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	148
Anexo 61: Gráfica de ensayo #19 (Caliza grano 50, 25mm/min, 25°C).....	148
Anexo 62: Tabla del ensayo #20 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	149
Anexo 63: Gráfica de ensayo #20 (Caliza grano 50, 25mm/min, 25°C).....	150
Anexo 64: Tabla del ensayo #21 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	151
Anexo 65: Gráfica de ensayo #21 (Caliza grano 50, 25mm/min, 25°C).....	151
Anexo 66: Tabla del ensayo #22 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	152
Anexo 67: Gráfica de ensayo #22 (Caliza grano 50, 25mm/min, 10°C).....	153
Anexo 68: Tabla del ensayo #23 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	154
Anexo 69: Gráfica de ensayo #23 (Caliza grano 50, 25mm/min, 10°C).....	155
Anexo 70: Tabla del ensayo #24 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	156
Anexo 71: Gráfica de ensayo #24 (Caliza grano 50, 25mm/min, 10°C).....	157
Anexo 72: Tabla del ensayo #25 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	158
Anexo 73: Gráfica de ensayo #25 (Basalto grano 120, 50mm/min, 25°C) .....	158
Anexo 74: Tabla del ensayo#26 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	159

Anexo 75: Gráfica de ensayo #26 (Basalto grano 120, 50mm/min, 25°C) .....	159
Anexo 76: Tabla del ensayo #27 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	160
Anexo 77: Gráfica de ensayo #27 (Basalto grano 120, 50mm/min, 25°C) .....	160
Anexo 78: Tabla del ensayo #28 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	161
Anexo 79: Gráfica de ensayo #28 (Basalto grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	162
Anexo 80: Tabla del ensayo #29 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	163
Anexo 81: Gráfica de ensayo #29 (Basalto grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	164
Anexo 82: Tabla del ensayo #30 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	165
Anexo 83: Gráfica de ensayo #30 (Basalto grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	165
Anexo 84: Tabla del ensayo #31 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	166
Anexo 85: Gráfica de ensayo #31 (Basalto grano 120, 25mm/min, 25°C) .....	166
Anexo 86: Tabla del ensayo #32 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	167
Anexo 87: Gráfica de ensayo #32 (Basalto grano 120, 25mm/min, 25°C) .....	167
Anexo 88: Tabla 4 del ensayo #33 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	168
Anexo 89: Gráfica de ensayo #33 (Basalto grano 120, 25mm/min, 25°C) .....	169
Anexo 90: Tabla del ensayo #34 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	170
Anexo 91: Gráfica de ensayo #34 (Basalto grano 120, 25mm/min, 10°C) .....	171
Anexo 92: Tabla del ensayo #35 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	172
Anexo 93: Gráfica de ensayo #35 (Basalto grano 120, 25mm/min, 10°C) .....	173
Anexo 94: Tabla del ensayo #36 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	174
Anexo 95: Gráfica de ensayo #36 (Basalto grano 120, 25mm/min, 10°C) .....	175
Anexo 96: Tabla del ensayo #37 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	176
Anexo 97: Gráfica de ensayo #37 (Basalto grano 50, 50mm/min, 25°C) .....	176

Anexo 98: Tabla del ensayo #38 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	177
Anexo 99: Gráfica de ensayo #38 (Basalto grano 50, 50mm/min, 25°C) .....	177
Anexo 100: Tabla del ensayo #39 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	178
Anexo 101: Gráfica de ensayo #39 (Basalto grano 50, 50mm/min, 25°C) .....	178
Anexo 102: Tabla del ensayo #40 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	179
Anexo 103: Gráfica de ensayo #40 (Basalto grano 50, 50mm/min, 10°C) .....	180
Anexo 104: Tabla del ensayo #41 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	181
Anexo 105: Gráfica de ensayo #41 (Basalto grano 50, 50mm/min, 10°C) .....	181
Anexo 106: Tabla del ensayo #42 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	182
Anexo 107: Gráfica de ensayo #42 (Basalto grano 50, 50mm/min, 10°C) .....	182
Anexo 108: Tabla del ensayo #43 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	183
Anexo 109: Gráfica de ensayo #43 (Basalto grano 50, 25mm/min, 25°C) .....	183
Anexo 110: Tabla del ensayo #44 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	184
Anexo 111: Gráfica de ensayo #44 (Basalto grano 50, 25mm/min, 25°C) .....	184
Anexo 112: Tabla del ensayo #45 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	185
Anexo 113: Gráfica de ensayo #45 (Basalto grano 50, 25mm/min, 25°C) .....	185
Anexo 114: Tabla del ensayo #46 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	186
Anexo 115: Gráfica de ensayo #46 (Basalto grano 50, 25mm/min, 10°C) .....	187
Anexo 116: Tabla del ensayo #47 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	188
Anexo 117: Gráfica de ensayo #47 (Basalto grano 50, 25mm/min, 10°C) .....	189
Anexo 118: Tabla del ensayo #48 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	190
Anexo 119: Gráfica de ensayo #48 (Basalto grano 50, 25mm/min, 10°C) .....	191
Anexo 120: Tabla del ensayo #49 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	192

Anexo 121: Gráfica de ensayo #49 (Basalto UR grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	193
Anexo 122: Tabla del ensayo #50 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	194
Anexo 123: Gráfica de ensayo #50 (Basalto UR grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	195
Anexo 124: Tabla del ensayo #51 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	196
Anexo 125: Gráfica de ensayo #51 (Argilita grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	196
Anexo 126: Tabla del ensayo #52 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	197
Anexo 127: Gráfica de ensayo #52 (Argilita grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	197
Anexo 128: Tabla del ensayo #53 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	198
Anexo 129: Gráfica de ensayo #53 (Argilita grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	198
Anexo 130: Tabla del ensayo #54 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	199
Anexo 131: Gráfica de ensayo #54 (Canto Rodado grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	200
Anexo 132: Tabla del ensayo #55 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	201
Anexo 133: Gráfica de ensayo #55 (Canto Rodado grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	202
Anexo 134: Tabla del ensayo #56 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	203
Anexo 135: Gráfica de ensayo #56 (Canto Rodado grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	203
Anexo 136: Tabla del ensayo #57 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	204
Anexo 137: Gráfica de ensayo #57 (Caliza grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	204
Anexo 138: Tabla del ensayo #58 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	205
Anexo 139: Gráfica de ensayo #58 (Caliza grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	205
Anexo 140: Tabla del ensayo #59 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	206
Anexo 141: Gráfica de ensayo #59 (Caliza grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	206
Anexo 142: Tabla del ensayo #60 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	207
Anexo 143: Gráfica de ensayo #60 (Basalto grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	207

Anexo 144: Tabla del ensayo #61 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	208
Anexo 145: Gráfica de ensayo #61 (Basalto grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	208
Anexo 146: Tabla del ensayo #62 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	209
Anexo 147: Gráfica de ensayo #62 (Basalto grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	209
Anexo 148: Tabla del ensayo #63 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	210
Anexo 149: Gráfica de ensayo #63 (Basalto UR grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	210
Anexo 150: Tabla del ensayo #64 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	211
Anexo 151: Gráfica de ensayo #64 (Basalto UR grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	212
Anexo 152: Tabla del ensayo #65 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	213
Anexo 153: Gráfica de ensayo #65 (Basalto UR grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	213
Anexo 154: Tabla del ensayo #66 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	214
Anexo 155: Gráfica de ensayo #66 (Argilita grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	214
Anexo 156: Tabla del ensayo #67 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	215
Anexo 157: Gráfica de ensayo #67 (Argilita grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	215
Anexo 158: Tabla del ensayo #68 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	216
Anexo 159: Gráfica de ensayo #68 (Argilita grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	216
Anexo 160: Tabla del ensayo #69 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	217
Anexo 161: Gráfica de ensayo #69 (Canto Rodado grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	217
Anexo 162: Tabla del ensayo #70 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	218
Anexo 163: Gráfica de ensayo #70(Canto Rodado grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	218
Anexo 164: Tabla del ensayo #71 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante .....	219
Anexo 165: Gráfica de ensayo #71 (Canto Rodado grano 120, 50mm/min, 10°C) .....	220

## RESUMEN

En los últimos años el Ecuador ha tenido un gran desarrollo vial, de manera que es muy importante conocer uno de los factores principales que inciden en el deterioro de las capas asfálticas en las carreteras, como lo es la adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado mineral.

Este trabajo de titulación consiste en realizar una investigación aplicando un procedimiento experimental nuevo, empleando una prueba de corte directo a muestras de rocas con cierto tratamiento, pegadas con cemento asfáltico.

En un diseño experimental se analizó la incidencia de variar distintos factores de ensayo como temperatura, tiempo de aplicación de carga y finura de lija en dicha prueba.

El procedimiento se aplicó a 2 tipos de rocas de diferente composición mineralógica con un solo tipo de asfalto.

Los resultados obtenidos fueron analizados por el programa estadístico Statgraphics, con el cual se realizó un análisis de varianza que permitió establecer los niveles pertinentes en los distintos factores analizados, es decir temperatura: 10°C, velocidad de carga: 50mm/min y finura de lija: 120.

Posteriormente se amplió el procedimiento de trabajo para evaluar el daño ante el agua en muestras sin y con inmersión al agua a 5 tipos de rocas.

**Palabras Claves:** agregado mineral, ligante asfáltico, adherencia, desprendimiento, daño en agua, ensayo de corte.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Debido al gran desarrollo vial que ha tenido el Ecuador en los últimos años es prioritario realizar un estudio a profundidad de la adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado mineral, el cual es un punto primordial que incide en la durabilidad de las mezclas asfálticas.

Han habido numerosas investigaciones en las cuales se ha tratado de disminuir o solucionar los deterioros originados en los pavimentos, los cuales pueden darse por la falta de adherencia en el sistema ligante asfáltico - agregado mineral. Esta falta de adherencia disminuye la capacidad estructural de la mezcla, pudiendo originarse desprendimientos, los cuales van a afectar negativamente al pavimento, ya sea superficialmente o provocando el ingreso del agua a las capas inferiores de la vía. (Botasso, Balige, González, Bisio y Rebollo)

En el estudio de la adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado mineral se toman en cuenta un número considerable de variables, ya que es un tema complejo. La palabra adherencia viene del latín “adhaerere” que significa “aferrarse”. La adhesividad se define como la capacidad de un ligante para quedar fijo en el agregado, al que recubre sin peligro de desplazamiento, incluso en presencia de agua, tránsito y cambios bruscos de temperatura. (Botasso, et al.)

A fines de analizar la evaluación de la adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado mineral, se han desarrollado varios métodos, siendo tal vez el más importante empleado en el Ecuador la evaluación mediante una

valoración visual del desprendimiento, la cual internacionalmente se conoce como “stripping”.

El stripping o desnudamiento, es un mecanismo de destrucción que se basa en la separación del ligante asfáltico y el agregado mineral por la pérdida de adherencia debido al efecto del agua; sin embargo, estas pruebas de stripping evalúan la pérdida de adherencia causada por el efecto en agua sin considerar la adherencia “pura” entre el agregado y el asfalto en condiciones normales.

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

Es conocido que la construcción de carreteras y vías, y su adecuado mantenimiento afectan de manera positiva la economía de un país, motivo por el cual la población se puede trasladar a distintos lugares de manera rápida, ayudándose a las actividades de producción como el turismo y el traslado de productos para el comercio en menor tiempo, disminuyéndose así los costos de transporte.

En el Ecuador, durante el actual gobierno y a través del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), se han invertido aproximadamente 7000 millones de dólares en ejecución y rehabilitación vial en distintas provincias.

Dichas vías que han sido construidas o rehabilitadas con periodos de diseño de 10 a 20 años, en la práctica tienen que ser intervenidas mucho antes de dicho tiempo, por lo cual esto genera gran preocupación para el MTO ya que estos daños generan muchos gastos para su remediación, además de inseguridad e inconformidad en los usuarios.

Dada la importancia del fenómeno de la adherencia del sistema ligante asfáltico - agregado mineral, de la vinculación de este con el diseño por

humedad, y su incidencia en la capacidad estructural de las capas asfálticas el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil se motivó a realizar una investigación al respecto considerando el tipo de asfalto producido por la Refinería de Esmeraldas y diferentes tipos de agregados minerales con los cuales comúnmente se producen nuestras mezclas asfálticas.

### **1.3. Justificación del tema**

Conociendo el desarrollo vial que ha tenido el Ecuador en los últimos años, resulta de manera indispensable conocer a profundidad uno de los factores que inciden de manera significativa en el deterioro de las carreteras de asfalto, el cual es la adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado mineral.

La adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado mineral es el punto inicial para que la mezcla asfáltica tenga un buen desempeño y no se produzcan fallas como la más común causada por la falta de adherencia que son los desprendimientos. Aunque los agregados y el asfalto cumplan ciertos requisitos de calidad, generalmente dicha adherencia no es analizada de manera “pura”, sino como la pérdida de adherencia en las mezclas asfálticas a causa del efecto en agua.

La vigencia de estos temas se ve reflejada en que en los últimos 10 años se han acelerado las investigaciones sobre nuevas alternativas de ensayos de adherencia a nivel internacional.

Como actividad previa a este trabajo de investigación se realizó un Trabajo de Titulación, el cual consistió en confeccionar un “Estado del Arte en el Estudio de la Adherencia entre el Asfalto y el Agregado Mineral” elaborada por el Sr. Sebastián González Larrea el cual es de gran utilidad para continuar con este trabajo.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Evaluar la resistencia a la ligadura del sistema ligante asfáltico - agregado mineral mediante el ajuste de un procedimiento con una prueba de corte directo, empleando núcleos extraídos de diferentes tipos de rocas y cemento asfáltico AC-20 de la Refinería de Esmeraldas, variando además las condiciones más importantes del ensayo, como el tiempo de aplicación de carga, temperatura y textura de las muestras.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Estudiar las características y propiedades de cada uno de los agregados minerales que se va a utilizar en la investigación y el cemento asfáltico AC-20 producido en la Refinería de Esmeraldas.
- Ajustar un procedimiento mediante pruebas de corte directo a partir de un diseño de experimentos factorial para la evaluación de la adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado mineral.
- Aplicar el procedimiento ajustado a cinco tipos de rocas sin y con inmersión en agua, para evaluar la incidencia de esta en los diferentes agregados empleados.
- Analizar los resultados obtenidos de acuerdo a criterios estadísticos.

## **1.5. Alcance**

Este trabajo pretende desarrollar y aplicar un procedimiento simple que permita caracterizar de manera “pura” la adherencia en el sistema ligante asfáltico - agregado mineral mediante una prueba de corte directo, sin otras interferencias como ocurre en las mezclas con la trabazón de los diferentes agregados. Esta caracterización se reflejará mediante la medición de una resistencia a la ligadura con una prueba de corte aplicada a dos cilindros pequeños de roca pegados con cemento asfáltico. Así se podrá comparar la potencial variabilidad de esta resistencia en rocas con diferentes constituciones mineralógicas y determinar las que pudieran ofrecer un mejor comportamiento.

## **1.6. Metodología**

Esta investigación se va a realizar mediante un enfoque cuantitativo y de tipo experimental, ya que se basa en medir la resistencia a la ligadura que tienen dos cilindros pequeños de roca pegados con cemento asfáltico.

La investigación constará de 3 etapas, las cuales son:

1. Marco teórico.
2. Desarrollo experimental.
3. Análisis de resultados.

Cada una de estas etapas se va a dividir en distintas tareas específicas que se las va a mencionar a continuación:

- Marco teórico conceptual:
  - Estudio bibliográfico.

- Desarrollo experimental:
  - Extracción de núcleos de diferentes tipos de rocas, las cuales tienen diferente composición mineralógica.
  - Elaboración de las “pastillas” de roca, las cuales tienen como diámetro 50mm y altura entre los 25 a 30mm.
  - Aplicación del diseño de experimentos factorial para ajuste del procedimiento de ensayo.
  - Realización de las pruebas de corte a diferentes muestras de roca sin y con presencia de humedad.
  
- Análisis de resultados:
  - Comparación de los resultados obtenidos.
  - Conclusiones.
  - Recomendaciones.

## **CAPÍTULO II**

### **2. CONSIDERACIONES SOBRE EL FENÓMENO DE LA ADHERENCIA Y SU EVALUACIÓN**

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

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

El agregado mineral es un material inerte y de consistencia dura, el cual es utilizado en manera de partículas o fragmentos para la elaboración de mezclas asfálticas.

El comportamiento de las mezclas asfálticas depende en alto grado de las características que presentan los agregados; estos forman en la mezcla un esqueleto mineral discontinuo, sólido, resistente y suficientemente indeformable, de acuerdo con una granulometría predeterminada. (Celis y Deschamps, 2005)

Para que el agregado sea considerado idóneo en una mezcla asfáltica debe cumplir con varias características como: forma, limpieza, dureza, textura superficial, afinidad con el asfalto, entre otras.

Dentro de la mezcla asfáltica el agregado constituye entre el 90-95% en peso y entre el 75-85% en volumen, por lo cual este componente es el principal responsable de soportar las cargas a la que está sometida una carpeta asfáltica. Una elección correcta del agregado puede ayudar a la construcción de un pavimento flexible de buena calidad.

## 2.1.2. Clasificación del agregado según su origen

Los agregados según su origen se clasifican en 3 tipos:

- **Rocas Ígneas:** Las rocas ígneas o también llamadas eruptivas son las rocas más antiguas, que se forman por el proceso de enfriamiento del magma fundido en el ascenso de éste hacia la superficie. Este grupo se subdivide en 3 tipos: rocas intrusivas o plutónicas, rocas extrusivas o volcánicas y rocas filonianas. (Figura 2.1)
  - **Rocas intrusivas:** Se forman a partir del magma solidificado en el interior de la corteza terrestre, este se va enfriando y endureciendo lentamente, es así que se va formando una estructura cristalina. Como ejemplo de rocas intrusivas podemos mencionar el granito, la diorita y el gabro.
  - **Rocas extrusivas:** Estas rocas se forman a partir del magma que se encuentra en la superficie de la corteza terrestre, luego de una erupción volcánica. Esta roca tiene una estructura de tipo vidriosa, debido a que el magma se enfría rápidamente. Ejemplo de estas: la riolita, la andesita y el basalto.
  - **Rocas filonianas:** Estas rocas se solidifican en condiciones intermedias de profundidad entre los dos grupos rocas intrusivas y rocas extrusivas.



ROCAS INTRUSIVAS



ROCAS EXTRUSIVAS



ROCAS FILONIANAS

**Figura 2.1: Tipos de rocas ígneas**  
Fuente: Rocas y Minerales (López, 2009)

- **Rocas Sedimentarias:** Son rocas formadas por acumulación de sedimentos, ya sea por medios mecánicos o químicos. El sedimento puede estar compuesto por partículas minerales o fragmentos (areniscas y arcilla esquistosa), residuos de productos animales (algunas calizas), plantas (carbón), productos finales de una acción química o una evaporación (sal, yeso) o de la combinación de cualquiera de estos tipos mencionados. (Figura 2.2)

Existen dos términos que son los más usados a las rocas sedimentarias:

- **Rocas sedimentarias silíceas:** Son aquellas rocas que contienen un alto porcentaje de sílice.
- **Rocas sedimentarias calcáreas:** Son aquellas que tienen un alto porcentaje de carbonato de calcio (calizas).



**Figura 2.2: Roca sedimentaria (caliza)**

Fuente: Roca Sedimentaria (Mariluz y Haymarí, 2013)

- **Rocas Metamórficas:** Estas rocas son las que se forman a partir de un proceso que se denomina metamorfismo. Esto se da cuando las rocas sedimentarias o ígneas son sometidas a altas presiones, altas temperaturas o a reacciones químicas dentro de la tierra. (Figura 2.3)

Las rocas metamórficas pueden presentar dos tipos de texturas:

- **Foliadas:** Los gneises, esquistos (formadas por rocas ígneas), pizarra (formada por rocas sedimentarias).

- **No foliadas:** mármol (formado por calizas), cuarcita (formada por areniscas).



PIZARRA

ROCA FOLIADA



CUARCITA

ROCA NO FOLIADA

**Figura 2.3: Clasificación de las rocas metamórficas**

Fuente: Clasificación de las Rocas Metamórficas (Pérez)

A continuación se presenta un cuadro de clasificación general de rocas:

CLASIFICACION GENERAL DE ROCAS		
Clase	Tipo	Familia
Sedimentarias	Calcáreas	Caliza Dolomita
	Silíceas	Arcilla Esquistosa Arenisca Horsteno Conglomerado <sup>1</sup> Breccia <sup>1</sup>
Metamórficas	Foliadas	Gneis Esquisto Anfibolita Pizarra
	No Foliadas	Cuarcita Mármol Serpentina
Ígneas	Intrusivas (de grano grueso)	Granito <sup>2</sup> Sienita <sup>2</sup> Diorita <sup>2</sup> Gabbro Periodotita Piroxenita Hornablendita
	Extrusivas (de grano fino)	Obsidiana Pómez Tufa Riolita <sup>2,3</sup> Traquita <sup>2,3</sup> Andesita <sup>2,3</sup> Basalto <sup>2</sup> Diabasa

<sup>1</sup>También puede estar parcialmente, o completamente, compuesta de materiales calcáreos.  
<sup>2</sup>Aparece, frecuentemente, como roca porfírica.  
<sup>3</sup>Se incluyen bajo el termino general "felsita" cuando no se pueden determinar, cuantitativamente, los minerales constituyentes.

**Figura 2.4: Clasificación general de los agregados**

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente (MS-22)

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

Las características principales que se deben observar en los agregados para estos fines son las siguientes:

- **Tamaño:** Todas las mezclas asfálticas requieren que las partículas de los agregados estén dentro de cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en diferentes proporciones.

Los agregados según su tamaño pueden clasificarse en 3 tipos:

- **Agregado Grueso:** Sus partículas tienen un tamaño mayor o igual al N°4 (4,75mm).
- **Agregado Fino:** Sus partículas tienen un tamaño menor al N°4 (4,75mm).
- **Filler:** Sus partículas tienen un tamaño del pasante del tamiz N° 200 (0.075mm).

Vale señalar que la frontera limitada por el Tamiz N°4 es la más usual en Mecánica de Suelos. Otras instituciones adoptan criterios diferentes como es el caso del Instituto del Asfalto que emplea el Tamiz N°8. (Instituto de Asfalto MS-22)

- **Forma:** Existen varias formas de los agregados que van a favorecer como también pueden afectar en los pavimentos, estos pueden clasificarse en: redondeadas, angulares, lajas, alargadas, alargadas – lajas e irregulares. Una forma adecuada de los agregados es algo importante a controlar en el proceso de trituración. La angulosidad junto con la textura superficial influyen en la resistencia del esqueleto mineral, por su contribución al rozamiento.

- **Dureza:** La dureza es una de las características más importantes que deben tener los agregados para las mezclas asfálticas. Estos deben ser capaces de resistir la abrasión y la degradación durante todo el proceso de pavimentación y la vida útil del pavimento.
- **Textura superficial:** La textura superficial es una característica que determina la resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento, además de su trabajabilidad y resistencia final de la mezcla asfáltica.  
Si la textura es áspera, aumentará el coeficiente de fricción y con ello se tendrá una mayor resistencia debido a que va a existir menor movimiento entre partículas. Además el asfalto se adhiere de mejor manera a superficies rugosas que a las lisas.
- **Limpieza:** La limpieza de los agregados es muy importante porque dependiendo de esto, el material se va a comportar de manera adecuada, ofreciendo una mejor superficie para la interacción con el asfalto. El agregado debe estar exento de polvo, limpio y libre de partículas orgánicas.
- **Capacidad de absorción:** La capacidad de absorción de un agregado va a depender de la porosidad de éste. Si es muy poroso va a continuar absorbiendo asfalto luego de producirse la mezcla asfáltica en la planta y así quedará menos asfalto en su superficie para que se ligen las demás partículas. Debido a esto, en la práctica los agregados altamente porosos y absorbentes no son muy utilizados. Los ensayos utilizados para medir esta propiedad son el de Gravedad Específica y Absorción del Agregado.
- **Afinidad con el asfalto:** La afinidad del agregado con el asfalto es la capacidad que tiene el agregado a retener o desplazar al asfalto de su superficie en presencia de agua. Existen los agregados que tienen

una alta afinidad con el asfalto los cuales se conocen como hidrofóbicos, que pueden resistir los esfuerzos del agua y aceptan al asfalto en sus caras, y los agregados que tienen poca afinidad con el asfalto conocidos como los hidrofílicos que tienden a separarse del asfalto cuando están en presencia del agua para darle paso a ésta.

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

##### **2.1.4.1. Agregados básicos**

Los agregados básicos son los que están compuestos en gran porcentaje por carbonatos como la piedra caliza. El porcentaje de cuarzo u óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) que deben tener los agregados para que sean considerados básicos debe ser menor al 55%. (Botasso, Rebollo, Soengas, Balige, Bisio y Berardo, 2011)

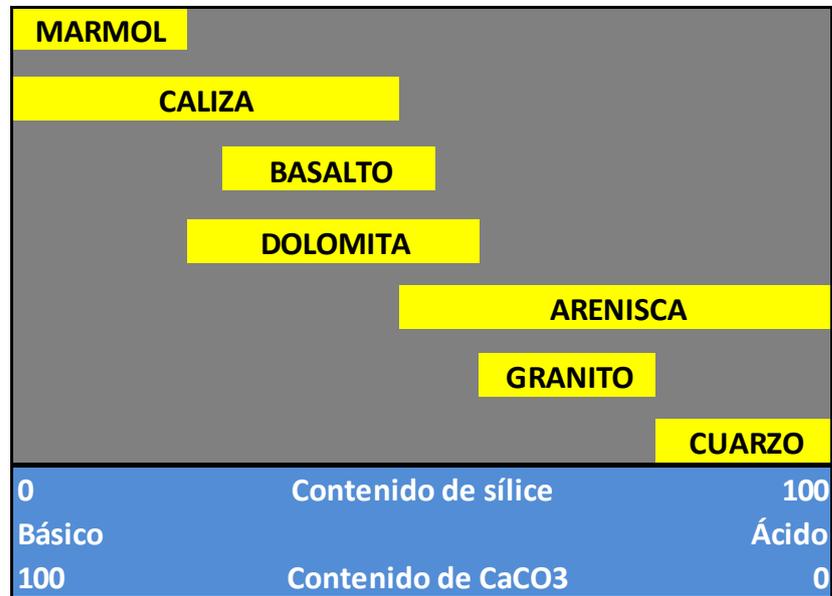
La superficie de estos agregados básicos debido a su composición tiende a cargarse positivamente cuando están en la presencia de agua, es decir, repele el agua por lo cual podemos también darle el nombre de agregados hidrofóbicos.

Los agregados básicos suelen presentar cierta atracción por los ácidos libres en los ligantes, y con ello una mejor adhesividad con los mismos.

##### **2.1.4.2. Agregados ácidos**

Los agregados ácidos tienen en su composición más del 55% de cuarzo u óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Debido a su acidez, la superficie de estos agregados se carga negativamente en presencia del agua, por lo tanto tienen una muy buena afinidad con ella y se los conoce como agregados hidrofílicos.

La adhesividad entre los agregados ácidos y el ligante asfáltico no es buena ya que en presencia del agua, ésta puede llegar a desplazar al ligante.



**Figura 2.5: Clasificación de los agregados según su composición química**

Fuente: Interacción Química del Asfalto y el Agregado, 2002

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

Tabla 2.1: 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 Ángeles (<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 ante el agua en prueba de tracción indirecta (>80%) Peladura de la mezcla en agua hirviendo (>95%)	

Fuente: Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), 2002

## 2.2. Ligante asfáltico

### 2.2.1. Generalidades

El asfalto es un producto el cual es obtenido de la destilación tanto natural como artificial del petróleo. Es el residuo sólido que queda una vez que se han extraído los componentes más ligeros y volátiles del petróleo.

Al asfalto podemos definirlo como un material cementante, que se presenta en forma de cuerpo viscoso o sólido dependiendo de su temperatura y de una coloración negra. Químicamente es conformado por una mezcla compleja de hidrocarburos con elevado peso molecular. Dichos

hidrocarburos básicamente formados de carbono e hidrógeno, tienen en su composición elementos como el azufre, nitrógeno, vanadio, níquel, silicio, titanio, entre otros.

En el campo de la ingeniería civil, el asfalto es utilizado principalmente para la elaboración de carreteras de pavimento flexible, ya que por su gran capacidad cementante e impermeabilidad es ideal para combinarse con los agregados minerales y formar las llamadas mezclas asfálticas.

### **2.2.2. Propiedades principales del ligante asfáltico**

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

- **Durabilidad:** La durabilidad es una propiedad física con la que se calcula el tiempo que el asfalto puede retener sus características originales cuando es sometido a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad que solo la podemos observar a través del comportamiento del pavimento, razón por la cual es difícil definirla solo como propiedad del asfalto. (Hernández, Molina y Reyes, 2007)
- **Adhesión:** La adhesión es la capacidad que tiene el asfalto para adherirse al agregado en la mezcla asfáltica. Se la define como la medida de los esfuerzos necesarios para romper los enlaces entre el ligante bituminoso y el agregado mineral.  
Para que haya adhesión tiene que haber afinidad entre las moléculas de ambos cuerpos. (Hernández, et al., 2007)
- **Cohesión:** Se define a la cohesión como una medida del esfuerzo de tracción requerido para romper el enlace entre las moléculas del ligante bituminoso.

Es la capacidad del asfalto para mantenerse firmemente en su puesto una vez que las partículas de agregado estén en el pavimento terminado.



**Figura 2.6: Posibles fallas entre el asfalto y el agregado**

Fuente: Gutiérrez y Ramírez, 2008

- **Endurecimiento:** El proceso de endurecimiento está comprendido de dos momentos. El primero es el más crítico, el cual ocurre en el proceso de mezclado, extensión y compactación de la mezcla asfáltica y el segundo momento corresponde al envejecimiento con el tiempo bajo la presencia de agentes atmosféricos desde que la mezcla está puesta en el firme.
- **Susceptibilidad térmica:** Todos los asfaltos con el aumento de temperatura se vuelven menos viscosos, tornándose casi líquidos y

con la disminución de ella se vuelven más viscosos llegando a una forma casi sólida.

A esta propiedad la conocemos como susceptibilidad a la temperatura y es de gran importancia, puesto que cuando estamos preparando la mezcla asfáltica es importante que se comporte de manera líquida para que pueda cubrir al agregado mineral y cuando ya está colocada la mezcla debe ser lo suficientemente viscosa para mantener a todas las partículas unidas. (Araiza, 2002)

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

**Tabla 2.2: Requisitos para la clasificación por viscosidad (60°C) de los cementos asfálticos en el Ecuador**

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, <sup>c</sup>	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN 915
Gravedad específica 25 °C/25 °C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD70
Índice de Penetración <sup>b</sup>		-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	--	1 200	--	2 000	ASTMD 2171
Cambio de masa,	% w/w	--	1,5	--	1,0	--	1,0	--	1,0	--	1,0	ASTMD 2872
Ductilidad <sup>a</sup> , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916
<sup>a</sup> 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. <sup>b</sup> Índice de penetración = $\frac{1952 - 500 \log pen - 20 SP}{50 \log pen - SP - 120}$ donde: pen = penetración a 25 °C, 100 g, 5 s SP = punto de ablandamiento (°C) ASTM D36 <sup>c</sup> Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un método alternativo a la solubilidad en TCE.												

Fuente: Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2515 Enmienda 1, 2014

Usualmente el asfalto empleado en el país comprende a un AC-20 producido en la Refinería de Esmeraldas.

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

### **2.3.1. Generalidades**

La adhesividad entre dos superficies es el proceso en el cual las distintas partículas de ambas o sus caras se mantienen unidas por fuerzas de valencia, esta adherencia determina la tendencia de ambos materiales con moléculas diferentes a enlazarse uno respecto a otro.

En la adherencia también incide la afinidad que existe entre las partículas moleculares de dos cuerpos, en este caso los dos cuerpos son el ligante asfáltico y el agregado mineral. Su permanencia va a depender de la protección que tenga el agregado y de las capas estructurales frente a los procesos de degradación.

Este fenómeno de adherencia se produce en la superficie de contacto de ambos materiales entre dos fases, por lo que sí existe un problema de adherencia será en la interfaz. El nitrógeno que está presente en el asfalto va a favorecer a la adhesividad con los agregados y los grupos funcionales controlan sus propiedades ya que determinan la estabilidad de permanecer unidas las superficies para formar una red, con capacidad de resistir esfuerzos. (Gamba, Mercado, 2004)

Este proceso puede ser medido por varios métodos como por ejemplo: el enfoque del ángulo de contacto o también de manera práctica con el ensayo de tracción adecuado.

### 2.3.2. Mecanismos de adherencia

Existe una alta probabilidad en la cual la adherencia que ocurra entre el ligante y el agregado corresponda a una combinación de mecanismos. Estos mecanismos se pueden clasificar en una de tres categorías: entrelazamiento mecánico, adhesión fisicoquímica causada por la energía libre superficial de material y la unión causada por reacciones químicas en la interfaz. (Moraes, Velásquez y Bahía, 2010)

Las principales teorías que explican la adherencia en el sistema asfalto – agregado son:

- **Teoría mecánica:** La teoría mecánica mezcla las fuerzas del asfalto en los poros y las irregularidades de la superficie total. (Bahía, Hanz, 2007)

Indica que la unión existente entre el asfalto y el agregado mineral se ve afectada por las propiedades físicas de los áridos como son la porosidad y la textura, además del recubrimiento superficial. (Moraes, et al., 2010)

La teoría mecánica describe el fenómeno de adhesión más intuitiva y tradicionalmente, implica el agarre mecánico del material adhesivo en las cavidades, poros y asperezas de la superficie sólida a escala macroscópica. (Allan, 1992; Schultz y Nardin, 1994)

- **Teoría química:** La teoría química se basa en que la adherencia depende del pH y los grupos funcionales de los dos cuerpos que son el agregado mineral y el asfalto.
- **Teoría de la frontera debilitada:** Esta teoría se conoce comúnmente como la teoría de las capas límites débiles y afirma que las uniones adhesivas fallan, ya sea en el agregado o el asfalto, debido a la

presencia de una región de interfaz de baja resistencia cohesiva; es decir que la falla siempre ocurre por el eslabón más débil.

Esta teoría es utilizada como respaldo para cualquier situación de adhesión que no puede ser explicada por otras razones.

Bajo peso molecular que conlleva a una baja fuerza cohesiva, contaminantes en la superficie como algunos compuestos orgánicos y agua son una causa frecuente de capas límites débiles.

- **Teoría termodinámica:** Estudia la atracción que existe entre el agregado, el asfalto y el agua causada por las diferencias en la tensión superficial. (Moraes, et al., 2010)

La adherencia se relaciona con la energía superficial del sistema asfalto - agregado. El humedecimiento de la superficie del agregado o la extracción del asfalto de la superficie total es causado por cambios en la energía libre del sistema. Cambios en la vinculación debido a la introducción de otros materiales (por ejemplo agua o aire) al sistema. (Bahía, et al., 2007)

Estas teorías y mecanismos asociados que se mencionan no son exclusivamente independientes, muchos investigadores están de acuerdo en que una combinación de mecanismos se lleva a cabo.

En general varios factores afectan la adhesión del asfalto y el agregado, incluyendo la tensión en la interfaz entre estos, la composición química, la viscosidad del ligante, la textura del agregado, la porosidad, la limpieza, la temperatura del agregado mineral y el contenido de humedad que hay al momento de realizar la mezcla.

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

Los mecanismos de falla están asociados a la disminución de la capacidad estructural asociado a problemas de la adherencia.

Uno de los principales mecanismos de falla asociados a la humedad es el stripping.

Una de las principales razones del deterioro de los pavimentos se da debido al daño en agua, que tiene como definición la reducción en la adherencia entre el asfalto y el agregado.

La presencia de agua en los poros del agregado mineral y en la interfaz entre el asfalto y el agregado es el factor principal en los problemas relacionados al desnudamiento o “stripping”, como también la pérdida de adhesividad.

Los términos para describir los mecanismos de falla asociados al “stripping” son:

- **Emulsificación espontánea:** El agua que se encuentra sobre la película del ligante (emulsión de fase invertida), provoca una resistencia cohesiva débil del asfalto.
- **Desplazamiento:** Es cuando el ligante se mueve de la superficie del agregado, esto es provocado por el agua que se introduce a través de una rotura de la película.
- **Despegue:** Similar al desplazamiento a diferencia que en este caso no hay una ruptura obvia de la película del ligante, sino solo la separación del ligante de la superficie del agregado por una delgada capa de agua.

- **Socavación hidráulica:** Debido a las cargas de tráfico que hay en la vía, el agua se presuriza y esta golpea y erosiona la película de asfalto que cubre al agregado.

Otros importantes mecanismos asociados al daño en agua son:

- **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.
- **Destrucción ambiental:** Causada por el pH del agua que se encuentra dentro del agregado o del ligante, que va a afectar la adherencia que haya entre estos, así como el envejecimiento del asfalto. Los cambios de temperatura que existan van a producir cambios volumétricos en el agua atrapada.

Los factores que influyen para que exista daño en agua son los siguientes: propiedades físicas y químicas del agregado mineral, contenido de asfalto, granulometría de la mezcla asfáltica, control de calidad en la planta, el diseño de la vía, el tipo de asfalto que se utiliza.

El daño en el pavimento se ve incrementado por las cargas cíclicas del tráfico, que al hacer fallar al enlace adhesivo, hace que el asfalto sea transportado hacia la superficie del agregado y se mantenga en forma de manchas. Al quedar el agregado sin la capa de asfalto que lo cubría, se presentarán en la carpeta asfáltica problemas de fatiga, pérdida de cohesión y adherencia, teniendo como consecuencia pérdida de la resistencia y grandes deformaciones hasta llegar a la total desintegración. (Gamba, et al., 2004)

#### **2.3.4. Influencias del asfalto y del agregado mineral sobre la adherencia**

La adherencia entre el asfalto y el agregado mineral es de gran importancia para las mezclas asfálticas, ya que se pueden formar fenómenos fisicoquímicos en la superficie de los agregados empleados en las carreteras.

Tanto la textura como la porosidad en el agregado, más la tensión superficial, la viscosidad y el espesor de película del asfalto, son propiedades físicas que influyen en la adherencia entre estos materiales. También hay que realizar el análisis de los factores químicos ya que son tan importantes como los físicos.

##### **2.3.4.1. Efecto de las propiedades del agregado mineral**

En el tema de la adherencia las propiedades del agregado mineral tienen mayor impacto que las propiedades del asfalto. Algunas características físicas como la forma del agregado, capacidad de adsorción, tamaño y volumen de poros, y las características químicas como su composición (acidez o alcalinidad), entre otras, son propiedades que repercuten en el daño por humedad. (Moraes et al., 2011)

##### **Composición mineralógica**

Algunos tipos de agregados minerales pueden ser inadecuados para las mezclas asfálticas debido a su composición química. La composición química del agregado es una característica que afecta sustancialmente a la adherencia en el sistema asfalto - agregado.

Los agregados minerales, poseen unas cargas superficiales descompensadas, que producen una tensión superficial. Cuando los agregados son cubiertos por líquidos con polaridad contraria, satisfacen su necesidad de energía y forman un enlace adhesivo. El líquido que sea capaz de compensar la máxima necesidad de energía es el que posee la mayor capacidad adhesiva y está en capacidad de desplazar a otro líquido. (Gamba et al., 2004)

Cuando un agregado está cubierto por asfalto, el agregado adsorbe algunos componentes del asfalto como los sulfóxidos y ácidos carboxílicos, ya que estos componentes tienen mayor afinidad por los agregados. A su vez, algunos hidrocarburos aromáticos tienen poca afinidad con las superficies de los agregados. Por lo tanto, el tipo y las cantidades de los componentes adsorbidos afectan el grado de adhesión, y varios agregados desarrollan lazos de diferente fuerza. (Moraes et al., 2011)

Los agregados minerales según su composición química se pueden clasificar en agregados básicos y ácidos.

Ciertos agregados por naturaleza, tienen una excesiva afinidad por el agua, lo que puede llevar a que el agua desplace al asfalto pegado al agregado en la mezcla. Esta situación ya se presentó en el numeral 2.1.4.

### **Propiedades físicas del agregado que influyen en la adherencia**

- **Rugosidad superficial:** La rugosidad superficial es un factor positivo para conseguir una mayor adherencia, siempre y cuando haya una verdadera unión entre los componentes del pavimento. Es conocida como una magnitud muy importante para valorar la calidad de la adherencia con respecto a la superficie. (Gamba et al., 2004)

Esta propiedad repercute tanto en la envoltura como en la resistencia adhesiva. La envoltura puede ser obstaculizada por la humedad y el aire acumulado en las grietas de la superficie del agregado.

Las superficies rugosas, y por lo tanto, con mayor área de contacto, son ideales para tener una mayor fuerza adhesiva en el sistema asfalto - agregado, desarrollan más fricción y son más estables; mientras que las superficies lisas reducen la fricción entre las partículas y hace que entre ellas se desarrolle más fuerza tensorial.

- **Porosidad:** La porosidad es otra propiedad del agregado que influye significativamente en el tema de la adherencia, ya que facilita el anclaje que tendrá el asfalto en el agregado mineral. La cantidad de poros, el tamaño de ellos, y su distribución pueden determinar el grado y la naturaleza de adsorción que el ligante asfáltico tendrá para penetrar en el agregado, consiguiendo así una unión física con éste.

Al calentarse la mezcla, el aire contenido en los poros del agregado es expulsado con el calor y al enfriarse los vacíos absorben el asfalto. (Gamba et al., 2004)

Por lo general, los poros del agregado no son del mismo tamaño y tampoco tienen la misma distribución, pero según investigaciones realizadas, (Lee, 1953), se han obtenido correlaciones sobre un óptimo tamaño de poros para la absorción del asfalto obteniendo así que en agregados con tamaños de poros mayores a 0.5 micrones tienen una influencia directa sobre la absorción del asfalto.

- **Limpieza:** Otros factores como el polvo o la humedad presente en los agregados minerales que serán utilizados para las mezclas asfálticas dificultan la penetración que tendrá el ligante asfáltico en el agregado, ocasionando así una mala adherencia entre estos materiales.

### **2.3.4.2. Efecto de las propiedades del asfalto**

Las características del aglutinante de asfalto pueden influir en la cohesión del mástico y en la adherencia en el sistema asfalto - agregado. Las propiedades del aglutinante de asfalto que pueden influir en el enlace entre el asfalto y el agregado son: la química del asfalto (polaridad y la constitución del asfalto), la viscosidad, el espesor de la película y la energía superficial. La fuerza cohesiva de la matriz de asfalto en presencia de humedad también está influenciada por la naturaleza química del ligante y técnicas de procesamiento. (Moraes, et al., 2011)

Los asfaltos envejecidos son más propensos al daño por humedad (Robertson, 1991). Los asfaltos que contienen nitrógeno y cetonas son menos susceptibles al daño por humedad (Petersen, Plancher, Ensley, Venable y Miyake, 1977).

La fuerza de unión está directamente relacionada con el espesor de la película de asfalto. Si es que la película es gruesa el asfalto tiende a fallar por cohesión y si la película es delgada, la falla tiende a ser por adhesividad.

#### **Composición química**

La composición química está constituido por cadenas de moléculas fundamentalmente compuestas por: carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno y complejos de vanadio, níquel, hierro, calcio y magnesio.

Esta composición química comprende dos grupos importantes: los asfaltenos y los maltenos (saturados, aromáticos y resinas).

Los cuales se detallarán a continuación:

- **Asfaltenos:** Son estructuras de compuestos aromáticos de color negro o marrón que contienen además del carbón otros elementos químicos, en general son compuestos polares, de alto grado molecular de 103 – 105 unidades de masa atómica. Los asfaltenos son los responsables de la dureza del ligante asfáltico. Los asfaltenos son muy adherentes, se encuentran rodeados por una cortina de resinas lo cual hace que no intervengan directamente en la adherencia con los materiales pétreos. Su presencia es fundamental en las propiedades mecánicas del asfalto, pues el alto poder de adsorción de las resinas proporciona a su núcleo una alta rigidez. (León, et al., 2006)
  
- **Maltenos:** Son sustancias que están compuestas por 3 grupos: resinas, aromáticos y saturados. Son compuestos muy polares de color marrón o marrón claro, al igual que los asfaltenos. Los maltenos tienen menor contenido de nitrógeno, oxígeno y azufre.
  - **Resinas:** Son cuerpos translúcidos, semisólidos y solubles en n-heptano (Shell bitumen, 1991). Las resinas son fuertemente adhesivas, actúan como peptizantes de los asfaltenos, haciendo que el betún sea estable.
  
  - **Aromáticos:** Representan en mayor proporción el medio de dispersión de los asfaltenos. Son líquidos viscosos de color café oscuro (Shell bitumen, 1991). Constituyen del 40 – 65% de la composición de los asfaltos, tienen menor peso molecular.
  
  - **Saturados:** Son cadenas lineales y/o ramificadas. Son compuestos NO polares. Tienen una muy baja reactividad. Comprenden entre el 5 y 20% del asfalto, son de color blanquecino (Shell bitumen, 1991).

Los asfaltos con gran cantidad de saturados y aromáticos serán más resistentes al envejecimiento y más durables, pero así mismo serán muy susceptibles a deformaciones en temperaturas ordinarias. (León, et al., 2006)

De acuerdo a información suministrada por el tutor de este trabajo, la composición SARA representativa del asfalto ecuatoriano puede ser la mostrada en el siguiente cuadro:

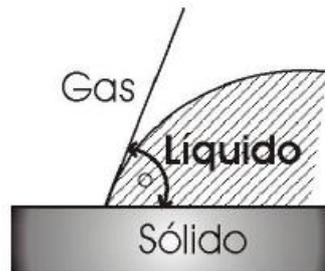
**Tabla 2.3: Composición SARA representativa del asfalto ecuatoriano**

MUESTRA	TIPO DE ENSAYO	RESULTADOS POR FRACCIÓN SARA, Wt %			
		Saturados	Aromáticos Naftenos	Aromáticos Polares	Asfaltenos
Asfalto Original	ASTM D 4124 por latroscan	13	33	35	19

Fuente: Información suministrada por el tutor de este trabajo.

### **Propiedades físicas del asfalto que influyen en la adherencia**

- **Tensión superficial:** Se basa en el desequilibrio de las fuerzas de atracción entre las moléculas de la superficie. Las moléculas que se encuentran en el interior son atraídas en todas las direcciones, mientras que las moléculas de la superficie son atraídas solo hacia adentro, esto hace que se genere una tensión en la superficie.



**Figura 2.7: Esquema del cubrimiento del agregado mineral por el asfalto**

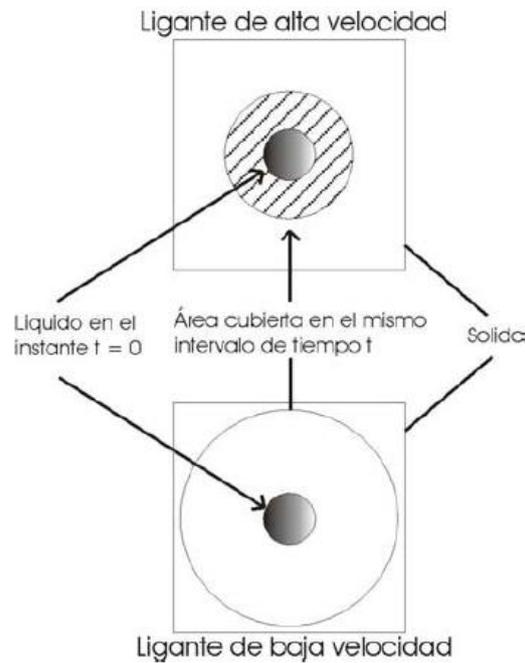
Fuente: Gamba, et al., 2004.



**Figura 2.8: Representación esquemática de la influencia de la tensión superficial sobre el cubrimiento producido por un líquido.**

Fuente: Gamba, et al., 2004

- **Viscosidad:** Depende de la temperatura a la cual esté sometido el asfalto e indica el grado de movilidad molecular y la magnitud de las fuerzas de atracción en los líquidos. Si se aumenta la temperatura se van a disminuir las fuerzas intermoleculares y la tensión superficial del líquido. Su resistencia al agua es mayor, a mayor viscosidad y viceversa. (Gamba, et al., 2004)



**Figura 2.9: Influencia de la viscosidad del asfalto sobre el cubrimiento de un líquido sobre un sólido**  
 Fuente: Gamba y Mercado, 2004.

- Envoltura y cubrimiento:** El cubrimiento depende de la atracción entre las moléculas del ligante asfáltico y el agregado, en comparación con la atracción entre las moléculas del interior del ligante. La capacidad de envoltura del ligante aumenta a medida que se disminuye la tensión superficial.

El ángulo de contacto entre el árido y el ligante afecta el cubrimiento del agregado por el asfalto. Entre mayor sea este, habrá un mejor cubrimiento del árido por el ligante, facilitando así una mejor adherencia. (Gamba, et al., 2004)

## **CAPÍTULO III**

### **3. METODOLOGÍA DE TRABAJO**

#### **3.1. Introducción**

Aplicar un procedimiento nuevo que se está poniendo a punto en el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil para evaluar la adherencia del sistema ligante asfáltico - agregado mineral a partir de la realización de una prueba de corte directo, a dos pastillas de agregados de diámetro 5cm, pegadas con asfalto, bajo ciertas condiciones experimentales.

