PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

"MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA BASE GRANULAR MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE ESCORIA DE ACERO A TRAVÉS DEL ENSAYO CBR. CASO DE ESTUDIO MINA SAN ANTONIO"

AUTORES

GALLEGOS SACA MARLON KELVIN

PAREDES CUMBICUS EVELYN KARINA

DIRECTOR: ING. YÁNEZ GUSTAVO

QUITO, ENERO 2019

Capítulo 1 : GENERALIDADES *1*

1.1. JUSTIFICACIÓN **1**

1.2. ALCANCE **2**

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **3**

1.3. OBJETIVOS **3**

1.3.1. Objetivo General 3

1.3.2. Objetivos Específicos 3

1.4. HIPÓTESIS **4**

Capítulo 2 : MARCO TEÓRICO *4*

2.1. ESCORIA DE ACERO **4**

2.1.1. Generalidades 4

2.1.1.1. Historia de la siderurgia a nivel mundial 4

2.1.1.2. Uso de la escoria a nivel mundial 6

2.1.1.3. Historia de la siderurgia a nivel nacional 7

2.1.1.4. Uso de la escoria a nivel nacional 9

2.1.2. Definiciones 9

2.1.3. Clasificación de la escoria de acero 10

2.1.3.1. Escoria de alto horno BF 10

2.1.3.2. Escoria de convertidor de oxigeno BOF. 10

2.1.3.3. Escoria de horno de arco eléctrico EAF. 11

Escoria de horno de arco eléctrico blanca 11

Escoria de horno de arco eléctrico negra 11

2.1.4. Características de la escoria de acero 12

2.1.5. Planta siderúrgica proveedora de la escoria de acero en análisis 13

2.1.3.1. Ubicación 13

2.1.3.2. Descripción de la planta 13

2.1.3.3. Proceso de obtención de la escoria de acero 14

2.2. BASE GRANULAR **15**

2.2.1. Generalidades 15

2.2.1.1. Explotación minera en Ecuador 15

2.2.1.2. Tipo de explotación minera en Ecuador 15

2.2.1.3. Ubicación y descripción de la cantera. 16

2.2.2. Definiciones 17

2.2.3. Características de la base granular de la cantera. 17

2.2.4. Clasificación de bases granulares 17
2.2.4.1. Base clase I 17
2.2.4.2. Base clase II 18
2.2.4.4. Base clase IV 19
2.3. ESTABILIZACIÓN DE BASE GRANULAR CON ESCORIA DE ACERO 19
2.3.1. Generalidades 19
2.3.2. Factores que afectan a la estabilidad de la escoria de acero 20
2.3.3.1. La hidratación de la cal libre 20
2.3.3.2. La hidratación de la magnesia libre. 21
2.3.3.3. Transformación del silicato bicálcico. 21
2.3.3. Factores que afectan al medio ambiente 21
2.3.3.1. Lixiviación 21
Capítulo 3 : ENSAYOS Y CÁLCULOS DE LABORATORIO 22
3.1. ENSAYOS EN LA BASE GRANULAR 22
3.1.1. Granulometría 22
3.1.1.1. Cálculos 23
Agregado grueso 23
Agregado fino 23
3.1.1.2. Análisis de resultados 24
3.1.2. Abrasión 24
3.1.2.1. Cálculos 26
3.1.2.2. Análisis de resultados 26
3.1.3. Desgaste a los sulfatos 26
3.1.3.1. Cálculos 28
Agregado grueso 28
Agregado fino 29
3.1.3.3. Análisis de resultados 29
3.1.4. Gravedad específica 30
3.1.4.1. Cálculos Agregado grueso 32
3.1.4.2. Cálculos Agregado fino 33
3.1.5. Equivalente de arena 33
3.1.5.1. Cálculos 34
3.1.5.2. Análisis de resultados 35
3.1.6. Ensayo Próctor 35
3.1.6.1. Cálculos Material Base 37
- Descripción del molde 38

- Contenido de humedad 38
- Densidad húmeda del suelo 38
- Densidad seca del suelo 38

Gráfico peso unitario seco – contenido de humedad 38

3.1.7. Ensayo CBR 39

3.1.7.1. Cálculos 41

- Datos del molde 41
- Contenido de humedad de moldeo 41
- Contenido de humedad posterior a la saturación 41
- Porcentaje de absorción luego de la saturación 41
- Porcentaje de esponjamiento 42
- Ensayo de penetración 42
- Curva de esfuerzo - penetración 43
- Curva de CBR – densidad seca 43
- Porcentajes de CBR 44

3.2. ENSAYOS EN LA ESCORIA DE ACERO 44

3.2.1. Granulometría 44

3.2.1.1. Cálculos 44

- Agregado grueso 44
- Agregado fino 45

3.3. ENSAYOS EN LA MEZCLA BASE/ESCORIA 45

3.3.1. Dosificaciones a usar 45

3.3.2. Ensayo Proctor 45

3.3.2.1. Cálculos 46

PROCTOR, BASE + 5% DE ESCORIA 46

- Descripción del molde 46
- Contenido de humedad 46
- Densidad húmeda del suelo 46
- Densidad seca del suelo 47
- Gráfico peso unitario seco – contenido de humedad 47

PROCTOR, BASE + 15% DE ESCORIA 47

- Descripción del molde 48
- Contenido de humedad 48
- Densidad húmeda del Suelo 48
- Densidad seca del suelo 49
- Gráfico peso unitario seco – contenido de humedad 49

PROCTOR, BASE + 25% DE ESCORIA 49
- Descripción del molde 50
- Contenido de humedad 50
- Densidad húmeda del suelo 50
- Densidad seca del suelo 50
- Gráfico peso unitario seco – contenido de humedad 50
PROCTOR, BASE + 35% DE ESCORIA 51
- Descripción del molde 51
- Contenido de humedad 52
- Densidad húmeda del suelo 52
- Densidad seca del suelo 52
- Gráfico peso unitario seco – contenido de humedad 52
PROCTOR, BASE + 40% DE ESCORIA 53
- Descripción del molde 53
- Contenido de humedad 54
- Densidad húmeda del suelo 54
- Densidad seca del suelo 54
- Gráfico peso unitario seco – contenido de humedad 54
3.3.2.2. Análisis de resultados 55
3.2.3. Ensayo CBR 55
3.2.3.1. Cálculos 56
CBR, BASE + 5% DE ESCORIA 56
- Datos de moldeo 56
- Contenido de humedad de moldeo 56
- Contenido de humedad posterior a la saturación 56
- Porcentaje de absorción luego de la saturación 56
- Porcentaje de esponjamiento 57
- Ensayo de penetración 57
- Curva de esfuerzo - penetración 58
- Curva de CBR – densidad seca 58
- Porcentajes de CBR 59
CBR, BASE + 15% DE ESCORIA 59
- Datos de moldeo 59
- Contenido de humedad de moldeo 59
- Contenido de humedad posterior a la saturación 59
- Porcentaje de absorción luego de la saturación 60
- Porcentaje de esponjamiento 60

- Ensayo de penetración 60
- Curva de esfuerzo - penetración 61
- Curva de CBR – densidad seca 61
- Porcentajes de CBR 62

CBR, BASE + 25% DE ESCORIA 62
- Datos de moldeo 62
- Contenido de humedad de moldeo 62
- Contenido de humedad posterior a la saturación 62
- Porcentaje de absorción luego de la saturación 63
- Porcentaje de esponjamiento 63
- Ensayo de penetración 63
- Curva de esfuerzo - penetración 64
- Curva de CBR – densidad seca 64
- Porcentajes de CBR 65

CBR, BASE + 35% DE ESCORIA 65
- Datos de moldeo 65
- Contenido de humedad de moldeo 65
- Contenido de humedad posterior a la saturación 65
- Porcentaje de absorción luego de la saturación 66
- Porcentaje de esponjamiento 66
- Ensayo de penetración 66
- Curva de esfuerzo - penetración 67
- Curva de CBR – densidad seca 67
- Porcentajes de CBR 68

CBR, BASE + 40% DE ESCORIA 68
- Datos de moldeo 68
- Contenido de humedad de moldeo 68
- Contenido de humedad posterior a la saturación 68
- Porcentaje de absorción luego de la saturación 69
- Porcentaje de esponjamiento 69
- Ensayo de penetración 69
- Curva de esfuerzo - penetración 70
- Curva de CBR – densidad seca 70
- Porcentajes de CBR 71

- Análisis de resultados 71

3.4. ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL 72

Capítulo 4 : CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS _____ 73

4.1. CONCLUSIONES _____ 73

4.2. RECOMENDACIONES _____ 74

4.3. BIBLIOGRAFÍA _____ 75

4.4. ANEXOS_____ 79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Porcentajes granulométricos para base Clase I 18

Tabla 2.2: Porcentajes granulométricos para base Clase II 18

Tabla 2.3: Porcentajes granulométricos para base Clase III 19

Tabla 2.4: Porcentajes granulométricos para base Clase IV 19

Tabla 3.1: Granulometría del agregado grueso. Base granular 23

Tabla 3.2: Granulometría del agregado fino. Base granular 24

Tabla 3.3: Masa de las fracciones antes del ensayo de Abrasión 26

Tabla 3.4: Granulometría del agregado grueso antes del ensayo. Desgaste a los sulfatos .. 28

Tabla 3.5: Granulometría del agregado grueso después del ensayo. Desgaste a los sulfatos 28