Por los aspectos ya explicados en el Capítulo anterior, se empleará para este estudio agregados minerales, de dos tipos: caliza procedente de la cantera de Huayco y basalto procedente de la cantera de Chivería, ambas en la provincia del Guayas. Como asfalto se usará el AC-20 producido en la Refinería de Esmeraldas, que es el utilizado generalmente en el Ecuador.

Los resultados obtenidos serán analizados por el programa estadístico programa Statgraphics Centurión XV, 2006, desarrollado por StatPoint, Inc, con el cual se establecerán los parámetros de ensayos óptimos y con ello posteriormente se realizará un análisis de daño en agua a 5 tipos de rocas.

### 3.2. Procedimiento de preparación de pastillas y ensayo de corte directo

A continuación se explicará el procedimiento de la preparación de las pastillas y el respectivo ensayo de corte directo:

1. Barrenar núcleos de roca de 5 centímetros de diámetro. Se deberán desechar núcleos con fisuras o desgarraduras en las superficies cilíndricas. Para ello se emplearon brocas especiales de  $2\frac{1}{4}$ " de diámetro. (Figura 3.1)



**Figura 3.1: Roca recién barrenada**

Fuente: Fotografía de los autores

2. Cortar los núcleos en forma de "pastillas" de 2.5 a 3 centímetros de espesor con una máquina cortadora con cuchilla para hormigón. Puede emplearse una maquina amoladora para eliminar cualquier irregularidad o marca de la cuchilla de la cortadora. (Figura 3.2)



**Figura 3.2: Proceso de corte de núcleos**

Fuente: Fotografía de los autores

3. Darle una buena terminación y uniformidad a la superficie haciendo totalmente plana la cara de la pastilla que se pondrá en contacto con el asfalto, mediante un procedimiento de lijado con una lija en base de tejido se le dará la textura correspondiente al grano que se seleccione ya sea 50 o 120. (Figura 3.3)



**Figura 3.3: Lijado de pastillas de roca**

Fuente: Fotografía de los autores

4. Lavar las pastillas de roca con agua destilada para eliminar el polvo acumulado. (Figura 3.4)



**Figura 3.4: Lavado manual de pastillas**

Fuente: Fotografía de los autores

- Colocar las pastillas en un limpiador ultrasónico con agua destilada a 60°C por 60 minutos para remover cualquier residuo del proceso de corte y normalizar la superficie del agregado a su condición original. Luego dichas pastillas se dejaron en un local climatizado para su escurrimiento y secado superficial. (Figura 3.5)



**Figura 3.5: Lavado con limpiador ultrasónico**

Fuente: Fotografía de los autores

- Recubrir con papel aluminio el contorno de las pastillas para evitar en lo posible que éstas se ensucien al momento de pintarlas con el asfalto. Dicho papel se aseguró mediante un alambre fino. (Figura 3.6)



**Figura 3.6: Pastillas cubiertas con papel aluminio**

Fuente: Fotografía de los autores

7. Secar las pastillas por 24h a 110°C en un horno de convección forzada.  
(Figura 3.7)



**Figura 3.7: Proceso de secado de las pastillas en el horno**  
Fuente: Fotografía de los autores

8. Calentar las pastillas a continuación por 2h a 150°C en el horno, antes de aplicar el asfalto. (Figura 3.8)



**Figura 3.8: Aumento de la temperatura a 150°C**  
Fuente: Fotografía de los autores

9. Pintar con asfalto (estado original) previamente calentado a 150°C la superficie seleccionada de la pastilla. Dicha superficie debe quedar cubierta de manera bondadosa. Para este proceso se empleó una brocha convencional de 19mm de ancho. (Figura 3.9)



**Figura 3.9: Pintado de las pastillas**

Fuente: Fotografía de los autores

10. Colocar las pastillas en un horno de convección forzada a 135°C por 2h para lograr que la roca absorba la cantidad de asfalto que le corresponda y que dicho asfalto adquiera un endurecimiento similar al producido por la planta en caliente más el proceso de extensión y compactación. (Figura 3.10)



**Figura 3.10: Pastillas con asfalto en el horno a 135°C**

Fuente: Fotografía de los autores

11. Pegar cuidadosamente las dos pastillas seleccionadas del mismo tipo de roca, aplicándole cierta presión a las pastillas utilizando una prensa mecánica. De esta forma el asfalto excesivo escurre. Las dos pastillas formaran un “sándwich” que debe conservar una única forma cilíndrica. Con antelación se habían preparado dos baterías de 4 prensas cada una, para realizar este paso. (Figura 3.11)



**Figura 3.11: Pegado de las pastillas en la prensa mecánica**  
Fuente: Fotografía de los autores

12. Dejar el “sándwich”, conformado por dos pastillas pegadas con asfalto, en la prensa mecánica durante 24h a la temperatura ambiente. (Figura 3.12)



**Figura 3.12: Sándwiches de roca en las prensas mecánicas**  
Fuente: Fotografía de los autores

13. Sacar el “sándwich” de la prensa mecánica y retirar el papel aluminio que se colocó alrededor de cada pastilla. De ser necesario lijar cuidadosamente el contorno del “sándwich” para retirar cualquier residuo de asfalto. (Figura 3.13)



**Figura 3.13: Retiro del alambre y papel aluminio**

Fuente: Fotografía de los autores

14. Colocar el “sándwich” en una cámara térmica con temperatura regulable (en este caso del equipo NAT) durante 2h, a la temperatura de ensayo de la muestra ya sea a 25°C ó 10°C. (Figura 3.14)



**Figura 3.14: Muestras de roca en el NAT**

Fuente: Fotografía de los autores

15. Introducir el “sándwich” cuidadosamente en el equipo de corte. (Figura 3.15)



**Figura 3.15: Muestra en el equipo de corte**  
Fuente: Fotografía de los autores

16. Ensayar el “sándwich” en una prensa con velocidad de recorrido variable (Humboldt Modelo HM – 2800 Master Loader), a las velocidades establecidas por el diseño experimental. (25mm/min ó 50mm/min). (Figura 3.16)



**Figura 3.16: Ensayo de la muestra**  
Fuente: Fotografía de los autores

17. Obtener a través del video puesto en cámara lenta los valores de carga y deformación para poder graficar dichos valores, además de obtener los máximos correspondientes.

### **3.3. Características de los materiales a utilizar en la prueba**

#### **3.3.1. Características de los agregados minerales**

##### **3.3.1.1. Caliza**

**Tabla 3.1: Características del agregado (piedra caliza)**

<b>Gravedad específica de masa</b>	2,597
<b>Gravedad específica de s.s.s.</b>	2,63
<b>Gravedad específica aparente</b>	2,686
<b>Absorción (%)</b>	1,28
<b>Durabilidad ante sulfato de sodio (%)</b>	1,2
<b>Abrasión de Los Ángeles (%)</b>	22,5

Fuente: Información suministrada por el tutor de este trabajo

##### **3.3.1.2. Basalto**

**Tabla 3.2: Características del agregado (piedra basalto)**

<b>Gravedad específica de masa</b>	2,931
<b>Gravedad específica de s.s.s.</b>	2,941
<b>Gravedad específica aparente</b>	2,961
<b>Absorción (%)</b>	0,34
<b>Durabilidad ante sulfato de sodio (%)</b>	0,7
<b>Abrasión de Los Ángeles (%)</b>	19,5

Fuente: Información suministrada por el tutor de este trabajo

### 3.3.2. Características del cemento asfáltico

Tabla 3.3: Características del cemento asfáltico AC-20

PROPIEDAD	NORMA	UNIDAD	RESULTADO	NTE INEN 2515:2010 / Enmienda 1			
				AC 20		AC 30	
				Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Penetración, 25 °C, 100g.,5s.	ASTM D-5	0.1 mm	64				
Punto de Ablandamiento A y B	ASTM D-36	°C	53,0				
Índice de Penetración	NLT 181	-	0,1	-1,5	+1,0	-1,5	+1,0
Gravedad Específica, 25 °C/25 °C	ASTM D-70	-	1,015	Informe		Informe	
Flash Point, Copa Cleveland	ASTM D-92	°C	296	232		232	
Viscosidad Dinámica 60 °C	ASTM D-4402	Pa.s	204,0	160	240	240	360
Viscosidad Cinemática, 135 °C	ASTM D 2170	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	435,0	300		350	
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%w		99		99	
<b>ENVEJECIMIENTO RTFOT</b>							
Pérdida de masa	ASTM D-1754	%w/w			1,0		1,0
Penetración, 25 °C, 100g.,5s.	ASTM D-5	0.1 mm	44				
% Penetración del Envejecido		%	69				
Ductilidad,25°C, 5cm/min	ASTM D 113	cm	55	50		40	
Viscosidad Dinámica 60 °C	ASTM D 4402	Pa.s	622,4		800		1.200

Fuente: Información suministrada por el tutor de este trabajo

### 3.4. Diseño de experimento

#### 3.4.1. Generalidades

En este caso se empleó un diseño  $2^k$  con 3 réplicas (sin puntos centrales), en el cual se considerará 4 factores con 2 niveles cada uno, siendo así  $2^4$  tratamientos o puntos de diseño, estructurados según la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Factores y niveles para el Diseño de Experimento

FACTORES	NIVELES	
	-1	+1
A – Tipo de agregado	Caliza	Basalto
B – Temperatura	10°C	25°C
C – Velocidad de carga	25mm/min	50mm/min
D- Textura (grano de lija)	50	120

Fuente: Tabla elaborada por los autores

### 3.4.2. Anova del diseño factorial $2^k$

La suma de cuadrados totales ( $SC_T$ ) en el diseño factorial  $2^4$  se calcula como:

$$SC_T = \sum_{i=1}^{n2^k} Y_i^2 - \frac{Y.^2}{n2^k} \quad (\text{Ecuación})$$

Y tiene  $n2^k - 1$  grados de libertad, donde el subíndice  $i$  corre sobre el total de observaciones. La suma de cuadrados del error ( $SC_E$ ) se obtiene por diferencia y tiene  $2^k(n - 1)$  grados de libertad. Con estas dos sumas de cuadrados y las de los efectos, dadas por la (ecuación) se procede a escribir la tabla de ANOVA.

**Tabla 3.5: Diseño factorial  $2^4$  y sus efectos de interés,  $k \leq 4$**

Notación de Yates	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD
(1)	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
a	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+
b	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+
ab	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+
c	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-
ac	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-
bc	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-
abc	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-
d	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-
ad	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-
bd	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-
abd	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-
cd	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+
acd	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+

<b>bcd</b>	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+
<b>abcd</b>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Fuente: Gutiérrez y De la Vara, 2008

### 3.4.3. Programa para el análisis estadístico

En este estudio se utilizó para el procesamiento de la información experimental el programa Statgraphics Centurión XV, 2006, desarrollado por StatPoint, Inc.

Todos los reportes mostrados como parte del diseño de experimento corresponden a los resultados y juicios emitidos por dicho software.

## 3.5. Resultados de los experimentos

### 3.5.1. Ejemplo de procedimiento de los datos obtenidos en una prueba

Se expone a continuación como ejemplo el procedimiento aplicado al ensayo #34 correspondiente a un basalto. Análisis similares se aplicaron a todas las muestras ensayadas.

#### **PIEDRA BASALTO ENSAYO #34**

*Grano de lija = 120*

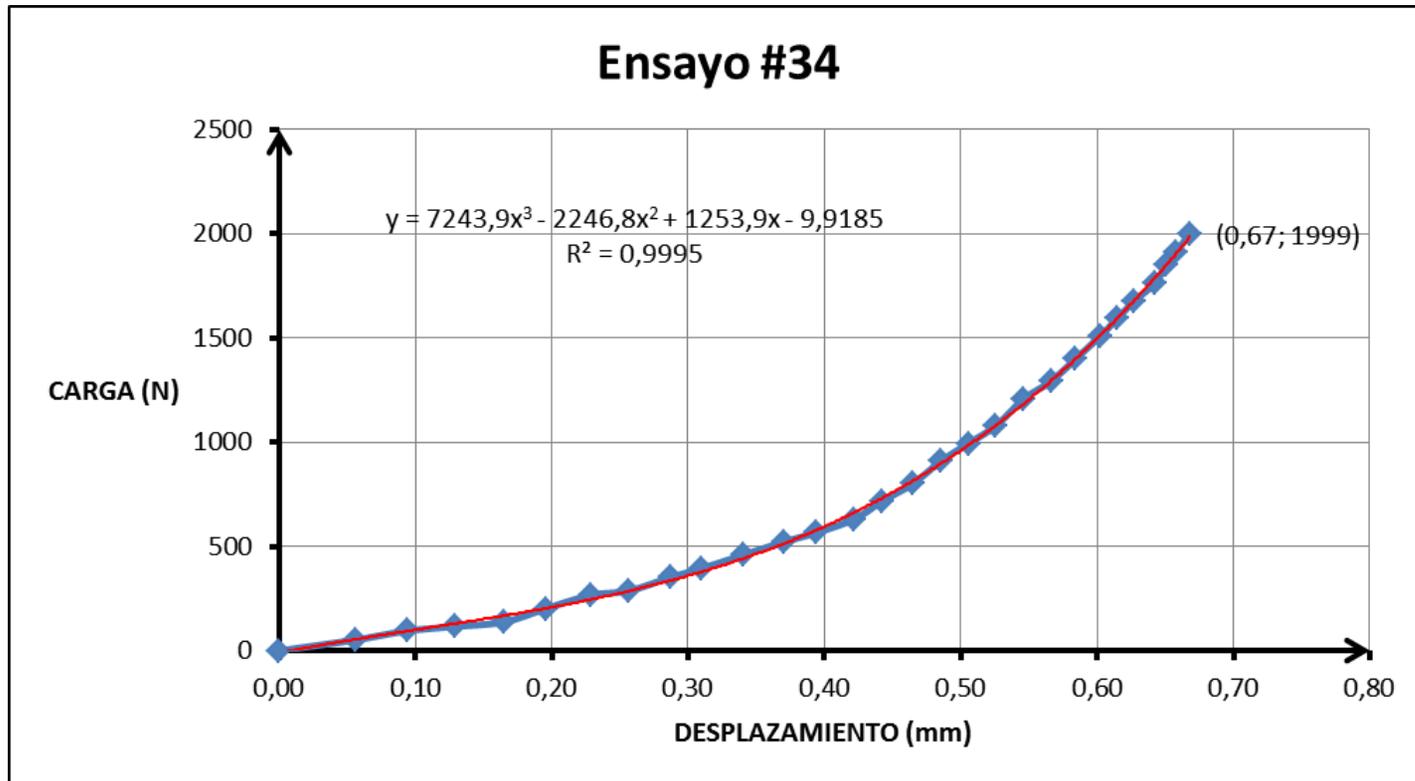
*Velocidad de carga = 25mm/min*

*Temperatura = 10°C*

**Tabla 3.6: Desplazamiento y Carga (Basalto, Ensayo #34)**

<b>DESPLAZAMIENTO (mm)</b>	<b>CARGA (N)</b>
0,000	0
0,056	52
0,094	95
0,130	117
0,165	138
0,196	202
0,229	266
0,257	288
0,287	352
0,310	395
0,340	459
0,371	523
0,394	566
0,422	630
0,442	716
0,465	801
0,485	908
0,505	994
0,526	1079
0,546	1208
0,566	1293
0,584	1400
0,602	1507
0,615	1593
0,627	1678
0,643	1764
0,650	1849
0,658	1913
0,668	1999

Fuente: Tabla de resultados de Excel de los autores



**Figura 3.17: Gráfica Carga (N) vs. Deformación (mm). Basalto, Ensayo #34**

Fuente: Gráficas del Diseño de Experimento

*Carga máxima de rotura* = 1999N

*Desplazamiento máximo* = 0,668mm

$$\text{Esfuerzo cortante máximo} = \frac{\text{Carga}}{\text{Área}} = 978,4\text{kPa}$$

Para el cálculo del área bajo la curva de la grafica se integró la ecuación de la curva de ajuste:

$$\begin{aligned} \mathbf{Area} &= \int_0^{0,668} (7243,9x^3 - 2246,8x^2 + 1253,9x - 9,9185) dx \\ \mathbf{Area} &= \left| \frac{7243,9(x)^4}{4} - \frac{2246,8(x)^3}{3} + \frac{1253,9(x)^2}{2} - 9,9185(x) \right|_0^{0,668} \\ \mathbf{Area} &= \left( \frac{7243,9(0,668)^4}{4} - \frac{2246,8(0,668)^3}{3} + \frac{1253,9(0,668)^2}{2} - 9,9185(0,668) \right) \\ &\quad - \left( \frac{7243,9(0)^4}{4} - \frac{2246,8(0)^3}{3} + \frac{1253,9(0)^2}{2} - 9,9185(0) \right) \\ \mathbf{Area} &= \mathbf{410,49 N. mm} \end{aligned}$$

### 3.5.2. Resumen de resultados

**Tabla 3.7: Resultados del Diseño de Experimento**

Ensayo	Piedra	Temp.	Vel. de Carga	Grano de	Desplazamiento	Carga	Esfuerzo	Área
		(°C)	(mm/min)	Lija	mm	N	kPa	N.mm
1	CALIZA	25	50	120	0,41	1101	539	162
2	CALIZA	25	50	120	0,57	1015	497	266
3	CALIZA	25	50	120	0,67	994	487	231
4	CALIZA	10	50	120	0,68	2341	1146	756
5	CALIZA	10	50	120	0,59	2405	1177	568
6	CALIZA	10	50	120	0,57	2298	1125	520
7	CALIZA	25	25	120	0,44	780	382	155
8	CALIZA	25	25	120	0,22	716	350	78
9	CALIZA	25	25	120	0,33	973	476	158
10	CALIZA	10	25	120	0,75	1977	968	561
11	CALIZA	10	25	120	0,53	1742	853	333
12	CALIZA	10	25	120	0,79	1977	968	763
13	CALIZA	25	50	50	0,38	1037	507	152
14	CALIZA	25	50	50	0,29	908	445	129
15	CALIZA	25	50	50	0,46	951	466	205
16	CALIZA	10	50	50	0,51	2084	1020	536
17	CALIZA	10	50	50	0,66	2319	1135	581
18	CALIZA	10	50	50	0,65	2127	1041	612
19	CALIZA	25	25	50	0,38	759	371	166
20	CALIZA	25	25	50	0,37	844	413	147
21	CALIZA	25	25	50	0,37	823	403	148
22	CALIZA	10	25	50	0,45	1913	937	403
23	CALIZA	10	25	50	0,66	2277	1114	604
24	CALIZA	10	25	50	0,67	1999	978	559
25	BASALTO	25	50	120	0,41	1101	539	235
26	BASALTO	25	50	120	0,41	973	476	215
27	BASALTO	25	50	120	0,38	1058	518	197
28	BASALTO	10	50	120	0,66	2447	1198	683
29	BASALTO	10	50	120	0,85	2426	1188	791
30	BASALTO	10	50	120	0,53	1892	926	307
31	BASALTO	25	25	120	0,36	801	392	151
32	BASALTO	25	25	120	0,18	737	361	64
33	BASALTO	25	25	120	0,21	780	382	76
34	BASALTO	10	25	120	0,67	1999	978	410
35	BASALTO	10	25	120	0,39	1635	801	260
36	BASALTO	10	25	120	0,38	2212	1083	368
37	BASALTO	25	50	50	0,32	887	434	95
38	BASALTO	25	50	50	0,30	887	434	115
39	BASALTO	25	50	50	0,33	823	403	109
40	BASALTO	10	50	50	0,54	1828	895	548
41	BASALTO	10	50	50	0,56	2042	999	384
42	BASALTO	10	50	50	0,72	2319	1135	614
43	BASALTO	25	25	50	0,28	673	329	91
44	BASALTO	25	25	50	0,27	587	288	90
45	BASALTO	25	25	50	0,32	716	350	116
46	BASALTO	10	25	50	0,52	2042	999	449
47	BASALTO	10	25	50	0,74	1635	801	588
48	BASALTO	10	25	50	0,41	1593	780	286

Fuente: Tabla de resultados de Excel de los autores

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTO SEGÚN EL SOFTWARE STATGRAPHICS

#### 4.1. Análisis de la carga de rotura “CR” (Newtons) en el experimento.

##### 4.1.1. Efectos estimados para carga de rotura (N)

Tabla 4.1: Efectos estimados para CR (N)

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
Promedio	1468,	22,89	
A:Agregados	-94,46	45,78	1,0
B:Temperatura	-1192,	45,78	1,0
C:Velocidad	253,0	45,78	1,0
D:Textura	96,13	45,78	1,0
AB	21,29	45,78	1,0
AC	19,71	45,78	1,0
AD	72,96	45,78	1,0
BC	-40,88	45,78	1,0
BD	-1,625	45,78	1,0
CD	57,13	45,78	1,0
bloque	-42,04	64,74	1,333
bloque	6,333	64,74	1,333

Errores estándar basados en el error total con 35 g.l.  
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

La Tabla 4.1 muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1,333. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o

más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

#### 4.1.2. Análisis de varianza para carga de rotura (N)

Tabla 4.2: Análisis de varianza para CR (N)

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Agregados	1,071E5	1	1,071E5	4,26	0,0465
B:Temperatura	1,705E7	1	1,705E7	677,96	0,0000
C:Velocidad	7,684E5	1	7,684E5	30,56	0,0000
D:Textura	1,109E5	1	1,109E5	4,41	0,0430
AB	5440,	1	5440,	0,22	0,6447
AC	4661,	1	4661,	0,19	0,6694
AD	6,388E4	1	6,388E4	2,54	0,1200
BC	2,005E4	1	2,005E4	0,80	0,3780
BD	31,69	1	31,69	0,00	0,9719
CD	3,916E4	1	3,916E4	1,56	0,2203
bloques	1,233E4	2	6165,	0,25	0,7839
Error total	8,8E5	35	2,514E4		
Total (corr.)	1,906E7	47			

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

R-cuadrada = 95,38 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 94,13 por ciento

Error estándar del est. = 158,6

Error absoluto medio = 94,67

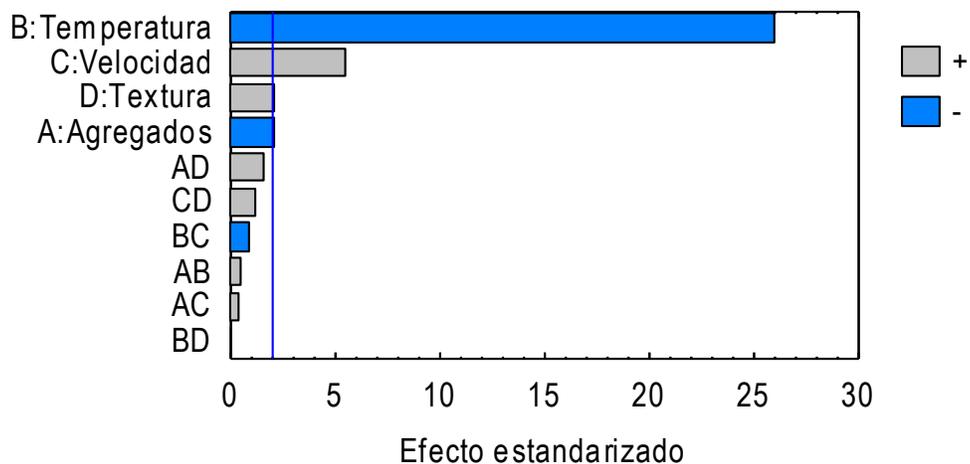
Estadístico Durbin-Watson = 1,857 (P=0,1754)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,06514

La tabla ANOVA (Tabla 4.2) segmenta la variabilidad de la CR en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces, prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado

del error experimental. En este caso, 4 efectos tienen una valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 95,38% de la variabilidad en CR. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 94,13%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 158,6. El error medio absoluto (MAE) de 94,67 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.



**Figura 4.1: Diagrama de Pareto estandarizado para CR**  
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

El diagrama de Pareto (Figura 4.1) muestra cada uno de los efectos estimados en orden decreciente de magnitud. La longitud de cada barra es proporcional al efecto estandarizado, el cual es el efecto estimado dividido entre su error

estándar. Esto es equivalente a calcular un estadístico-t para cada efecto. La línea vertical puede utilizarse para juzgar cuales efectos son estadísticamente significativos. Cualquier barra que se extienda más allá de la línea corresponde a efectos que son estadísticamente significativos con un 95,0% de nivel de confianza. En este caso, 4 efectos son significativos.

En estos diagramas se toma el valor de 2 como indicativo para el efecto estandarizado, lo que quiere decir que el efecto es 2 veces superior al error que se comete y eso garantiza que toda variable que supere ese valor es significativa. También tiene en cuenta el tamaño de la muestra, es por eso que se llama estandarizado.

#### 4.1.3. Análisis de varianza ajustado para carga de rotura (N)

En este caso la tabla ANOVA (Tabla 4.2) se vuelve a calcular pero desechando los factores o interacciones que no cumplen con el nivel de significación exigido. Si una interacción significativa aparece vinculada a un factor que no es significativo, el mismo no debe ser desechado en el ajuste.

**Tabla 4.3: Análisis de varianza ajustado para CR (N)**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GI</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Agregados	1,071E5	1	1,071E5	4,33	0,0437
B:Temperatura	1,705E7	1	1,705E7	689,77	0,0000
C:Velocidad	7,684E5	1	7,684E5	31,09	0,0000
D:Textura	1,109E5	1	1,109E5	4,49	0,0403
bloques	1,233E4	2	6165,	0,25	0,7804
Error total	1,013E6	41	2,471E4		
Total (corr.)	1,906E7	47			

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

R-cuadrada = 94,68 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 94,19 por ciento

Error estándar del est. = 157,2

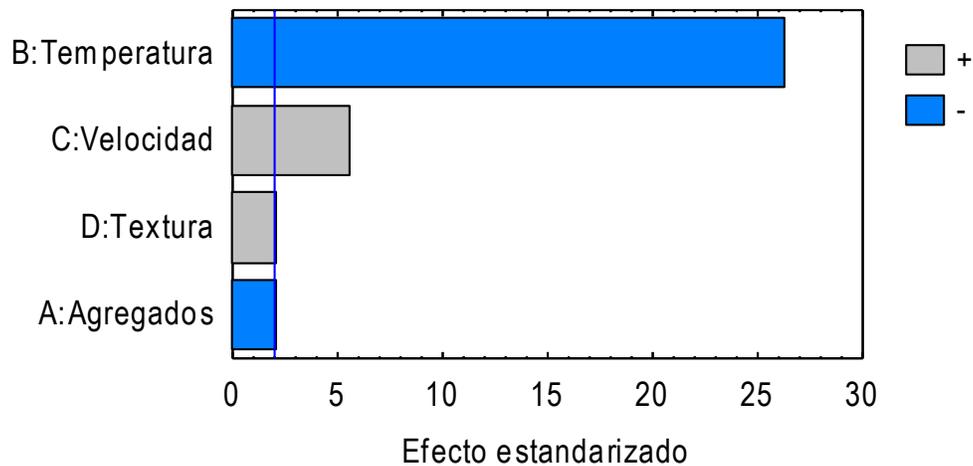
Error absoluto medio = 108,7

Estadístico Durbin-Watson = 1,862 (P=0,1943)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,06654

La tabla ANOVA (Tabla 4.3) muestra que 4 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 94,68% de la variabilidad en CR. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 94,19%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 157,2. El error medio absoluto (MAE) de 108,7 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.



**Figura 4.2: Diagrama de Pareto estandarizado ajustado para CR**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

#### 4.1.4. Coeficientes de regresión para carga de rotura (N)

**Tabla 4.4: Coeficientes de regresión para CR (N)**

<b>Coeficiente</b>	<b>Estimado</b>
constante	2362,
A:Agregados	-47,23
B:Temperatura	-79,46
C:Velocidad	10,12
D:Textura	1,373

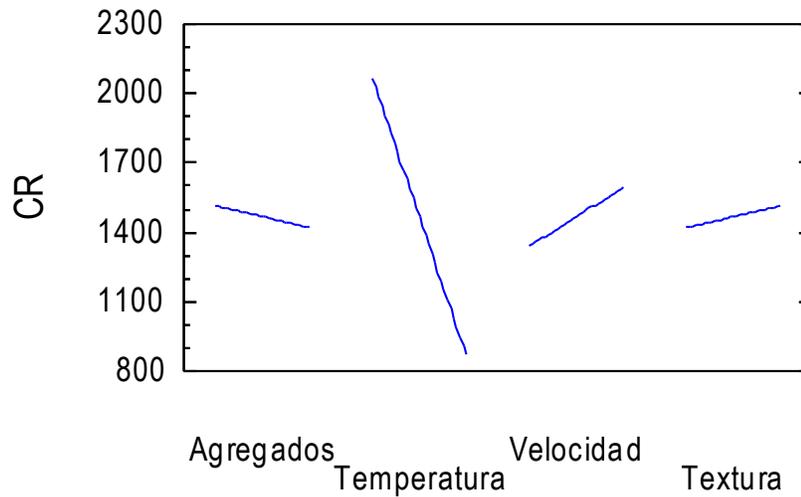
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

Es decir, que la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos es:

$$CR = 2362, - 47,23 * Agregados - 79,46 * Temperatura + 10,12 * Velocidad + 1,373 * Textura$$

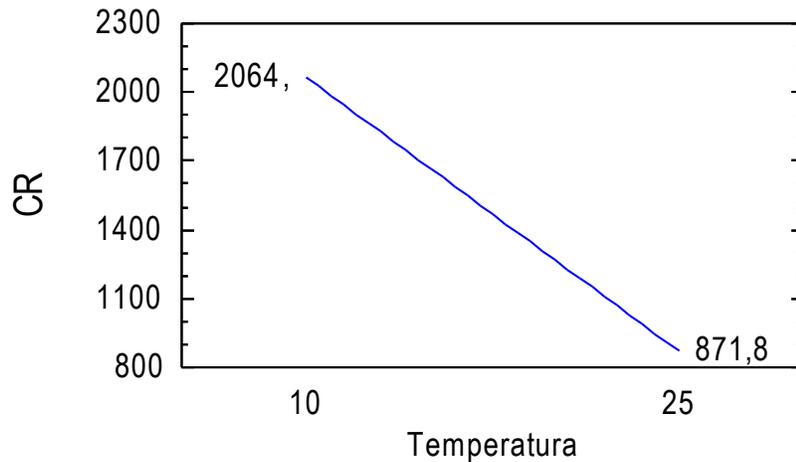
En donde los valores de las variables se encuentran especificados en sus unidades originales, excepto para los factores categóricos, en este caso los agregados, que toman valores de -1 para el nivel bajo y +1 para el nivel alto.

#### 4.1.5. Gráficas de efectos principales para carga de rotura (N)



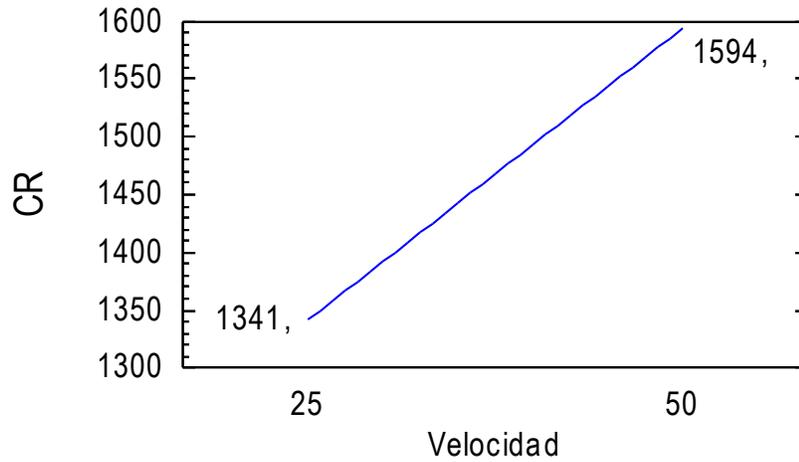
**Figura 4.3: Gráfica de efectos principales para CR tomando en cuenta los 4 factores**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



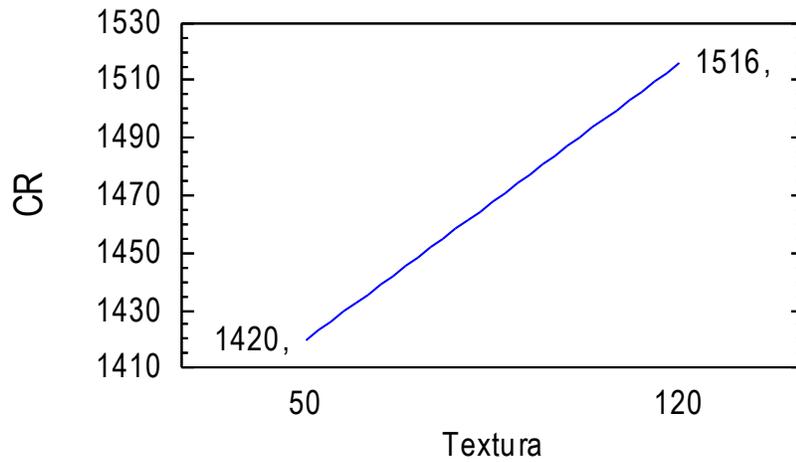
**Figura 4.4: Gráfica de efectos principales para CR vs. Temperaturas**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



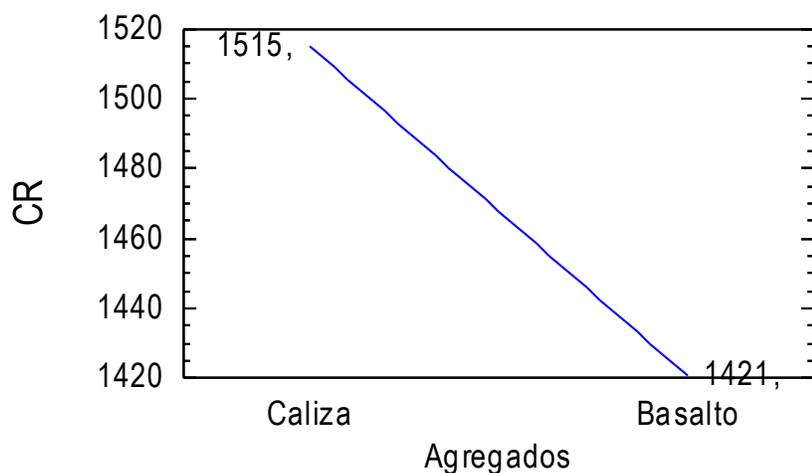
**Figura 4.5: Gráfica de efectos principales para CR vs. Velocidades**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.6: Gráfica de efectos principales para CR vs. Texturas**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.7: Gráfica de efectos principales para CR vs. Agregados**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

#### 4.1.6. Resultados estimados para carga de rotura (N)

**Tabla 4.5: Resultados estimados para CR (N)**

<i>Fila</i>	<i>Observados Valores</i>	<i>Ajustados Valores</i>	<i>Inferior 95,0% para Media</i>	<i>Superior 95,0% para Media</i>
1	1913,	1954,	1833,	2075,
2	2042,	1860,	1739,	1981,
3	759,0	762,3	641,1	883,6
4	673,0	667,9	546,6	789,1
5	2084,	2207,	2086,	2328,
6	1828,	2113,	1992,	2234,
7	1037,	1015,	894,1	1137,
8	887,0	920,9	799,7	1042,
9	1977,	2050,	1929,	2172,
10	1999,	1956,	1835,	2077,
11	780,0	858,5	737,2	979,7
12	801,0	764,0	642,8	885,2
13	2341,	2303,	2182,	2425,
14	2447,	2209,	2088,	2330,
15	1101,	1111,	990,3	1233,
16	1101,	1017,	895,8	1138,
17	2277,	1915,	1794,	2037,
18	1635,	1821,	1700,	1942,

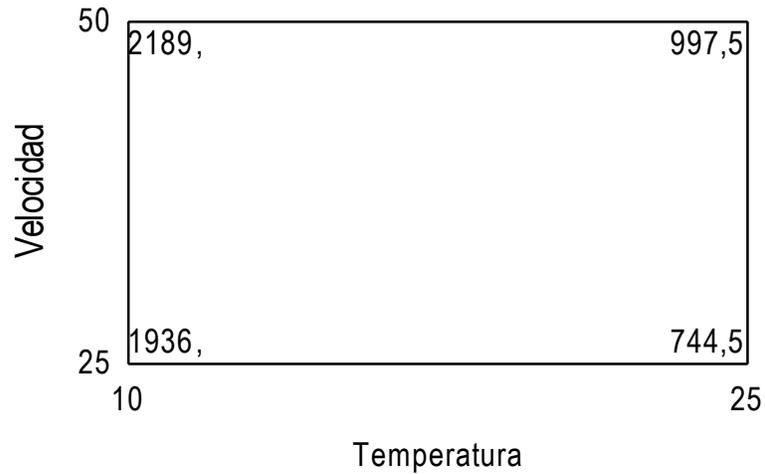
19	844,0	723,5	602,2	844,7
20	587,0	629,0	507,8	750,2
21	2319,	2168,	2047,	2290,
22	2042,	2074,	1953,	2195,
23	908,0	976,5	855,3	1098,
24	887,0	882,0	760,8	1003,
25	1742,	2011,	1890,	2133,
26	1635,	1917,	1796,	2038,
27	716,0	819,6	698,3	940,8
28	737,0	725,1	603,9	846,4
29	2405,	2265,	2143,	2386,
30	2426,	2170,	2049,	2291,
31	1015,	1073,	951,4	1194,
32	973,0	978,2	856,9	1099,
33	1999,	1940,	1818,	2061,
34	1593,	1845,	1724,	1966,
35	823,0	747,6	626,4	868,9
36	716,0	653,2	531,9	774,4
37	2127,	2193,	2071,	2314,
38	2319,	2098,	1977,	2219,
39	951,0	1001,	879,4	1122,
40	823,0	906,2	785,0	1027,
41	1977,	2036,	1914,	2157,
42	2212,	1941,	1820,	2062,
43	973,0	843,8	722,5	965,0
44	780,0	749,3	628,1	870,6
45	2298,	2289,	2167,	2410,
46	1892,	2194,	2073,	2315,
47	994,0	1097,	975,6	1218,
48	1058,	1002,	881,1	1124,

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

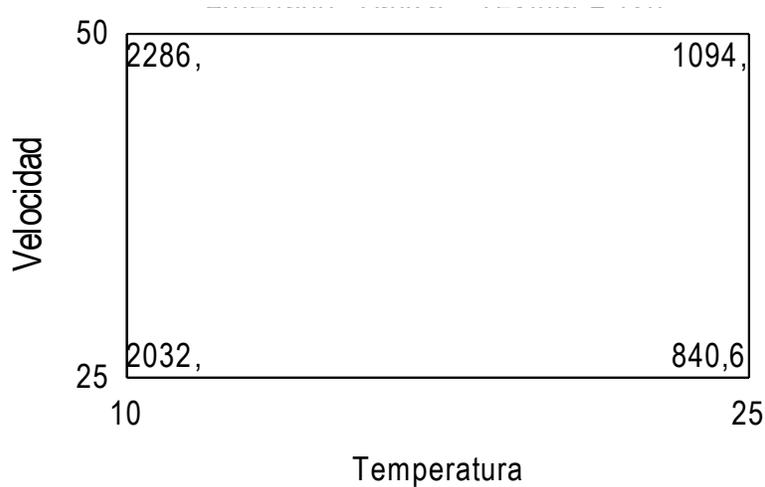
La Tabla 4.5 contiene información acerca de los valores de CR generados usando el modelo ajustado. Esta tabla incluye:

- (1) los valores observados de CR (si alguno)
- (2) el valor predicho de CR usando el modelo ajustado
- (3) intervalos de confianza del 95,0% para la respuesta media

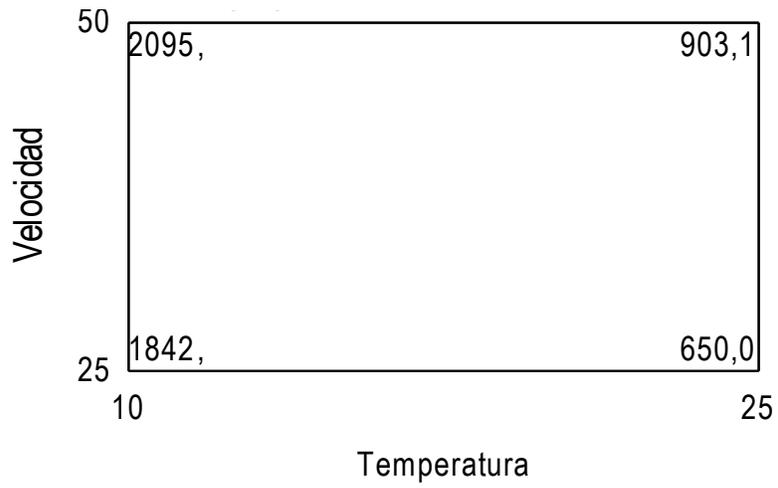
#### 4.1.7. Gráficas de cuadros para carga de rotura (N)



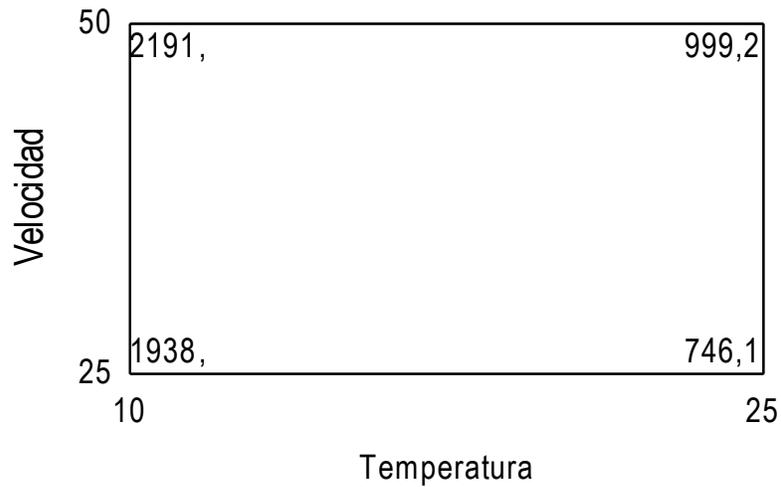
**Figura 4.8: Gráfica de cuadro para CR (Caliza, Textura: 50)**  
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.9: Gráfica de cuadro para CR (Caliza, Textura: 120)**  
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

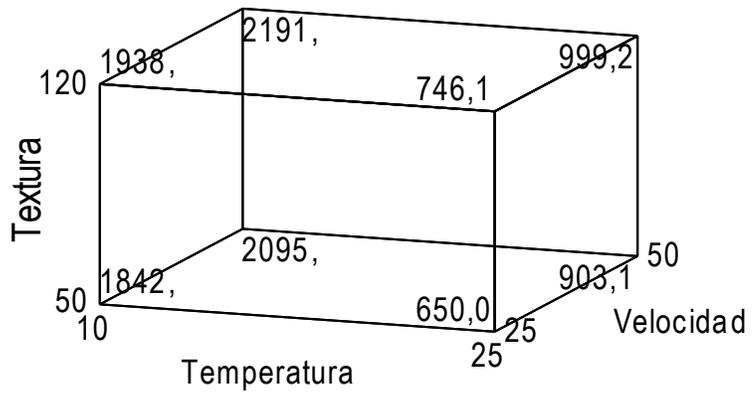


**Figura 4.10: Gráfica de cuadro para CR (Basalto, Textura: 50)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



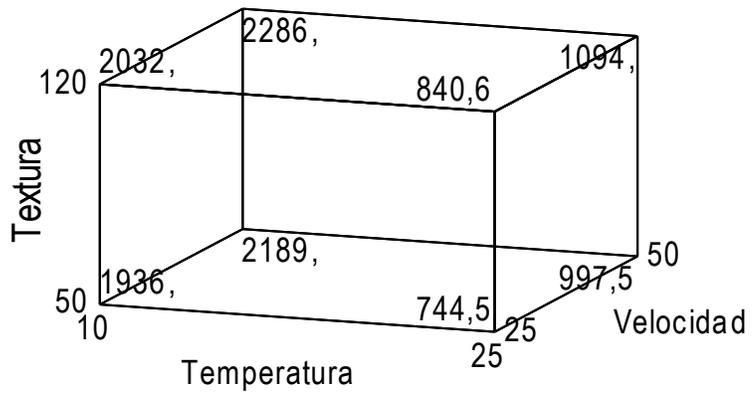
**Figura 4.11: Gráfica de cuadro para CR (Basalto, Textura: 120)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

#### 4.1.8. Gráficas de cubos para carga de rotura (N)



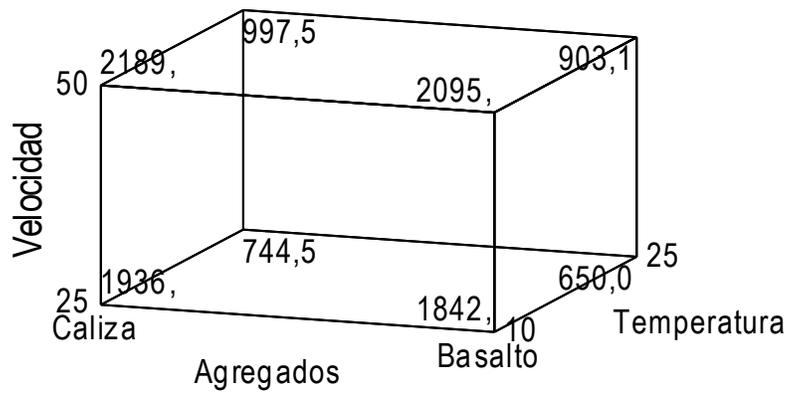
**Figura 4.12: Gráfica de cubo para CR (Basalto)**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

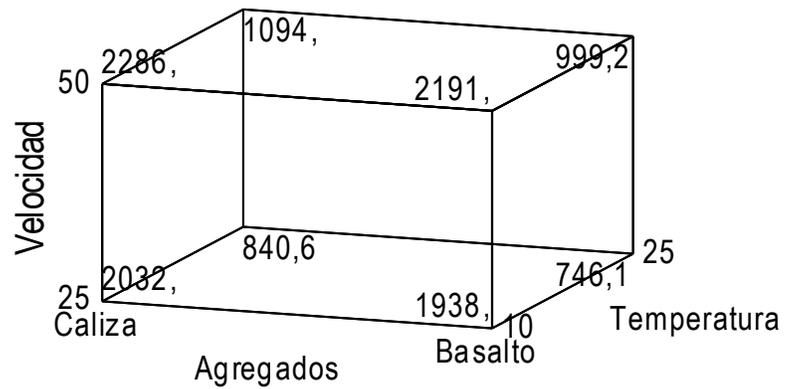


**Figura 4.13: Gráfica de cubo para CR (Caliza)**

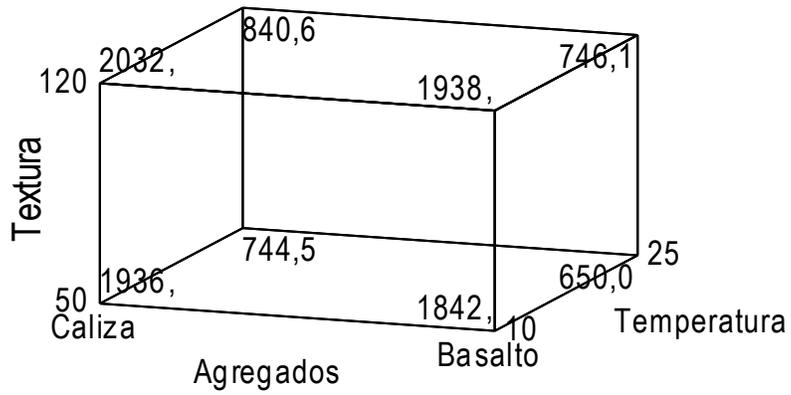
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



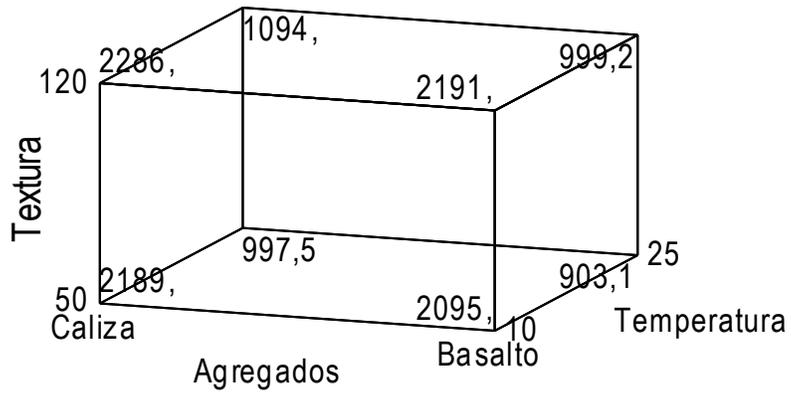
**Figura 4.14: Gráfica de cubo para CR (Textura: 50)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



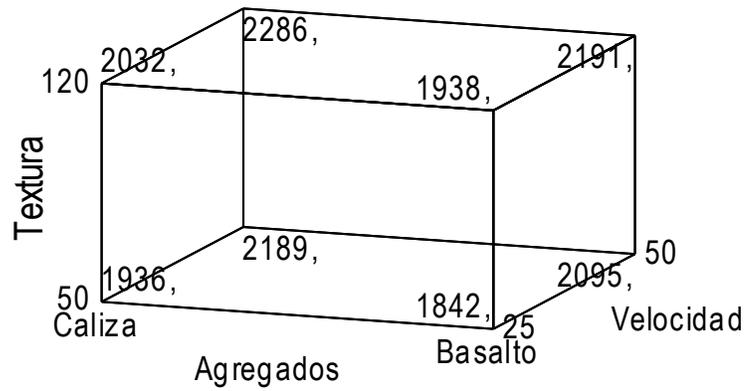
**Figura 4.15: Gráfica de cubo para CR (Textura: 120)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



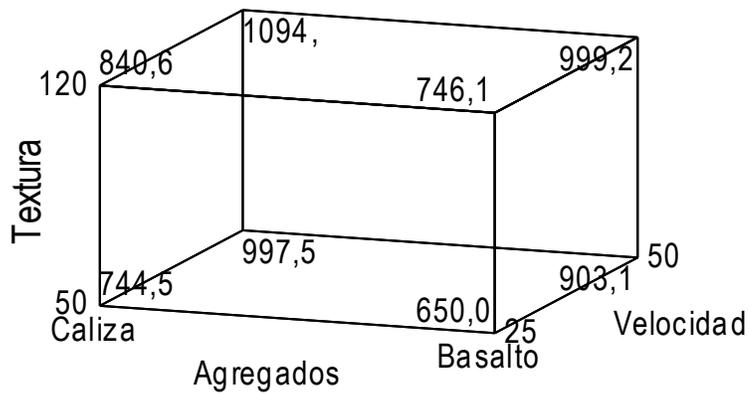
**Figura 4.16: Gráfica de cubo para CR (Velocidad: 25mm/min)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.17: Gráfica de cubo para CR (Velocidad: 50mm/min)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.18: Gráfica de cubo para CR (Temperatura: 10°C)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.19: Gráfica de cubo para CR (Temperatura: 25°C)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

## 4.2. Análisis del desplazamiento “DES” (milímetros) en el experimento.

### 4.2.1. Efectos estimados para desplazamiento (mm)

Tabla 4.6: Efectos estimados para DES (mm)

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
promedio	0,4821	0,01599	
A:Agregados	-0,06917	0,03198	1,0
B:Temperatura	-0,2425	0,03198	1,0
C:Velocidad	0,07333	0,03198	1,0
D:Textura	0,03417	0,03198	1,0
AB	-0,02417	0,03198	1,0
AC	0,03333	0,03198	1,0
AD	-0,02417	0,03198	1,0
BC	0,02667	0,03198	1,0
BD	0,009167	0,03198	1,0
CD	0,05	0,03198	1,0
bloque	-0,01542	0,04523	1,333
bloque	0,009583	0,04523	1,333

Errores estándar basados en el error total con 35 g.l.

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

La Tabla 4.6 muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1,333. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

#### 4.2.2. Análisis de varianza para desplazamiento (mm)

Tabla 4.7: Análisis de varianza para DES (mm)

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Agregados	0,05741	1	0,05741	4,68	0,0375
B:Temperatura	0,7057	1	0,7057	57,49	0,0000
C:Velocidad	0,06453	1	0,06453	5,26	0,0280
D:Textura	0,01401	1	0,01401	1,14	0,2927
AB	0,007008	1	0,007008	0,57	0,4549
AC	0,01333	1	0,01333	1,09	0,3045
AD	0,007008	1	0,007008	0,57	0,4549
BC	0,008533	1	0,008533	0,70	0,4101
BD	0,001008	1	0,001008	0,08	0,7761
CD	0,03	1	0,03	2,44	0,1270
bloques	0,001454	2	0,0007271	0,06	0,9426
Error total	0,4296	35	0,01227		
Total (corr.)	1,34	47			

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

R-cuadrada = 67,93 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 59,26 por ciento

Error estándar del est. = 0,1108

Error absoluto medio = 0,0756

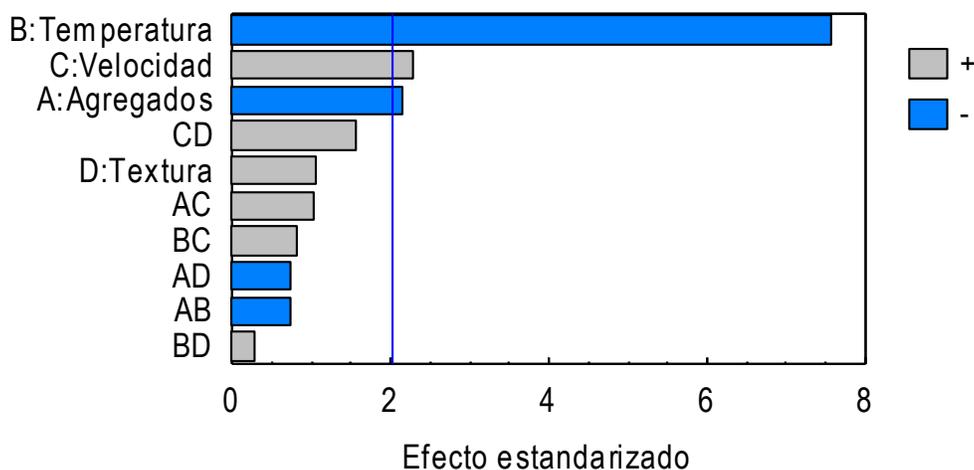
Estadístico Durbin-Watson = 1,548 (P=0,0260)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,1893

La tabla ANOVA (Tabla 4.7) particiona la variabilidad de DES en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen una valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 67,93%

de la variabilidad en DES. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 59,26%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,1108. El error medio absoluto (MAE) de 0,0756 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Debido a que el valor-P es menor que 5,0%, hay una indicación de posible correlación serial al nivel de significancia del 5,0%.



**Figura 4.20: Diagrama de Pareto estandarizado para DES**  
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

### 4.2.3. Análisis de varianza ajustado para desplazamiento (mm)

**Tabla 4.8: Análisis de varianza ajustado para DES (mm)**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Agregados	0,05741	1	0,05741	4,72	0,0355
B:Temperatura	0,7057	1	0,7057	58,06	0,0000
C:Velocidad	0,06453	1	0,06453	5,31	0,0262

bloques	0,001454	2	0,0007271	0,06	0,9420
Error total	0,5105	42	0,01216		
Total (corr.)	1,34	47			

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

R-cuadrada = 61,89 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 59,29 porciento

Error estándar del est. = 0,1103

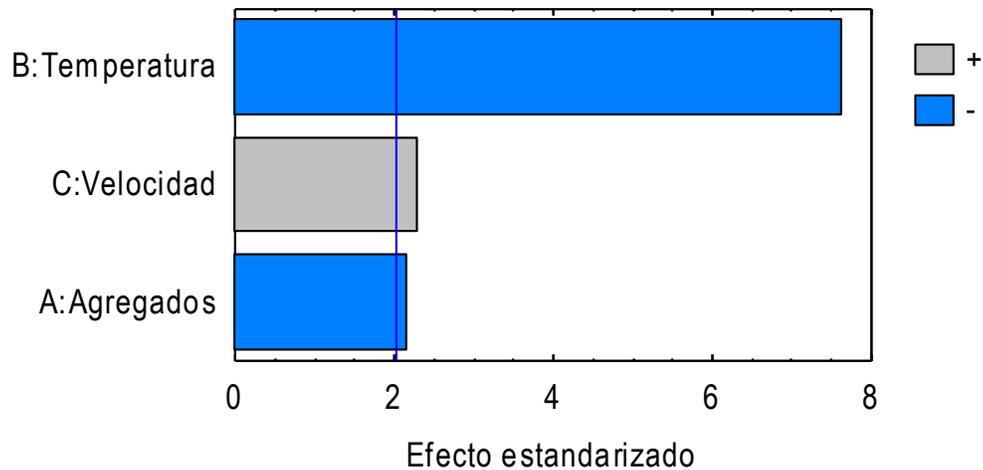
Error absoluto medio = 0,08148

Estadístico Durbin-Watson = 1,462 (P=0,0168)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,2456

La tabla ANOVA (Tabla 4.8) particiona la variabilidad de DES en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen una valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 61,89% de la variabilidad en DES. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 59,29%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,1103. El error medio absoluto (MAE) de 0,08148 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Debido a que el valor-P es menor que 5,0%, hay una indicación de posible correlación serial al nivel de significancia del 5,0%.



**Figura 4.21: Diagrama de Pareto estandarizado ajustado para DES**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

#### 4.2.4. Coeficientes de regresión para desplazamiento (mm)

**Tabla 4.9: Coeficientes de regresión para DES (mm)**

<b>Coeficiente</b>	<b>Estimado</b>
constante	0,655
A:Agregados	-0,03458
B:Temperatura	-0,01617
C:Velocidad	0,002933

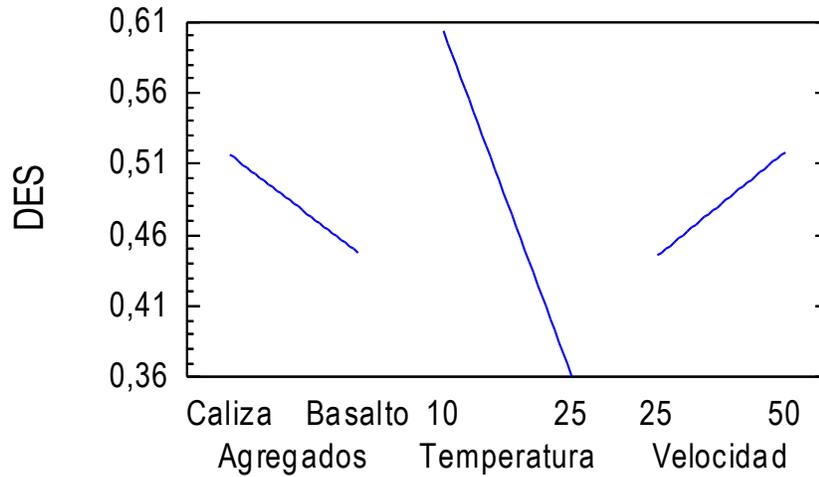
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

La ecuación de regresión del modelo ajustado es:

$$DES = 0,655 - 0,03458 * Agregados - 0,01617 * Temperatura + 0,002933 * Velocidad$$

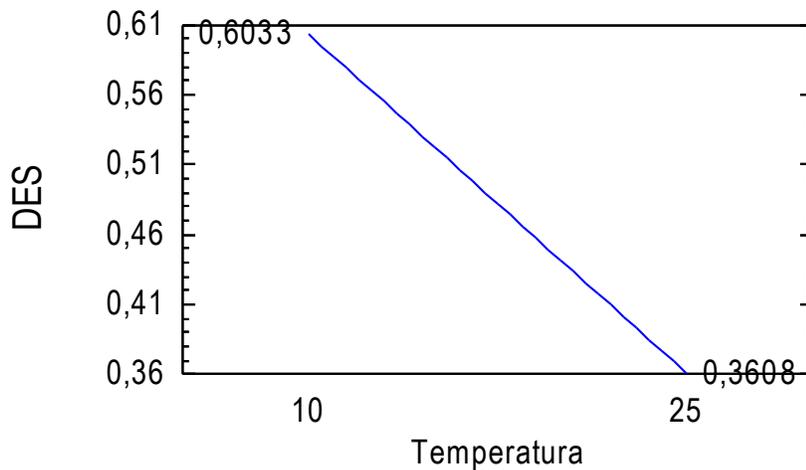
En donde los valores de las variables se encuentran especificados en sus unidades originales, excepto para los factores categóricos que toman valores de -1 para el nivel bajo y +1 para el nivel alto.

**4.2.5. Gráficas de efectos principales para desplazamiento (mm)**



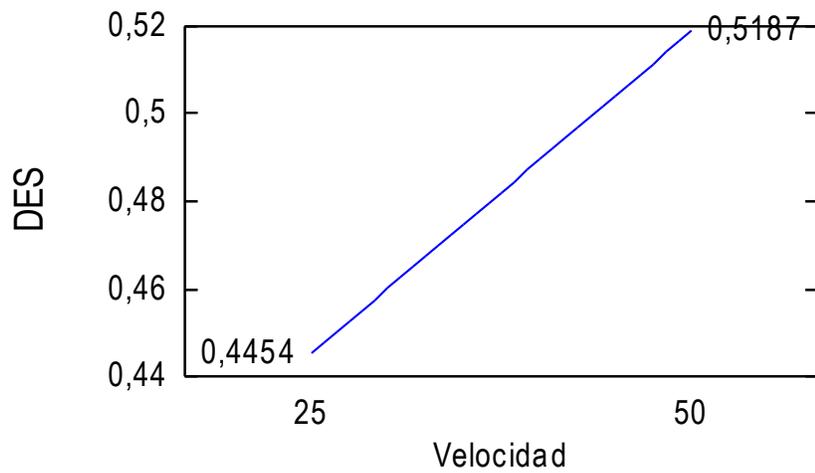
**Figura 4.22: Gráfica de efectos principales para DES tomando en cuenta los 3 factores**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

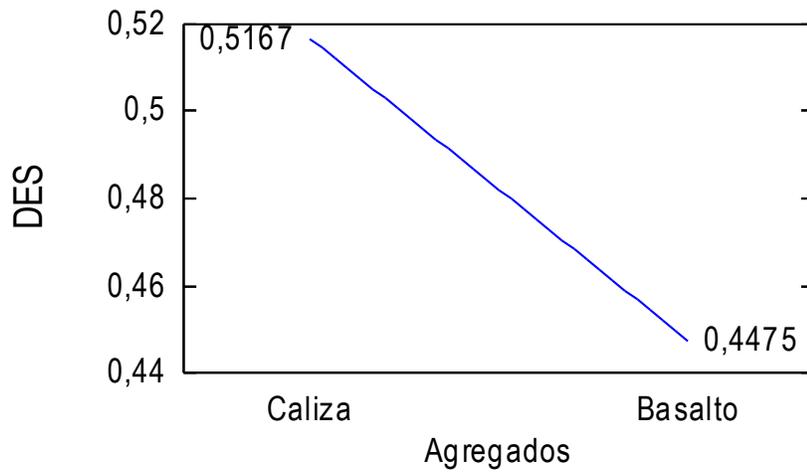


**Figura 4.23: Gráfica de efectos principales para DES vs. Temperaturas**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.24: Gráfica de efectos principales para DES vs. Velocidades**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.25: Gráfica de efectos principales para DES vs. Agregados**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

#### 4.2.6. Resultados estimados para desplazamiento (mm)

Tabla 4.10: Resultados estimados para DES (mm)

<i>Fila</i>	<i>Observados Valores</i>	<i>Ajustados Valores</i>	<i>Inferior 95,0% para Media</i>	<i>Superior 95,0% para Media</i>
1	0,45	0,6042	0,5255	0,6828
2	0,52	0,535	0,4563	0,6137
3	0,38	0,3617	0,283	0,4403
4	0,28	0,2925	0,2138	0,3712
5	0,51	0,6775	0,5988	0,7562
6	0,54	0,6083	0,5297	0,687
7	0,38	0,435	0,3563	0,5137
8	0,32	0,3658	0,2872	0,4445
9	0,75	0,6042	0,5255	0,6828
10	0,67	0,535	0,4563	0,6137
11	0,44	0,3617	0,283	0,4403
12	0,36	0,2925	0,2138	0,3712
13	0,68	0,6775	0,5988	0,7562
14	0,66	0,6083	0,5297	0,687
15	0,41	0,435	0,3563	0,5137
16	0,41	0,3658	0,2872	0,4445
17	0,66	0,5935	0,5149	0,6722
18	0,74	0,5244	0,4457	0,603
19	0,37	0,351	0,2724	0,4297
20	0,27	0,2819	0,2032	0,3605
21	0,66	0,6669	0,5882	0,7455
22	0,56	0,5977	0,519	0,6764
23	0,29	0,4244	0,3457	0,503
24	0,3	0,3552	0,2765	0,4339
25	0,53	0,5935	0,5149	0,6722
26	0,39	0,5244	0,4457	0,603
27	0,22	0,351	0,2724	0,4297
28	0,18	0,2819	0,2032	0,3605
29	0,59	0,6669	0,5882	0,7455
30	0,85	0,5977	0,519	0,6764
31	0,57	0,4244	0,3457	0,503
32	0,41	0,3552	0,2765	0,4339
33	0,67	0,606	0,5274	0,6847
34	0,41	0,5369	0,4582	0,6155
35	0,37	0,3635	0,2849	0,4422
36	0,32	0,2944	0,2157	0,373
37	0,65	0,6794	0,6007	0,758

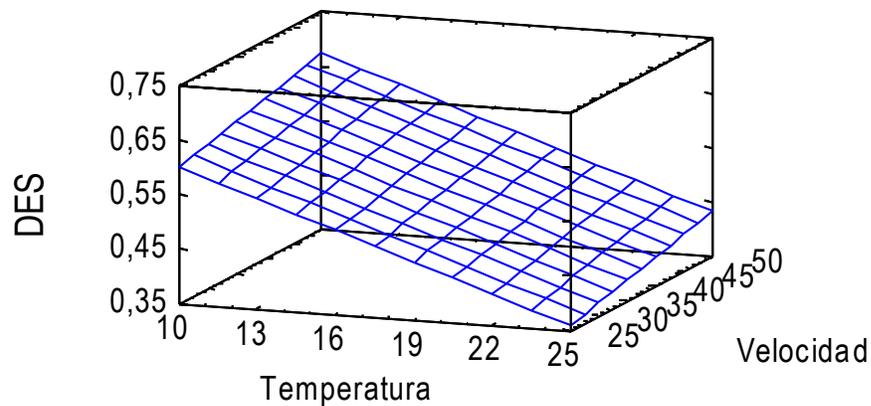
38	0,72	0,6102	0,5315	0,6889
39	0,46	0,4369	0,3582	0,5155
40	0,33	0,3677	0,289	0,4464
41	0,79	0,606	0,5274	0,6847
42	0,38	0,5369	0,4582	0,6155
43	0,33	0,3635	0,2849	0,4422
44	0,21	0,2944	0,2157	0,373
45	0,57	0,6794	0,6007	0,758
46	0,53	0,6102	0,5315	0,6889
47	0,67	0,4369	0,3582	0,5155
48	0,38	0,3677	0,289	0,4464

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

La Tabla 4.10 contiene información acerca de los valores de DES generados usando el modelo ajustado. Esta tabla incluye:

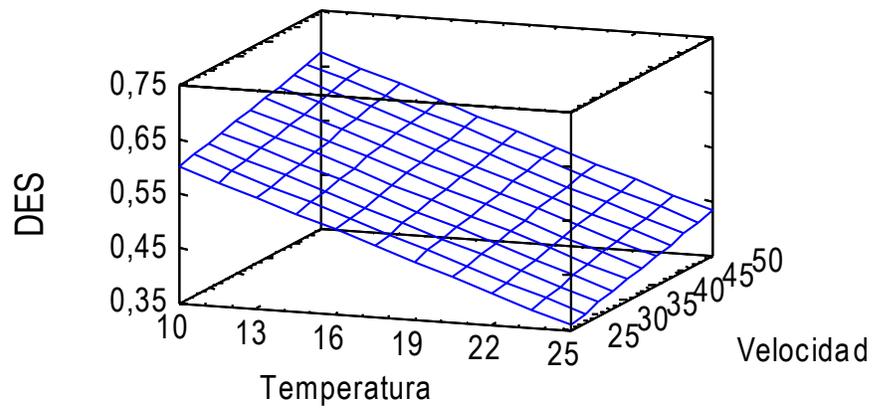
- (1) los valores observados de DES (si alguno)
- (2) el valor predicho de DES usando el modelo ajustado
- (3) intervalos de confianza del 95,0% para la respuesta media

#### 4.2.7. Gráfica de superficie de respuesta estimada

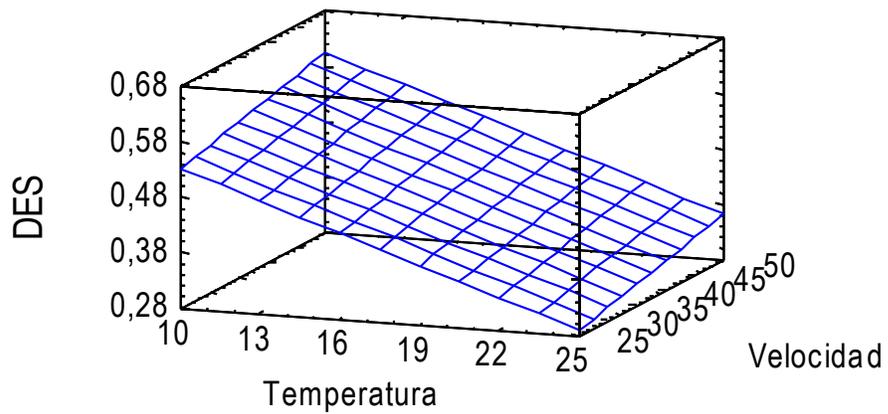


**Figura 4.26: Superficie de respuesta estimada (Caliza, Textura: 50)**

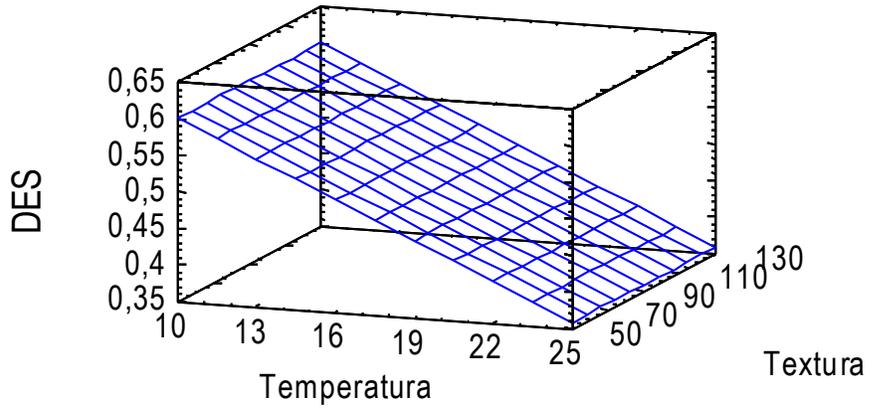
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



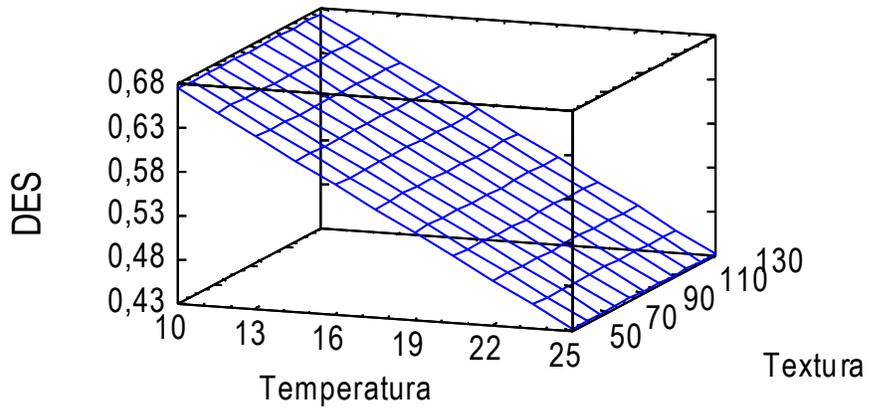
**Figura 4.27: Superficie de respuesta estimada (Caliza, Textura: 120)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



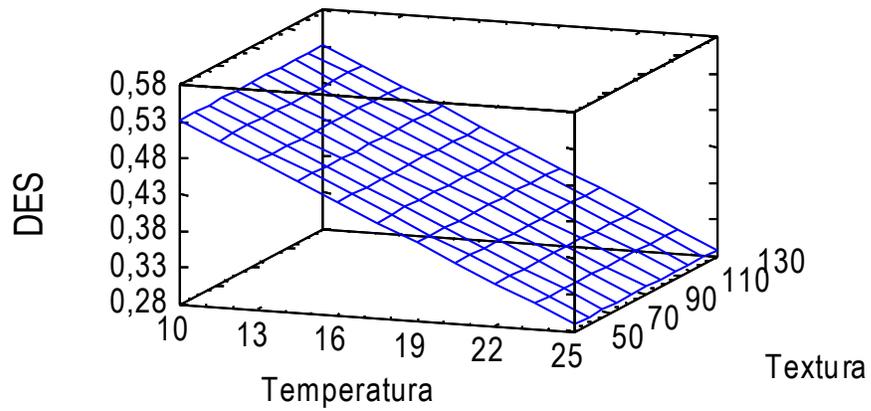
**Figura 4.28: Superficie de respuesta estimada (Basalto, Textura: 50)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.29: Superficie de respuesta estimada (Caliza, Velocidad: 25)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

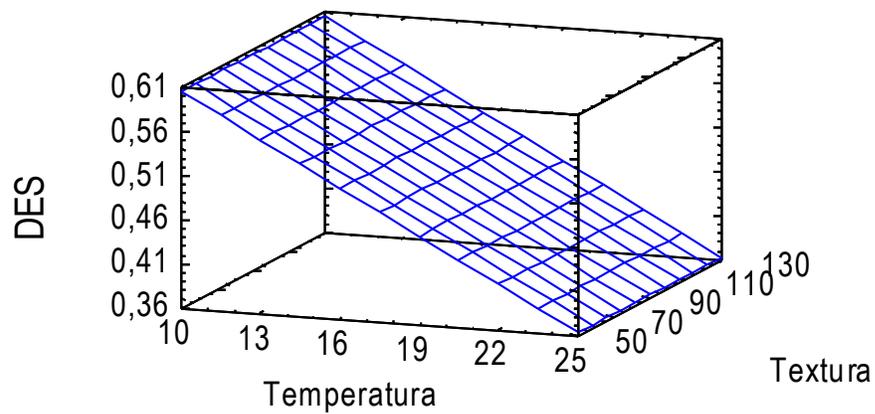


**Figura 4.30: Superficie de respuesta estimada (Caliza, Velocidad: 50)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.31: Superficie de respuesta estimada (Basalto, Velocidad: 25)**

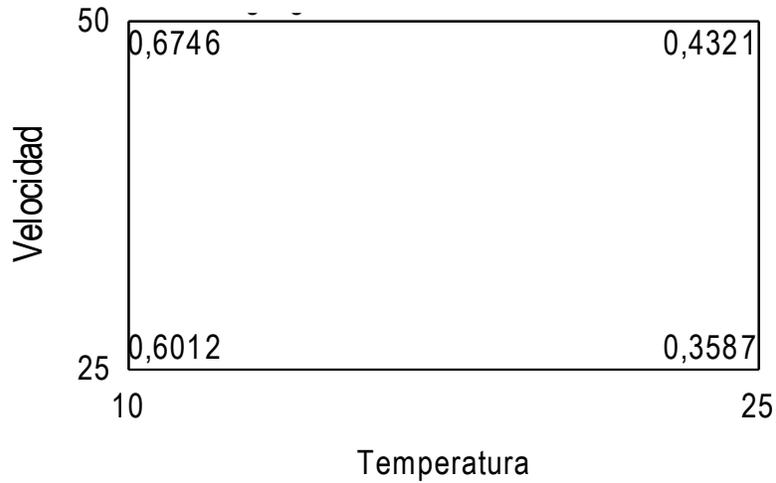
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.32: Superficie de respuesta estimada (Basalto, Velocidad: 50)**

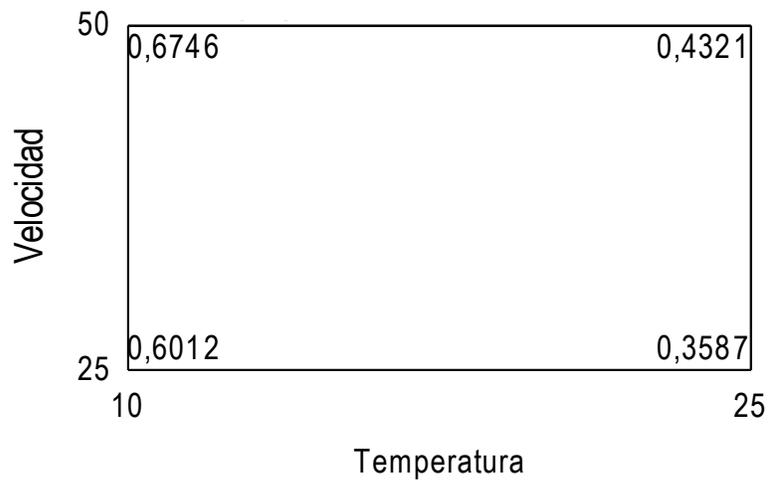
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

#### 4.2.8. Gráficas de cuadros para desplazamiento (mm)



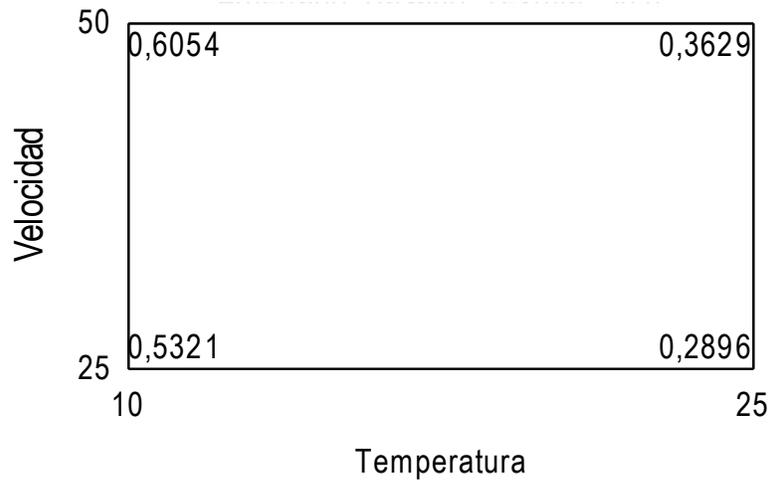
**Figura 4.33: Gráfica de cuadro para DES (Caliza, Textura: 50)**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

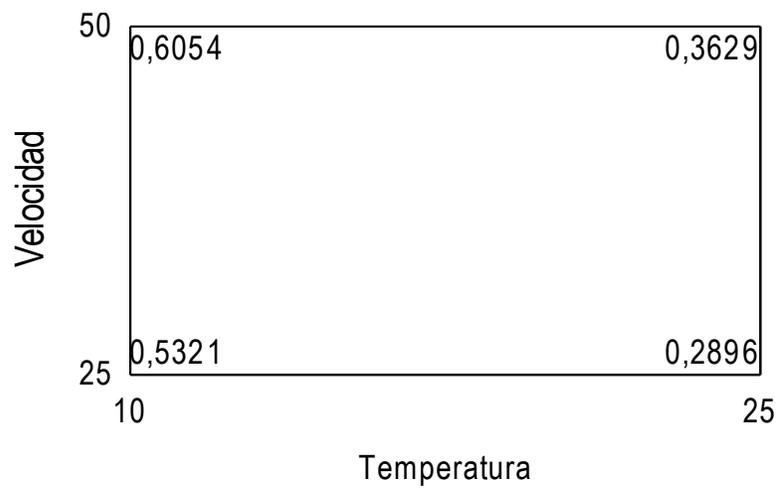


**Figura 4.34: Gráfica de cuadro para DES (Caliza, Textura: 120)**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

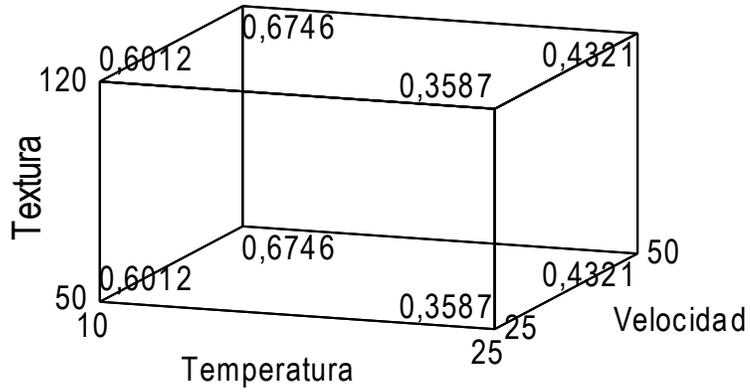


**Figura 4.35: Gráfica de cuadro para DES (Basalto, Textura: 50)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



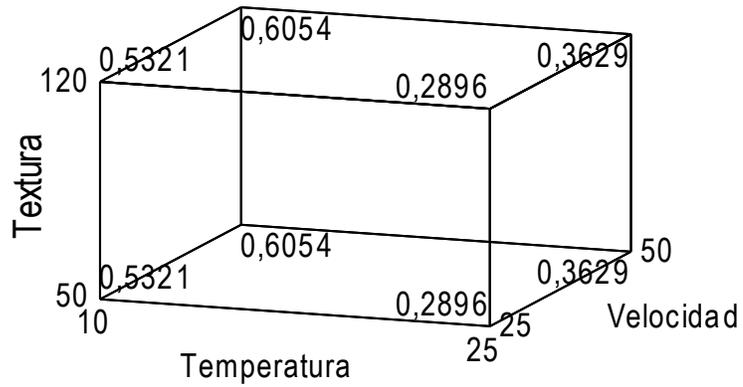
**Figura 4.36: Gráfica de cuadro para DES (Basalto, Textura: 120)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

#### 4.2.9. Gráficas de cubos para desplazamiento (mm)



**Figura 4.37: Gráfica de cubo para DES (Caliza)**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.38: Gráfica de cubo para DES (Basalto)**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

### 4.3. Análisis del área bajo la curva CR vs DES “Área” (N.mm) en el experimento.

#### 4.3.1. Efectos estimados para área (N.mm)

Tabla 4.11: Efectos estimados para ÁREA (N.mm)

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
Promedio	334,1	15,42	
A:Agregados	-64,63	30,84	1,0
B:Temperatura	-372,2	30,84	1,0
C:Velocidad	82,79	30,84	1,0
D:Textura	24,21	30,84	1,0
AB	27,71	30,84	1,0
AC	29,21	30,84	1,0
AD	-1,542	30,84	1,0
BC	-26,88	30,84	1,0
BD	11,21	30,84	1,0
CD	46,71	30,84	1,0
bloque	-16,5	43,62	1,333
bloque	-9,5	43,62	1,333

Errores estándar basados en el error total con 35 g.l.

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

La Tabla 4.11 muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1,333. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

### 4.3.2. Análisis de varianza para área (N.mm)

Tabla 4.12: Análisis de varianza para ÁREA (N.mm)

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Agregados	5,012E4	1	5,012E4	4,39	0,0434
B:Temperatura	1,662E6	1	1,662E6	145,65	0,0000
C:Velocidad	8,225E4	1	8,225E4	7,21	0,0110
D:Textura	7033,	1	7033,	0,62	0,4378
AB	9213,	1	9213,	0,81	0,3751
AC	1,024E4	1	1,024E4	0,90	0,3501
AD	28,52	1	28,52	0,00	0,9604
BC	8667,	1	8667,	0,76	0,3895
BD	1508,	1	1508,	0,13	0,7185
CD	2,618E4	1	2,618E4	2,29	0,1389
bloques	4154,	2	2077,	0,18	0,8344
Error total	3,995E5	35	1,141E4		
Total (corr.)	2,261E6	47			

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

R-cuadrada = 82,33 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 77,56 por ciento

Error estándar del est. = 106,8

Error absoluto medio = 60,8

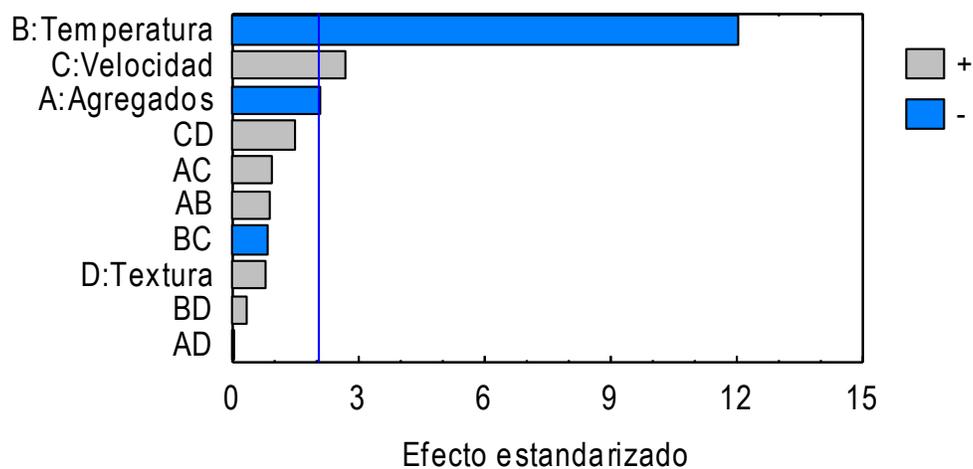
Estadístico Durbin-Watson = 1,59 (P=0,0357)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,1757

La tabla ANOVA (Tabla 4.12) particiona la variabilidad de AREA en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 82,33% de la variabilidad en AREA. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más

adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 77,56%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 106,8. El error medio absoluto (MAE) de 60,8 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Debido a que el valor-P es menor que 5,0%, hay una indicación de posible correlación serial al nivel de significancia del 5,0%.



**Figura 4.39: Diagrama de Pareto estandarizado para ÁREA**  
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

### 4.3.3. Análisis de varianza ajustado para área (N.mm)

**Tabla 4.13: Análisis de varianza ajustado para ÁREA (N.mm)**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Agregados	5,012E4	1	5,012E4	4,55	0,0388
B:Temperatura	1,662E6	1	1,662E6	151,01	0,0000
C:Velocidad	8,225E4	1	8,225E4	7,47	0,0091
bloques	4154,	2	2077,	0,19	0,8288
Error total	4,624E5	42	1,101E4		
Total (corr.)	2,261E6	47			

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

R-cuadrada = 79,55 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 78,16 por ciento

Error estándar del est. = 104,9

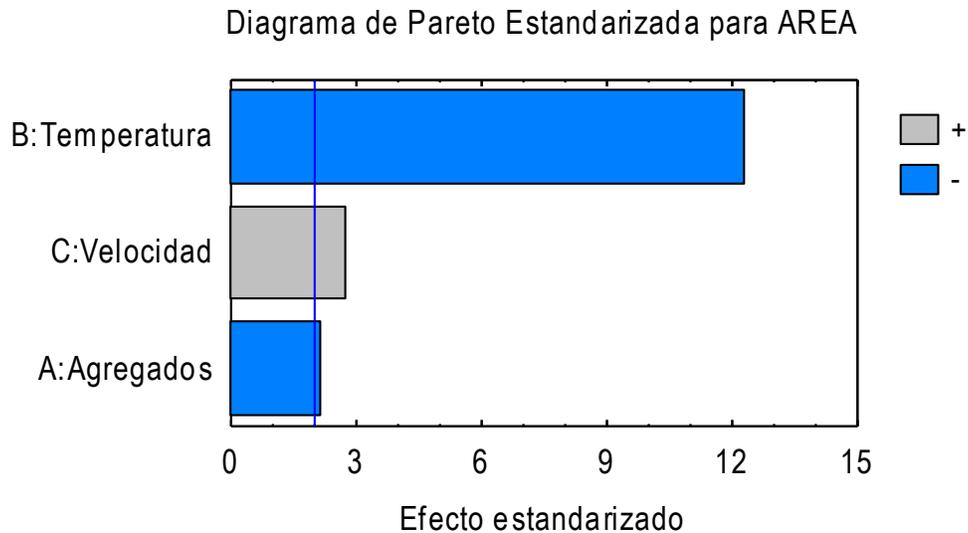
Error absoluto medio = 72,23

Estadístico Durbin-Watson = 1,566 (P=0,0400)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,199

La tabla ANOVA (Tabla 4.13) particiona la variabilidad de AREA en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 79,55% de la variabilidad en AREA. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 78,16%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 104,9. El error medio absoluto (MAE) de 72,23 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Debido a que el valor-P es menor que 5,0%, hay una indicación de posible correlación serial al nivel de significancia del 5,0%.



**Figura 4.40: Diagrama de Pareto estandarizada ajustado para ÁREA**  
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

#### 4.3.4. Coeficiente de regresión para área (N.mm)

**Tabla 4.14: Coeficientes de regresión para ÁREA (mm)**

<b>Coeficiente</b>	<b>Estimado</b>
constante	644,1
A:Agregados	-32,31
B:Temperatura	-24,81
C:Velocidad	3,312

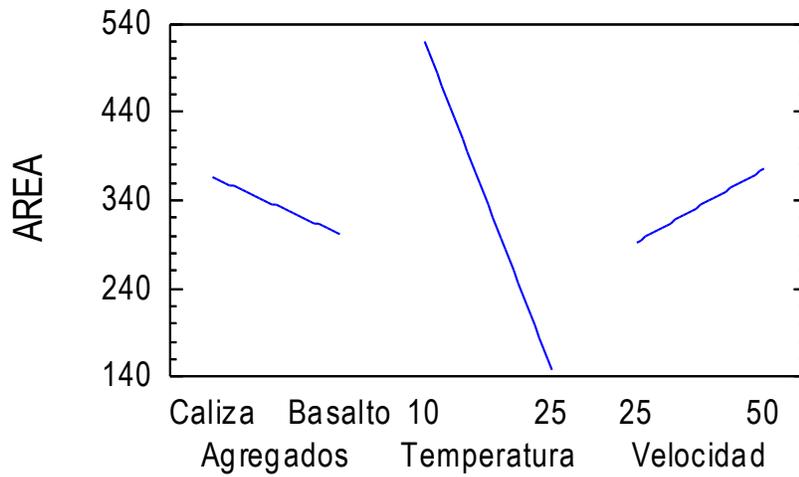
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

La ecuación de regresión del modelo ajustado es

$$AREA = 644,1 - 32,31 * Agregados - 24,81 * Temperatura + 3,312 * Velocidad$$

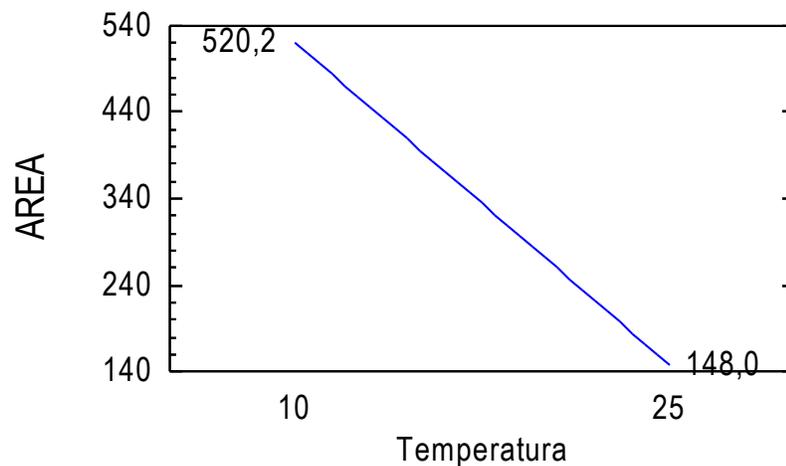
En donde los valores de las variables se encuentran especificados en sus unidades originales, excepto para los factores categóricos que toman valores de -1 para el nivel bajo y +1 para el nivel alto.