Tabla 3.6: Granulometría del agregado fino antes del ensayo. Desgaste a los sulfatos 29

Tabla 3.7: Granulometría del agregado fino después del ensayo. Desgaste a los sulfatos .. 29

Tabla 3.8: Datos, base granular. Ensayo Proctor 37

Tabla 3.9: Descripción del molde, base granular. Ensayo Proctor 38

Tabla 3.10: Contenido de humedad, base granular. Ensayo Proctor 38

Tabla 3.11: Densidad húmeda del suelo, base granular. Ensayo Proctor 38

Tabla 3.12: Densidad seca del suelo, base granular. Ensayo Proctor 38

Tabla 3.13: Datos de moldeo, base granular. Ensayo CBR 41

Tabla 3.14: Contenido de humedad de moldeo, base granular. Ensayo CBR 41

Tabla 3.15: Contenido de humedad posterior a la saturación, base granular. Ensayo CBR 41

Tabla 3.16: Porcentaje de absorción luego de la saturación, base granular. Ensayo CBR .. 41

Tabla 3.17: Porcentaje de esponjamiento, base granular. Ensayo CBR 42

Tabla 3.18: Ensayo de penetración, base granular. Ensayo CBR 42

Tabla 3.19: Porcentajes de CBR, base granular 44

Tabla 3.20: Granulometría del material grueso. Escoria de Acero 44

Tabla 3.21: Granulometría del material fino. Escoria de Acero 45
Tabla 3.22: Datos, base + 5% de escoria. Ensayo Proctor 46
Tabla 3.23: Descripción del molde, base + 5% escoria. Ensayo Proctor 46
Tabla 3.24: Contenido de humedad, base + 5% de escoria. Ensayo Proctor 46
Tabla 3.25: Densidad húmeda del suelo, base + 5% de escoria. Ensayo Proctor..... 47
Tabla 3.26: Densidad seca del suelo, base + 5% de escoria. Ensayo Proctor 47
Tabla 3.27: Datos, base + 15% de escoria. Ensayo Proctor 47
Tabla 3.28: Descripción del molde, base + 15% de escoria. Ensayo Proctor 48
Tabla 3.29: Contenido de humedad, base + 15% de escoria. Ensayo Proctor 48
Tabla 3.30: Densidad húmeda del suelo, base + 15% de escoria. Ensayo Proctor..... 48
Tabla 3.31: Densidad seca del suelo, base + 15% de escoria. Ensayo Proctor 49
Tabla 3.32: Datos, base + 25% de escoria. Ensayo Proctor 49
Tabla 3.33: Descripción del molde, base + 25% de escoria. Ensayo Proctor 50
Tabla 3.34: Contenido de humedad, base + 25% de escoria. Ensayo Proctor 50
Tabla 3.35: Densidad húmeda del suelo, base + 25% de escoria. Ensayo Proctor..... 50
Tabla 3.36: Densidad seca del suelo, base + 25% de escoria. Ensayo Proctor 50
Tabla 3.37: Datos, base + 35% de escoria. Ensayo Proctor 51
Tabla 3.38: Descripción del molde, base + 35% de escoria. Ensayo Proctor 51
Tabla 3.39: Contenido de humedad, base + 35% de escoria. Ensayo Proctor 52
Tabla 3.40: Densidad húmeda del suelo, base + 35% de escoria. Ensayo Proctor..... 52
Tabla 3.41: Densidad seca del suelo, base + 35% de escoria. Ensayo Proctor 52
Tabla 3.42: Datos, base + 40% de escoria. Ensayo Proctor 53
Tabla 3.43: Descripción del molde, base + 40% de escoria. Ensayo Proctor 53
Tabla 3.44: Contenido de humedad, base + 40% de escoria. Ensayo Proctor 54
Tabla 3.45: Densidad húmeda del suelo, base + 40% de escoria. Ensayo Proctor..... 54
Tabla 3.46: Densidad seca del suelo, base + 40% de escoria. Ensayo Proctor 54

Tabla 3.47: Datos de moldeo, base + 5% Escoria. Ensayo CBR 56

Tabla 3.48: Contenido de humedad de moldeo, base + 5% de escoria. Ensayo CBR 56

Tabla 3.49: Contenido de humedad posterior a la saturación, base + 5% de escoria. Ensayo CBR 56

Tabla 3.50: Porcentaje de absorción luego de la saturación, base + 5% de escoria. Ensayo CBR 56

Tabla 3.51: Porcentaje de esponjamiento, base + 5% de escoria. Ensayo CBR 57

Tabla 3.52: Ensayo de penetración, base + 5% de escoria. Ensayo CBR 57

Tabla 3.53: Porcentajes de CBR, base + 5% de escoria 59

Tabla 3.54: Datos de moldeo, base + 15% de escoria. Ensayo CBR 59

Tabla 3.55: Contenido de humedad de moldeo, base + 15% de escoria. Ensayo CBR 59

Tabla 3.56: Contenido de humedad posterior a la saturación, base + 15% de escoria. Ensayo CBR 59

Tabla 3.57: Porcentaje de absorción luego de la saturación, base + 15% de escoria. Ensayo CBR 60

Tabla 3.58: Porcentaje de esponjamiento, base + 15% de escoria. Ensayo CBR 60

Tabla 3.59: Ensayo de penetración, base + 15% de escoria. Ensayo CBR 60

Tabla 3.60: Porcentajes de CBR, base + 15% de escoria 62

Tabla 3.61: Datos de moldeo, base + 25% de escoria. Ensayo CBR 62

Tabla 3.62: Contenido de humedad de moldeo, base + 25% de escoria. Ensayo CBR 62

Tabla 3.63: Contenido de humedad posterior a la saturación, base + 25% de escoria. Ensayo CBR 62

Tabla 3.64: Porcentaje de absorción luego de la saturación, base + 25% de escoria. Ensayo CBR 63

Tabla 3.65: Porcentaje de esponjamiento, base + 25% de escoria. Ensayo CBR 63

Tabla 3.66: Ensayo de penetración, base + 25% de escoria. Ensayo CBR 63

Tabla 3.67: Porcentajes de CBR, base + 25% de escoria 65

Tabla 3.68: Datos de moldeo, base + 35% de escoria. Ensayo CBR 65

Tabla 3.69: Contenido de humedad de moldeo, base + 35% de escoria. Ensayo CBR 65

Tabla 3.70: Contenido de humedad posterior a la saturación, base + 35% de escoria. Ensayo CBR 65

Tabla 3.71: Porcentaje de absorción luego de la saturación, base + 35% de escoria. Ensayo CBR 66

Tabla 3.72: Porcentaje de esponjamiento, base + 35% de escoria. Ensayo CBR 66

Tabla 3.73: Ensayo de penetración, base + 35% de escoria. Ensayo CBR 66

Tabla 3.74: Porcentajes de CBR, base + 35% de escoria 68

Tabla 3.75: Datos de moldeo, base + 40% de escoria. Ensayo CBR 68

Tabla 3.76: Contenido de humedad de moldeo, base + 40% de escoria. Ensayo CBR 68

Tabla 3.77: Contenido de humedad posterior a la saturación, base + 40% de escoria. Ensayo CBR 68

Tabla 3.78: Porcentaje de absorción luego de la saturación, base + 40% de escoria. Ensayo CBR 69

Tabla 3.79: Porcentaje de esponjamiento, base + 40% de escoria. Ensayo CBR 69

Tabla 3.80: Ensayo de penetración, base + 40% de escoria. Ensayo CBR 69

Tabla 3.81: Porcentajes de CBR, base + 40% Escoria 71

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1: Ubicación geográfica de la Empresa Siderúrgica 13

Gráfico 2.2: Ubicación geográfica de la cantera proveedora de la base granular 16

Gráfico 3.1: Peso unitario seco vs contenido de humedad, base granular. Ensayo Proctor 39

Gráfico 3.2: Esfuerzo vs penetración, base granular. Ensayo CBR 43

Gráfico 3.3: % CBR vs densidad seca, base granular. Ensayo CBR 43

Gráfico 3.4: Peso unitario seco vs contenido de humedad, base + 5% de escoria. Ensayo Proctor 47

Gráfico 3.5: Peso unitario seco vs contenido de humedad, base + 15% de escoria. Ensayo Proctor 49

Gráfico 3.6: Peso unitario seco vs contenido de humedad, base + 25% de escoria. Ensayo Proctor 51

Gráfico 3.7: Peso unitario seco vs contenido de humedad, base + 35% de escoria. Ensayo Proctor 53

Gráfico 3.8: Peso unitario seco vs contenido de humedad, base + 40% de escoria. Ensayo Proctor 55

Gráfico 3.9: Esfuerzo vs penetración, base + 5% de escoria. Ensayo CBRCurva de CBR – densidad seca 58

Gráfico 3.10: % CBR vs densidad seca, base + 5% de escoria. Ensayo CBR 58

Gráfico 3.11: Esfuerzo vs penetración, base + 15% de escoria. Ensayo CBR 61

Gráfico 3.12: % CBR vs densidad deca, base + 15% de escoria. Ensayo CBR 61

Gráfico 3.13: Esfuerzo vs penetración, base + 25% de escoria. Ensayo CBR 64

Gráfico 3.14: % CBR vs densidad seca, base + 25% de escoria. Ensayo CBR 64

Gráfico 3.15: Esfuerzo vs penetración, base + 35% de escoria. Ensayo CBR 67

Gráfico 3.16: % CBR vs densidad seca, base + 35% de escoria. Ensayo CBR 67

Gráfico 3.17: Esfuerzo vs penetración, base + 40% de escoria. Ensayo CBR 70

Gráfico 3.18: % CBR vs densidad seca, base + 40% de escoria. Ensayo CBR 70

Gráfico 3.19: Gráfica de CBR vs porcentaje de escoria 71

CAPÍTULO 1 : GENERALIDADES

El capítulo 1 tiene la finalidad de ofrecer una breve introducción acerca del estudio que se ha realizado en el presente trabajo. En este capítulo se cuenta con los objetivos que se han planteado en la investigación; así como su respectiva justificación, alcance, planteamiento del problema y la hipótesis.