**4.3.5. Gráficas de efectos principales para área (N.mm)**



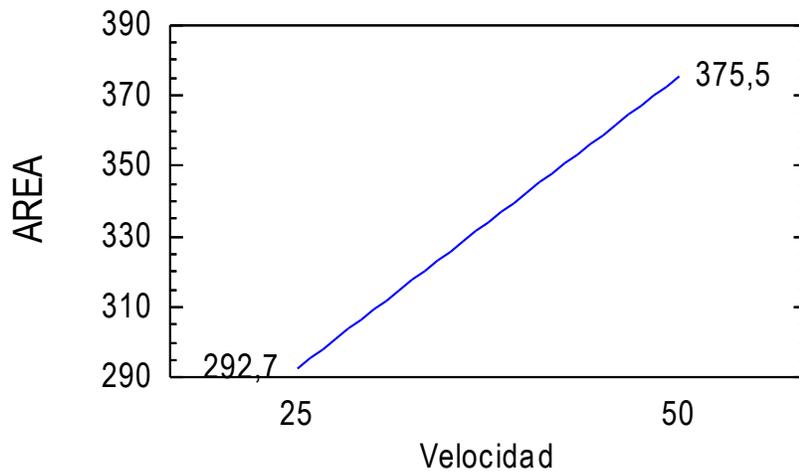
**Figura 4.41: Gráfica de efectos principales para ÁREA tomando en cuenta los 3 factores**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

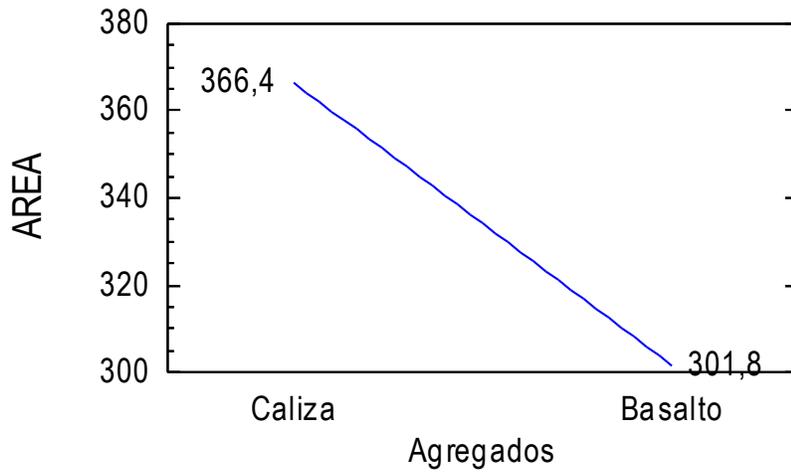


**Figura 4.42: Gráfica de efectos principales para ÁREA vs. Temperaturas**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.43: Gráfica de efectos principales para ÁREA vs. Velocidades**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.44: Gráfica de efectos principales para ÁREA vs. Agregados**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

#### 4.3.6. Resultados estimados para área (N.mm)

Tabla 4.15: Resultados estimados para ÁREA (N.mm)

<i>Fila</i>	<i>Observados Valores</i>	<i>Ajustados Valores</i>	<i>Inferior 95,0% para Media</i>	<i>Superior 95,0% para Media</i>
1	403,0	524,1	449,2	598,9
2	449,0	459,5	384,6	534,3
3	166,0	151,9	77,01	226,7
4	91,0	87,25	12,39	162,1
5	536,0	606,9	532,0	681,7
6	548,0	542,3	467,4	617,1
7	152,0	234,7	159,8	309,5
8	95,0	170,0	95,18	244,9
9	561,0	524,1	449,2	598,9
10	410,0	459,5	384,6	534,3
11	155,0	151,9	77,01	226,7
12	151,0	87,25	12,39	162,1
13	756,0	606,9	532,0	681,7
14	683,0	542,3	467,4	617,1
15	162,0	234,7	159,8	309,5
16	235,0	170,0	95,18	244,9
17	604,0	502,8	428,0	577,7
18	588,0	438,2	363,3	513,1
19	147,0	130,6	55,76	205,5
20	90,0	66,0	-8,863	140,9
21	581,0	585,6	510,8	660,5
22	384,0	521,0	446,1	595,9
23	129,0	213,4	138,6	288,3
24	115,0	148,8	73,93	223,7
25	333,0	502,8	428,0	577,7
26	260,0	438,2	363,3	513,1
27	78,0	130,6	55,76	205,5
28	64,0	66,0	-8,863	140,9
29	568,0	585,6	510,8	660,5
30	791,0	521,0	446,1	595,9
31	266,0	213,4	138,6	288,3
32	215,0	148,8	73,93	223,7
33	559,0	506,3	431,5	581,2
34	286,0	441,7	366,8	516,6
35	148,0	134,1	59,26	209,0
36	116,0	69,5	-5,363	144,4
37	612,0	589,1	514,3	664,0
38	614,0	524,5	449,6	599,4

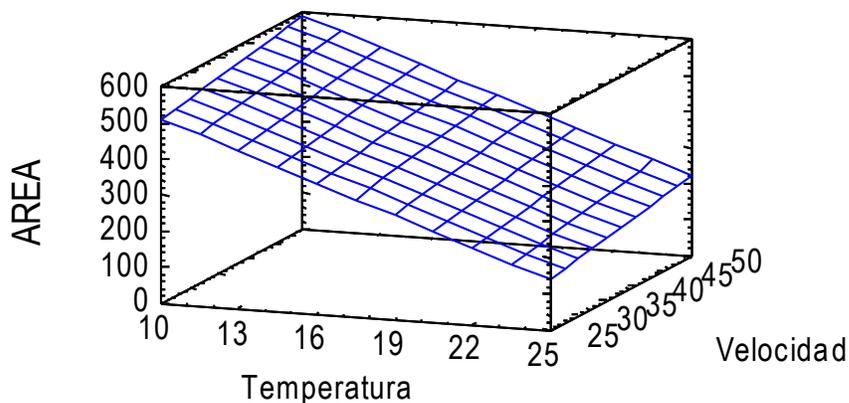
39	205,0	216,9	142,1	291,8
40	109,0	152,3	77,43	227,2
41	763,0	506,3	431,5	581,2
42	368,0	441,7	366,8	516,6
43	158,0	134,1	59,26	209,0
44	76,0	69,5	-5,363	144,4
45	520,0	589,1	514,3	664,0
46	307,0	524,5	449,6	599,4
47	231,0	216,9	142,1	291,8
48	197,0	152,3	77,43	227,2

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

La Tabla 4.15 contiene información acerca de los valores de AREA generados usando el modelo ajustado. Esta tabla incluye:

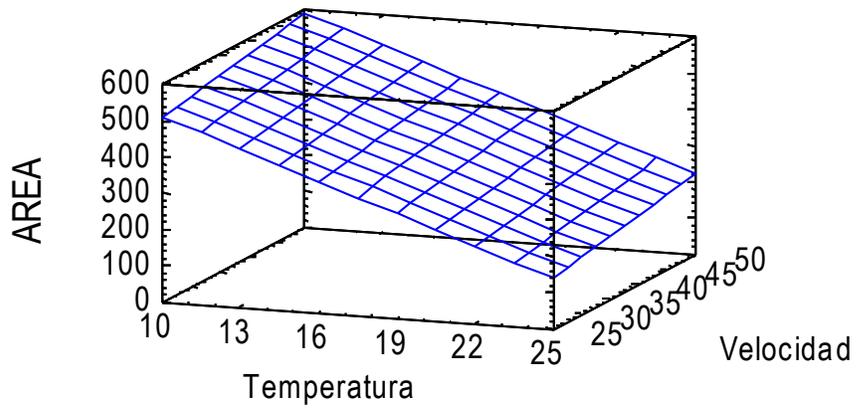
- (1) los valores observados de AREA (si alguno)
- (2) el valor predicho de AREA usando el modelo ajustado
- (3) intervalos de confianza del 95,0% para la respuesta media

#### 4.3.7. Gráfica de superficie de respuesta estimada

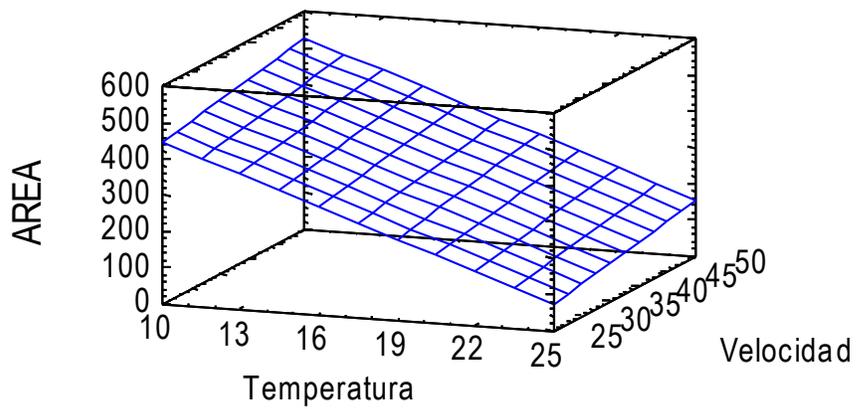


**Figura 4.45: Superficie de respuesta estimada (Caliza, Textura: 50)**

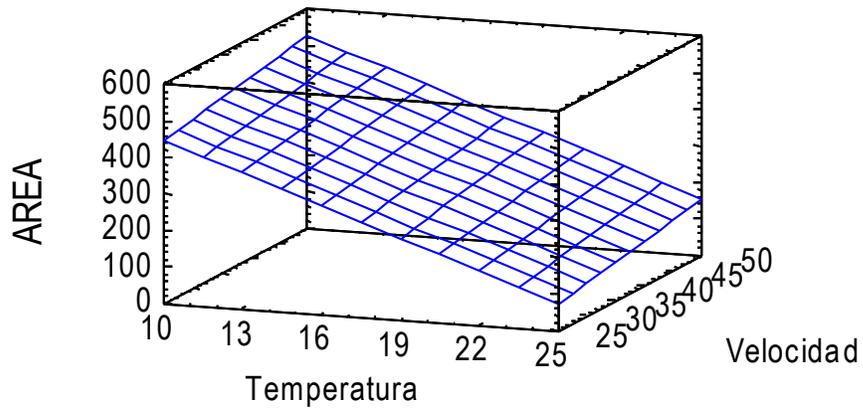
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.46: Superficie de respuesta estimada (Caliza, Textura: 120)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



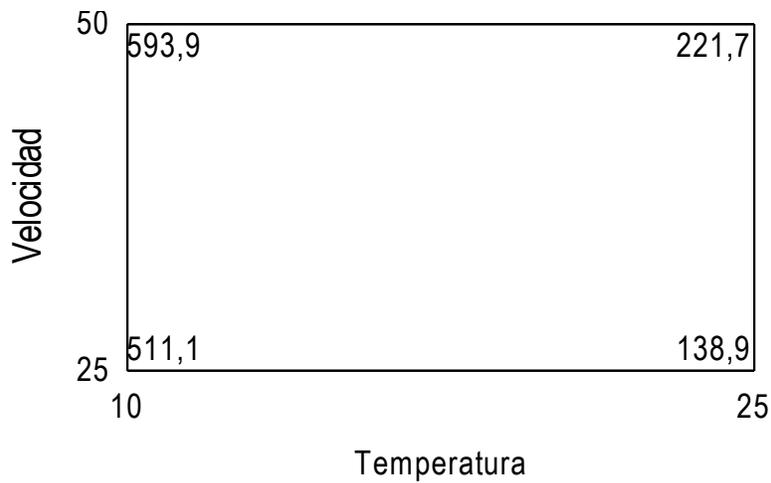
**Figura 4.47: Superficie de respuesta estimada (Basalto, Textura: 50)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.48: Superficie de respuesta estimada (Basalto, Textura: 120)**

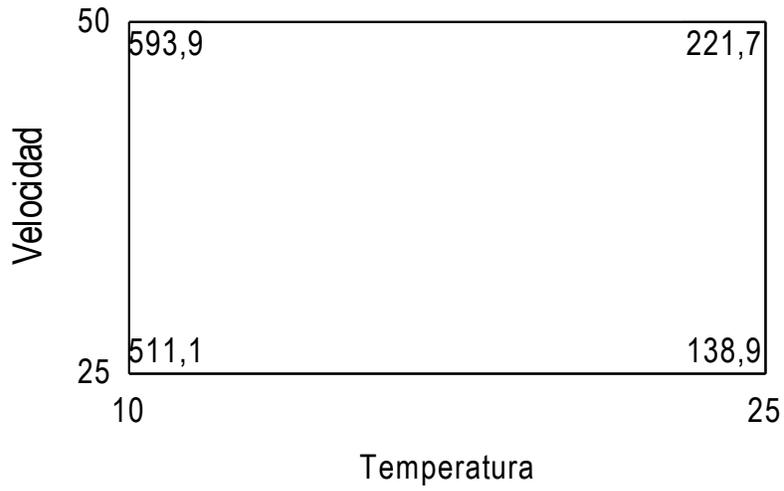
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

#### 4.3.8. Gráficas de cuadros para área (N.mm)



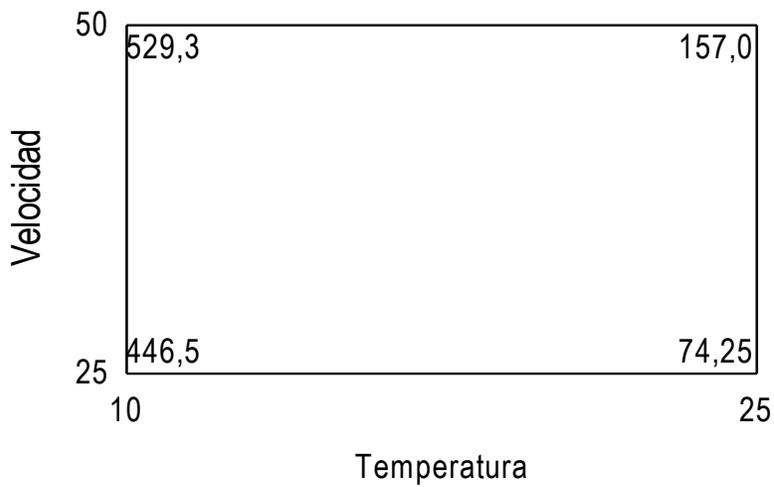
**Figura 4.49: Gráfica de cuadro para ÁREA (Caliza, Textura: 50)**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



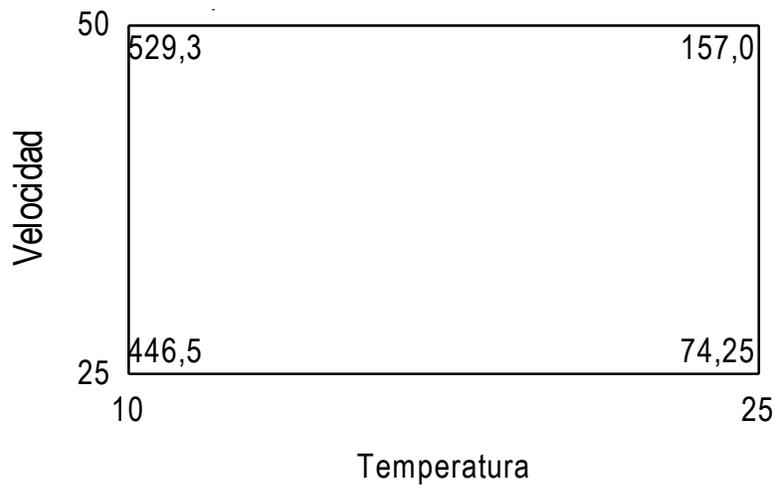
**Figura 4.50: Gráfica de cuadro para ÁREA (Caliza, Textura: 120)**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.51: Gráfica de cuadro para ÁREA (Basalto, Textura: 50)**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



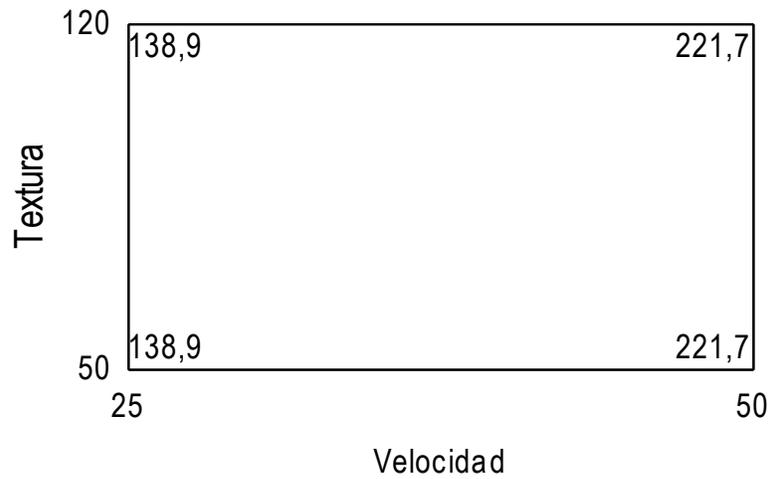
**Figura 4.52: Gráfica de cuadro para ÁREA (Basalto, Textura: 120)**

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

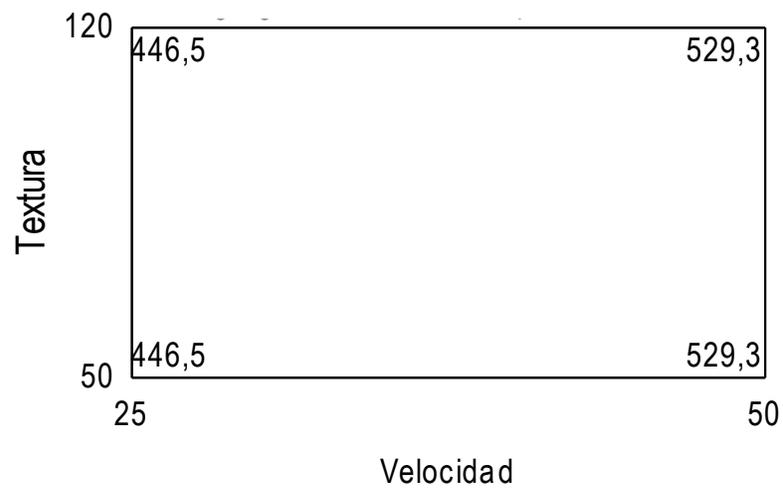


**Figura 4.53: Gráfica de cuadro para ÁREA (Caliza, Temperatura: 10°C)**

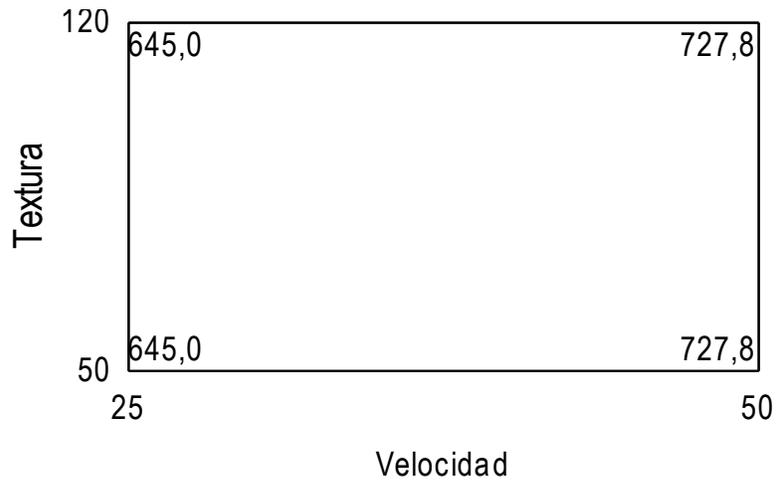
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.54: Gráfica de cuadro para ÁREA (Caliza, Temperatura: 25°C)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

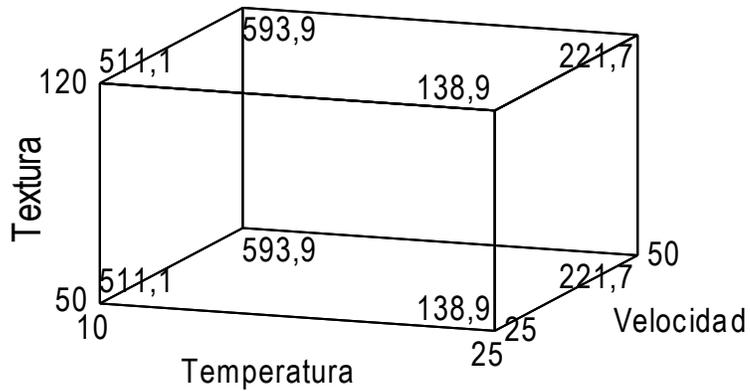


**Figura 4.55: Gráfica de cuadro para ÁREA (Basalto, Temperatura: 10°C)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

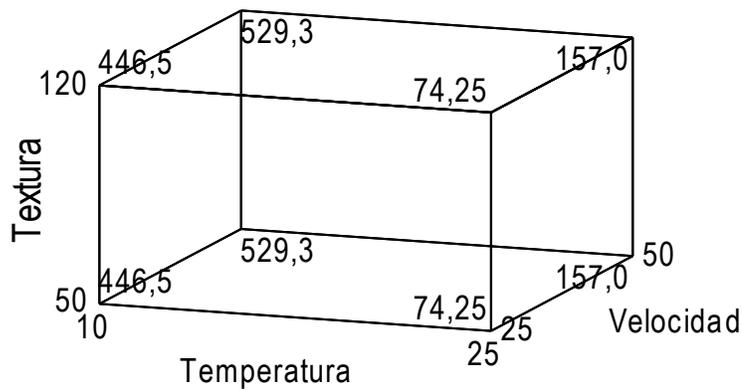


**Figura 4.56: Gráfica de cuadro para ÁREA (Basalto, Temperatura: 25°C)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

#### 4.3.9. Gráficas de cubos para área (N.mm)



**Figura 4.57: Gráfica de cubo para ÁREA (Caliza)**  
 Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics



**Figura 4.58: Gráfica de cubo para ÁREA (Basalto)**  
Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

#### 4.4. Optimización de la respuesta

Siendo nuestra meta maximizar CR, para poder mejorar la apreciación de la incidencia de los diferentes factores estudiados, y otros por estudiar aún como la humedad, se realizó un nuevo análisis de los resultados considerando los agregados de manera independiente. De esta forma se obtuvo:

##### Agregado Caliza:

La ecuación de regresión correspondiente es:

$$CR = 2909,8 - 80,878 * Temperatura - 0,20286 * Velocidad - 3,8762 * Textura + 0,11219 * Velocidad * Textura$$

**Tabla 4.16: Resultados óptimos de agregado caliza**

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Temperatura	10,0	25,0	10,0
Velocidad	25,0	50,0	50,0
Textura	50,0	120,0	120,0

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

$$Valor\ óptimo = 2298,9 N$$

### **Agregado Basalto:**

La ecuación de regresión correspondiente es:

$$CR = 2171,8 - 78,039 * Temperatura + 10,91 * Velocidad + 2,4155 * Textura$$

**Tabla 4.17: Resultados óptimos de agregado basalto**

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
Temperatura	10,0	25,0	10,0
Velocidad	25,0	50,0	50,0
Textura	50,0	120,0	120,0

Fuente: Información obtenida a través del software Statgraphics

$$Valor\ óptimo = 2226,8 N$$

Ya que los valores que corresponden al óptimo para cada factor en ambos agregados son coincidentes, se trabajará en el procedimiento de diseño de daño en agua con dichos valores.

## CAPÍTULO V

### 5. EVALUACIÓN DEL DAÑO POR EL EFECTO DEL AGUA EN EL SISTEMA ASFALTO - AGREGADO MINERAL

#### 5.1. Introducción

Como ya ha sido tratado en los numerales 2.3.3, la calidad del tipo de asfalto y del agregado es vital para el comportamiento ante el agua. Por esta razón se presenta a continuación, partiendo de la metodología experimental seleccionada, un pequeño estudio sobre el daño por el agua en estos sistemas empleando 5 tipos de rocas diferentes, dos de las cuales ya habían sido utilizadas en los estudios previos.

#### 5.2. Características de los materiales

Se resume a continuación las pruebas realizadas a las rocas.

##### 5.2.1. Basalto UR

**Tabla 5.1: Características del agregado (piedra basalto UR)**

<b>Gravedad específica de masa</b>	2,657
<b>Gravedad específica de s.s.s.</b>	2,7
<b>Gravedad específica aparente</b>	2,778
<b>Absorción (%)</b>	1,65
<b>Durabilidad ante sulfato de sodio (%)</b>	9
<b>Abrasión de Los Ángeles (%)</b>	18,1

Fuente: Información suministrada por el tutor de este trabajo

### 5.2.2. Argilita

**Tabla 5.2: Características del agregado (piedra argilita)**

<b>Gravedad específica de masa</b>	2,274
<b>Gravedad específica de s.s.s.</b>	2,394
<b>Gravedad específica aparente</b>	2,585
<b>Absorción (%)</b>	5,29
<b>Durabilidad ante sulfato de sodio (%)</b>	26,5
<b>Abrasión de Los Ángeles (%)</b>	20,6

Fuente: Información suministrada por el tutor de este trabajo

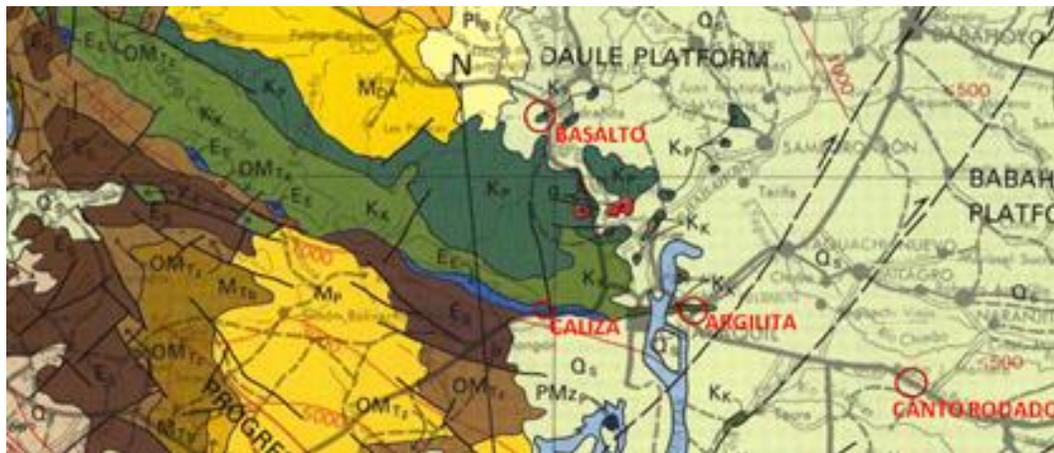
### 5.2.3. Canto rodado (Aluviales)

**Tabla 5.3: Características del agregado (piedra canto rodado)**

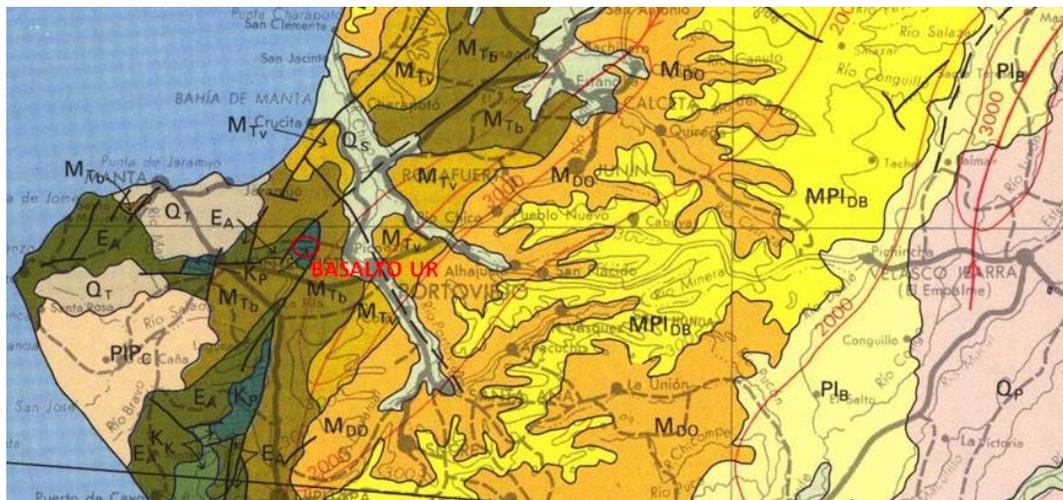
<b>Gravedad específica de masa</b>	2,766
<b>Gravedad específica de s.s.s.</b>	2,796
<b>Gravedad específica aparente</b>	2,851
<b>Absorción (%)</b>	1,09
<b>Durabilidad ante sulfato de sodio (%)</b>	1,2
<b>Abrasión de Los Ángeles (%)</b>	16,6

Fuente: Información suministrada por el tutor de este trabajo

La ubicación en los mapas geológicos de las canteras de los materiales que se analizarán en daño de agua, además de los vistos en el diseño experimental previo, se muestran a continuación:



**Figura 5.1: Tipo de rocas según mapa geológico de provincia de Guayas**  
Fuente: National Geological Map of the Republic of Ecuador, 1982



**Figura 5.2: Tipo de rocas según mapa geológico de provincia de Manabí**  
Fuente: National Geological Map of the Republic of Ecuador, 1982



Esquistos, pizarras tobáceas, argilita (Miembro Guayaquil de la Formación Cayo).



Rocas basálticas, brechas, tobas (Formación Piñón)



Calizas (Formación San Eduardo)

El asfalto empleado es el mismo a lo largo de todo el estudio y sus características ya están reportadas en el numeral 3.3.2.

### **5.3. Ampliación del procedimiento de ensayo para considerar el daño debido al agua**

1. Preparar para cada tipo de roca 6 “sándwiches”, siguiendo la metodología establecida en el numeral 3.2. De estos, 3 para pruebas sin inmersión y 3 para pruebas con inmersión en agua. (Figura 5.1)



**Figura 5.3: Muestras preparadas para ser ensayadas**

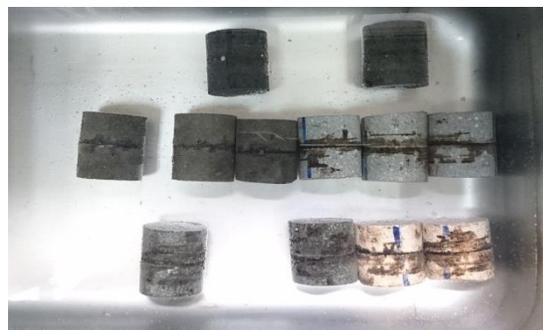
Fuente: Fotografía de los autores

2. Aplicar directamente en el procedimiento sin inmersión la metodología establecida ( $T=10^{\circ}\text{C}$ , grano de lija=120, velocidad de carga=50mm/min). La temperatura en las muestras se consiguió en una cámara térmica con temperatura regulable (en este caso del equipo NAT) a  $10^{\circ}\text{C}$  por 2h. (Figura 5.2)



**Figura 5.4: Muestras en el NAT**  
Fuente: Fotografía de los autores

3. Realizar en el procedimiento con inmersión los siguientes pasos:
  - a. Colocación de muestras (“sándwiches”) en baño de agua a  $60^{\circ}\text{C}$  por 24h. Con ello se mantuvo invariable el criterio recogido en la norma ASTM 4867M-96 sobre el condicionamiento a las muestras en el agua. (Figura 5.3)



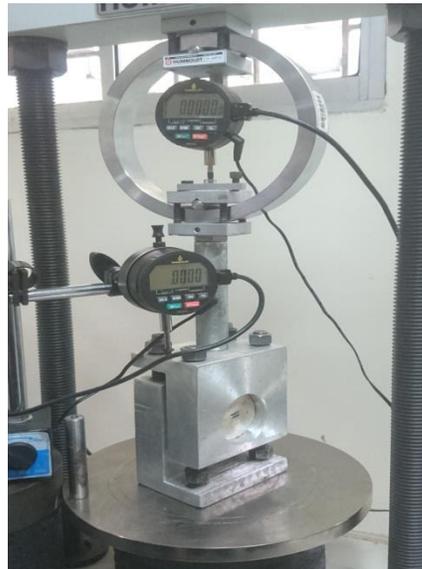
**Figura 5.5: Muestras en Baño María**  
Fuente: Fotografía de los autores

- b. Colocación de muestras en baño en agua a 10°C (temperatura de ensayo a cortante) por 2h en la cámara térmica (NAT). (Figura 5.4)



**Figura 5.6: Muestras en baño en agua a 10°C en el NAT**  
Fuente: Fotografía de los autores

4. Ensayos de corte a las muestras sin y con inmersión. (Figura 5.5)



**Figura 5.7: Ensayo de corte**  
Fuente: Fotografía de los autores

## 5.4. Resultados obtenidos

Se presentan a continuación las tablas con los resultados obtenidos a las pruebas realizadas con y sin inmersión al agua.

**Tabla 5.4: Resultados de ensayos a pruebas realizadas sin inmersión**

#Ensayos	Piedra	Desplazamiento (mm)	Carga Rotura (N)	Esf. Cortante (kPa)	Área (N.mm)	Promedios			
						Desp.	Carga Rotura	Esf. Cortante	Área
4	Caliza	0,68	2341	1146	756	0,61	2348	1149	615
5		0,59	2405	1177	568				
6		0,57	2298	1125	520				
28	Basalto	0,66	2447	1198	683	0,68	2255	1104	594
29		0,85	2426	1188	791				
30		0,53	1892	926	307				
49	Basalto UR	0,82	3003	1470	979	0,85	3035	1486	948
50		0,88	3067	1501	917				
		0,00	0	0	0				
51	Argilita	0,52	887	434	215	0,51	1129	553	278
52		0,34	844	413	137				
53		0,66	1657	811	484				
54	Canto Rodado	0,55	2554	1250	618	0,62	2234	1093	597
55		0,54	1742	853	398				
56		0,78	2405	1177	774				

Fuente: Tabla de resultados de Excel de los autores

**Tabla 5.5: Resultados de ensayos a pruebas realizadas con inmersión**

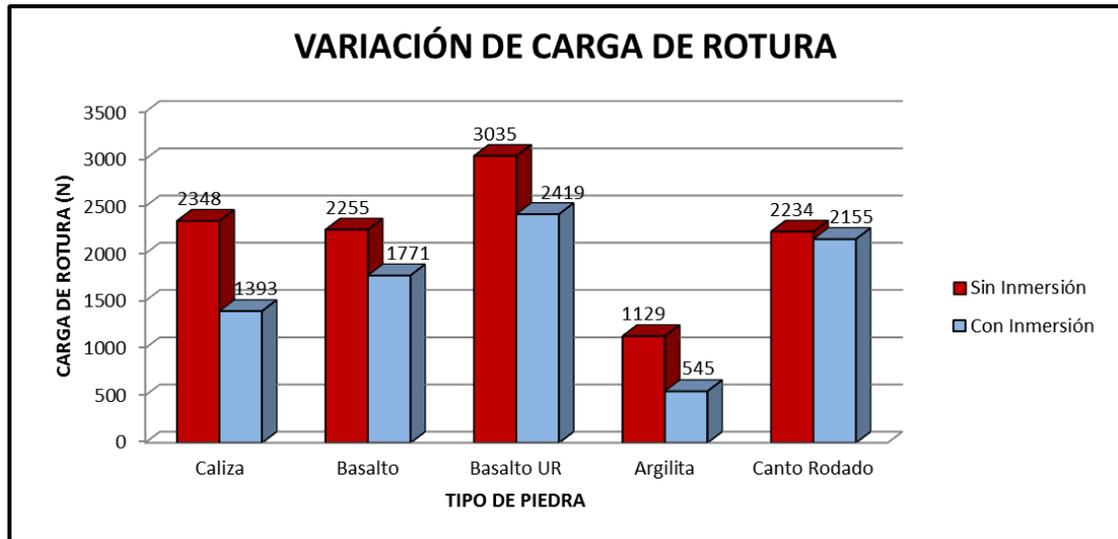
#Ensayos	Piedra	Desplazamiento (mm)	Carga Rotura (N)	Esf. Cortante (kPa)	Área (N.mm)	Promedios			
						Desp.	Carga Rotura	Esf. Cortante	Área
57	Caliza	0,45	1529	748	304	0,44	1393	682	259
58		0,40	1464	717	213				
59		0,45	1186	581	260				
60	Basalto	0,36	1785	874	270	0,55	1771	867	459
61		0,84	1657	811	749				
62		0,45	1871	916	360				
63	Basalto UR	0,69	2490	1219	675	0,73	2419	1184	688
64		0,68	2576	1261	623				
65		0,83	2191	1073	766				
66	Argilita	0,21	438	214	49	0,26	545	267	70
67		0,30	652	319	86				
68		0,26	545	267	76				
69	Canto Rodado	0,51	1700	832	337	0,47	2155	1055	430
70		0,42	2191	1073	390				
71		0,47	2576	1261	563				

Fuente: Tabla de resultados de Excel de los autores

**Tabla 5.6: Resumen de resultados promedios con y sin inmersión al agua**

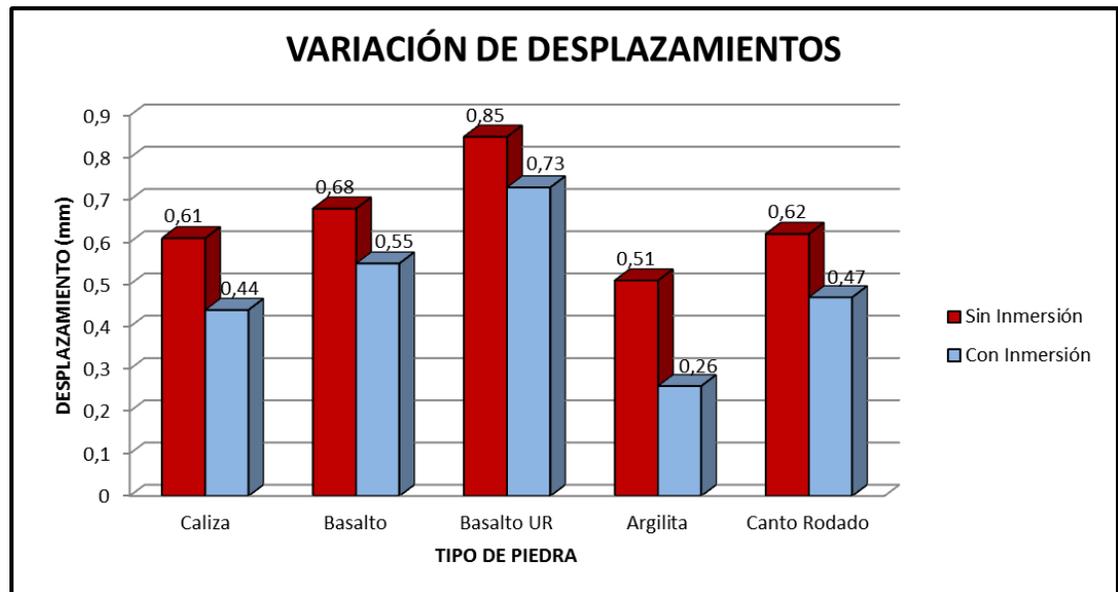
Piedra	Carga de Rotura (N)		Razón de Disminución
	Sin Inmer.	Con Inmer.	
Caliza	2348	1393	0,41
Basalto	2255	1771	0,21
Basalto UR	3035	2419	0,20
Argilita	1129	545	0,52
Canto Rodado	2234	2155	0,04
Piedra	Desplazamientos (mm)		Razón de Disminución
	Sin Inmer.	Con Inmer.	
Caliza	0,61	0,44	0,28
Basalto	0,68	0,55	0,19
Basalto UR	0,85	0,73	0,14
Argilita	0,51	0,26	0,49
Canto Rodado	0,62	0,47	0,24
Piedra	Área (N.mm)		Razón de Disminución
	Sin Inmer.	Con Inmer.	
Caliza	615	259	0,58
Basalto	594	459	0,23
Basalto UR	948	688	0,27
Argilita	278	70	0,75
Canto Rodado	597	430	0,28
Piedra	Res. Cortante(kPa)		% Resistencia al Cortante Retenida
	Sin Inmer.	Con Inmer.	
Caliza	1149	682	59,4
Basalto	1104	867	78,5
Basalto UR	1486	1184	79,7
Argilita	553	267	48,3
Canto Rodado	1093	1055	96,5

Fuente: Tabla de resultados de Excel de los autores



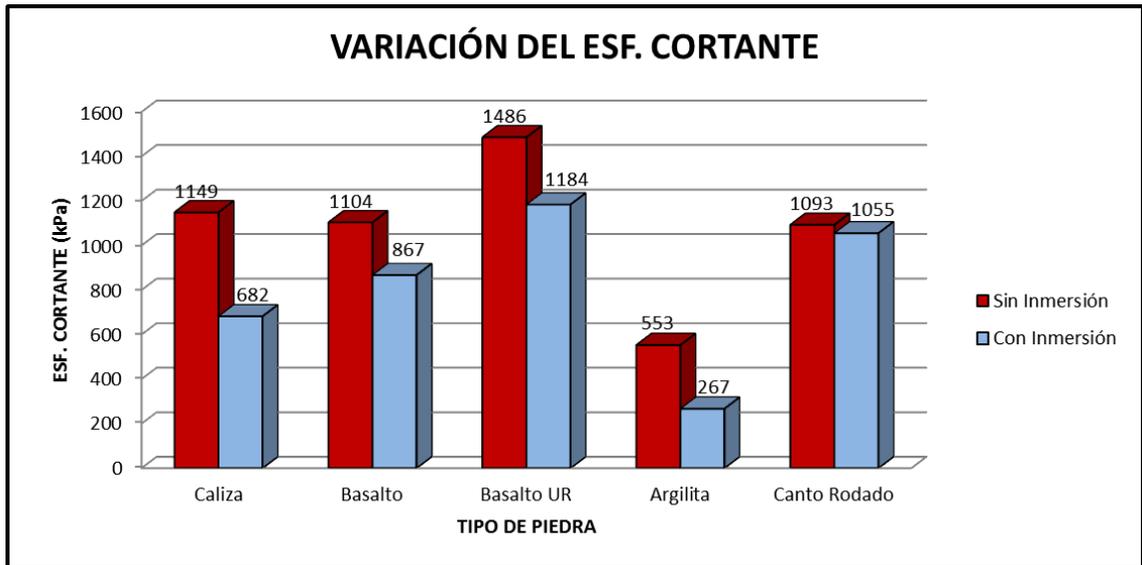
**Figura 5.8: Gráfica de promedios de carga de rotura**

Fuente: Gráfica de Excel de los autores

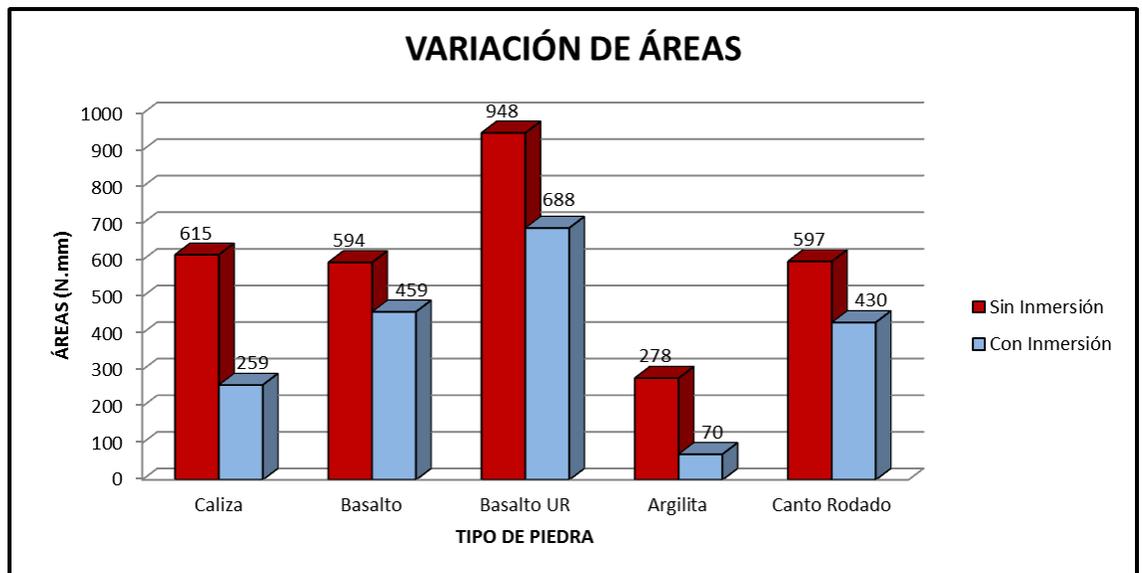


**Figura 5.9: Gráfica de promedios de desplazamientos**

Fuente: Gráfica de Excel de los autores



**Figura 5.10: Gráfica de promedios de esfuerzo cortante**  
Fuente: Gráfica de Excel de los autores



**Figura 5.11: Gráfica de promedios de área**  
Fuente: Gráfica de Excel de los autores

## 5.5. Análisis de resultados

Al analizar las tablas y los gráficos que muestran las variaciones de los parámetros medidos en las diferentes rocas puede observarse que los comportamientos de las muestras (“sándwiches”) sin inmersión cumplen una misma tendencia, es decir, los valores mayores de carga de rotura, desplazamiento, esfuerzo cortante y área corresponden a la piedra basalto UR y los valores menores a la piedra argilita.

Vale aclarar que los mencionados parámetros guardan una estrecha relación ya que una elevada carga de rotura produce altos esfuerzos cortantes y si a un valor elevado de carga de rotura le coincide un alto valor de desplazamiento, esto provocaría un área mayor.

Lo interesante es que los casos mostrados en el basalto UR coinciden una alta carga de rotura y un alto desplazamiento, pudiendo esperarse el resto de los comportamientos. Además, la tendencia contraria ocurre en la roca argilita, donde coincide una baja carga de rotura con un bajo desplazamiento.

En las restantes rocas el comportamiento oscila entre las dos rocas antes mencionadas, siendo muy parecido.

En las muestras con inmersión las tendencias generales se mantienen para los valores máximos (basalto UR) y mínimos (argilita). Para las restantes rocas el comportamiento ante el agua es variable. Por ejemplo: para cargas de rotura sin inmersión muy similares (basalto y canto rodado), los valores de carga de rotura con inmersión son muy diferentes.

En la Tabla 5.6 donde aparece el resumen de daños puede apreciarse que los valores de la resistencia (esfuerzo) a cortante varían apreciablemente entre las diferentes rocas, entre 1486kPa para la piedra basalto UR y 553kPa para la

piedra argilita. El porcentaje de resistencia al cortante retenida varía considerablemente entre las distintas rocas, siendo el valor mayor de 96,5% para el canto rodado y el menor de 48,3% para la argilita. El basalto y el basalto UR tuvieron valores muy parecidos, alrededor del 80%. La roca caliza mostró una resistencia retenida de 59,4%.

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

- En el trabajo se realizó un diseño de experimentos para ajustar un procedimiento mediante una prueba de corte simple para evaluar la resistencia a la ligadura del sistema “asfalto – agregado”. Para dicho trabajo se empleó el programa “Statgraphics” que permitió elaborar un análisis de varianza (ANOVA), con chequeos de los niveles de significación más todas las representaciones gráficas que permitieron llegar a los valores óptimos que son: temperatura, 10°C; velocidad de carga, 50mm/min y textura obtenida con lija de grano 120.
- En el estudio del daño en agua empleando el procedimiento desarrollado se obtuvo que el mayor porcentaje de resistencia al cortante retenida lo tiene el canto rodado (96,5%), seguido por el basalto UR y el basalto (aproximadamente 80%). La roca caliza obtuvo un (59,4%), valor que nos llamó la atención por el buen comportamiento a la adherencia que se le atribuye a esta piedra. El valor más bajo corresponde a la argilita con solo (48%).
- En general, en las muestras sin inmersión se observan tendencias parecidas, es decir, los valores mayores de carga de rotura, desplazamiento, resistencia (esfuerzo) cortante y área, corresponden a la piedra basalto UR, mientras que todos los valores menores corresponden a la piedra argilita. En las muestras con inmersión las

tendencias generales antes mencionadas se mantienen para los valores máximos y mínimos, pero para el resto de rocas el comportamiento ante el agua es variable con razones de disminución más bajas siempre para el caso de la roca basáltica, el basalto UR y el canto rodado.

## **6.2. Recomendaciones**

- Realizar un diseño experimental nuevo que permita ajustar los factores relacionados con el proceso de inmersión en agua (por ejemplo: temperatura y tiempo en Baño María) para una mejor consideración del daño debido a la humedad, empleando el procedimiento de partida ajustado en este trabajo.
- Ganar experiencia en el manejo del procedimiento propuesto, empleando otros tipos de roca y de asfaltos.
- Estudiar la composición mineralógica de las rocas para poder valorar los comportamientos evaluados con aspectos teóricos importantes.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar, J., Salazar, J., Villegas, R., Loría, L., Hajj, E., & Navas, A. (s.f.). *Evaluación de adhesión de mezclas asfálticas en Costa Rica mediante ensayos de BBS y de ángulo de contacto.*
- Bahia, H., Hanz, A., Kanitpong, K., & Wen, H. (2007). *Test Method to determine aggregate/asphalt adhesion properties and potential moisture damage.* Wisconsin.
- Botasso, G., Rebollo, O., Soengas, C., Balige, M., Bisio, A., & Berardo, A. (2011). *Metodología para la evaluación en la incorporación de pomotores de adherencia en cementos asfálticos.* Rio de Janeiro.
- Botasso, H., Balige, M., González, R., Bisio, A., & Rebollo, O. (s.f.). *Nueva metodología para la valoración de la adherencia árido ligante .*
- Celis, P., & Deschamps, S. (2005). *Preparación y evaluación de una mezcla en caliente para la obtención de un pavimento ferromagnético que mejore la adhesión entre la superficie pavimento y llanta magnética.* Bucaramanga.
- 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.
- Gutiérrez , H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos.* México: McGraw Hill Interamericana.
- Hefer, A., & Little, D. (2005). *Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond.* Texas.

- Hernández, H., Molina , E., & Reyes, C. (2007). *Propuesta de elaboración de un manual práctico para el control de calidad en el mantenimiento de pavimentos asfálticos*. San Miguel.
- Huamán, N. (2011). *La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos en el Perú*. Lima.
- Moraes, R., Velasquez, R., & Bahia, H. (2011). *Measuring the effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strength test*. Washington.
- Vila, R. (2009). *Prueba simple de corte directo para evaluar mezclas asfálticas*. Lisboa: CILA XV.
- Vila, R., & Aulestia, N. (2007). *Criterios para mejorar los controles rutinarios de calidad a las mezclas asfálticas*. La Habana: CILA XIV.
- Vila, R., & García, G. (2015). *Resistencia de las mezclas asfálticas calientes producidas en el Ecuador ante la acción del agua*. Guayaquil: UCSG.