1.1. JUSTIFICACIÓN

El uso constante de productos químicos que intervienen en el mejoramiento de la metodología constructiva en el campo de ingeniería civil, es uno de los muchos factores que han ocasionado un desequilibrio en el medio ambiente. Es por esta razón que actualmente a nivel mundial se ha hecho presente la necesidad de desarrollar nuevos productos que puedan ser aplicados a la construcción y que al mismo tiempo permitan una integración amigable con el tema ambiental, siendo algunos de estos originarios del proceso de reciclado. La escoria del acero siendo un producto derivado de la fabricación de elementos de acero, podría ser un elemento que incida favorablemente en el ámbito constructivo con visión hacia la rama vial de la ingeniería civil y a su vez someterse al reciclaje, de modo que pueda ser solidario con el medio ambiente.

La razón de una posible implementación de la escoria de acero en la construcción vial, además de lo mencionado anteriormente; es que podría influir directamente en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los agregados que forman parte de la estructura de una carretera. Son muchas las fuentes de agregados pétreos que se pueden encontrar en nuestra naturaleza, sin embargo, no todas presentan las condiciones necesarias para ser tomadas en cuenta en la conformación de la estructura vial debido a su bajo desempeño en la resistencia requerida frente a las cargas de tránsito vehicular. En ensayos preliminares se tiene que la base granular de San Antonio no cumple con el ensayo a la abrasión perjudicando así su resistencia bajo cargas vehiculares, por lo que uno de los motivos de la presente disertación es verificar si al añadir escoria de acero se puede mejorar esta deficiencia.

Si bien es cierto, frente a este inconveniente se encuentra la alternativa de considerar el uso de productos químicos que aporten con la resistencia faltante, muchas veces este

procedimiento podría desembocar en una elevación de los costos al término de la construcción, además de perjudicar al medio ambiente.

La importancia de determinar el porcentaje óptimo de escoria de acero y agregados pétreos como una mezcla conjunta frente a solicitaciones de tránsito vehicular recreadas en laboratorio, radica en la posibilidad de poder incorporar al campo vial un producto estabilizante alternativo e innovador, que sea capaz de proveer un desenvolvimiento óptimo de la estructura, tomando en cuenta las desventajas del suelo granular y aportando a sus deficiencias mecánicas; y a su vez beneficiar al sector constructivo vial por el bajo costo relativo que representaría la adquisición de este residuo del acero, ya que el costo de 1 tonelada de escoria se encuentra por debajo de los 10 dólares americanos (NOVACERO, 2018).

El poder emprender esta investigación acerca del aprovechamiento de la escoria en la baja resistencia de los agregados, sería posible gracias al aporte de la empresa siderúrgica y la mina San Antonio, entidades que proveerán de la escoria y agregados respectivamente; y a su vez los ensayos serían realizados en las instalaciones del Laboratorio de la Facultad de Ingeniería, Escuela Civil.

1.2. ALCANCE

La investigación a desarrollar se encuentra direccionada hacia la determinación de la variabilidad de las propiedades mecánicas de una base granular bajo los efectos de una combinación con escoria de acero en las siguientes partes porcentuales: 5%, 15%, 25%, 35% y 40%. Para poder determinar su variabilidad se realizarán ensayos de laboratorio en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería, teniendo como principal ensayo a emplearse el del CBR. Este ensayo permitirá determinar las propiedades mecánicas de la base antes y después de ser sometida a la combinación con escoria de acero, de modo que se pueda determinar la variación en su resistencia y el porcentaje óptimo de escoria que provea las mejores condiciones. Es importante puntualizar el hecho de que ninguno de los ensayos complementarios a utilizar en donde se encuentre involucrada la escoria, serán de índole químico dirigido a determinar posibles beneficios o perdidas de sus características durante el tiempo que pudiera formar parte de la estructura del pavimento (en caso de una futura aplicación de la escoria en obra).

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La investigación a realizar consiste como aspecto central, en la identificación de los efectos que causaría la escoria de acero en una base granular a través de ensayos de laboratorio que permitan evaluar la calidad se la base antes de ser puesta en práctica, entre los cuales se podría destacar el ensayo principal: Determinación del Índice de CBR.

Como aspectos complementarios, de ser el caso favorable; se plantea la identificación del porcentaje óptimo de escoria de acero, siendo este porcentaje el que aporte con los mayores beneficios de entre un conjunto de valores que serán resultados de la realización de los ensayos de CBR en laboratorio.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Modificar las propiedades mecánicas de una base granular combinada con diversos porcentajes de escoria de acero mediante la determinación del índice de CBR. Caso de estudio mina San Antonio.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Indagar de forma minuciosa en los conceptos relacionados con el tema de estudio, de manera que la investigación permita un mejor entendimiento acerca de la conceptualización de la misma.
- Ensayar la mezcla base-escoria en cada una de las dosificaciones planteadas utilizando el método CBR.
- Determinar el porcentaje óptimo de escoria a ser utilizado en la mezcla base-escoria mediante el análisis de los resultados procedentes del ensayo CBR.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados de CBR con el objeto de establecer la variabilidad de las propiedades mecánicas de la base antes y después de ser modificada con escoria.

1.4. HIPÓTESIS

El aprovechamiento de la escoria de acero como estabilizante de la base granular analizada, otorgará a la misma un incremento en la calidad de sus propiedades mecánicas ante la acción del tránsito vehicular recreada en laboratorio mediante la aplicación del ensayo CBR.

CAPÍTULO 2 : MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se ha recopilado contenido bibliográfico acerca de las principales definiciones que forman parte del estudio realizado, entre las cuales se encuentran la escoria de acero, base granular y la estabilización de la base con este residuo siderúrgico. Se contempla el desarrollo histórico que ha sufrido la siderurgia a nivel mundial e internacional, su clasificación y características. Además, se realiza una caracterización y clasificación de la base granular según la normativa del MOP, y finalmente se relata los factores que afectan a la estabilización de la escoria de acero y su impacto medioambiental.

2.1. ESCORIA DE ACERO

2.1.1. Generalidades

2.1.1.1. Historia de la siderurgia a nivel mundial

Se conoce que hace aproximadamente 3000 años se empezó la fabricación de hierro en Asia Menor, extendiéndose por Europa y África, esto dio inicio a un nuevo comienzo histórico llamado la Edad de hierro que reemplazo a la edad de bronce y a la Edad de Piedra (Ortega, 2011).

El hierro es un material que se oxida rápidamente con el paso del tiempo o dependiendo de las condiciones climatológicas, por este motivo a lo largo de la historia no se ha podido conservar piezas antiguas que sirvan de ayuda para obtener información relevante de los primeros minerales ferrosos (Martínez, 2005).

Inicialmente los antepasados solo se tenían conocimiento del hierro, pero fue en el año 1200 A.C. que se tubo los primeros indicios de cómo convertir la superficie de hierro forjado en acero. Esto se dio ante la necesidad de elaborar instrumentos para guerra, como, por ejemplo: una vez conformada el hacha de hierro forjado, se procedía a colocarla en medio de carbón de leña triturado, dejándolo varias horas en un recipiente sumamente caliente para que el

carbono producto de la leña se fundiera con el hacha y así conformar una capa dura de acero (Martínez, 2005).

Como se ha mencionado anteriormente, los herreros de la antigüedad conformaban objetos de hierro con carbono de leña a temperaturas de alrededor de 950°C, y su conformación duraba alrededor de 9 horas con 0,5% de carbono de 1,5 mm de ancho, este proceso conocido como cementación aún se lo usa en la actualidad (Martínez, 2005).

En el año 1740, se descubrió el método crisol para la conformación de acero. Esto se dio debido a que un cirujano llamado Benjamin Huntsman impresionaba a todas las personas por la textura uniforme de sus aceros, pero el secreto de su forjado era guardado celosamente por él y sus empleados (Martínez, 2005).

En el siglo XVIII, aún se desconocía el motivo por el cual el hierro forjado y el acero eran tan distintos, pero en el año 1820 fue cuando Kersten sugirió que el contenido de carbono era la diferencia más importante. En 1831 Leibig desarrolló el primer método donde se puede determinar con precisión el contenido de carbono en el acero (Martínez, 2005).

En ese mismo siglo, ya eran conocidos los procesos de metalurgia y siderurgia, los cuales consistían en la extracción y transformación de metales a partir de diferentes minerales, y la transformación del hierro en sus distintas aleaciones, respectivamente (Habashi, 1986).

La siderurgia y metalurgia del hierro resultaron ser más complejas que otras metalurgias analizadas, por este motivo se vieron en la necesidad de emplear otros minerales no metálicos en el proceso de purificación química del hierro. Dichos minerales interactúan en el estado de purificación sufriendo una transformación, que al final constituye lo que se conoce como escoria (Ortega, 2011).