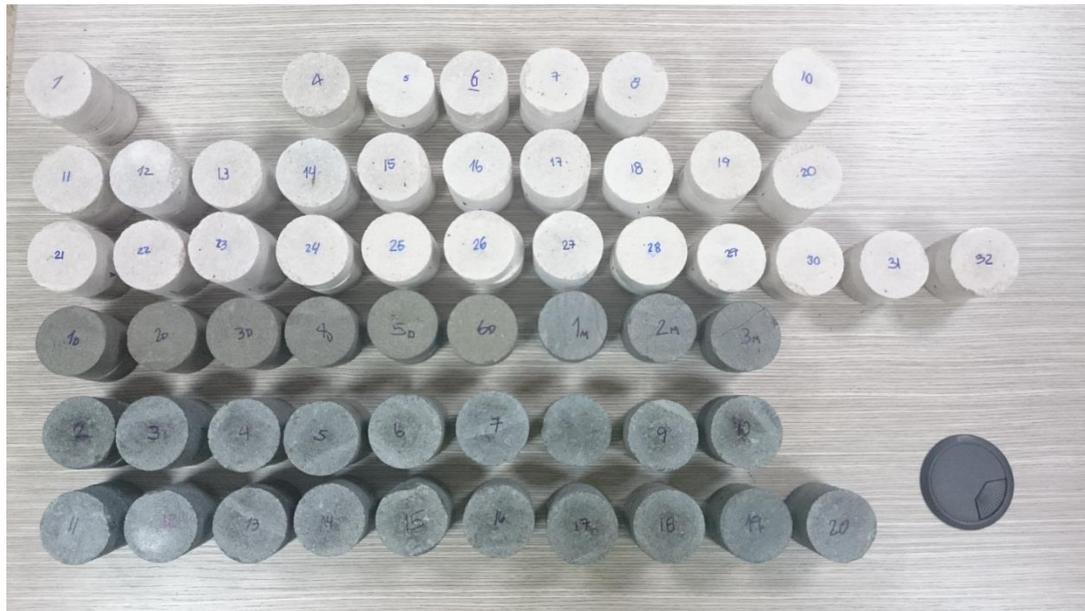
**ANEXOS**



**Anexo 1: Rocas caliza y basalto**



**Anexo 2: Núcleos extraídos de rocas**



**Anexo 3: Pastillas de rocas**



**Anexo 4: Muestra (sándwich) de piedra caliza**



**Anexo 5: Muestra (sándwich) de piedra basalto**



**Anexo 6: Muestra (sándwich) de piedra basalto UR**



**Anexo 7: Muestra (sándwich) de piedra argilita**



**Anexo 8: Muestra (sándwich) de canto rodado**



**Anexo 9: Lavado de pastillas en limpiador ultrasónico**



**Anexo 10: Proceso de recubrir pastillas con papel aluminio**



**Anexo 11: Pastillas luego de cubrir las con papel aluminio**



**Anexo 12: Pastillas previo a ser colocadas en el horno**



**Anexo 13: Pastillas dentro del horno**



**Anexo 14: Proceso de pintado de pastillas**



**Anexo 15: Proceso de pintado de pastillas**



**Anexo 16: Proceso de unión de pastillas**



**Anexo 17: Muestras (sándwiches) en las prensas mecánicas**



**Anexo 18: Muestras (sándwiches) en Baño María**



**Anexo 19: Muestras (sándwiches) dentro del NAT**



**Anexo 20: Muestras (sándwiches) dentro del NAT bajo inmersión**



**Anexo 21: Colocación de la muestra dentro de la máquina de corte**



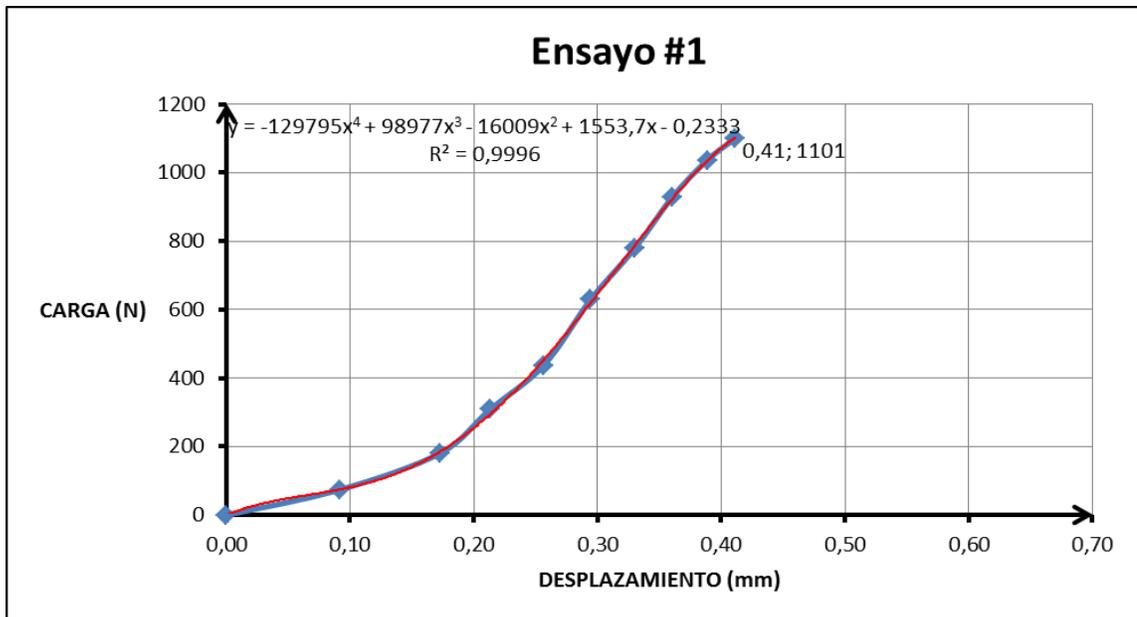
**Anexo 22: Ensayo de corte a muestra (caliza)**



**Anexo 23: Ensayo de corte a muestra (basalto)**

**Anexo 24: Tabla del ensayo #1 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

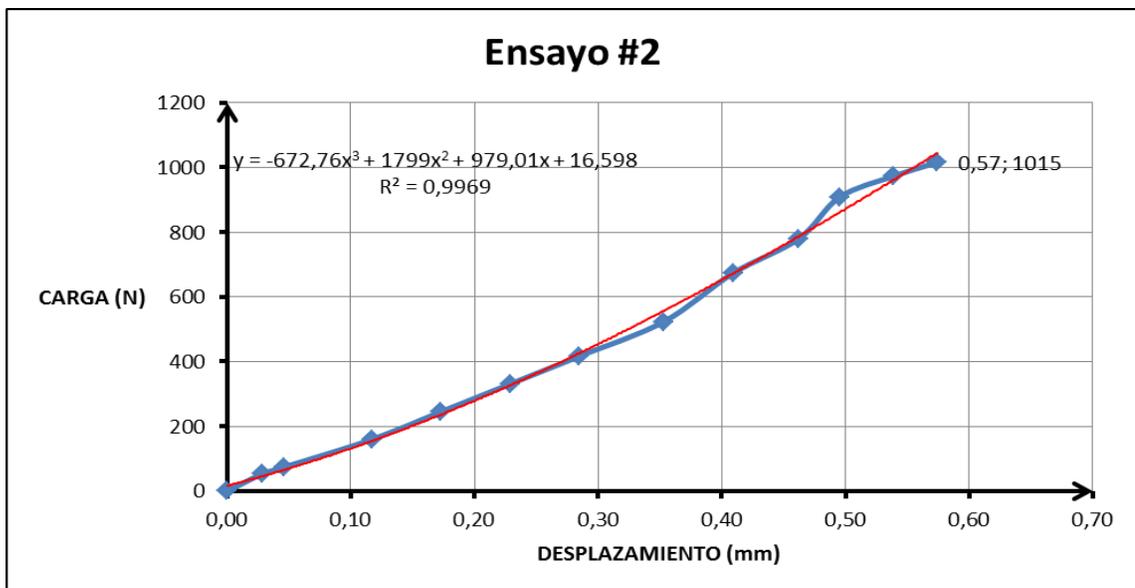
Ensayo #1		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,09	74	36,1
0,17	181	88,5
0,21	309	151,4
0,26	438	214,2
0,29	630	308,5
0,33	780	381,8
0,36	930	455,1
0,39	1037	507,5
0,41	1101	538,9



**Anexo 25: Gráfica de ensayo #1 (Caliza grano 120, 50mm/min, 25°C)**

**Anexo 26: Tabla del ensayo #2 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

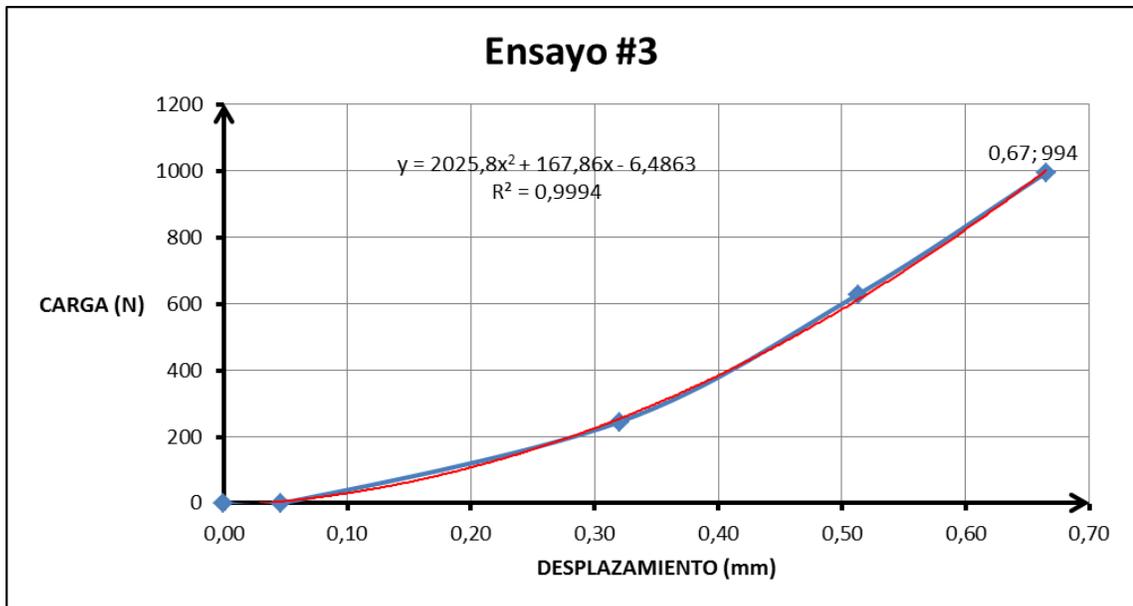
Ensayo #2		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	52	25,7
0,05	74	36,1
0,12	159	78,1
0,17	245	120,0
0,23	331	161,9
0,28	416	203,8
0,35	523	256,2
0,41	673	329,5
0,46	780	381,8
0,50	908	444,7
0,54	973	476,1
0,57	1015	497,0



**Anexo 27: Gráfica de ensayo #2 (Caliza grano 120, 50mm/min, 25°C)**

**Anexo 28: Tabla del ensayo #3 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

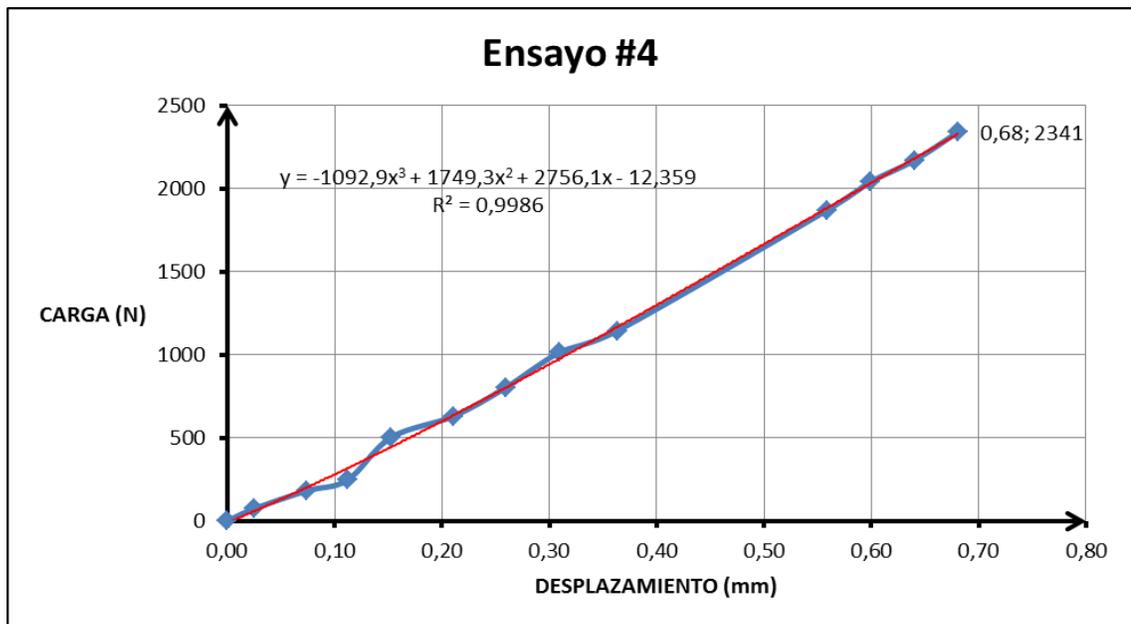
Ensayo #3		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,05	0	0,0
0,32	245	120,0
0,51	629	307,7
0,67	994	486,6



**Anexo 29: Gráfica de ensayo #3 (Caliza grano 120, 50mm/min, 25°C)**

**Anexo 30: Tabla del ensayo #4 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

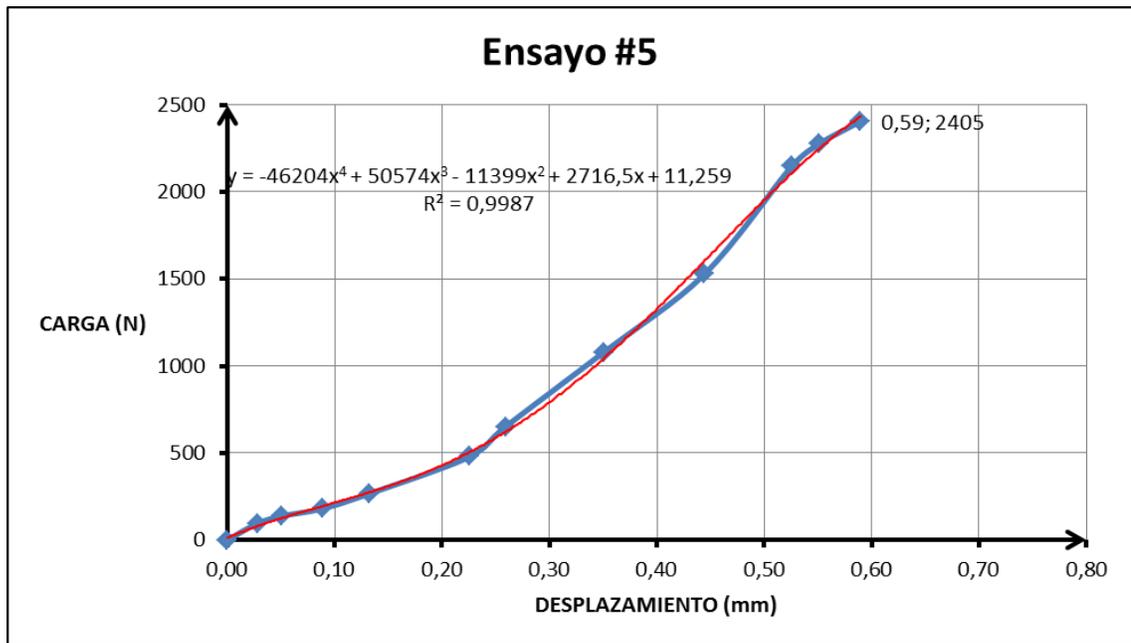
Ensayo #4		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	74	36,1
0,07	181	88,5
0,11	245	120,0
0,15	502	245,7
0,21	630	308,5
0,26	801	392,3
0,31	1015	497,0
0,36	1144	559,8
0,56	1871	915,7
0,60	2042	999,4
0,64	2170	1062,1
0,68	2341	1145,8



**Anexo 31: Gráfica de ensayo #4 (Caliza grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 32: Tabla del ensayo #5 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

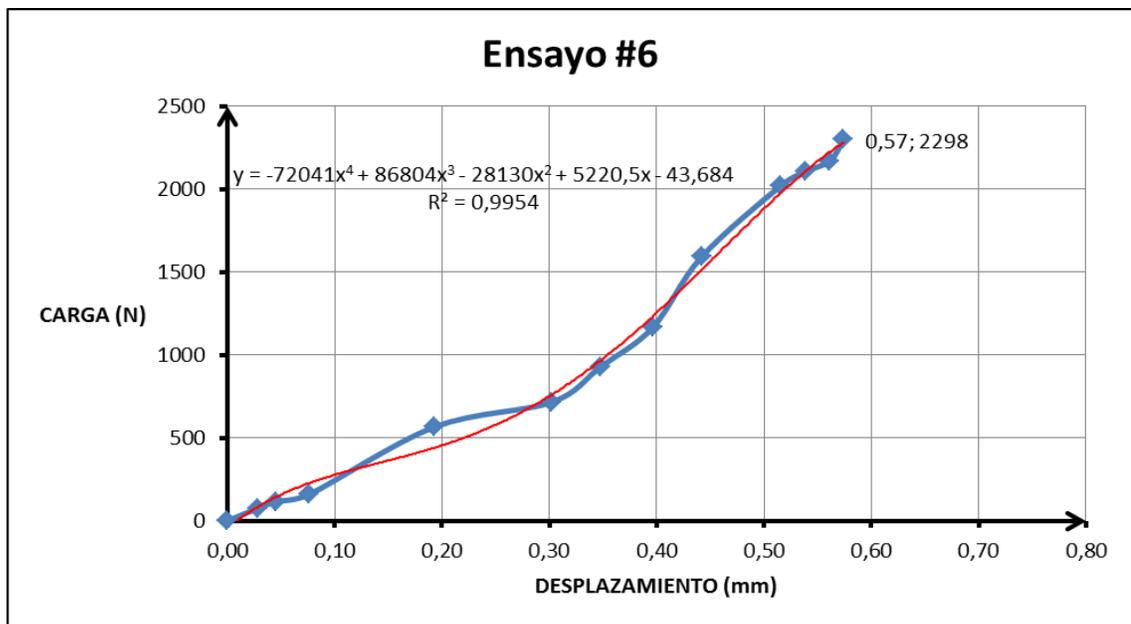
Ensayo #5		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	95	46,6
0,05	138	67,6
0,09	181	88,5
0,13	266	130,5
0,23	480	235,2
0,26	652	319,0
0,35	1079	528,4
0,44	1529	748,2
0,53	2148	1051,6
0,55	2277	1114,4
0,59	2405	1177,2



**Anexo 33: Gráfica de ensayo #5 (Caliza grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 34: Tabla del ensayo #6 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

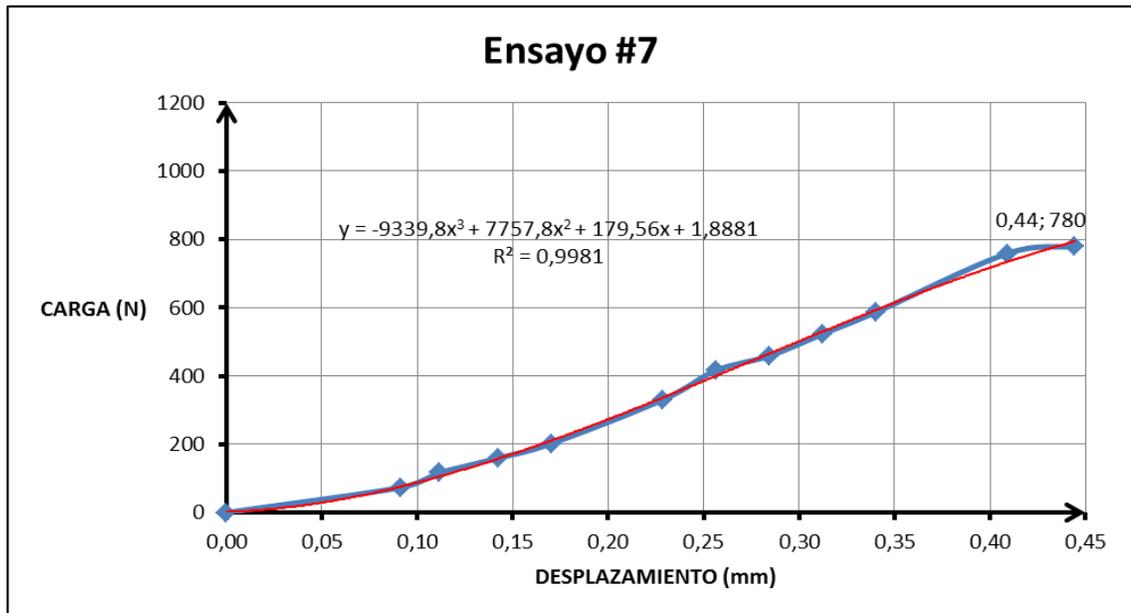
Ensayo #6		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	74	36,1
0,05	117	57,1
0,08	159	78,1
0,19	566	277,1
0,30	716	350,4
0,35	930	455,1
0,40	1165	570,3
0,44	1593	779,6
0,52	2020	988,9
0,54	2106	1030,7
0,56	2170	1062,1
0,57	2298	1124,9



**Anexo 35: Gráfica de ensayo #6 (Caliza grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 36: Tabla del ensayo #7 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

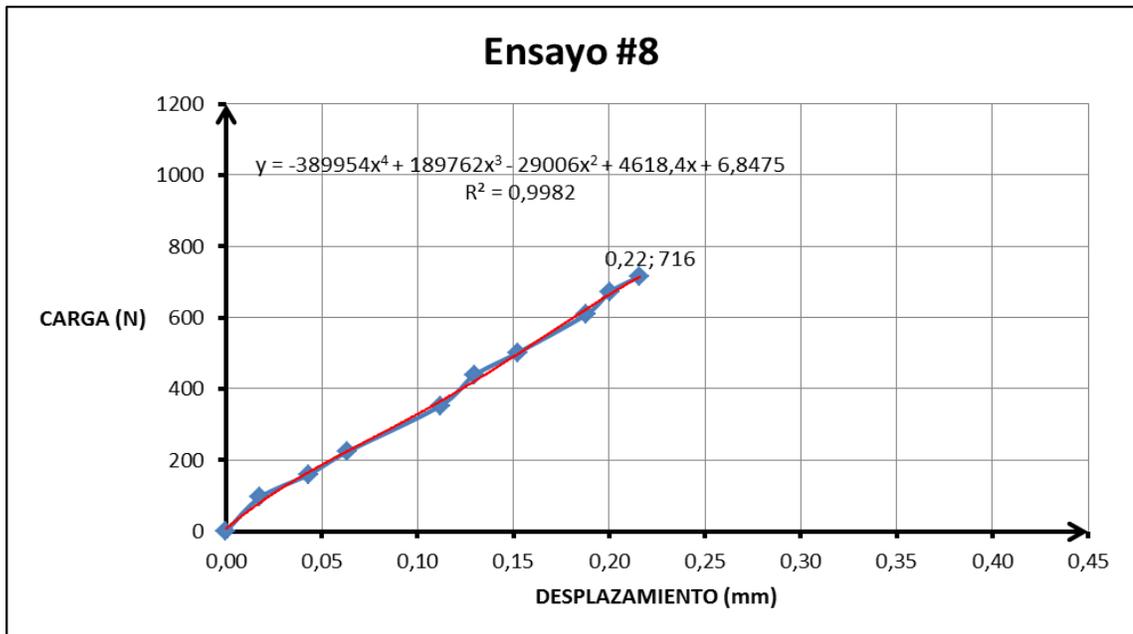
Ensayo #7		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,09	74	36,1
0,11	117	57,1
0,14	159	78,1
0,17	202	99,0
0,23	331	161,9
0,26	416	203,8
0,28	459	224,7
0,31	523	256,2
0,34	587	287,6
0,41	759	371,4
0,44	780	381,8



**Anexo 37: Gráfica de ensayo #7 (Caliza grano 120, 25mm/min, 25°C)**

**Anexo 38: Tabla del ensayo #8 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

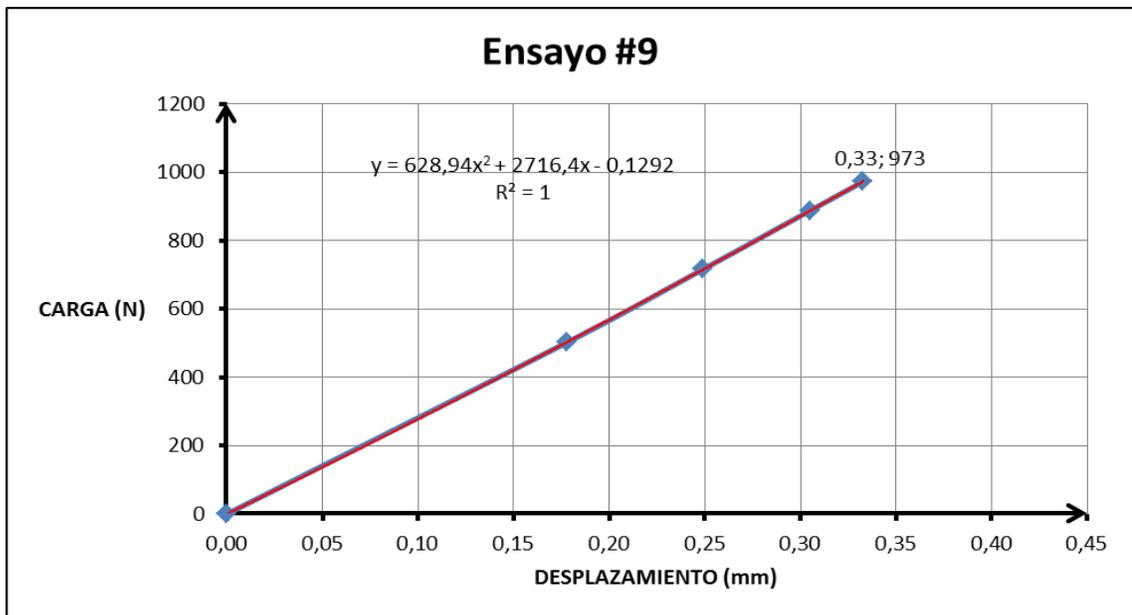
Ensayo #8		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	95	46,6
0,04	159	78,1
0,06	224	109,5
0,11	352	172,4
0,13	438	214,2
0,15	502	245,7
0,19	609	298,0
0,20	673	329,5
0,22	716	350,4



**Anexo 39: Gráfica de ensayo #8 (Caliza grano 120, 25mm/min, 25°C)**

**Anexo 40: Tabla del ensayo #9 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

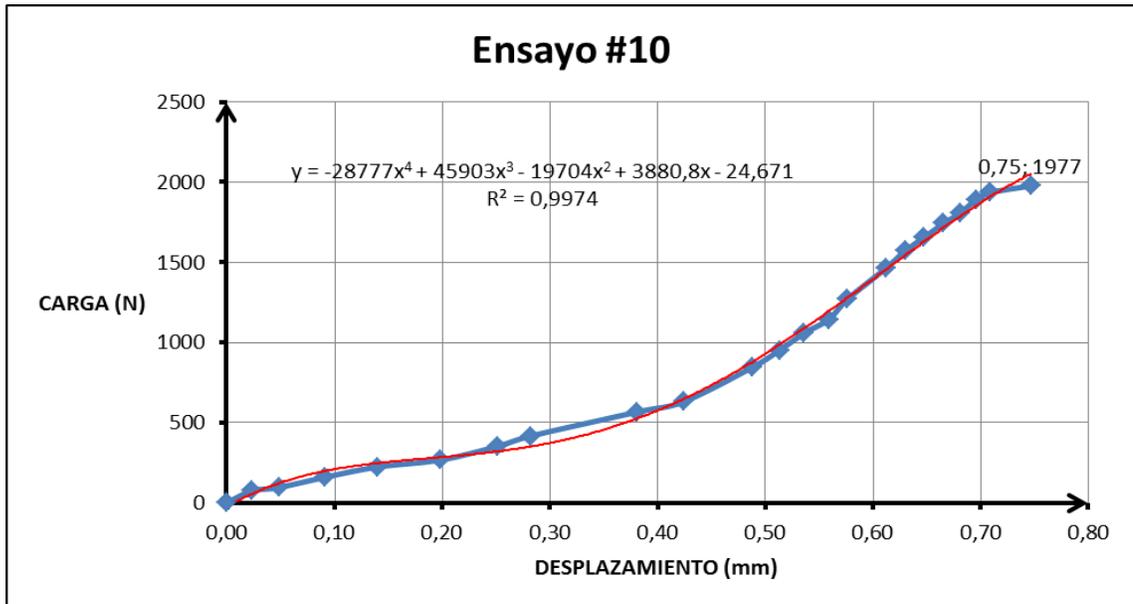
Ensayo #9		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,18	502	245,7
0,25	716	350,4
0,30	887	434,2
0,33	973	476,1



**Anexo 41: Gráfica de ensayo #9 (Caliza grano 120, 25mm/min, 25°C)**

**Anexo 42: Tabla del ensayo #10 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

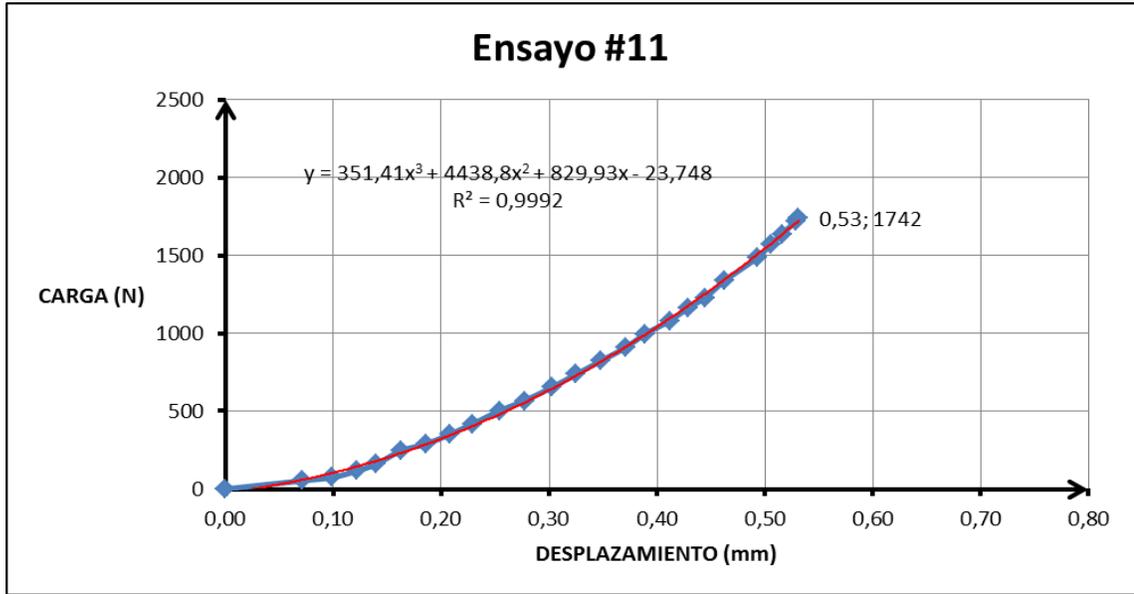
Ensayo #10		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	74	36,1
0,05	95	46,6
0,09	159	78,1
0,14	224	109,5
0,20	266	130,5
0,25	352	172,4
0,28	416	203,8
0,38	566	277,1
0,42	630	308,5
0,49	844	413,2
0,51	951	465,6
0,54	1058	518,0
0,56	1144	559,8
0,58	1272	622,6
0,61	1464	716,8
0,63	1571	769,2
0,65	1657	811,0
0,67	1742	852,9
0,68	1806	884,3
0,70	1892	926,1
0,71	1935	947,0
0,75	1977	968,0



**Anexo 43: Gráfica de ensayo #10 (Caliza grano 120, 25mm/min, 10°C)**

**Anexo 44: Tabla del ensayo #11 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

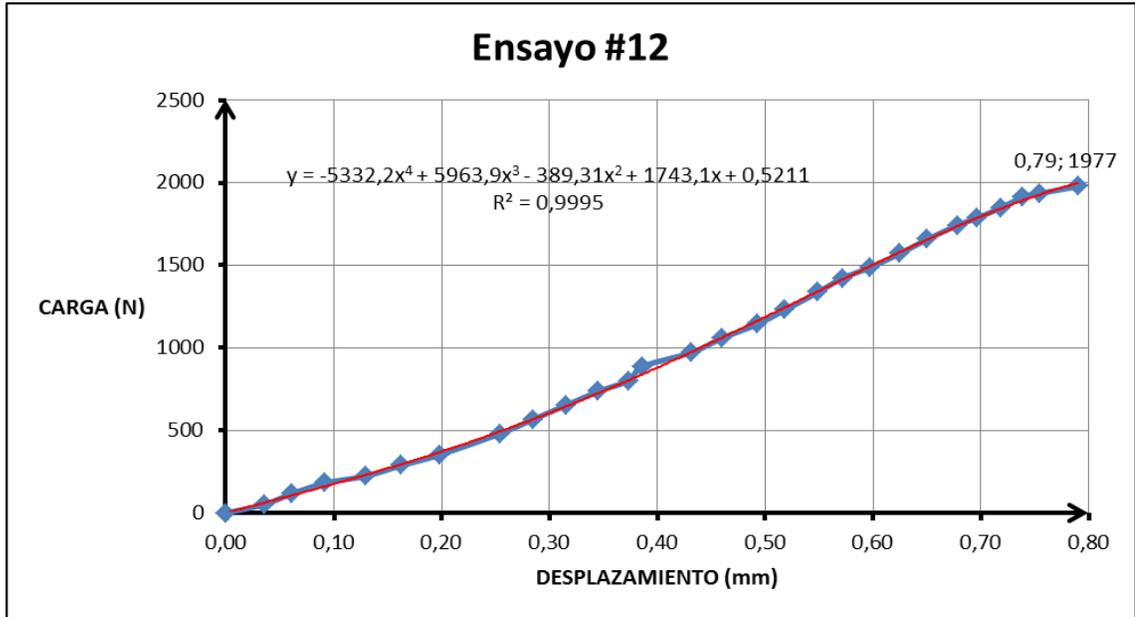
Ensayo #11		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,07	52	25,7
0,10	74	36,1
0,12	117	57,1
0,14	159	78,1
0,16	245	120,0
0,19	288	140,9
0,21	352	172,4
0,23	416	203,8
0,25	502	245,7
0,28	566	277,1
0,30	652	319,0
0,33	737	360,9
0,35	823	402,8
0,37	908	444,7
0,39	994	486,6
0,41	1079	528,4
0,43	1165	570,3
0,44	1229	601,7
0,46	1336	654,0
0,49	1486	727,3
0,51	1571	769,2
0,52	1635	800,6
0,53	1721	842,4
0,53	1742	852,9



**Anexo 45: Gráfica de ensayo #11 (Caliza grano 120, 25mm/min, 10°C)**

**Anexo 46: Tabla del ensayo #12 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

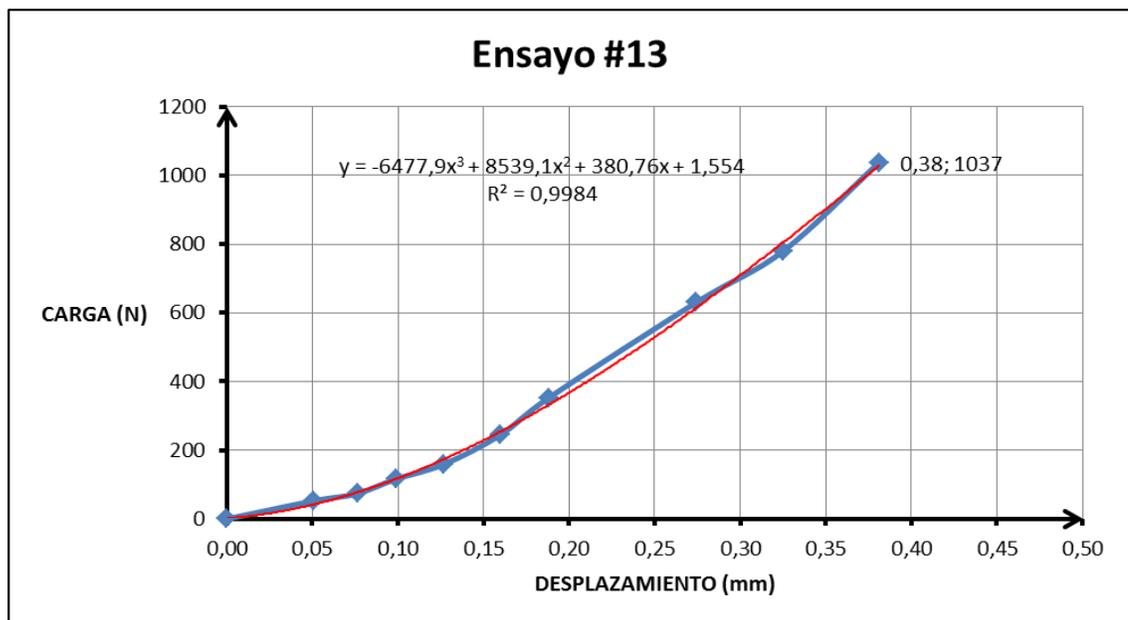
Ensayo #12		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,04	52	25,7
0,06	117	57,1
0,09	181	88,5
0,13	224	109,5
0,16	288	140,9
0,20	352	172,4
0,25	480	235,2
0,28	566	277,1
0,31	652	319,0
0,35	737	360,9
0,37	801	392,3
0,39	887	434,2
0,43	973	476,1
0,46	1058	518,0
0,49	1144	559,8
0,52	1229	601,7
0,55	1336	654,0
0,57	1422	695,9
0,60	1486	727,3
0,62	1571	769,2
0,65	1657	811,0
0,68	1742	852,9
0,70	1785	873,8
0,72	1849	905,2
0,74	1913	936,6
0,75	1935	947,0
0,79	1977	968,0



**Anexo 47: Gráfica de ensayo #12 (Caliza grano 120, 25mm/min, 10°C)**

**Anexo 48: Tabla del ensayo #13 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

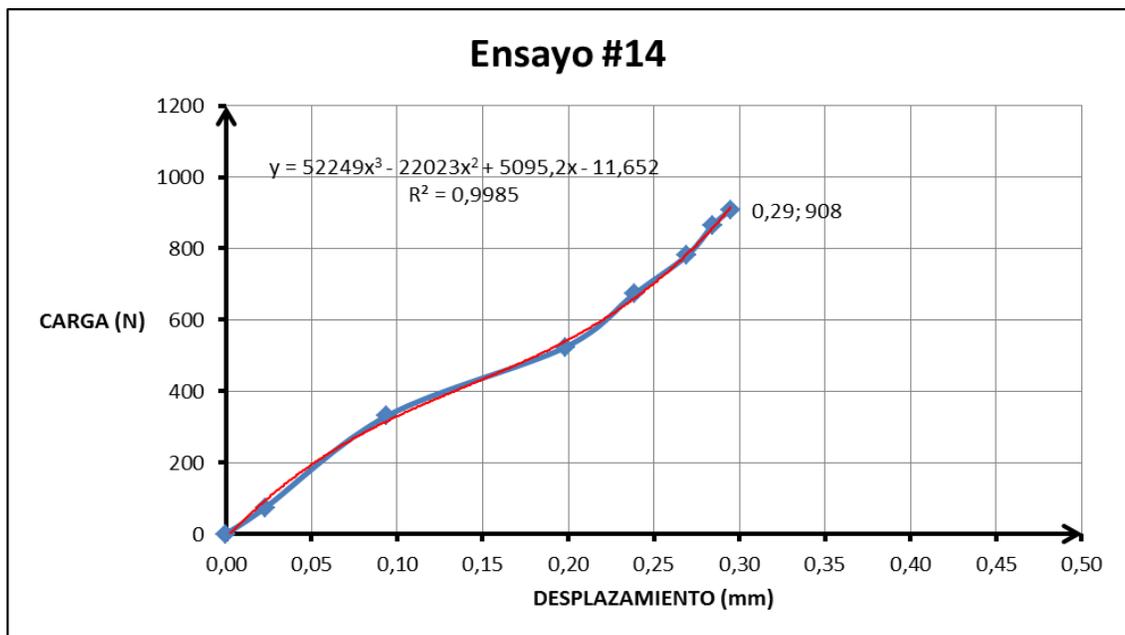
Ensayo #13		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,05	52	25,7
0,08	74	36,1
0,10	117	57,1
0,13	159	78,1
0,16	245	120,0
0,19	352	172,4
0,27	630	308,5
0,33	780	381,8
0,38	1037	507,5



**Anexo 49: Gráfica de ensayo #13 (Caliza grano 50, 50mm/min, 25°C)**

**Anexo 50: Tabla del ensayo #14 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

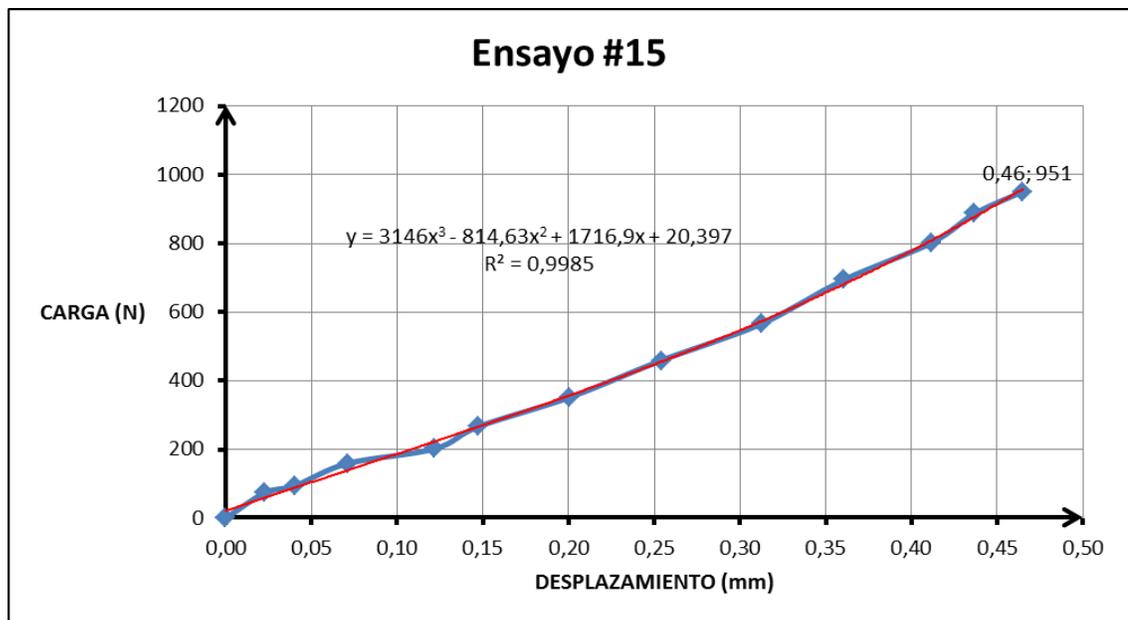
Ensayo #14		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	74	36,1
0,09	331	161,9
0,20	523	256,2
0,24	673	329,5
0,27	780	381,8
0,28	866	423,7
0,29	908	444,7



**Anexo 51: Gráfica de ensayo #14 (Caliza grano 50, 50mm/min, 25°C)**

**Anexo 52: Tabla del ensayo #15 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

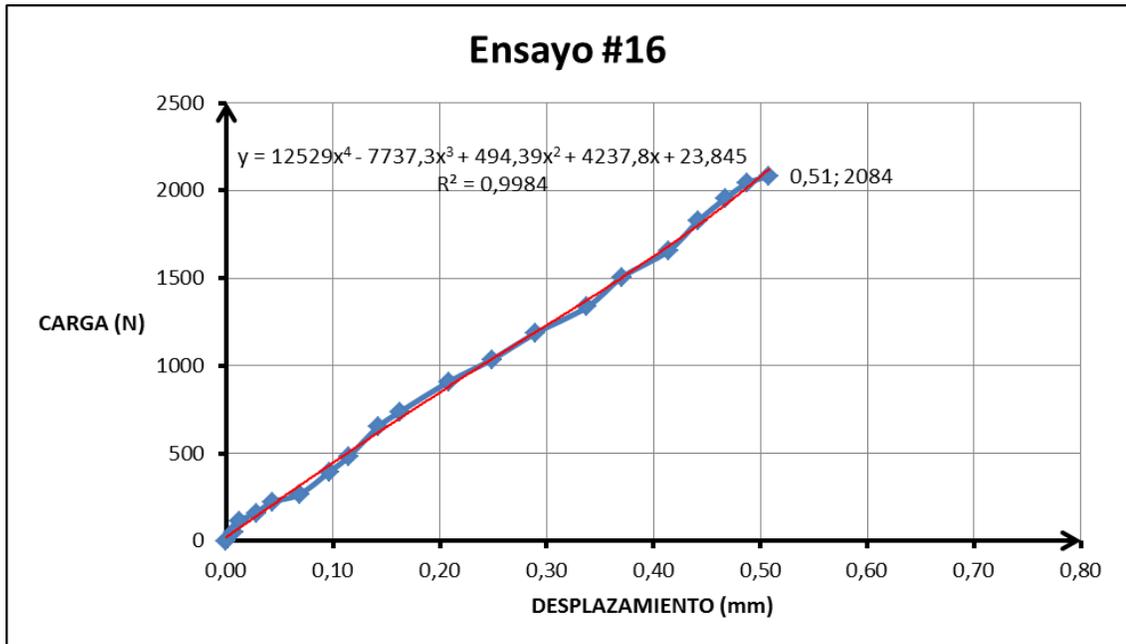
Ensayo #15		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	74	36,1
0,04	95	46,6
0,07	159	78,1
0,12	202	99,0
0,15	266	130,5
0,20	352	172,4
0,25	459	224,7
0,31	566	277,1
0,36	694	339,9
0,41	801	392,3
0,44	887	434,2
0,46	951	465,6



**Anexo 53: Gráfica de ensayo #15 (Caliza grano 50, 50mm/min, 25°C)**

**Anexo 54: Tabla 4 del ensayo #16 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

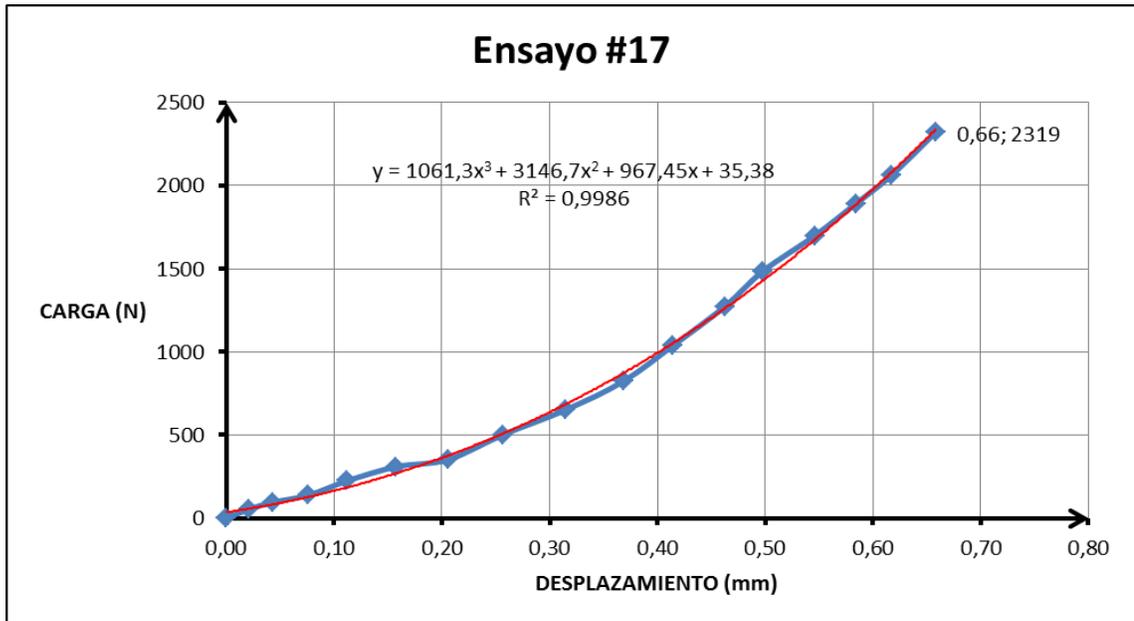
Ensayo #16		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,01	52	25,7
0,01	117	57,1
0,03	159	78,1
0,04	224	109,5
0,07	266	130,5
0,10	395	193,3
0,11	480	235,2
0,14	652	319,0
0,16	737	360,9
0,21	908	444,7
0,25	1037	507,5
0,29	1186	580,8
0,34	1336	654,0
0,37	1507	737,8
0,41	1657	811,0
0,44	1828	894,7
0,47	1956	957,5
0,49	2042	999,4
0,51	2084	1020,3



**Anexo 55: Gráfica de ensayo #16 (Caliza grano 50, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 56: Tabla 4 del ensayo #17 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

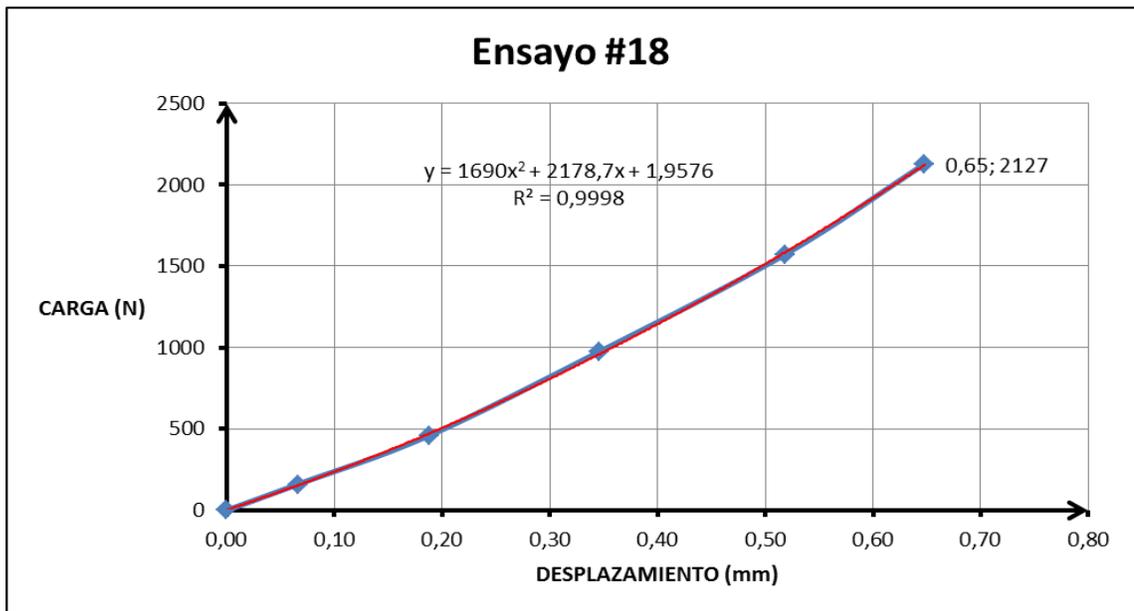
Ensayo #17		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	52	25,7
0,04	95	46,6
0,08	138	67,6
0,11	224	109,5
0,16	309	151,4
0,21	352	172,4
0,26	502	245,7
0,31	652	319,0
0,37	823	402,8
0,41	1037	507,5
0,46	1272	622,6
0,50	1486	727,3
0,55	1700	832,0
0,58	1892	926,1
0,62	2063	1009,8
0,66	2319	1135,3



**Anexo 57: Gráfica de ensayo #17 (Caliza grano 50, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 58: Tabla del ensayo #18 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

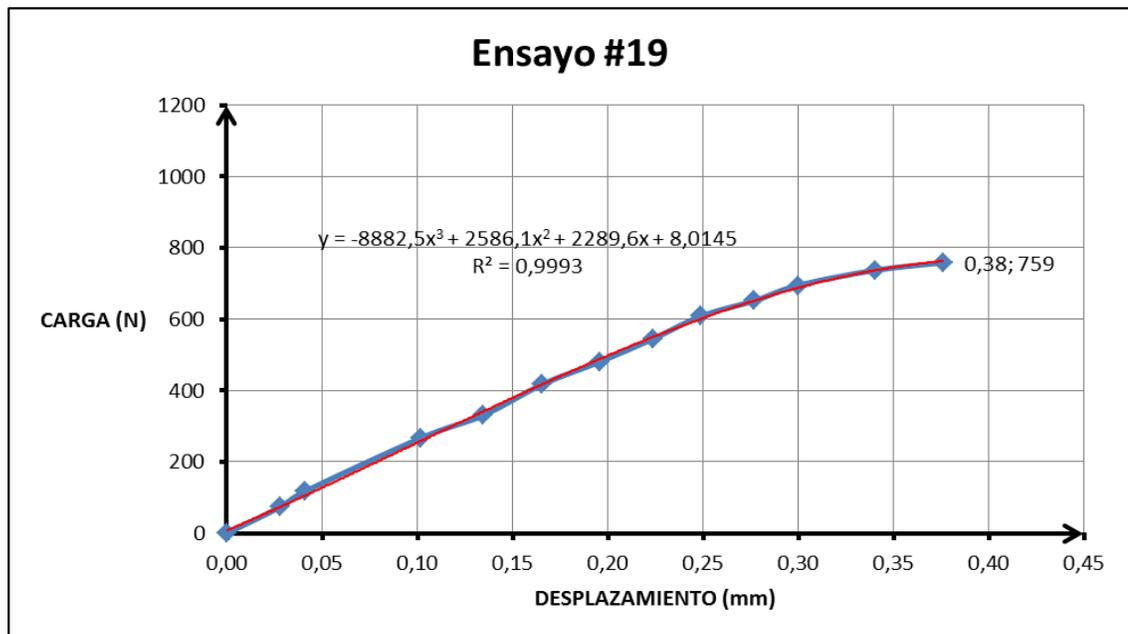
Ensayo #18		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,07	159	78,1
0,19	459	224,7
0,35	973	476,1
0,52	1571	769,2
0,65	2127	1041,2