A través de estudios geográficos y arqueológicos, la escoria ha aportado con información sobre el avance que ha tenido la civilización; esto gracias a la presencia o ausencia de escorias férreas asociadas a su tipo y calidad (Ortega, 2011).

La escoria siderúrgica fue de gran ayuda para la construcción de obras civiles y militares en la Época romana, Edad Media y Edad Moderna. Desde ese entonces, se observa como la escoria ya era usada en la construcción de pavimentos, mejoramiento de suelos, cimentaciones y en lo referente a hormigones primitivos (Ortega, 2011).

La durabilidad y resistencia al paso del tiempo y condiciones climáticas, son las características con mayor relevancia que poseen las escorias férreas desde la antigüedad.

Esto dio lugar a que sea considerado uno de los elementos arqueológicos más importantes a lo largo de la historia y un producto industrial, ya que desde hace 3000 años hasta la actualidad la producción de hierro y acero ha crecido de modo exponencial (Ortega, 2011).

A mediados de siglo XIX, la producción de acero a gran escala da paso a la formación masiva de escorias de acería. Su almacenamiento era realizado en grandes masas a la intemperie, asemejándose a las escombreras producto de la minería en el mismo siglo (Ortega, 2011).

El uso de las escorias en la construcción y en otras aplicaciones se ha dado desde aquellas épocas hasta la actualidad, aumentando considerablemente su producción. Hoy en día existen distintas plantas de producción de acero y escoria en diferentes países desarrollados y no desarrollados en todo el mundo (Ortega, 2011).

2.1.1.2. Uso de la escoria a nivel mundial

Aunque la escoria es un residuo producto de la fabricación de acero, ésta puede ser utilizada en la agricultura donde se cuenta con suelos sulfato-ácidos[1]. En la industria de la construcción se han dado similares usos a nivel mundial mejorando las propiedades de explanadas, bases y sub-bases en la construcción de carreteras, así mismo, mejorando la capa de rodadura y siendo usado como aditivo en las distintas plantas de producción de cemento (Luxan, 1995).

Luxan (1995) realizó un estudio mediante el uso de espectroscopía de absorción infrarroja, donde se pudo determinar la presencia de reacción hidráulica. Posterior a este estudio se evalúo el comportamiento de la escoria como reemplazo en el cemento, determinando la retracción en morteros, la estabilidad volumétrica, índice de resistencia, resistencia mecánica y tiempo de fraguado. Finalmente se concluyó que las escorias analizadas no presentan ninguna reacción nociva, pudiendo ser empleadas en la industria de la construcción como agregado para mezclas asfálticas, agregado en bases, sub-bases y aditivo en cemento Portland en la producción de hormigón (Luxan, 1995).

En Brasil, Geyer Et (1997) analizó los factores que pueden limitar el uso de la escoria como aditivo en el cemento donde se realizaron ensayos como la determinación de la resistencia a la compresión, ensayos de expansión y carbonatación.

[1] Suelos sulfato-ácidos: Son aquellos suelos que contienen una gran cantidad de substratos orgánicos y minerales de sulfuro de hierro, que se han formado en condiciones de humedad (Sammut, White, & Melville, 1996)

Para el ensayo de expansión se reemplazó un 35% de escoria en lugar de cemento, obteniendo como resultado una expansión nula. Sin embargo, en el ensayo de carbonatación con un porcentaje del 70% de escoria se obtuvieron resultados no confiables, en lo que se refiere a las propiedades físicas del hormigón, pero se pudo observar que el hormigón con un adecuado porcentaje de escoria presenta densidades más elevada y resistencia a la compresión y flexo-compresión muy parecida a la del hormigón, concluyendo que el uso de escorias de acero se puede usar como reemplazo de los agregados del hormigón patrón (Geyer, 1997).

En Suecia, Bäverman Et (1996), realizó una investigación donde el agregado fino del hormigón fue sustituido por escoria con la misma granulometría, realizando ensayos de resistencia a la compresión y flexo-tracción, obteniendo resultados favorables.

Losáñez (2007), investigó el aprovechamiento integral de las escorias de acería en obras civiles. En esta investigación se planteó que la escoria blanca tras pasar un proceso de enfriamiento de 6 a 10 semanas a la intemperie, pierde completamente su expansibilidad potencial y se convierte en un material pulverulento con un comportamiento estable beneficioso para la industria de la construcción.