**Anexo 59: Gráfica de ensayo #18 (Caliza grano 50, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 60: Tabla del ensayo #19 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

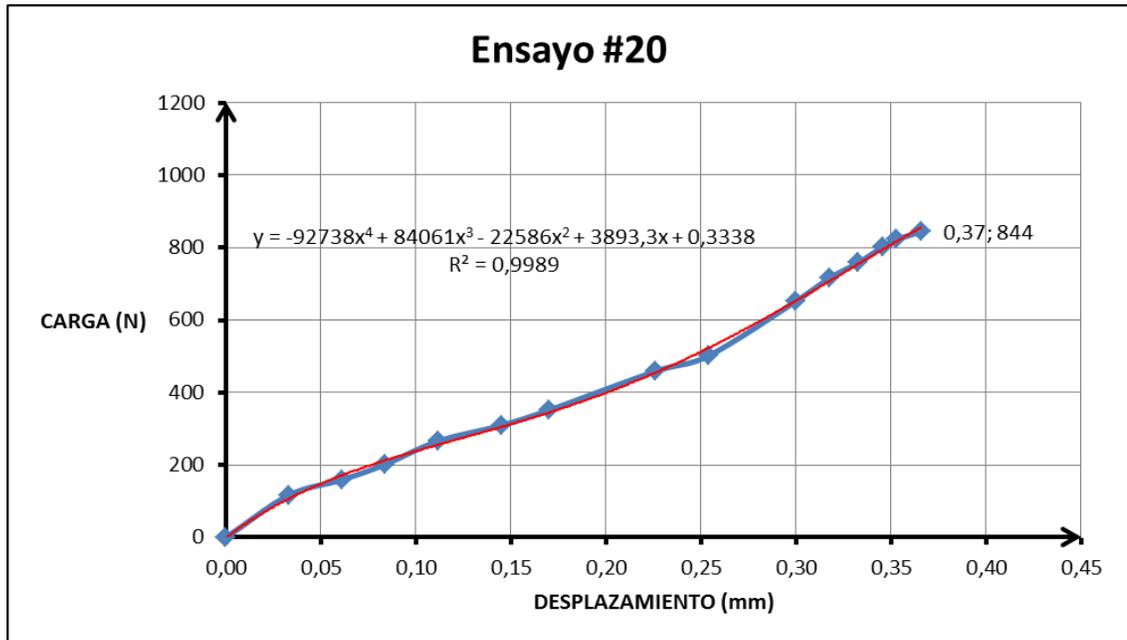
Ensayo #19		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	74	36,1
0,04	117	57,1
0,10	266	130,5
0,13	331	161,9
0,17	416	203,8
0,20	480	235,2
0,22	545	266,6
0,25	609	298,0
0,28	652	319,0
0,30	694	339,9
0,34	737	360,9
0,38	759	371,4



**Anexo 61: Gráfica de ensayo #19 (Caliza grano 50, 25mm/min, 25°C)**

**Anexo 62: Tabla del ensayo #20 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

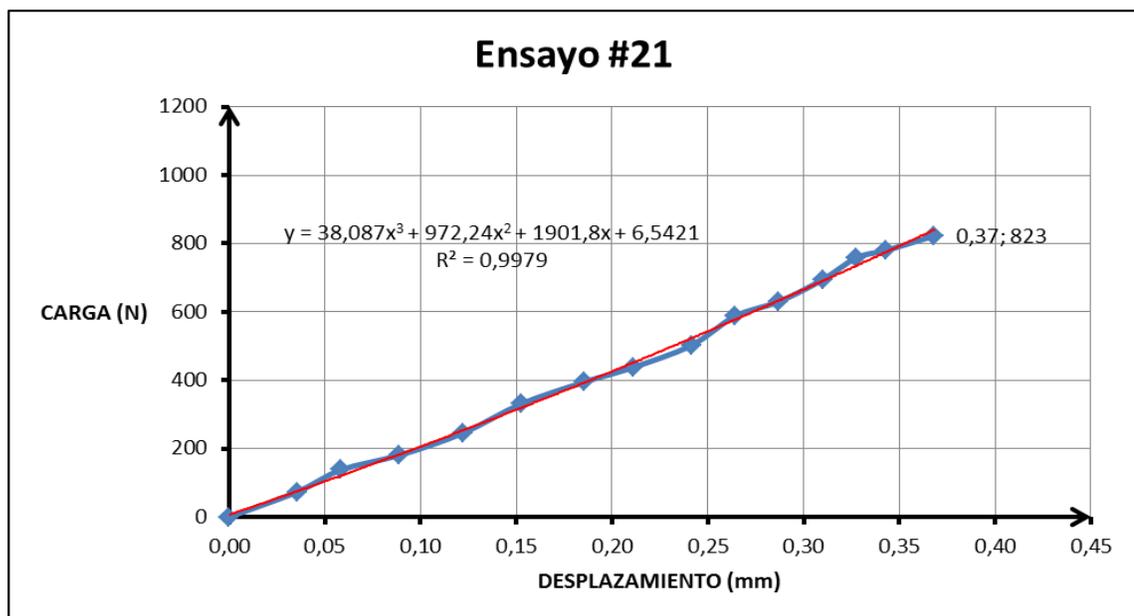
Ensayo #20		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	117	57,1
0,06	159	78,1
0,08	202	99,0
0,11	266	130,5
0,14	309	151,4
0,17	352	172,4
0,23	459	224,7
0,25	502	245,7
0,30	652	319,0
0,32	716	350,4
0,33	759	371,4
0,35	801	392,3
0,35	823	402,8
0,37	844	413,2



**Anexo 63: Gráfica de ensayo #20 (Caliza grano 50, 25mm/min, 25°C)**

**Anexo 64: Tabla del ensayo #21 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

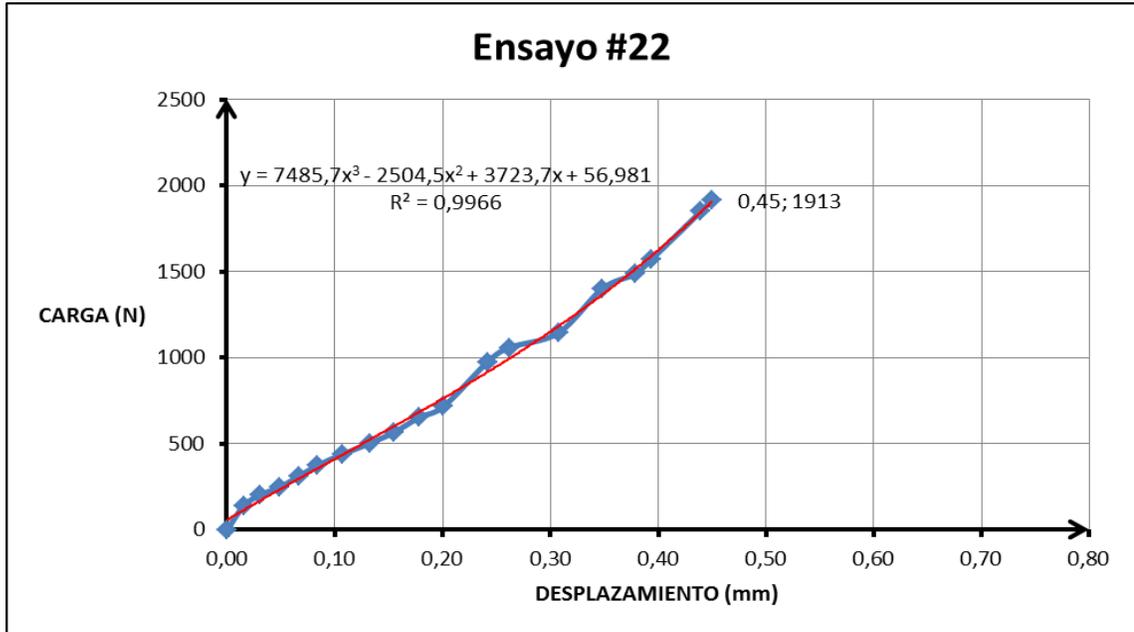
Ensayo #21		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,04	74	36,1
0,06	138	67,6
0,09	181	88,5
0,12	245	120,0
0,15	331	161,9
0,19	395	193,3
0,21	438	214,2
0,24	502	245,7
0,26	587	287,6
0,29	630	308,5
0,31	694	339,9
0,33	759	371,4
0,34	780	381,8
0,37	823	402,8



**Anexo 65: Gráfica de ensayo #21 (Caliza grano 50, 25mm/min, 25°C)**

**Anexo 66: Tabla del ensayo #22 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

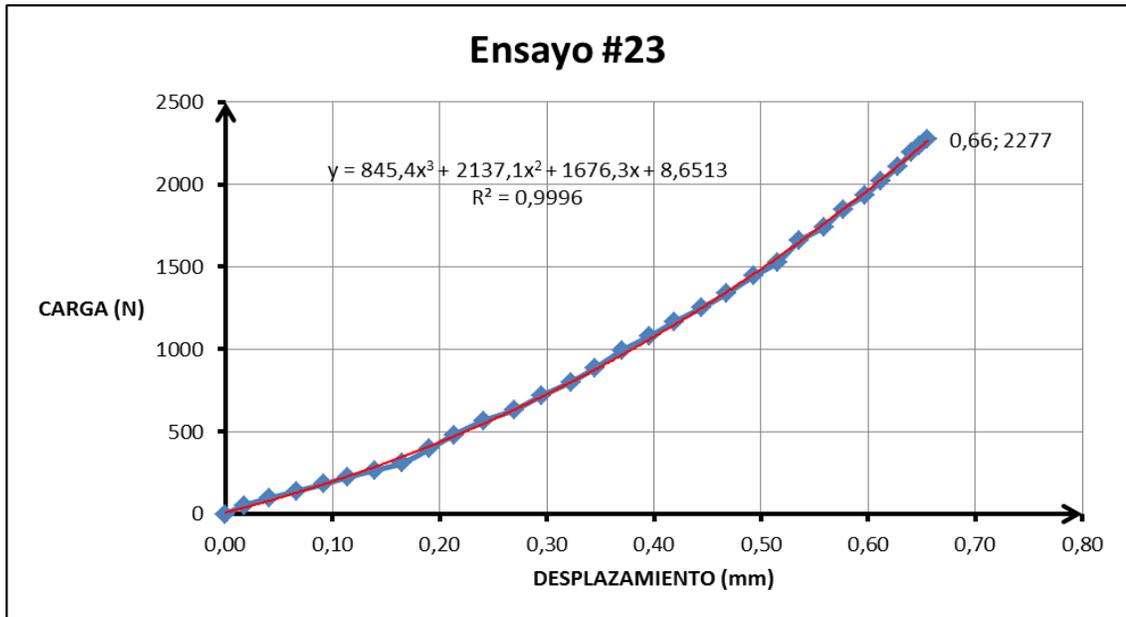
Ensayo #22		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	138	67,6
0,03	202	99,0
0,05	245	120,0
0,07	309	151,4
0,08	373	182,8
0,11	438	214,2
0,13	502	245,7
0,15	566	277,1
0,18	652	319,0
0,20	716	350,4
0,24	973	476,1
0,26	1058	518,0
0,31	1144	559,8
0,35	1400	685,4
0,38	1486	727,3
0,39	1571	769,2
0,44	1849	905,2
0,45	1913	936,6



**Anexo 67: Gráfica de ensayo #22 (Caliza grano 50, 25mm/min, 10°C)**

**Anexo 68: Tabla del ensayo #23 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

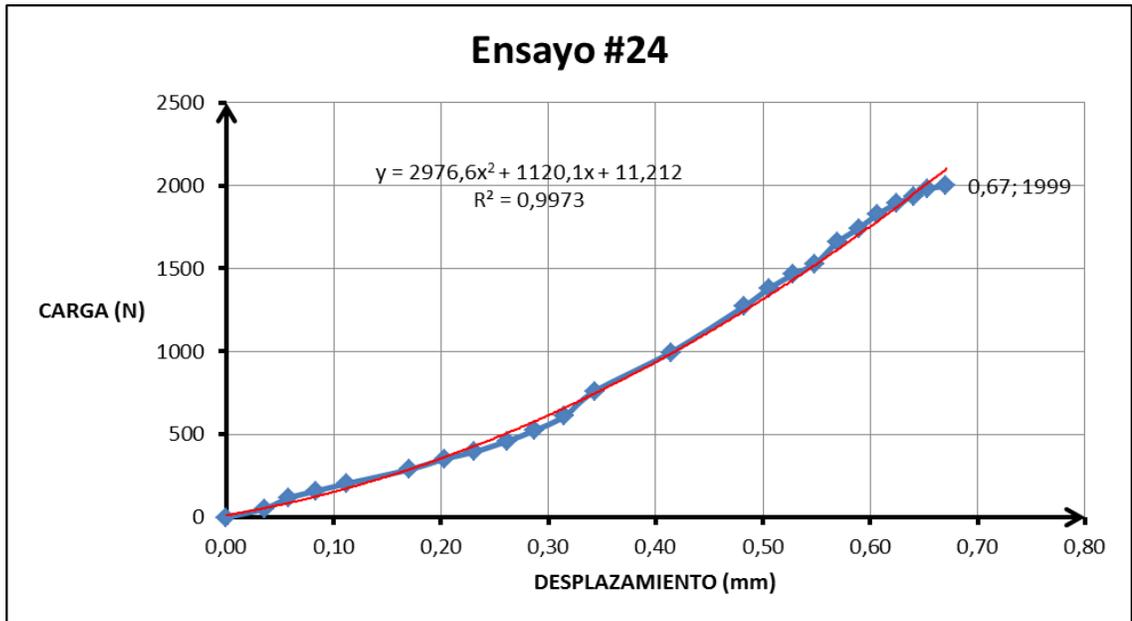
Ensayo #23		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	52	25,7
0,04	95	46,6
0,07	138	67,6
0,09	181	88,5
0,11	224	109,5
0,14	266	130,5
0,17	309	151,4
0,19	395	193,3
0,21	480	235,2
0,24	566	277,1
0,27	630	308,5
0,29	716	350,4
0,32	801	392,3
0,35	887	434,2
0,37	994	486,6
0,40	1079	528,4
0,42	1165	570,3
0,44	1251	612,2
0,47	1336	654,0
0,49	1443	706,4
0,52	1529	748,2
0,54	1657	811,0
0,56	1742	852,9
0,58	1849	905,2
0,60	1935	947,0
0,61	2020	988,9
0,63	2106	1030,7
0,64	2191	1072,6
0,65	2234	1093,5
0,66	2277	1114,4



**Anexo 69: Gráfica de ensayo #23 (Caliza grano 50, 25mm/min, 10°C)**

**Anexo 70: Tabla del ensayo #24 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

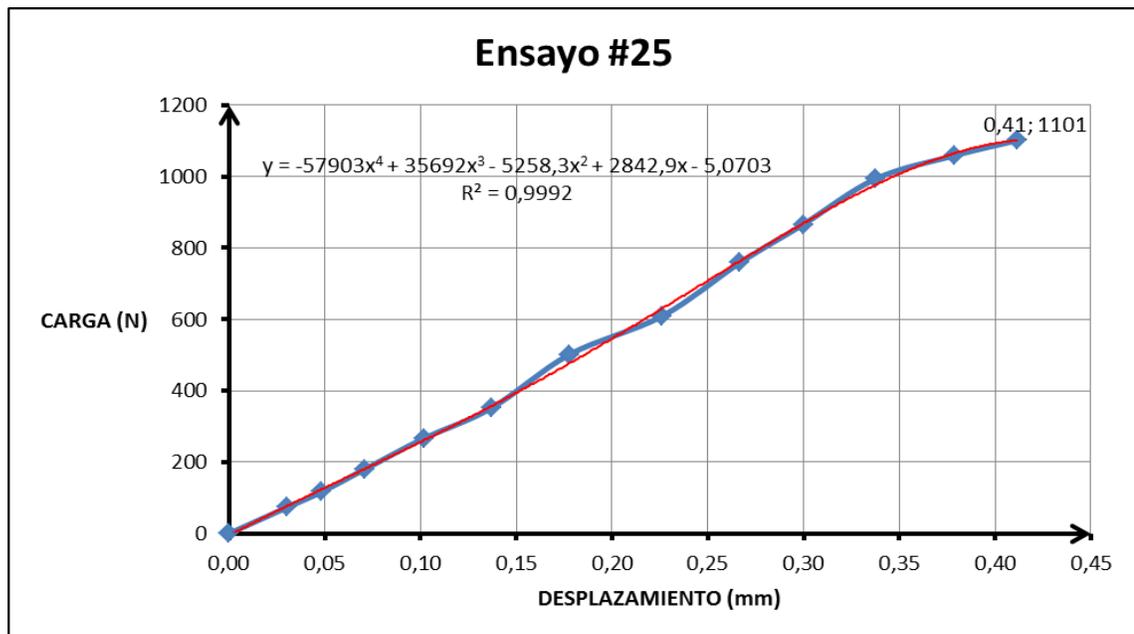
Ensayo #24		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,04	52	25,7
0,06	117	57,1
0,08	159	78,1
0,11	202	99,0
0,17	288	140,9
0,20	352	172,4
0,23	395	193,3
0,26	459	224,7
0,29	523	256,2
0,31	609	298,0
0,34	759	371,4
0,41	994	486,6
0,48	1272	622,6
0,51	1379	675,0
0,53	1464	716,8
0,55	1529	748,2
0,57	1657	811,0
0,59	1742	852,9
0,61	1828	894,7
0,62	1892	926,1
0,64	1935	947,0
0,65	1977	968,0
0,67	1999	978,4



**Anexo 71: Gráfica de ensayo #24 (Caliza grano 50, 25mm/min, 10°C)**

**Anexo 72: Tabla del ensayo #25 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

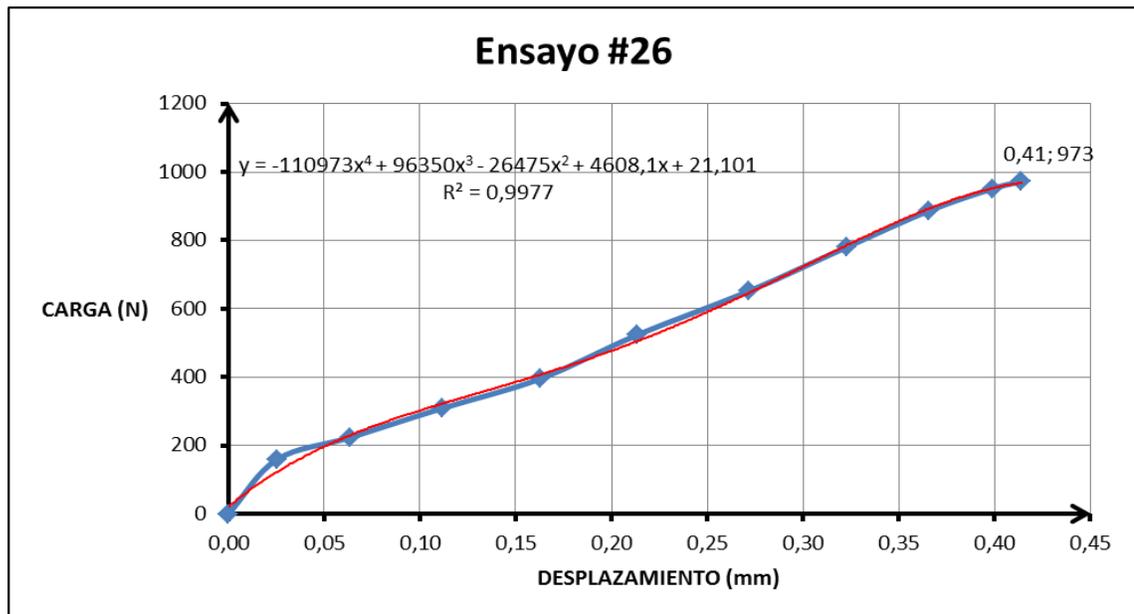
Ensayo #25		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	74	36,1
0,05	117	57,1
0,07	181	88,5
0,10	266	130,5
0,14	352	172,4
0,18	502	245,7
0,23	609	298,0
0,27	759	371,4
0,30	866	423,7
0,34	994	486,6
0,38	1058	518,0
0,41	1101	538,9



**Anexo 73: Gráfica de ensayo #25 (Basalto grano 120, 50mm/min, 25°C)**

**Anexo 74: Tabla del ensayo#26 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

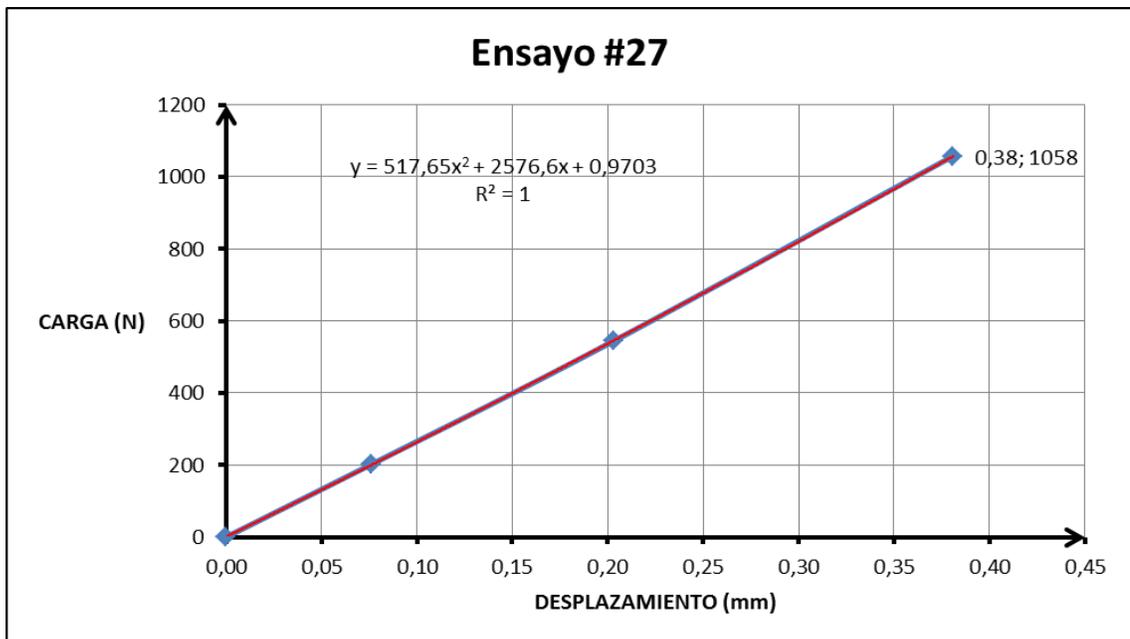
Ensayo #26		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	159	78,1
0,06	224	109,5
0,11	309	151,4
0,16	395	193,3
0,21	523	256,2
0,27	652	319,0
0,32	780	381,8
0,37	887	434,2
0,40	951	465,6
0,41	973	476,1



**Anexo 75: Gráfica de ensayo #26 (Basalto grano 120, 50mm/min, 25°C)**

**Anexo 76: Tabla del ensayo #27 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

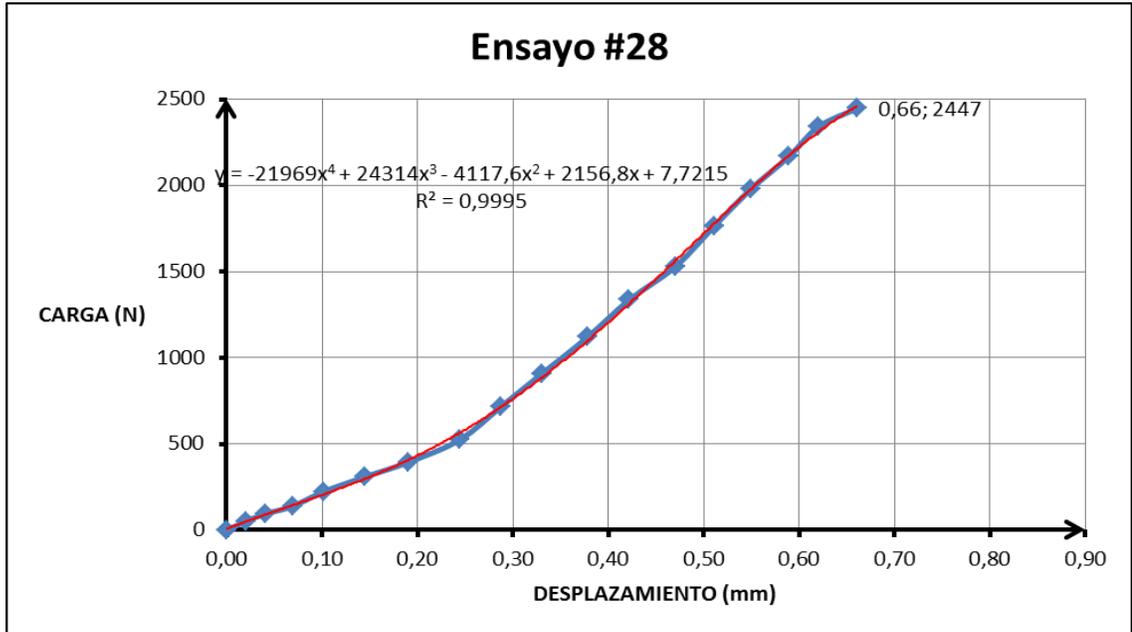
Ensayo #27		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,08	202	99,0
0,20	545	266,6
0,38	1058	518,0



**Anexo 77: Gráfica de ensayo #27 (Basalto grano 120, 50mm/min, 25°C)**

**Anexo 78: Tabla del ensayo #28 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

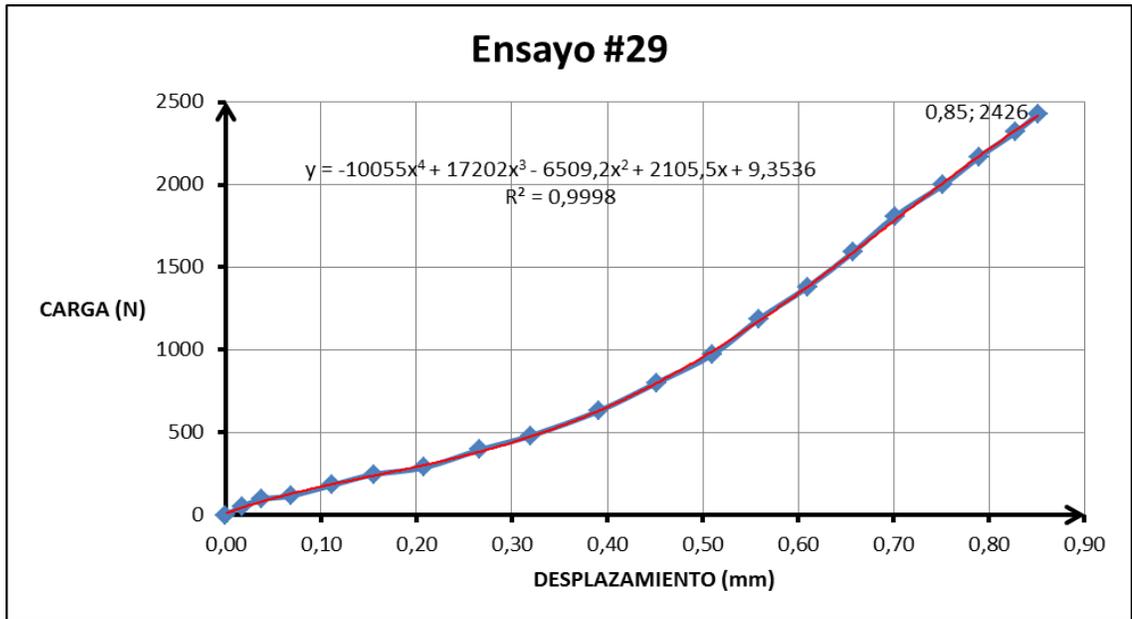
Ensayo #28		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	52	25,7
0,04	95	46,6
0,07	138	67,6
0,10	224	109,5
0,14	309	151,4
0,19	395	193,3
0,24	523	256,2
0,29	716	350,4
0,33	908	444,7
0,38	1122	549,4
0,42	1336	654,0
0,47	1529	748,2
0,51	1764	863,4
0,55	1977	968,0
0,59	2170	1062,1
0,62	2341	1145,8
0,66	2447	1198,1



**Anexo 79: Gráfica de ensayo #28 (Basalto grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 80: Tabla del ensayo #29 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

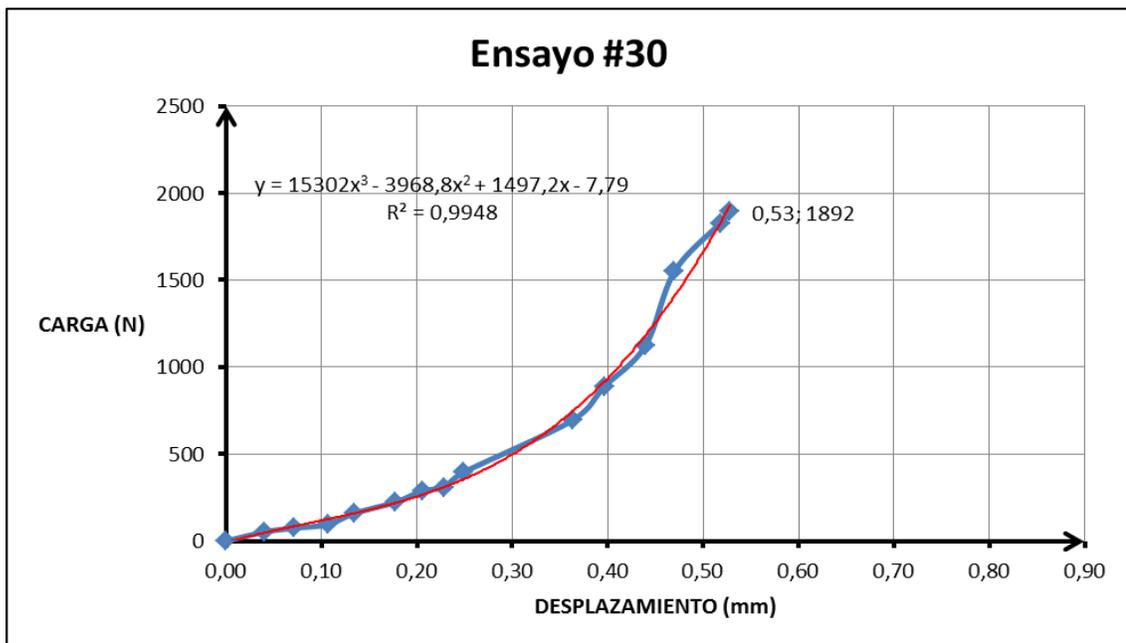
Ensayo #29		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	52	25,7
0,04	95	46,6
0,07	117	57,1
0,11	181	88,5
0,15	245	120,0
0,21	288	140,9
0,27	395	193,3
0,32	480	235,2
0,39	630	308,5
0,45	801	392,3
0,51	973	476,1
0,56	1186	580,8
0,61	1379	675,0
0,66	1593	779,6
0,70	1806	884,3
0,75	1999	978,4
0,79	2170	1062,1
0,83	2319	1135,3
0,85	2426	1187,6



Anexo 81: Gráfica de ensayo #29 (Basalto grano 120, 50mm/min, 10°C)

**Anexo 82: Tabla del ensayo #30 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

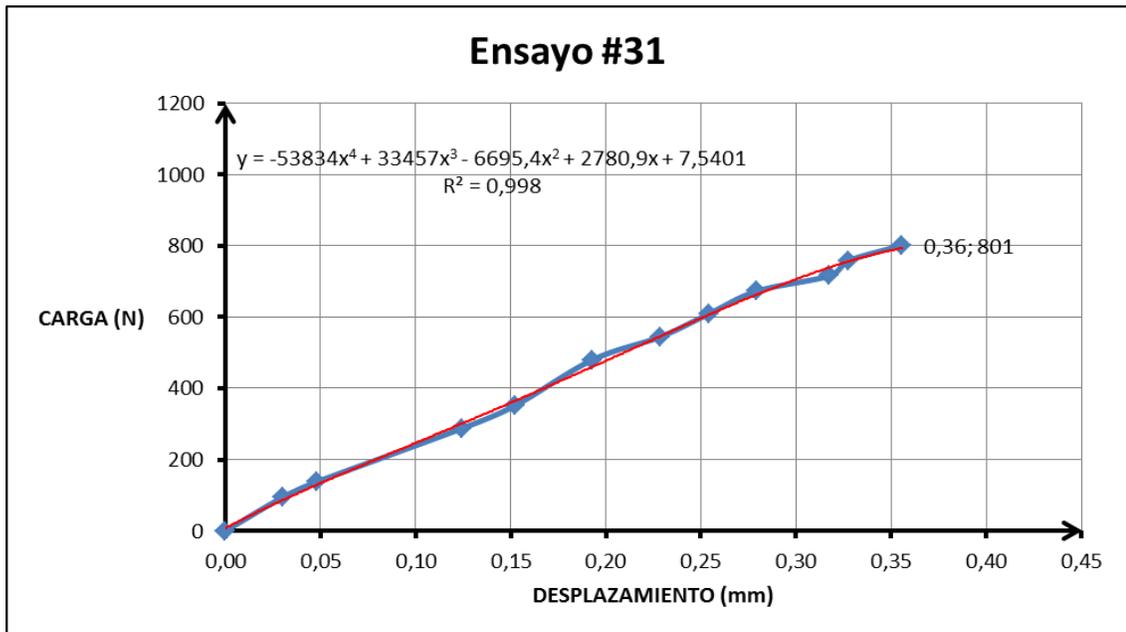
Ensayo #30		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,04	52	25,7
0,07	74	36,1
0,11	95	46,6
0,13	159	78,1
0,18	224	109,5
0,21	288	140,9
0,23	309	151,4
0,25	395	193,3
0,36	694	339,9
0,40	887	434,2
0,44	1122	549,4
0,47	1550	758,7
0,52	1828	894,7
0,53	1892	926,1



**Anexo 83: Gráfica de ensayo #30 (Basalto grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 84: Tabla del ensayo #31 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

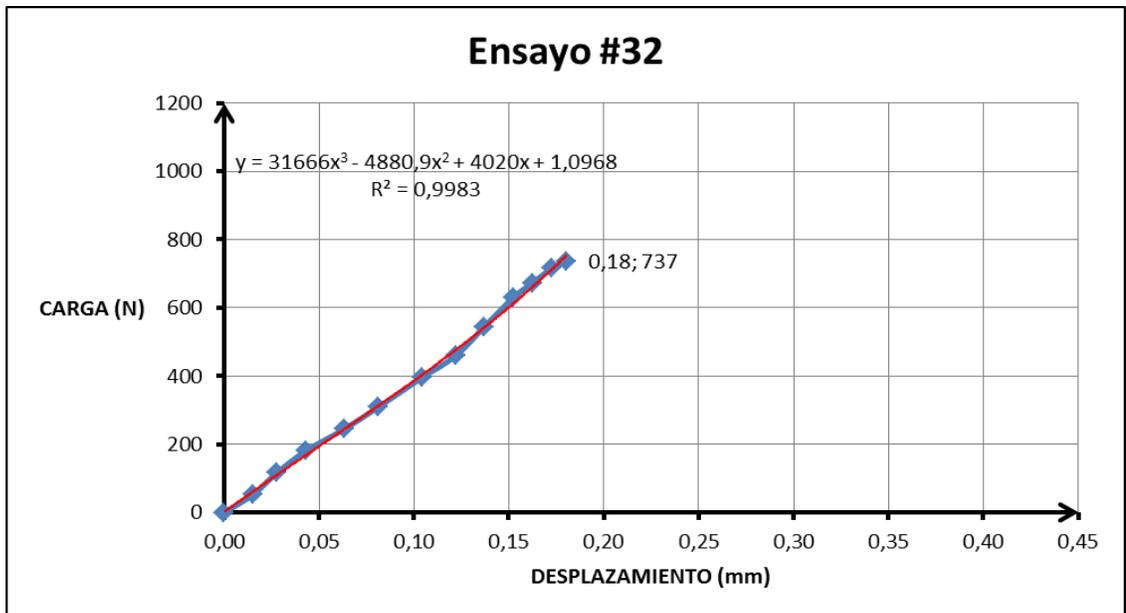
Ensayo #31		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	95	46,6
0,05	138	67,6
0,12	288	140,9
0,15	352	172,4
0,19	480	235,2
0,23	545	266,6
0,25	609	298,0
0,28	673	329,5
0,32	716	350,4
0,33	759	371,4
0,36	801	392,3



**Anexo 85: Gráfica de ensayo #31 (Basalto grano 120, 25mm/min, 25°C)**

**Anexo 86: Tabla del ensayo #32 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

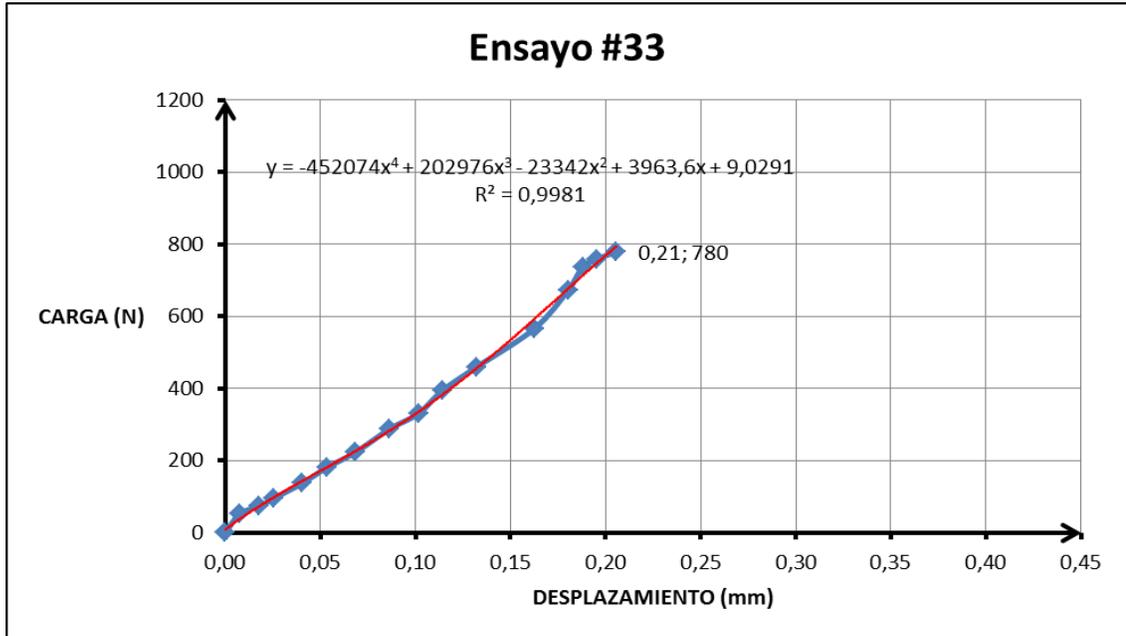
Ensayo #32		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	52	25,7
0,03	117	57,1
0,04	181	88,5
0,06	245	120,0
0,08	309	151,4
0,10	395	193,3
0,12	459	224,7
0,14	545	266,6
0,15	630	308,5
0,16	673	329,5
0,17	716	350,4
0,18	737	360,9



**Anexo 87: Gráfica de ensayo #32 (Basalto grano 120, 25mm/min, 25°C)**

**Anexo 88: Tabla 4 del ensayo #33 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

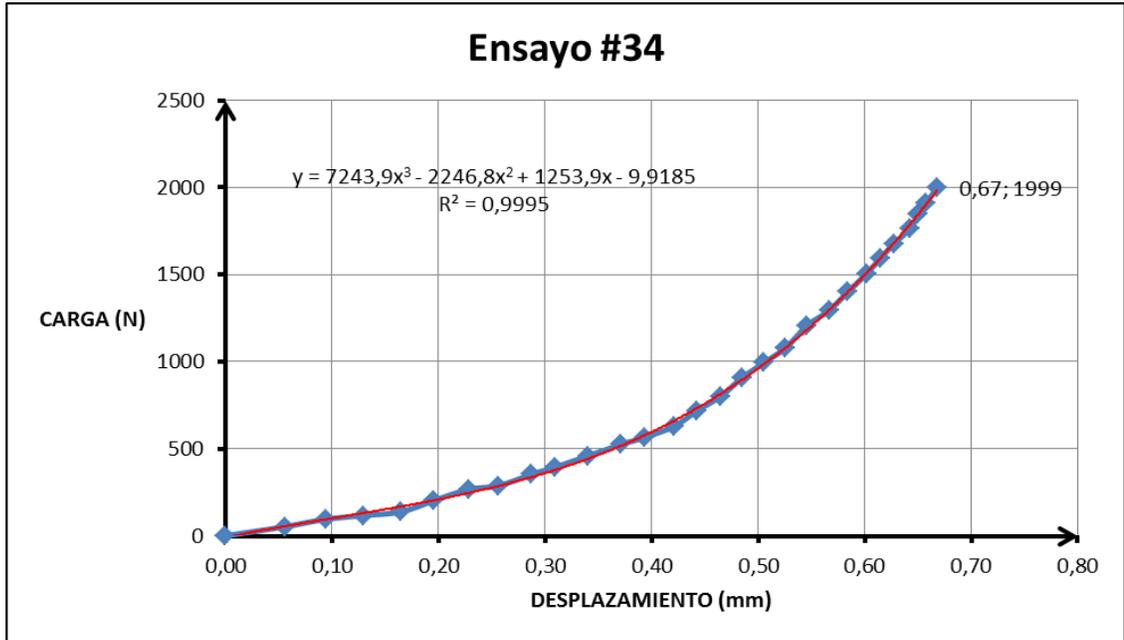
Ensayo #33		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,01	52	25,7
0,02	74	36,1
0,03	95	46,6
0,04	138	67,6
0,05	181	88,5
0,07	224	109,5
0,09	288	140,9
0,10	331	161,9
0,11	395	193,3
0,13	459	224,7
0,16	566	277,1
0,18	673	329,5
0,19	737	360,9
0,20	759	371,4
0,21	780	381,8



**Anexo 89: Gráfica de ensayo #33 (Basalto grano 120, 25mm/min, 25°C)**

**Anexo 90: Tabla del ensayo #34 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

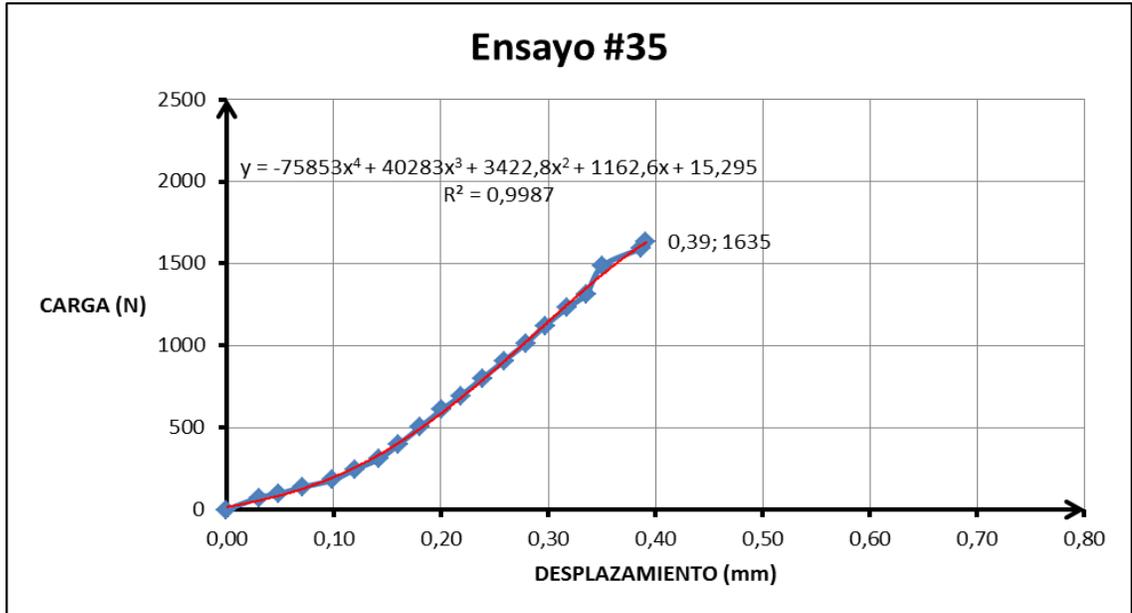
<b>Ensayo #34</b>		
<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Carga (N)</b>	<b>Esf. Cortante (kPa)</b>
0,00	0	0,0
0,06	52	25,7
0,09	95	46,6
0,13	117	57,1
0,17	138	67,6
0,20	202	99,0
0,23	266	130,5
0,26	288	140,9
0,29	352	172,4
0,31	395	193,3
0,34	459	224,7
0,37	523	256,2
0,39	566	277,1
0,42	630	308,5
0,44	716	350,4
0,46	801	392,3
0,49	908	444,7
0,51	994	486,6
0,53	1079	528,4
0,55	1208	591,2
0,57	1293	633,1
0,58	1400	685,4
0,60	1507	737,8
0,61	1593	779,6
0,63	1678	821,5
0,64	1764	863,4
0,65	1849	905,2
0,66	1913	936,6
0,67	1999	978,4



**Anexo 91: Gráfica de ensayo #34 (Basalto grano 120, 25mm/min, 10°C)**

**Anexo 92: Tabla del ensayo #35 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

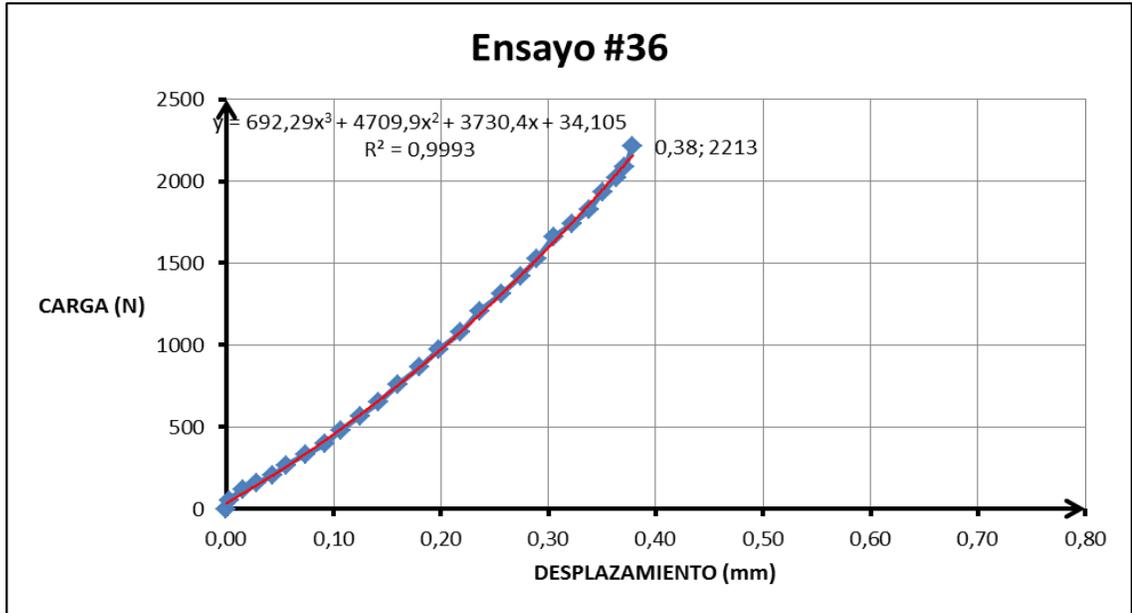
Ensayo #35		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	74	36,1
0,05	95	46,6
0,07	138	67,6
0,10	181	88,5
0,12	245	120,0
0,14	309	151,4
0,16	395	193,3
0,18	502	245,7
0,20	609	298,0
0,22	694	339,9
0,24	801	392,3
0,26	908	444,7
0,28	1015	497,0
0,30	1122	549,4
0,32	1229	601,7
0,34	1315	643,6
0,35	1486	727,3
0,39	1593	779,6
0,39	1635	800,6



**Anexo 93: Gráfica de ensayo #35 (Basalto grano 120, 25mm/min, 10°C)**

**Anexo 94: Tabla del ensayo #36 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

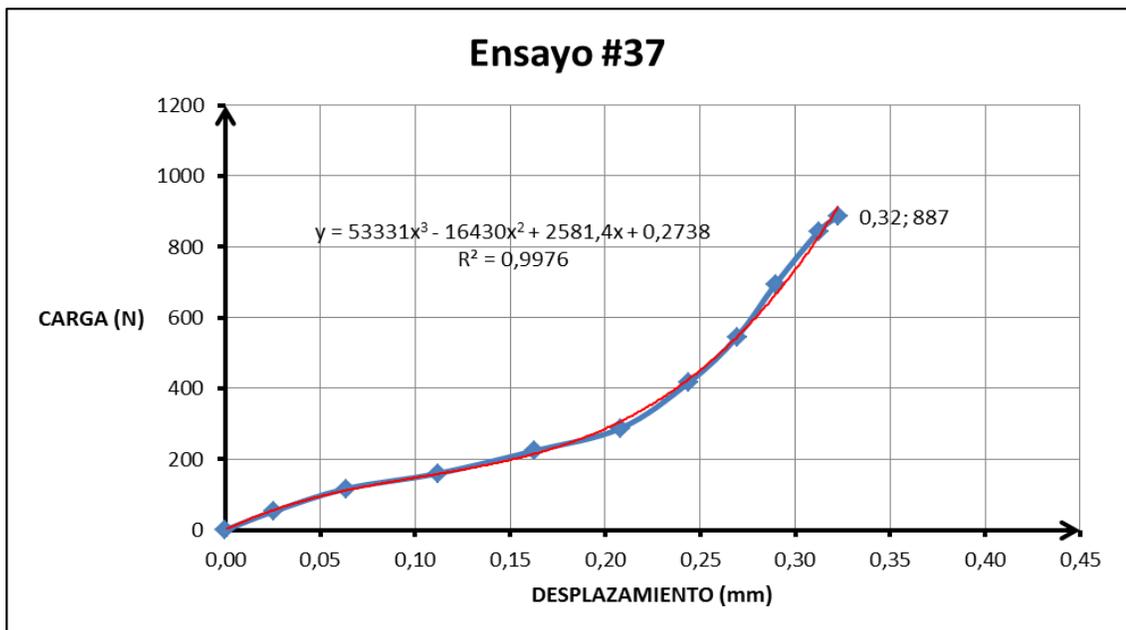
Ensayo #36		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,00	52	25,7
0,02	117	57,1
0,03	159	78,1
0,04	202	99,0
0,06	266	130,5
0,07	331	161,9
0,09	395	193,3
0,11	480	235,2
0,12	566	277,1
0,14	652	319,0
0,16	759	371,4
0,18	866	423,7
0,20	973	476,1
0,22	1079	528,4
0,24	1208	591,2
0,26	1315	643,6
0,27	1422	695,9
0,29	1529	748,2
0,30	1657	811,0
0,32	1742	852,9
0,34	1828	894,7
0,35	1935	947,0
0,36	2020	988,9
0,37	2084	1020,3
0,38	2213	1083,4



**Anexo 95: Gráfica de ensayo #36 (Basalto grano 120, 25mm/min, 10°C)**

**Anexo 96: Tabla del ensayo #37 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

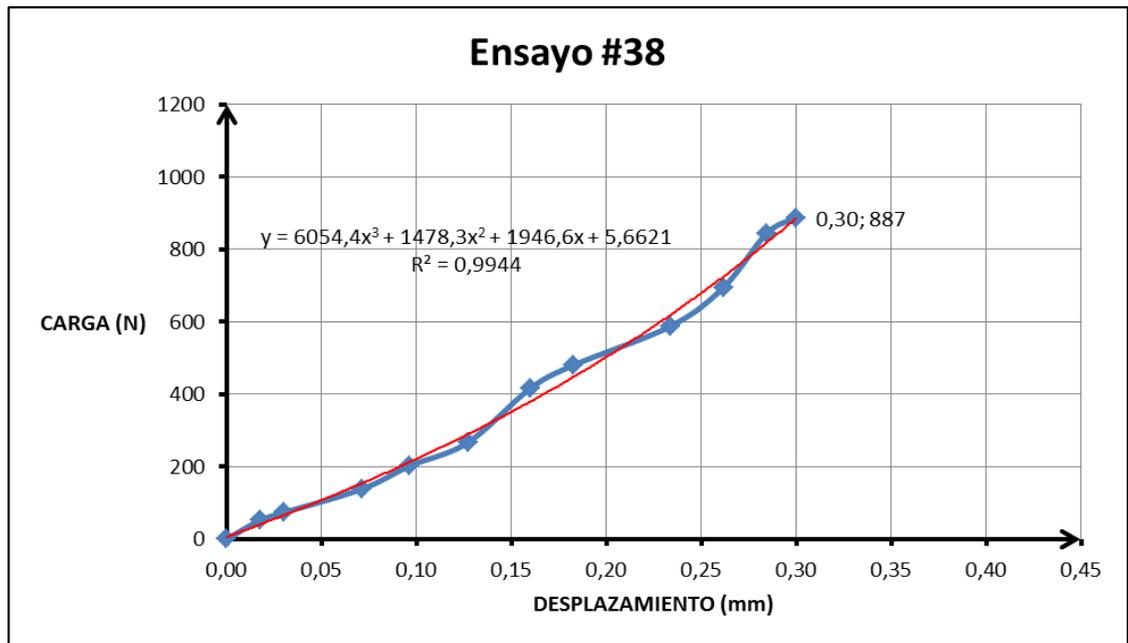
Ensayo #37		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	52	25,7
0,06	117	57,1
0,11	159	78,1
0,16	224	109,5
0,21	288	140,9
0,24	416	203,8
0,27	545	266,6
0,29	694	339,9
0,31	844	413,2
0,32	887	434,2



**Anexo 97: Gráfica de ensayo #37 (Basalto grano 50, 50mm/min, 25°C)**

**Anexo 98: Tabla del ensayo #38 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

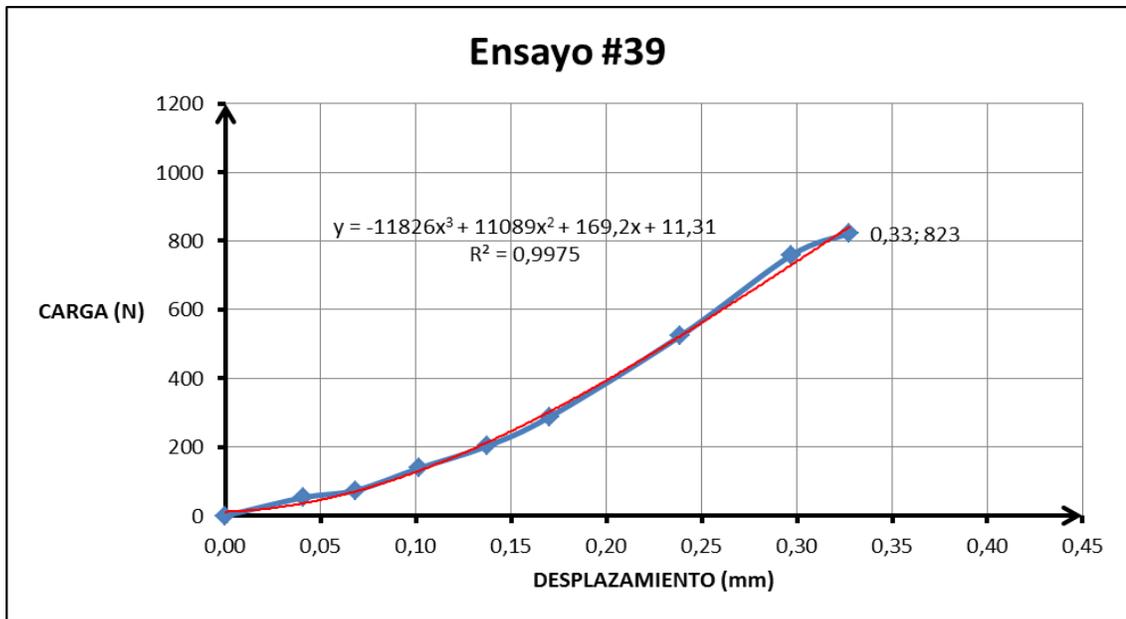
Ensayo #38		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	52	25,7
0,03	74	36,1
0,07	138	67,6
0,10	202	99,0
0,13	266	130,5
0,16	416	203,8
0,18	480	235,2
0,23	587	287,6
0,26	694	339,9
0,28	844	413,2
0,30	887	434,2



**Anexo 99: Gráfica de ensayo #38 (Basalto grano 50, 50mm/min, 25°C)**

**Anexo 100: Tabla del ensayo #39 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

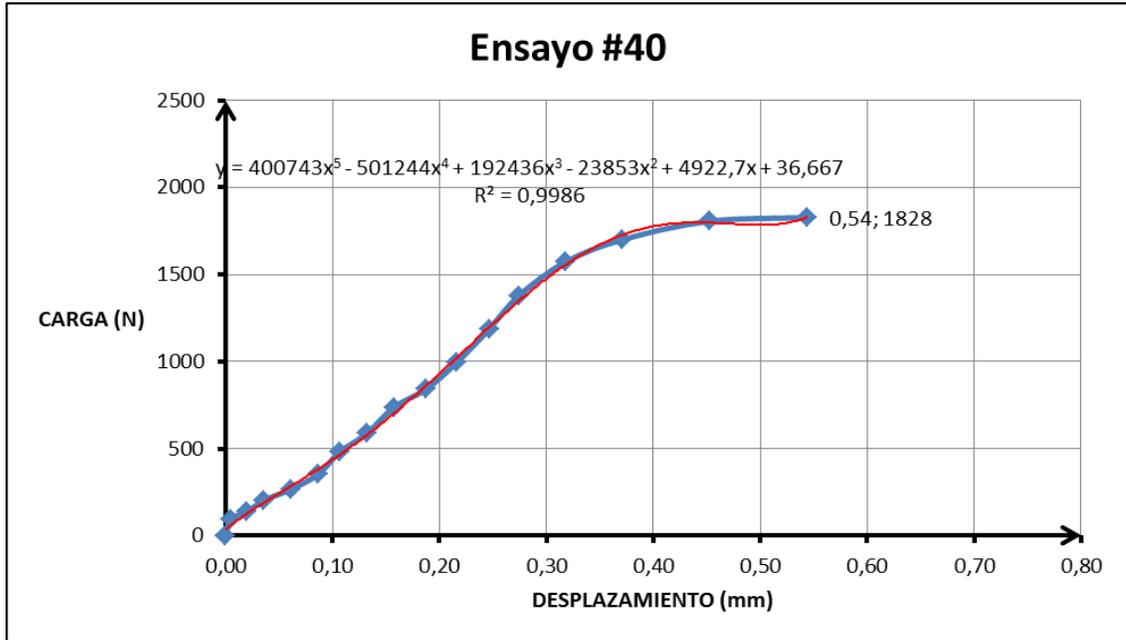
Ensayo #39		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,04	52	25,7
0,07	74	36,1
0,10	138	67,6
0,14	202	99,0
0,17	288	140,9
0,24	523	256,2
0,30	759	371,4
0,33	823	402,8



**Anexo 101: Gráfica de ensayo #39 (Basalto grano 50, 50mm/min, 25°C)**

**Anexo 102: Tabla del ensayo #40 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

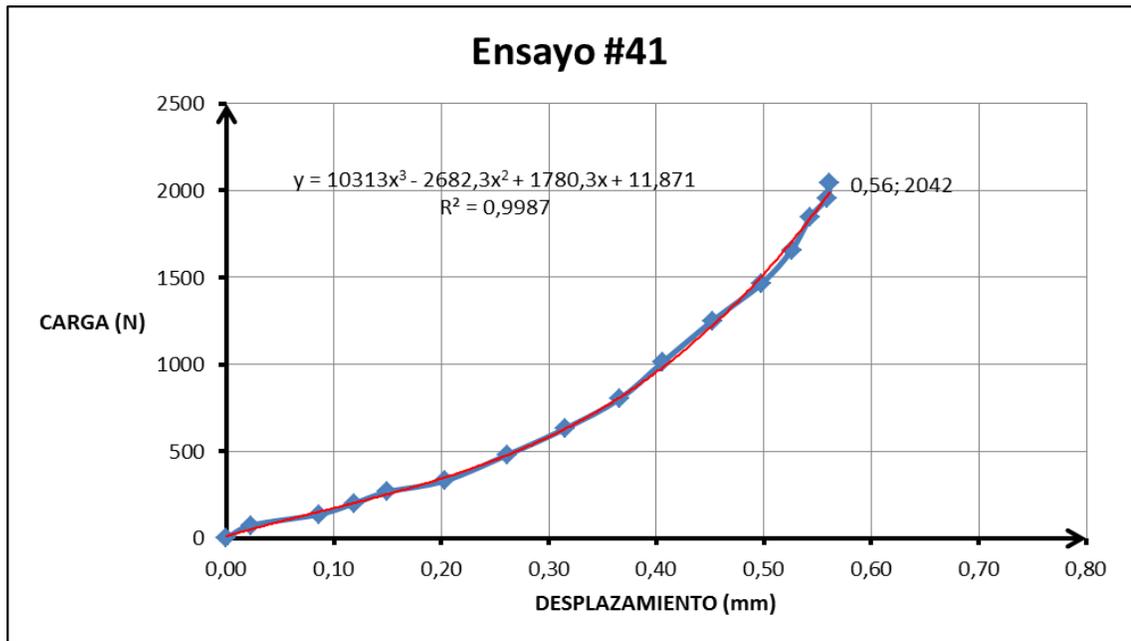
<b>Ensayo #40</b>		
<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Carga (N)</b>	<b>Esf. Cortante (kPa)</b>
0,00	0	0,0
0,01	95	46,6
0,02	138	67,6
0,04	202	99,0
0,06	266	130,5
0,09	352	172,4
0,11	480	235,2
0,13	587	287,6
0,16	737	360,9
0,19	844	413,2
0,22	994	486,6
0,25	1186	580,8
0,27	1379	675,0
0,32	1571	769,2
0,37	1700	832,0
0,45	1806	884,3
0,54	1828	894,7



**Anexo 103: Gráfica de ensayo #40 (Basalto grano 50, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 104: Tabla del ensayo #41 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

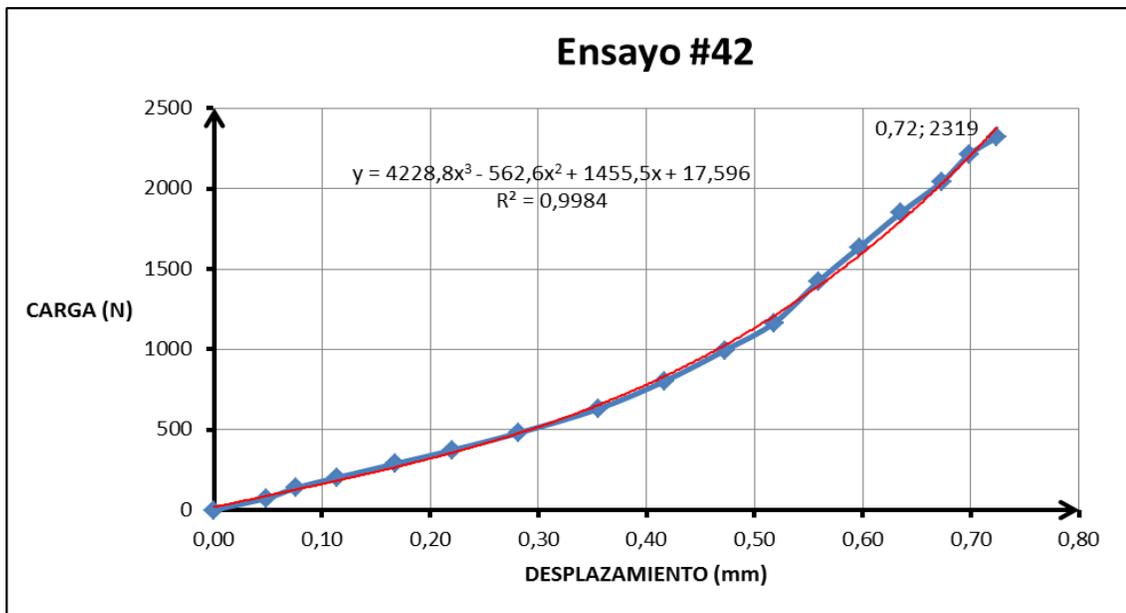
Ensayo #41		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	74	36,1
0,09	138	67,6
0,12	202	99,0
0,15	266	130,5
0,20	331	161,9
0,26	480	235,2
0,31	630	308,5
0,37	801	392,3
0,41	1015	497,0
0,45	1251	612,2
0,50	1464	716,8
0,53	1657	811,0
0,54	1849	905,2
0,56	1956	957,5
0,56	2042	999,4



**Anexo 105: Gráfica de ensayo #41 (Basalto grano 50, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 106: Tabla del ensayo #42 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

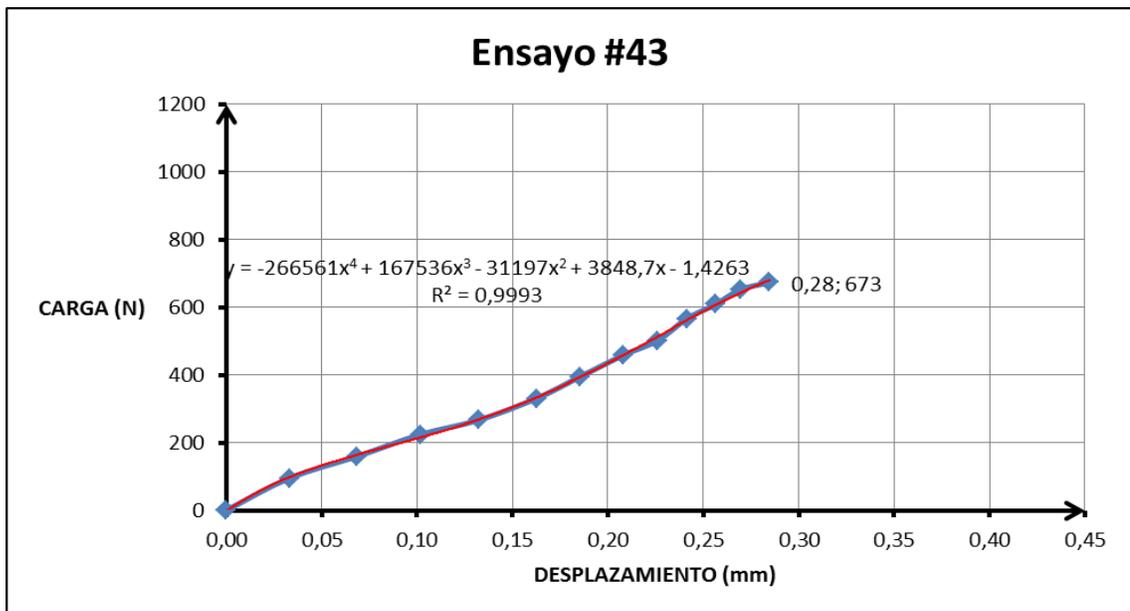
Ensayo #42		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,05	74	36,1
0,08	138	67,6
0,11	202	99,0
0,17	288	140,9
0,22	373	182,8
0,28	480	235,2
0,36	630	308,5
0,42	801	392,3
0,47	994	486,6
0,52	1165	570,3
0,56	1422	695,9
0,60	1635	800,6
0,64	1849	905,2
0,67	2042	999,4
0,70	2212	1083,0
0,72	2319	1135,3



**Anexo 107: Gráfica de ensayo #42 (Basalto grano 50, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 108: Tabla del ensayo #43 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

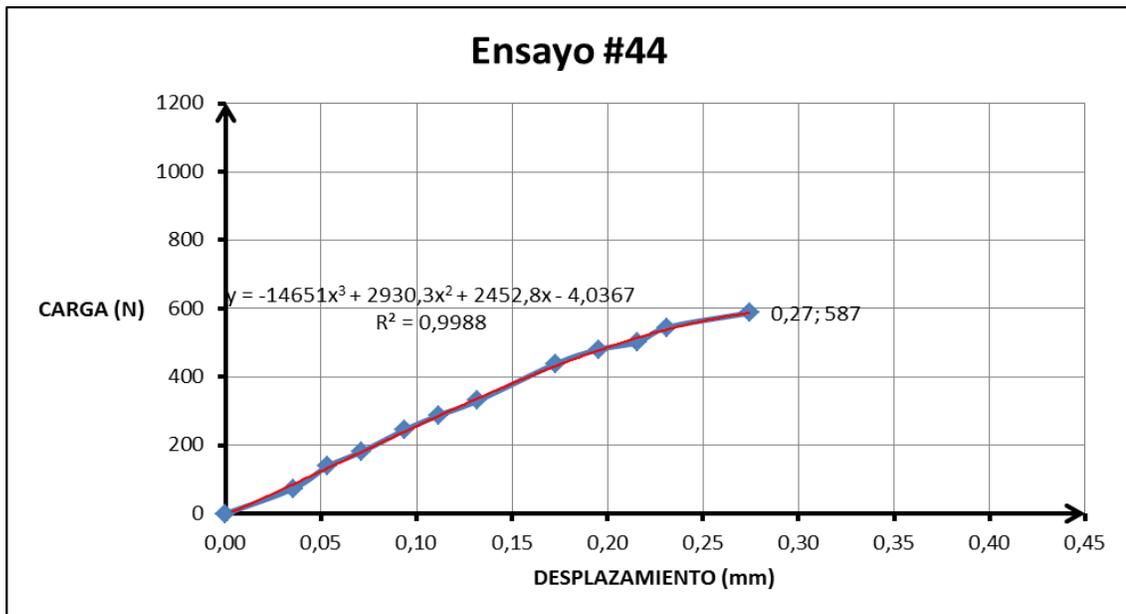
Ensayo #43		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	95	46,6
0,07	159	78,1
0,10	224	109,5
0,13	266	130,5
0,16	331	161,9
0,19	395	193,3
0,21	459	224,7
0,23	502	245,7
0,24	566	277,1
0,26	609	298,0
0,27	652	319,0
0,28	673	329,5



**Anexo 109: Gráfica de ensayo #43 (Basalto grano 50, 25mm/min, 25°C)**

**Anexo 110: Tabla del ensayo #44 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

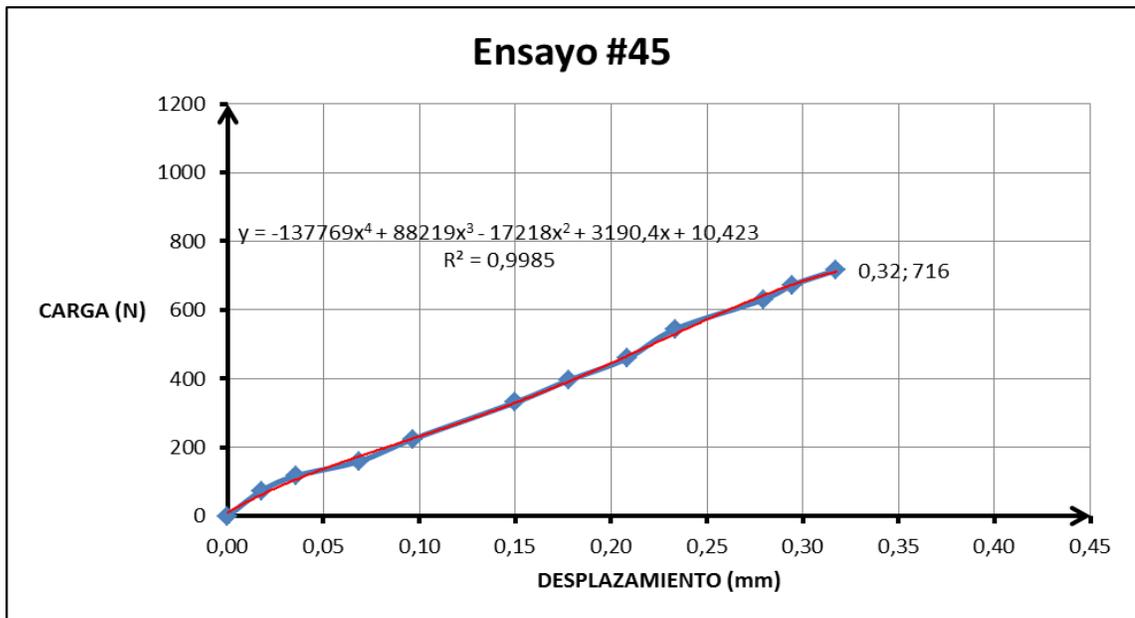
Ensayo #44		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,04	74	36,1
0,05	138	67,6
0,07	181	88,5
0,09	245	120,0
0,11	288	140,9
0,13	331	161,9
0,17	438	214,2
0,20	480	235,2
0,22	502	245,7
0,23	545	266,6
0,27	587	287,6



**Anexo 111: Gráfica de ensayo #44 (Basalto grano 50, 25mm/min, 25°C)**

**Anexo 112: Tabla del ensayo #45 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

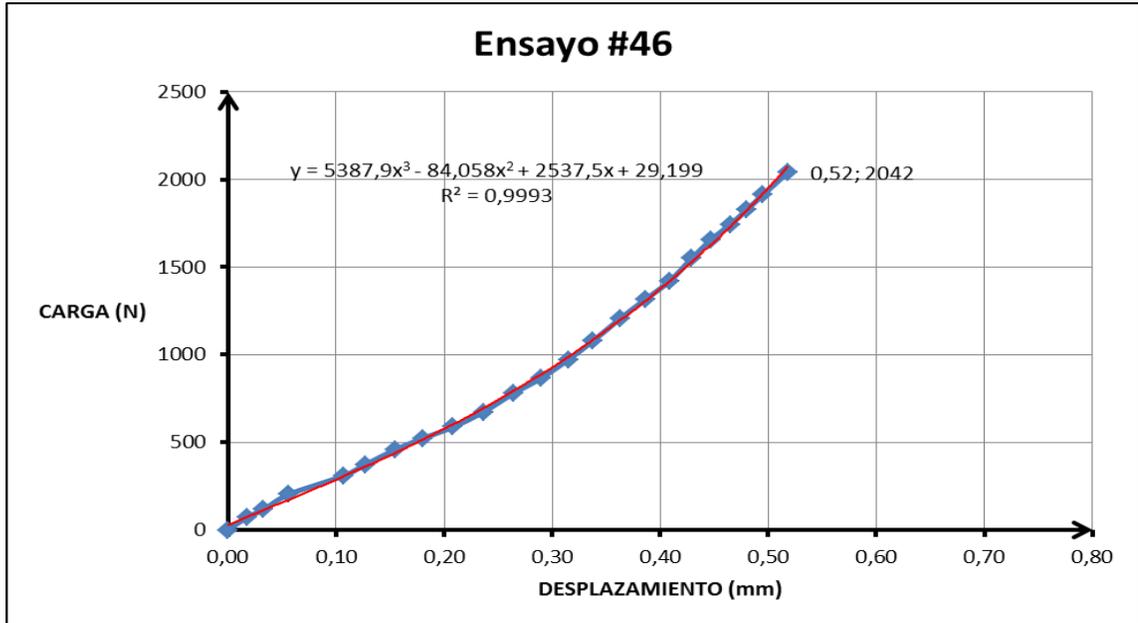
Ensayo #45		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	74	36,1
0,04	117	57,1
0,07	159	78,1
0,10	224	109,5
0,15	331	161,9
0,18	395	193,3
0,21	459	224,7
0,23	545	266,6
0,28	630	308,5
0,29	673	329,5
0,32	716	350,4



**Anexo 113: Gráfica de ensayo #45 (Basalto grano 50, 25mm/min, 25°C)**

**Anexo 114: Tabla del ensayo #46 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

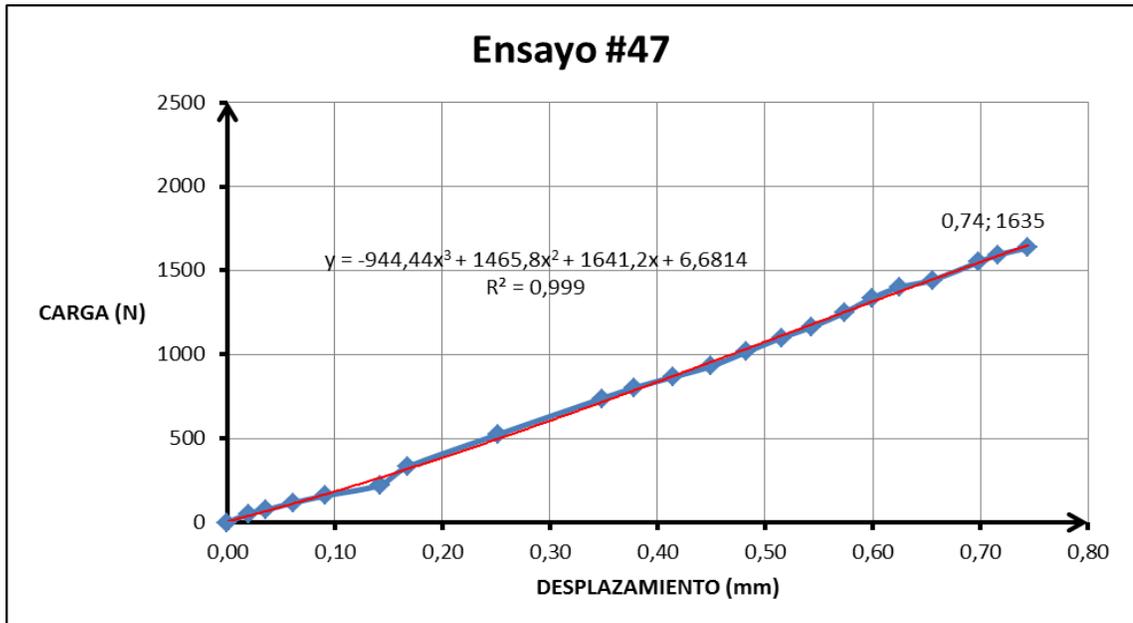
Ensayo #46		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	74	36,1
0,03	117	57,1
0,06	202	99,0
0,11	309	151,4
0,13	373	182,8
0,15	459	224,7
0,18	523	256,2
0,21	587	287,6
0,24	673	329,5
0,26	780	381,8
0,29	866	423,7
0,31	973	476,1
0,34	1079	528,4
0,36	1208	591,2
0,39	1315	643,6
0,41	1422	695,9
0,43	1550	758,7
0,45	1657	811,0
0,46	1742	852,9
0,48	1828	894,7
0,50	1913	936,6
0,52	2042	999,4



**Anexo 115: Gráfica de ensayo #46 (Basalto grano 50, 25mm/min, 10°C)**

**Anexo 116: Tabla del ensayo #47 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

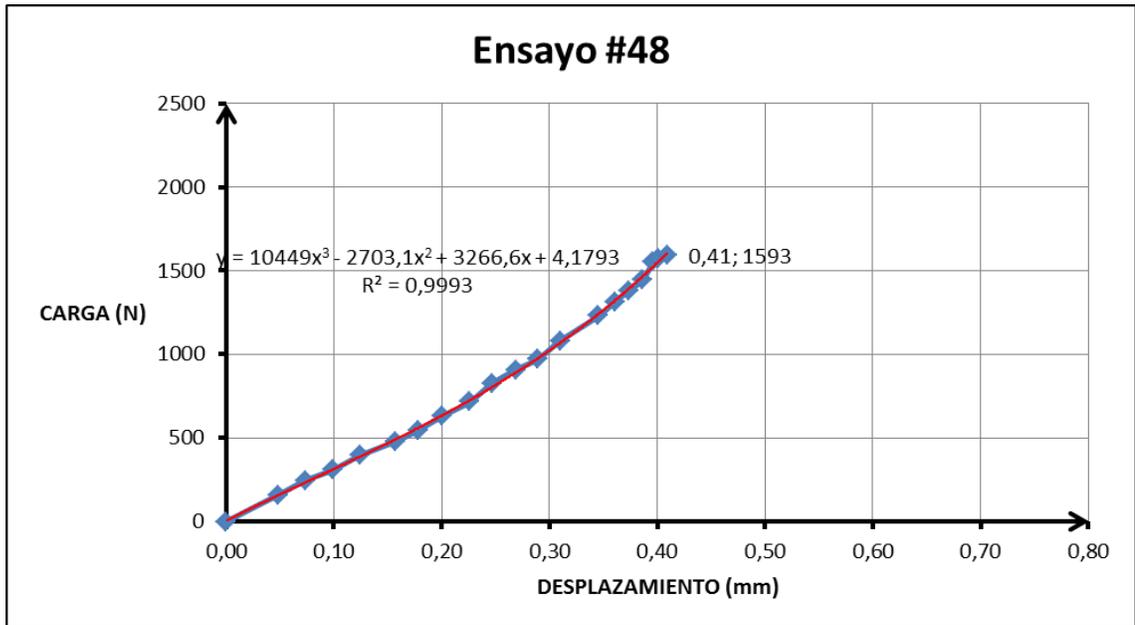
<b>Ensayo #47</b>		
<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Carga (N)</b>	<b>Esf. Cortante (kPa)</b>
0,00	0	0,0
0,02	52	25,7
0,04	74	36,1
0,06	117	57,1
0,09	159	78,1
0,14	224	109,5
0,17	331	161,9
0,25	523	256,2
0,35	737	360,9
0,38	801	392,3
0,41	866	423,7
0,45	930	455,1
0,48	1015	497,0
0,52	1101	538,9
0,54	1165	570,3
0,57	1251	612,2
0,60	1336	654,0
0,62	1400	685,4
0,66	1443	706,4
0,70	1550	758,7
0,72	1593	779,6
0,74	1635	800,6



**Anexo 117: Gráfica de ensayo #47 (Basalto grano 50, 25mm/min, 10°C)**

**Anexo 118: Tabla del ensayo #48 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

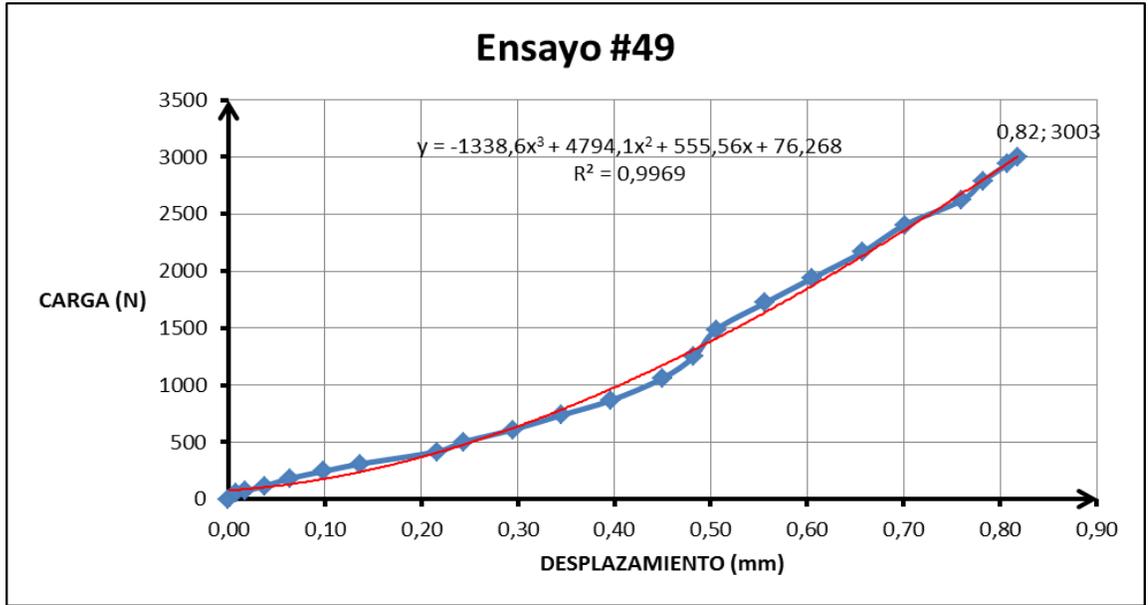
Ensayo #48		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,05	159	78,1
0,07	245	120,0
0,10	309	151,4
0,12	395	193,3
0,16	480	235,2
0,18	545	266,6
0,20	630	308,5
0,23	716	350,4
0,25	823	402,8
0,27	908	444,7
0,29	973	476,1
0,31	1079	528,4
0,35	1229	601,7
0,36	1315	643,6
0,37	1379	675,0
0,39	1443	706,4
0,40	1550	758,7
0,40	1571	769,2
0,41	1593	779,6



**Anexo 119: Gráfica de ensayo #48 (Basalto grano 50, 25mm/min, 10°C)**

**Anexo 120: Tabla del ensayo #49 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

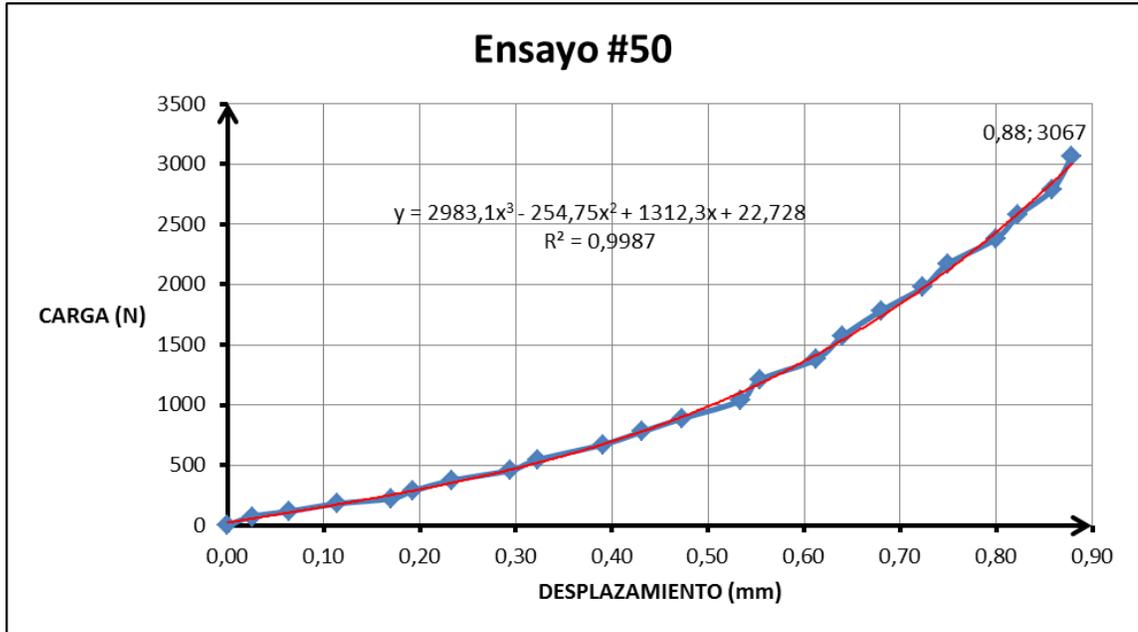
Ensayo #49		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,01	52	25,7
0,02	74	36,1
0,04	117	57,1
0,06	181	88,5
0,10	245	120,0
0,14	309	151,4
0,22	416	203,8
0,24	502	245,7
0,29	609	298,0
0,35	737	360,9
0,40	866	423,7
0,45	1058	518,0
0,48	1251	612,2
0,51	1486	727,3
0,56	1721	842,4
0,60	1935	947,0
0,66	2170	1062,1
0,70	2405	1177,2
0,76	2618	1281,7
0,78	2789	1365,4
0,81	2939	1438,5
0,82	3003	1469,9



**Anexo 121: Gráfica de ensayo #49 (Basalto UR grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 122: Tabla del ensayo #50 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

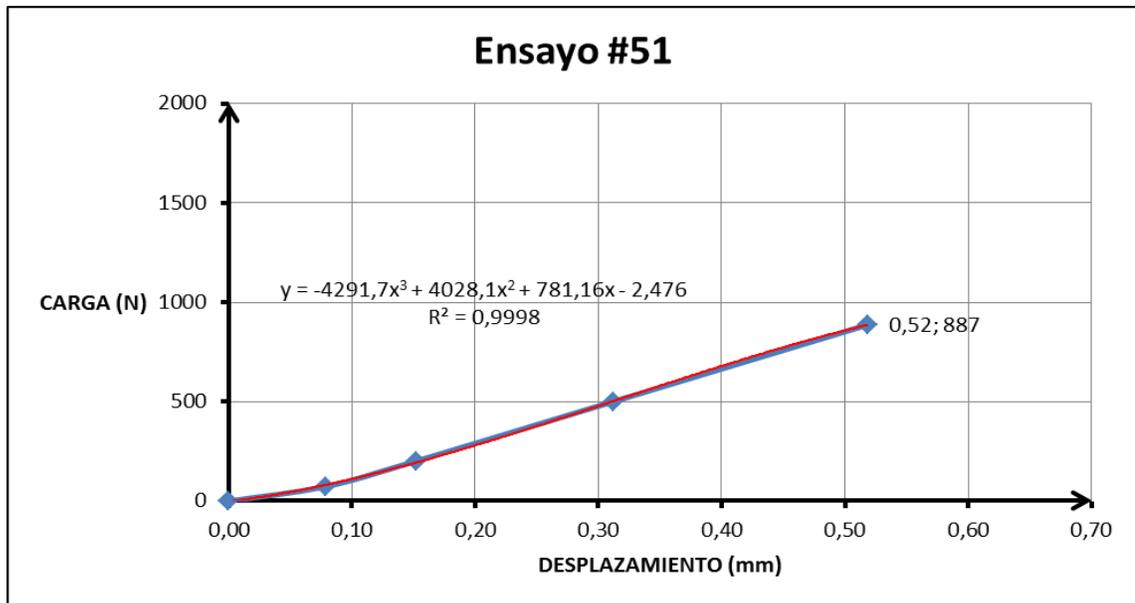
Ensayo #50		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	74	36,1
0,06	117	57,1
0,11	181	88,5
0,17	224	109,5
0,19	288	140,9
0,23	373	182,8
0,29	459	224,7
0,32	545	266,6
0,39	673	329,5
0,43	780	381,8
0,47	887	434,2
0,53	1037	507,5
0,55	1208	591,2
0,61	1379	675,0
0,64	1571	769,2
0,68	1785	873,8
0,72	1977	968,0
0,75	2170	1062,1
0,80	2383	1166,7
0,82	2576	1260,8
0,86	2789	1365,4
0,88	3067	1501,2



**Anexo 123: Gráfica de ensayo #50 (Basalto UR grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 124: Tabla del ensayo #51 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

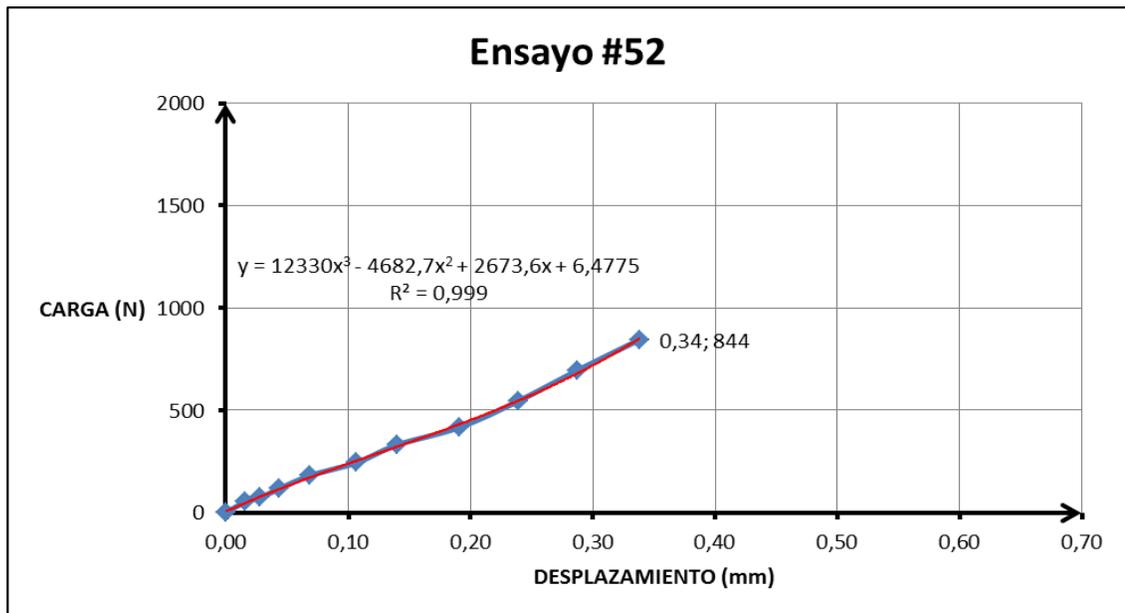
Ensayo #51		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,08	74	36,1
0,15	202	99,0
0,31	502	245,7
0,52	887	434,2



**Anexo 125: Gráfica de ensayo #51 (Argilita grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 126: Tabla del ensayo #52 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

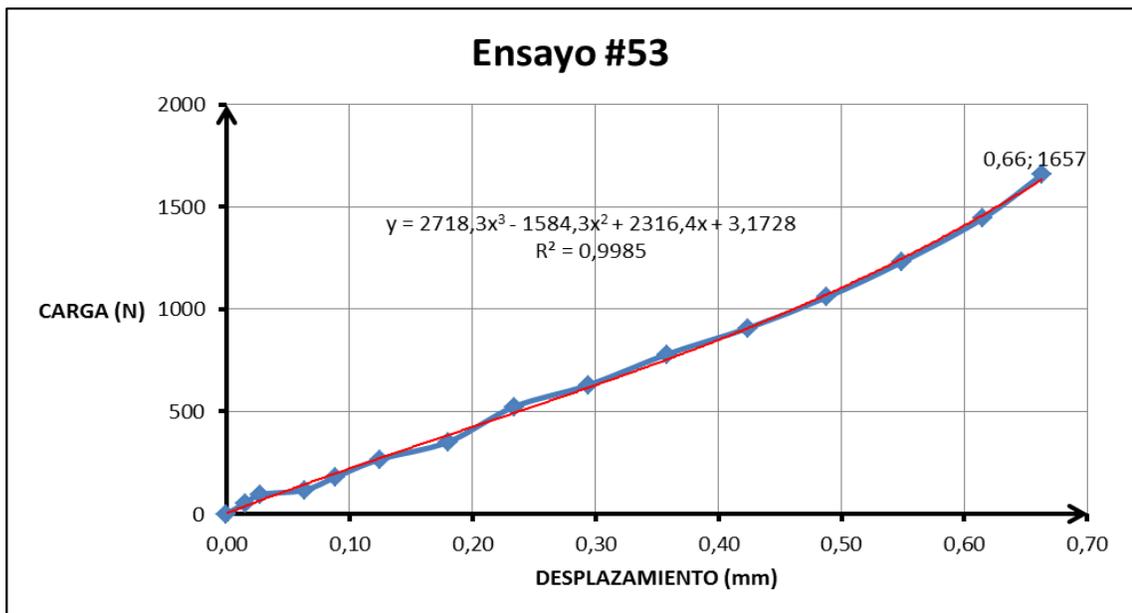
Ensayo #52		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	52	25,7
0,03	74	36,1
0,04	117	57,1
0,07	181	88,5
0,11	245	120,0
0,14	331	161,9
0,19	416	203,8
0,24	545	266,6
0,29	694	339,9
0,34	844	413,2



**Anexo 127: Gráfica de ensayo #52 (Argilita grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 128: Tabla del ensayo #53 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

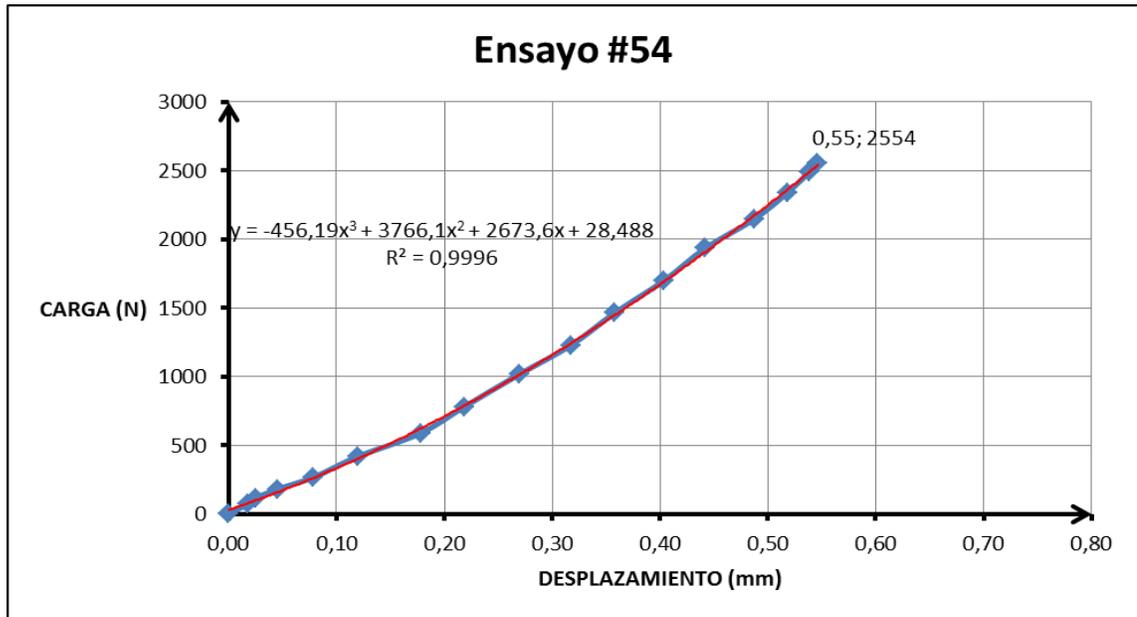
Ensayo #53		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	52	25,7
0,03	95	46,6
0,06	117	57,1
0,09	181	88,5
0,12	266	130,5
0,18	352	172,4
0,23	523	256,2
0,29	630	308,5
0,36	780	381,8
0,42	908	444,7
0,49	1058	518,0
0,55	1229	601,7
0,61	1443	706,4
0,66	1657	811,0



**Anexo 129: Gráfica de ensayo #53 (Argilita grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 130: Tabla del ensayo #54 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

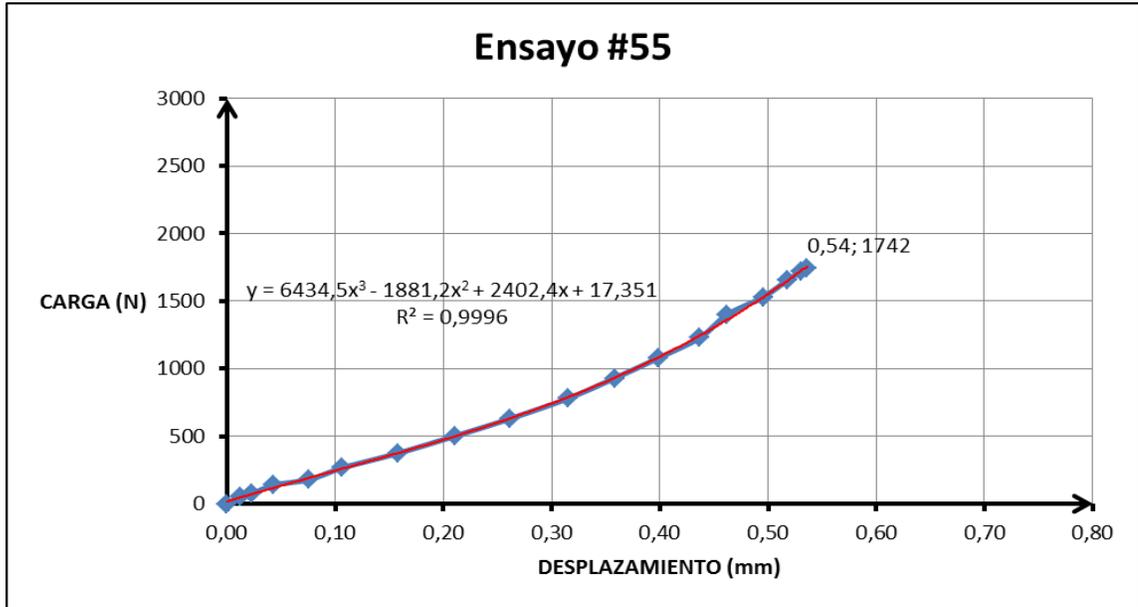
Ensayo #54		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	74	36,1
0,03	117	57,1
0,05	181	88,5
0,08	266	130,5
0,12	416	203,8
0,18	587	287,6
0,22	780	381,8
0,27	1015	497,0
0,32	1229	601,7
0,36	1464	716,8
0,40	1700	832,0
0,44	1935	947,0
0,49	2148	1051,6
0,52	2341	1145,8
0,54	2490	1219,0
0,55	2554	1250,4



**Anexo 131: Gráfica de ensayo #54 (Canto Rodado grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 132: Tabla del ensayo #55 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

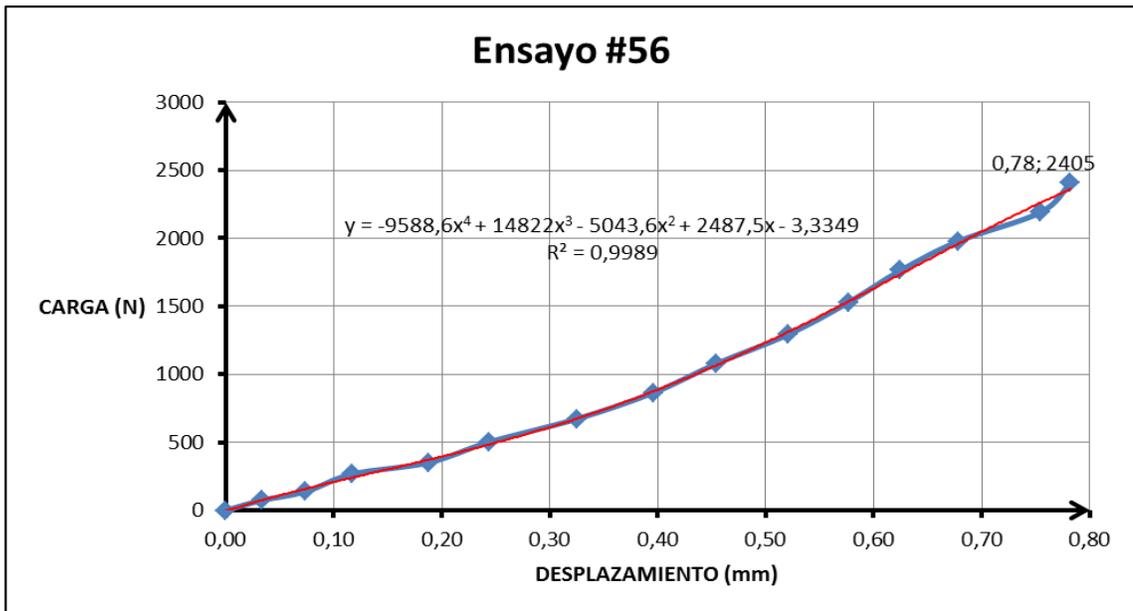
Ensayo #55		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,01	52	25,7
0,02	74	36,1
0,04	138	67,6
0,08	181	88,5
0,11	266	130,5
0,16	373	182,8
0,21	502	245,7
0,26	630	308,5
0,31	780	381,8
0,36	930	455,1
0,40	1079	528,4
0,44	1229	601,7
0,46	1400	685,4
0,50	1529	748,2
0,52	1657	811,0
0,53	1721	842,4
0,54	1742	852,9



**Anexo 133: Gráfica de ensayo #55 (Canto Rodado grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 134: Tabla del ensayo #56 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

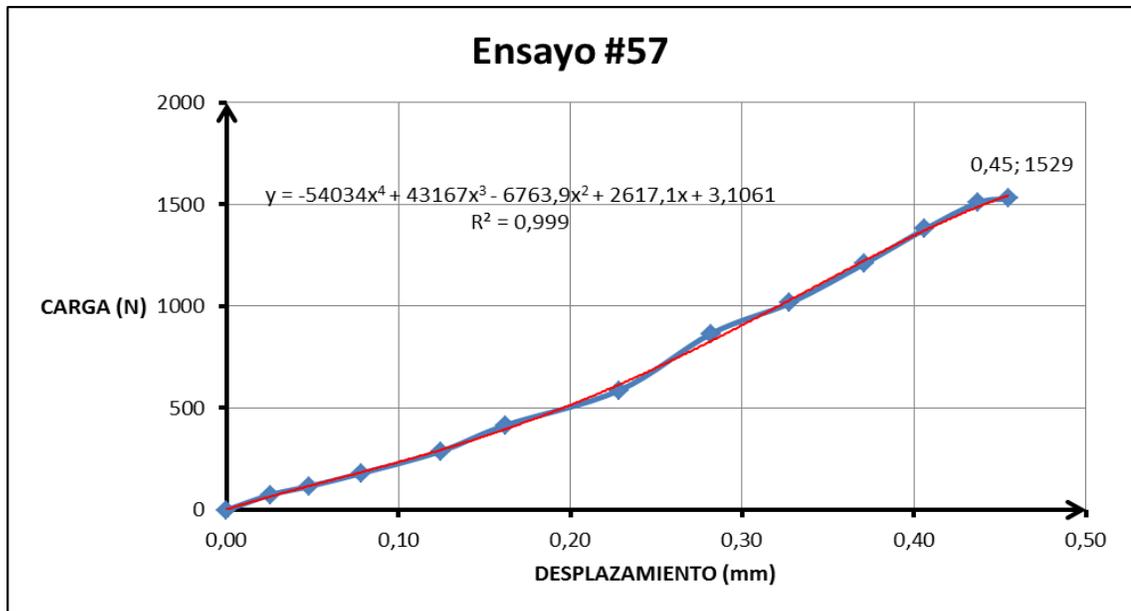
Ensayo #56		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	74	36,1
0,07	138	67,6
0,12	266	130,5
0,19	352	172,4
0,24	502	245,7
0,33	673	329,5
0,40	866	423,7
0,45	1079	528,4
0,52	1293	633,1
0,58	1529	748,2
0,62	1764	863,4
0,68	1977	968,0
0,75	2191	1072,6
0,78	2405	1177,2



**Anexo 135: Gráfica de ensayo #56 (Canto Rodado grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 136: Tabla del ensayo #57 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

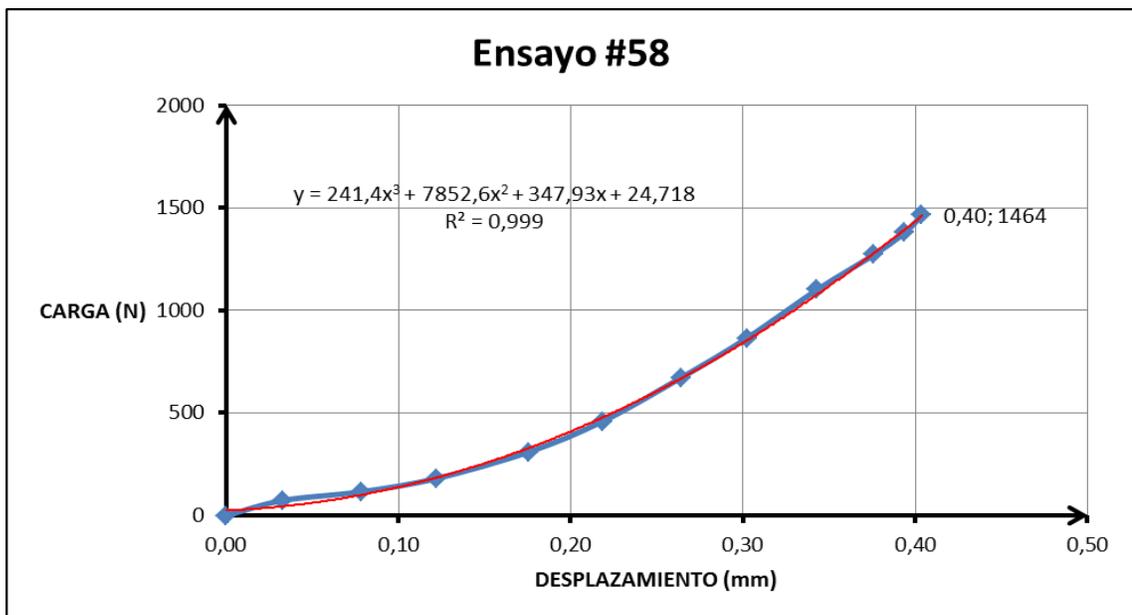
Ensayo #57		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	74	36,1
0,05	117	57,1
0,08	181	88,5
0,12	288	140,9
0,16	416	203,8
0,23	587	287,6
0,28	866	423,7
0,33	1015	497,0
0,37	1208	591,2
0,41	1379	675,0
0,44	1507	737,8
0,45	1529	748,2



**Anexo 137: Gráfica de ensayo #57 (Caliza grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 138: Tabla del ensayo #58 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

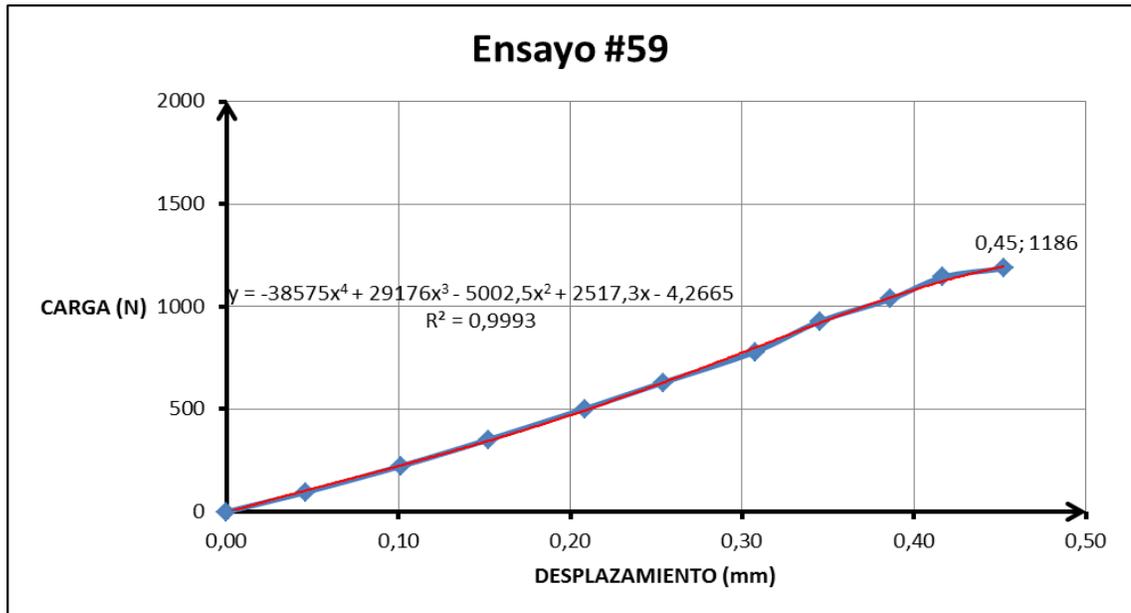
Ensayo #58		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	74	36,1
0,08	117	57,1
0,12	181	88,5
0,18	309	151,4
0,22	459	224,7
0,26	673	329,5
0,30	866	423,7
0,34	1101	538,9
0,38	1272	622,6
0,39	1379	675,0
0,40	1464	716,8



**Anexo 139: Gráfica de ensayo #58 (Caliza grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 140: Tabla del ensayo #59 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

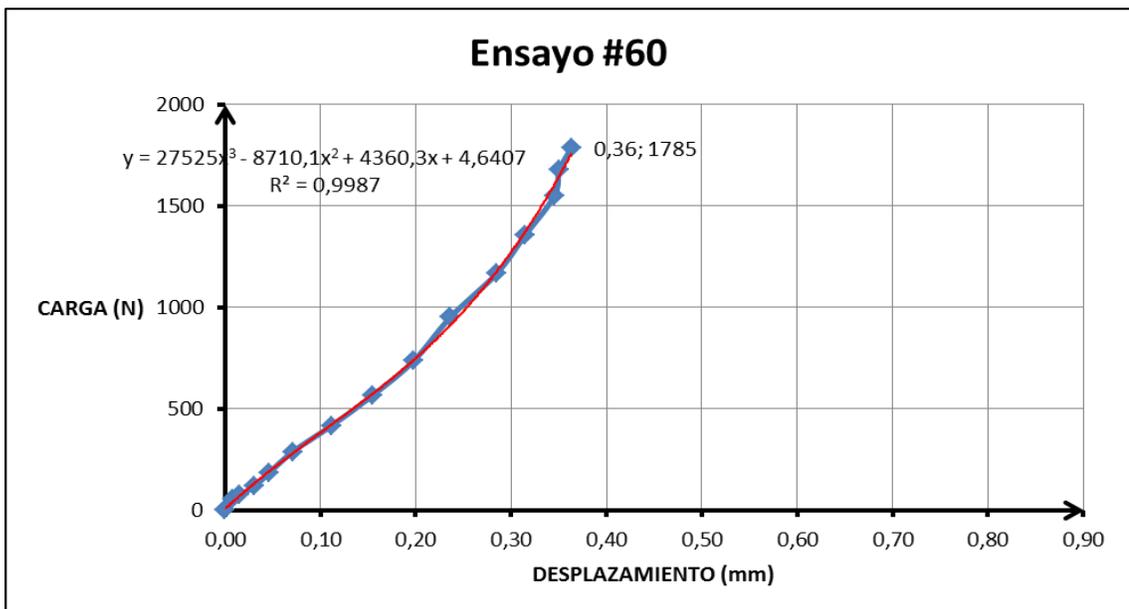
Ensayo #59		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,05	95	46,6
0,10	224	109,5
0,15	352	172,4
0,21	502	245,7
0,25	630	308,5
0,31	780	381,8
0,35	930	455,1
0,39	1037	507,5
0,42	1144	559,8
0,45	1186	580,8



**Anexo 141: Gráfica de ensayo #59 (Caliza grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 142: Tabla del ensayo #60 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

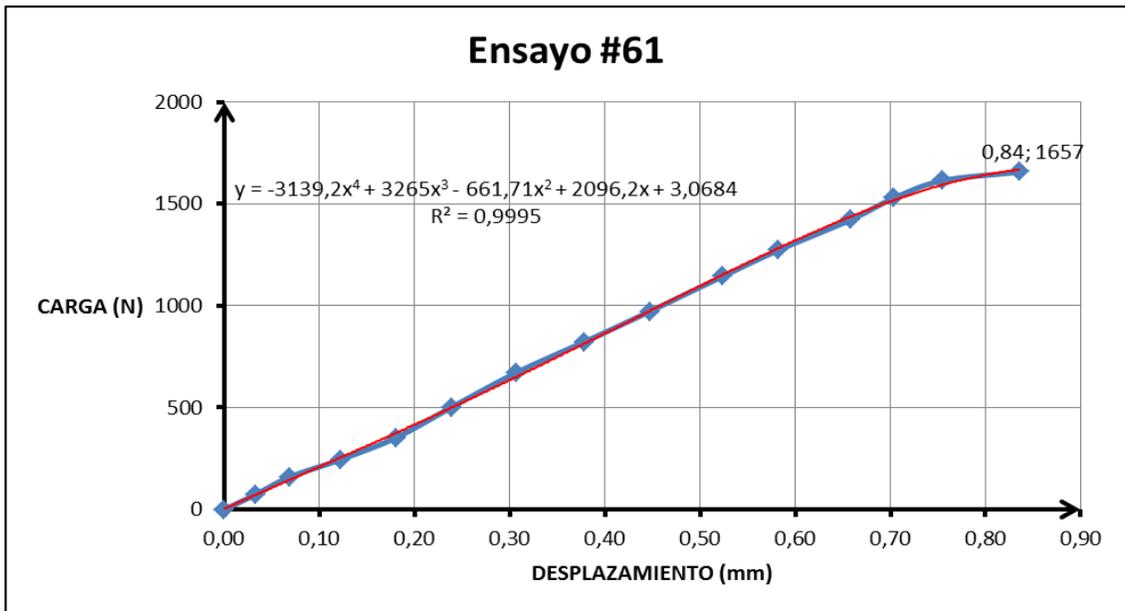
Ensayo #60		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,01	52	25,7
0,02	74	36,1
0,03	117	57,1
0,05	181	88,5
0,07	288	140,9
0,11	416	203,8
0,15	566	277,1
0,20	737	360,9
0,24	951	465,6
0,28	1165	570,3
0,31	1357	664,5
0,35	1550	758,7
0,35	1678	821,5
0,36	1785	873,8



**Anexo 143: Gráfica de ensayo #60 (Basalto grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 144: Tabla del ensayo #61 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

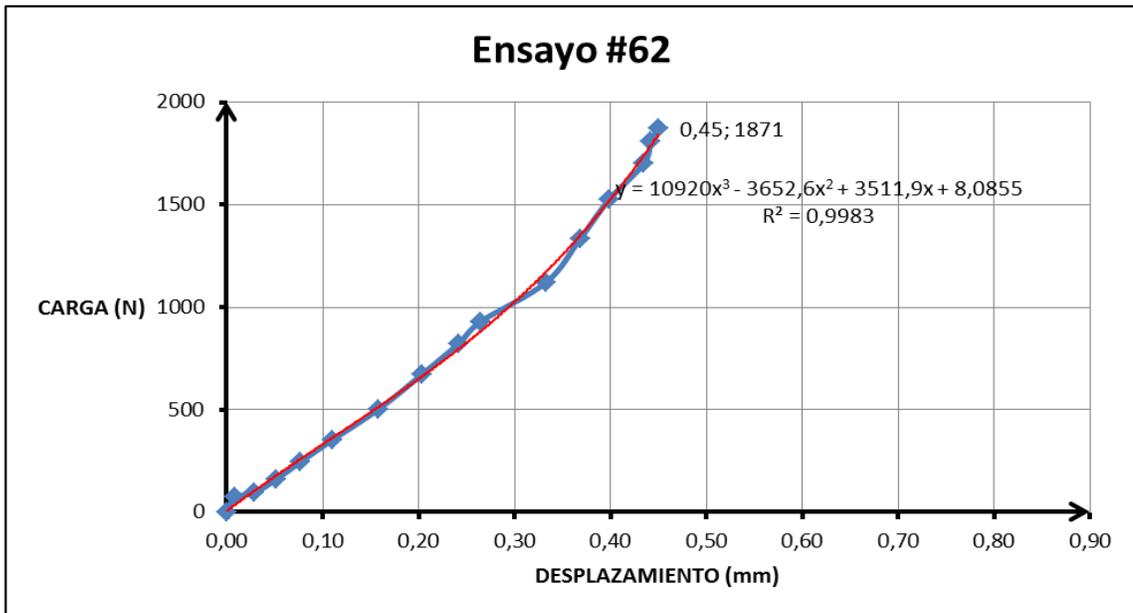
Ensayo #61		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	74	36,1
0,07	159	78,1
0,12	245	120,0
0,18	352	172,4
0,24	502	245,7
0,31	673	329,5
0,38	823	402,8
0,45	973	476,1
0,52	1144	559,8
0,58	1272	622,6
0,66	1422	695,9
0,70	1529	748,2
0,75	1614	790,1
0,84	1657	811,0



**Anexo 145: Gráfica de ensayo #61 (Basalto grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 146: Tabla del ensayo #62 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

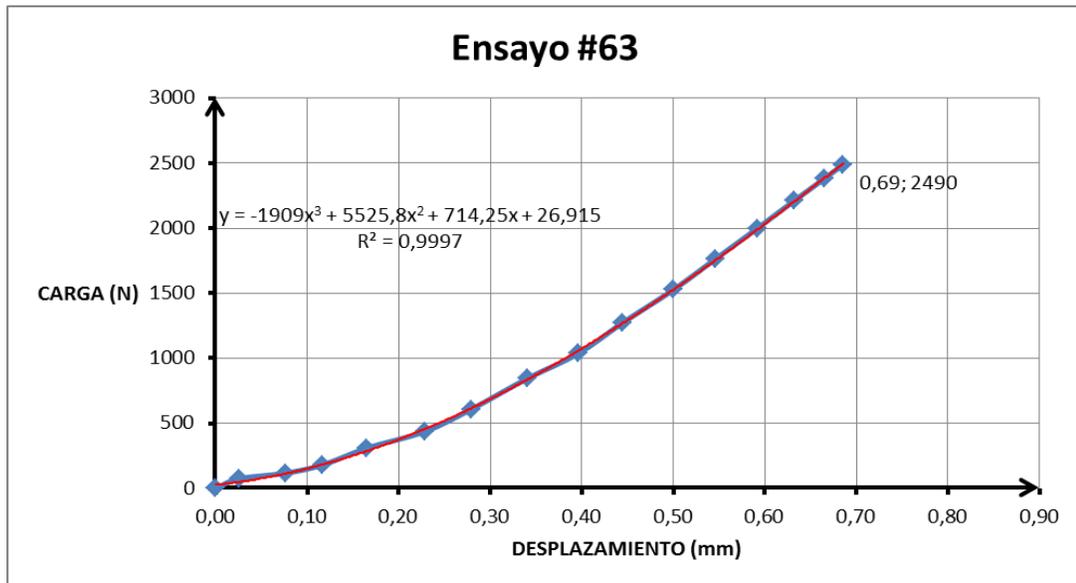
Ensayo #62		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,01	74	36,1
0,03	95	46,6
0,05	159	78,1
0,08	245	120,0
0,11	352	172,4
0,16	502	245,7
0,20	673	329,5
0,24	823	402,8
0,26	930	455,1
0,33	1122	549,4
0,37	1336	654,0
0,40	1529	748,2
0,43	1700	832,0
0,44	1806	884,3
0,45	1871	915,7



**Anexo 147: Gráfica de ensayo #62 (Basalto grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 148: Tabla del ensayo #63 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

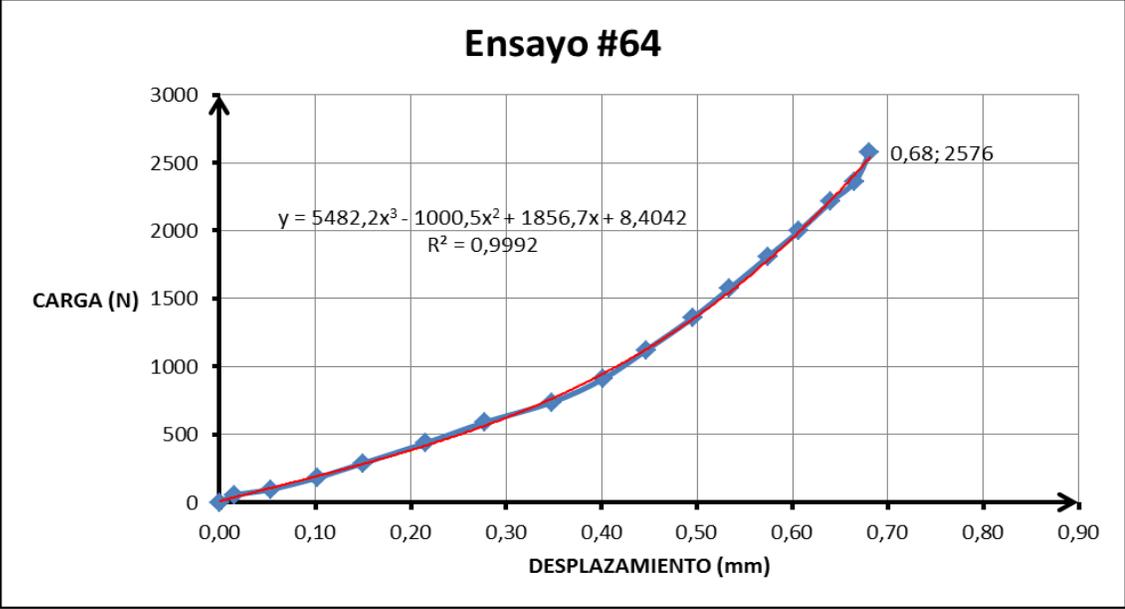
Ensayo #63		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	74	36,1
0,08	117	57,1
0,12	181	88,5
0,17	309	151,4
0,23	438	214,2
0,28	609	298,0
0,34	844	413,2
0,40	1037	507,5
0,44	1272	622,6
0,50	1529	748,2
0,55	1764	863,4
0,59	1999	978,4
0,63	2212	1083,0
0,67	2383	1166,7
0,69	2490	1219,0



**Anexo 149: Gráfica de ensayo #63 (Basalto UR grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 150: Tabla del ensayo #64 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

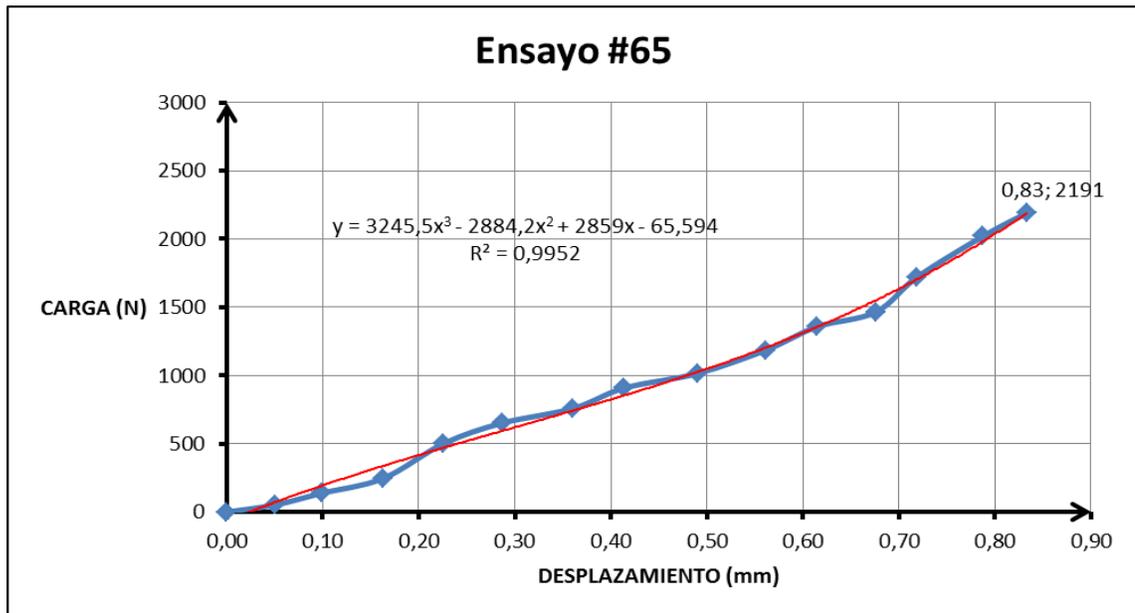
Ensayo #64		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	52	25,7
0,05	95	46,6
0,10	181	88,5
0,15	288	140,9
0,22	438	214,2
0,28	587	287,6
0,35	737	360,9
0,40	908	444,7
0,45	1122	549,4
0,50	1357	664,5
0,53	1571	769,2
0,57	1806	884,3
0,61	1999	978,4
0,64	2212	1083,0
0,67	2362	1156,2
0,68	2576	1260,8



**Anexo 151: Gráfica de ensayo #64 (Basalto UR grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 152: Tabla del ensayo #65 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

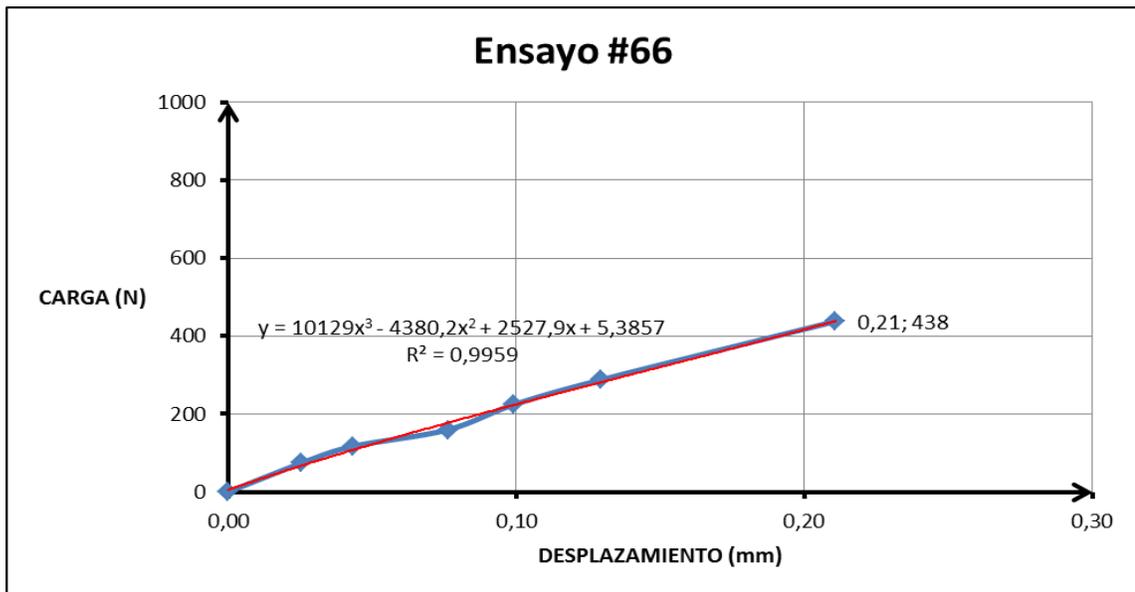
Ensayo #65		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,05	52	25,7
0,10	138	67,6
0,16	245	120,0
0,23	502	245,7
0,29	652	319,0
0,36	759	371,4
0,41	908	444,7
0,49	1015	497,0
0,56	1186	580,8
0,61	1357	664,5
0,68	1464	716,8
0,72	1721	842,4
0,79	2020	988,9
0,83	2191	1072,6



**Anexo 153: Gráfica de ensayo #65 (Basalto UR grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 154: Tabla del ensayo #66 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

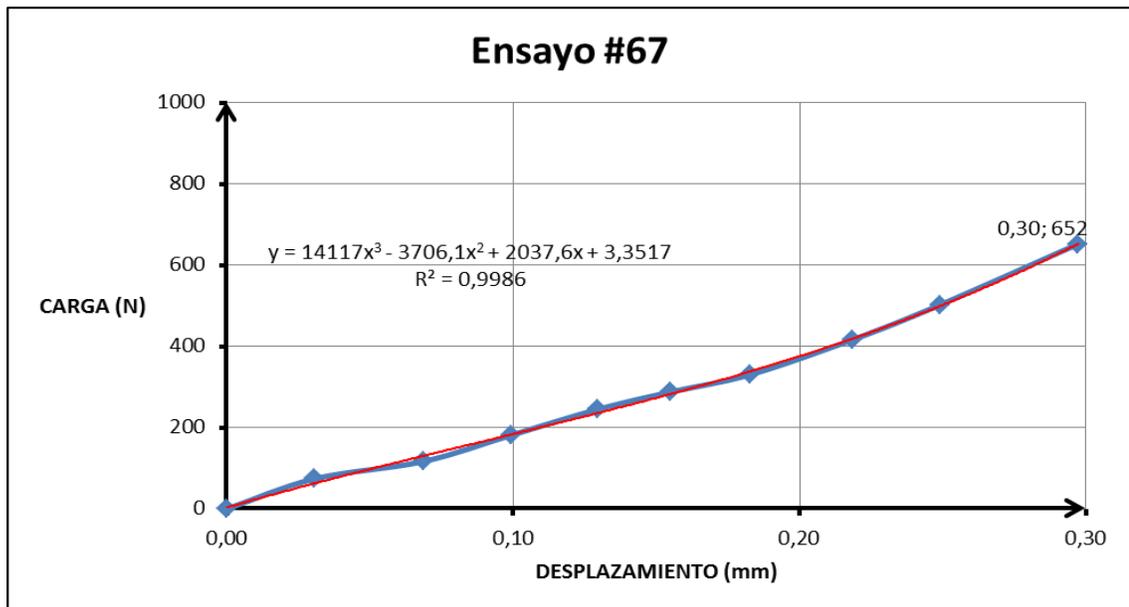
Ensayo #66		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	74	36,1
0,04	117	57,1
0,08	159	78,1
0,10	224	109,5
0,13	288	140,9
0,21	438	214,2



**Anexo 155: Gráfica de ensayo #66 (Argilita grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 156: Tabla del ensayo #67 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

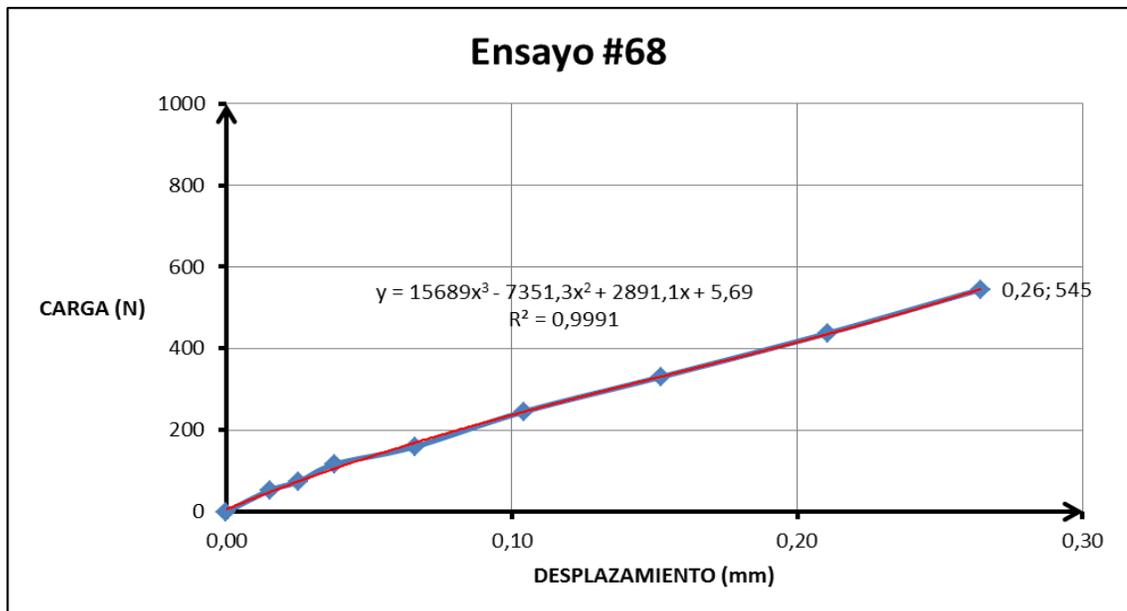
Ensayo #67		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	74	36,1
0,07	117	57,1
0,10	181	88,5
0,13	245	120,0
0,15	288	140,9
0,18	331	161,9
0,22	416	203,8
0,25	502	245,7
0,30	652	319,0



**Anexo 157: Gráfica de ensayo #67 (Argilita grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 158: Tabla del ensayo #68 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

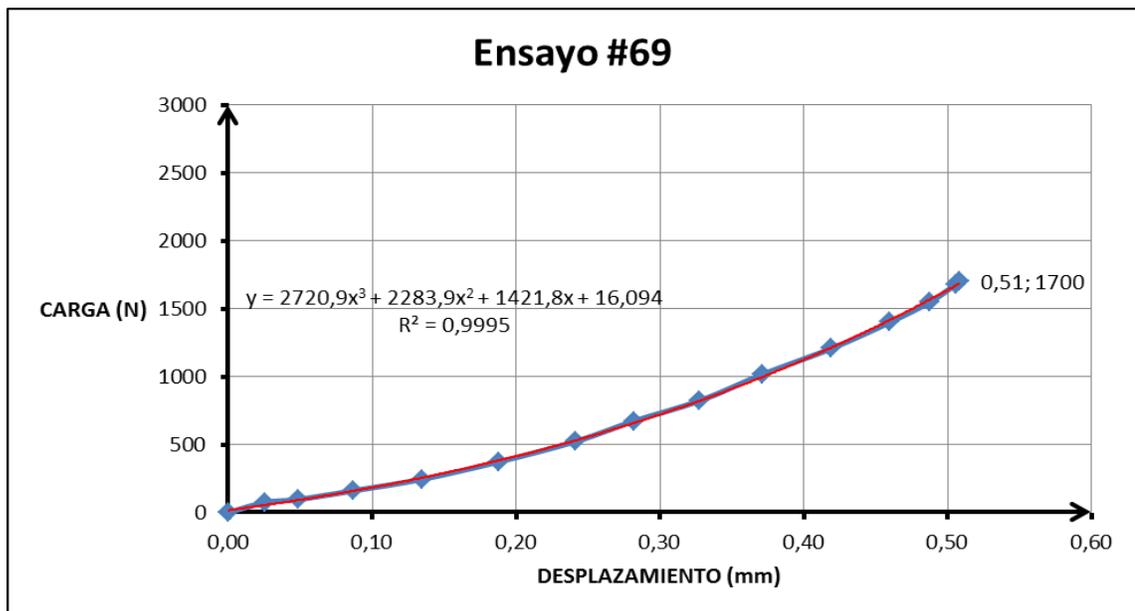
Ensayo #68		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	52	25,7
0,03	74	36,1
0,04	117	57,1
0,07	159	78,1
0,10	245	120,0
0,15	331	161,9
0,21	438	214,2
0,26	545	266,6



**Anexo 159: Gráfica de ensayo #68 (Argilita grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 160: Tabla del ensayo #69 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

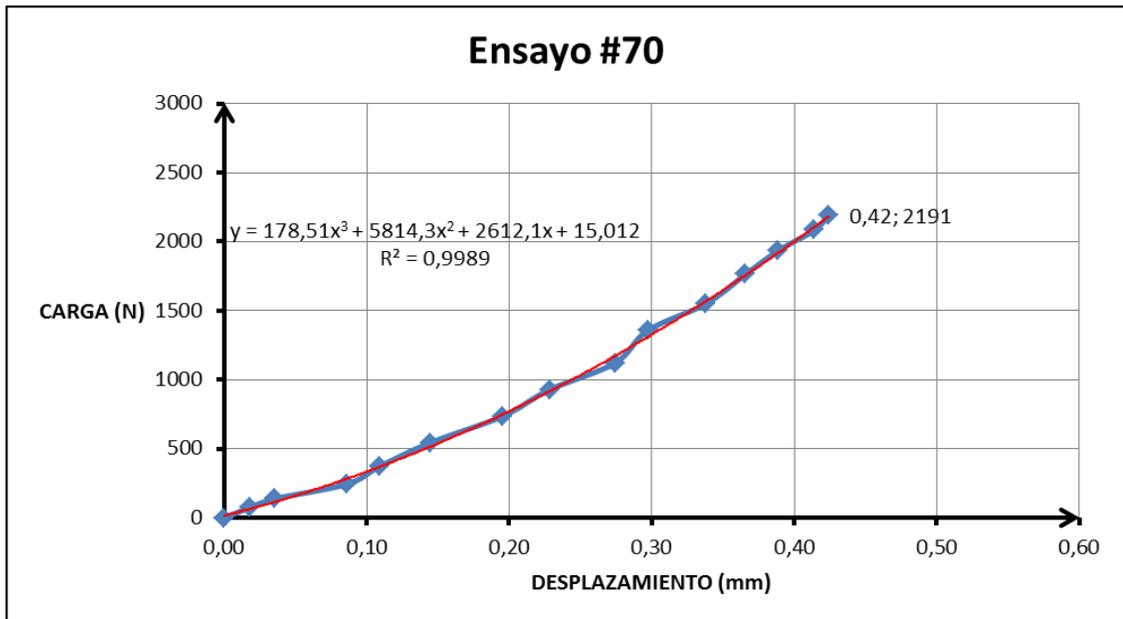
Ensayo #69		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,03	74	36,1
0,05	95	46,6
0,09	159	78,1
0,13	245	120,0
0,19	373	182,8
0,24	523	256,2
0,28	673	329,5
0,33	823	402,8
0,37	1015	497,0
0,42	1208	591,2
0,46	1400	685,4
0,49	1550	758,7
0,51	1678	821,5
0,51	1700	832,0



**Anexo 161: Gráfica de ensayo #69 (Canto Rodado grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 162: Tabla del ensayo #70 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

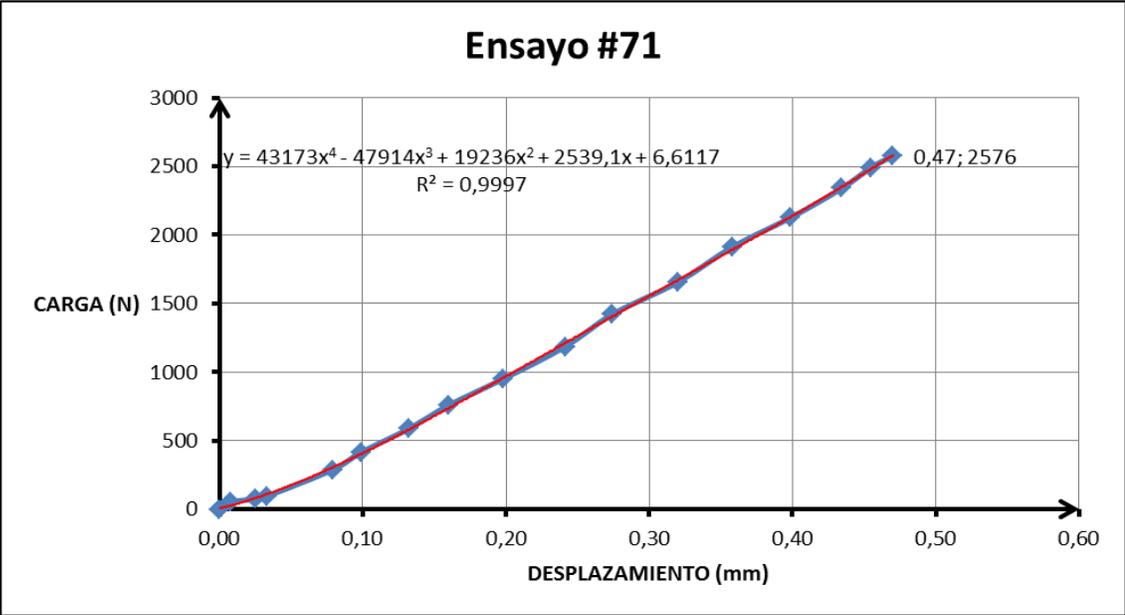
Ensayo #70		
Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Esf. Cortante (kPa)
0,00	0	0,0
0,02	74	36,1
0,04	138	67,6
0,09	245	120,0
0,11	373	182,8
0,14	545	266,6
0,20	737	360,9
0,23	930	455,1
0,27	1122	549,4
0,30	1357	664,5
0,34	1550	758,7
0,37	1764	863,4
0,39	1935	947,0
0,41	2084	1020,3
0,42	2191	1072,6



**Anexo 163: Gráfica de ensayo #70(Canto Rodado grano 120, 50mm/min, 10°C)**

**Anexo 164: Tabla del ensayo #71 valores de desplazamiento, carga y resistencia cortante**

<b>Ensayo #71</b>		
<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Carga (N)</b>	<b>Esf. Cortante (kPa)</b>
0,00	0	0,0
0,01	52	25,7
0,03	74	36,1
0,03	95	46,6
0,08	288	140,9
0,10	416	203,8
0,13	587	287,6
0,16	759	371,4
0,20	951	465,6
0,24	1186	580,8
0,27	1422	695,9
0,32	1657	811,0
0,36	1913	936,6
0,40	2127	1041,2
0,43	2341	1145,8
0,45	2490	1219,0
0,47	2576	1260,8



**Anexo 165: Gráfica de ensayo #71 (Canto Rodado grano 120, 50mm/min, 10°C)**



**Presidencia  
de la República  
del Ecuador**



**Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes**



**SENESCYT**

Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Nosotros, Carrión Baste Helen Andrea, con C.C: # 0922063870 y Velásquez Solórzano, Wagner Andrés, con C.C: # 0925703126 autores del trabajo de titulación: **Evaluación de la adherencia en el sistema asfalto –agregado mineral mediante una prueba 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, 29 de febrero de 2016

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

Carrión Baste Helen Andrea

C.C: 0922063870

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

Velásquez Solórzano Wagner Andrés

C.C: 0925703126

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

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

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA EN EL SISTEMA ASFALTO - AGREGADO MINERAL MEDIANTE UNA PRUEBA DE CORTE DIRECTO	
<b>AUTOR(ES)</b>	VELÁSQUEZ SOLORZANO WAGNER Y CARRIÓN BASTE HELEN ANDREA	
<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>	29 DE FEBRERO DEL 2016	<b>NO. DE PÁGINAS:</b> 248
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	PAVIMENTOS	
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	AGREGADO MINERAL, LIGANTE ASFÁLTICO, ADHERENCIA, DESPRENDIMIENTO, DAÑO EN AGUA, ENSAYO DE CORTE.	
<b>RESUMEN/ABSTRACT:</b>	<p>EN LOS ÚLTIMOS AÑOS EL ECUADOR HA TENIDO UN GRAN DESARROLLO VIAL, DE MANERA QUE ES MUY IMPORTANTE CONOCER UNO DE LOS FACTORES PRINCIPALES QUE INCIDEN EN EL DETERIORO DE LAS CAPAS ASFÁLTICAS EN LAS CARRETERAS, COMO LO ES LA ADHERENCIA ENTRE EL LIGANTE ASFÁLTICO Y EL AGREGADO MINERAL.</p> <p>ESTE TRABAJO DE TITULACIÓN CONSISTE EN REALIZAR UNA INVESTIGACIÓN APLICANDO UN PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL NUEVO, EMPLEANDO UNA PRUEBA DE CORTE DIRECTO A MUESTRAS DE ROCAS CON CIERTO TRATAMIENTO, PEGADAS CON CEMENTO ASFÁLTICO.</p> <p>EN UN DISEÑO EXPERIMENTAL SE ANALIZÓ LA INCIDENCIA DE VARIAR DISTINTOS FACTORES DE ENSAYO COMO TEMPERATURA, TIEMPO DE APLICACIÓN DE CARGA Y FINURA DE LIJA EN DICHA PRUEBA.</p> <p>EL PROCEDIMIENTO SE APLICÓ A 2 TIPOS DE ROCAS DE DIFERENTE COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CON UN SOLO TIPO DE ASFALTO.</p> <p>LOS RESULTADOS OBTENIDOS FUERON ANALIZADOS POR EL PROGRAMA ESTADÍSTICO STATGRAPHICS, CON EL CUAL SE REALIZÓ UN ANÁLISIS DE VARIANZA QUE PERMITIÓ ESTABLECER LOS NIVELES PERTINENTES EN LOS DISTINTOS FACTORES ANALIZADOS, ES DECIR TEMPERATURA: 10°C, VELOCIDAD DE CARGA: 50MM/MIN Y FINURA DE LIJA: 120.</p> <p>POSTERIORMENTE SE AMPLIÓ EL PROCEDIMIENTO DE TRABAJO PARA EVALUAR EL DAÑO ANTE EL AGUA EN MUESTRAS SIN Y CON INMERSIÓN AL AGUA A 5 TIPOS DE ROCAS.</p>	
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> 593-0982884124	<b>E-mail:</b> helencb92@hotmail.com, addressv63@hotmail.com
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:</b>	<b>Nombre:</b> ING. ROLANDO VILA ROMANÍ, PHD	
	<b>Teléfono:</b> +593-4-206951	
	<b>E-mail:</b> vilarolando@hotmail.com	

#### **SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA**

<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>	
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>	
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>	