Pérez en Centroamérica año 2008, realizó un estudio donde caracterizó a la escoria de acero como agregado normal. Este estudio se realizó mediante la evaluación de mezclas asfálticas con distintos porcentajes de escoria. Pérez realizó un reemplazo del 100% de escoria para referencia de comparación, donde pudo obtener conclusiones favorables como las que se muestran a continuación:

- Las mezclas con agregado normal o tradicional, presentan menos estabilidad que las mezclas con escoria. Esto ayuda a la durabilidad de la mezcla asfáltica, haciéndola más resistente a la deformación del pavimento debido al tráfico.
- La combinación de escoria con un agregado normal, logra compensar el bajo porcentaje de finos que presenta la escoria y de esta forma se disminuye el porcentaje de asfalto en la mezcla.

2.1.1.3. Historia de la siderurgia a nivel nacional

En Ecuador, la actividad siderúrgica comenzó en el año 1964 con la adquisición de trenes de procedencia italiana. A demás, los especialistas con conocimiento de la producción de siderurgia que existían en aquella época eran de origen extranjero (Villavicencio, 2014).

En ese entonces no existía ninguna normativa que controlara la producción de acero a nivel nacional, por este motivo se utilizaban referencias extranjeras como la ASTM. La actividad siderúrgica da inicio al desarrollo de la actividad económica en el país, y genera una estrecha relación con los proyectos fomentados por el gobierno en el impulso de la construcción y en el desarrollo de la infraestructura del estado (Villavicencio, 2014).

Desde la primera producción de acero se dio una gran demanda y aceptación por parte de los clientes, generando la inversión de empresarios en la fabricación de varillas de acero para el refuerzo del hormigón armado, motivando a que los especialistas y productores del mismo elaboren una normativa nacional (Villavicencio, 2014).

Hasta mediados del año 2000 la producción de varillas utilizadas para el refuerzo del hormigón armado, eran fabricadas con un grado de acero extra duro, es decir con un contenido de carbono mayor a 0.40%. Las normas ASTM 615 y NTE INEN 102 eran tomadas como referencia en la validación de resultados, obteniendo así una varilla con enfriamiento natural y mayor resistencia (Villavicencio, 2014).

En el mismo año llega al país un innovador proceso de fabricación de varillas de acero, con el cual se logró modificar el grado de acero en las varillas de refuerzo y por ende las propiedades mecánicas de la misma. Esto generó la necesidad de establecer una nueva normativa nacional con especificaciones distintas a la ASTM 615 y NTE INEN 102. Este documento se basó en la normativa extranjera ASTM 706 y fue denominado NTE INEN 2167 (Villavicencio, 2014).

La norma NTE INEN 2167 ha sido sometida a varias revisiones, debido al mejoramiento en la calidad del productor y el aumento de la necesidad de producción de acero en la industria de la construcción (Villavicencio, 2014).

El gobierno y la industria responsable de la siderurgia ecuatoriana han puesto especial interés en la conservación del medio ambiente. Tanto es su compromiso, que existe un convenio con el Ministerio de Producción e Industrias para el reciclado de chatarra. De esta manera, se ha impulsado el Plan Renova destinado a la renovación del sector automotor del transporte público del Ecuador (Villavicencio, 2014).

La industria siderúrgica en el país y la producción de escoria se encuentra constantemente en desarrollo y mejoramiento en los procesos de fabricación, consecuentemente en los

últimos años se han adquirido equipos con nueva tecnología y capacitación del personal productor dentro y fuera del país (Villavicencio, 2014).

Hasta el año 2014, Ecuador necesitaba producir anualmente aproximadamente 550.000 toneladas métricas de acero para satisfacer su demanda en el sector de la construcción, en donde los principales productores eran: TALME, NOVACERO, ANDEC y ADELCA (Villavicencio, 2014).

2.1.1.4. Uso de la escoria a nivel nacional

En la actualidad, en el Ecuador no existe gran investigación acerca de los beneficios que se puede obtener del uso de la escoria de acero en la construcción. Sin embargo, ya se ha dado indicios del empleo de escorias en el mejoramiento de hormigones, mezclas asfálticas y mejoramiento de suelos.

Se estima que la fabricación de acero en el Ecuador genera aproximadamente 2.400 toneladas de residuos ferrosos y escoria, esto equivale a un 8% de la producción total de acero. La escoria es triturada y tamizada para posteriormente ser vendida a las principales empresas cementeras del Ecuador, siendo destinadas como componente puzolámico en la elaboración de cemento (Albuja, 2014).

El porcentaje que sobra de escoria se acumula hasta que las industrias que producen cemento las requieran. De no ser así, la escoria de acero es depositada y almacenada en rellenos sanitarios según lo establezca el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente (TULAS), y así es como las siderúrgicas evitan la pérdida de espacio en sus instalaciones por la acumulación excesiva del material (Albuja, 2014).

Es por ello que las empresas siderúrgicas del Ecuador requieren del aporte de investigación que innove el uso de la escoria de acero como un material reciclado, motivo por el cual el presente trabajo busca aportar en el estudio técnico y científico de la aplicación de la escoria siderúrgica en la industria de la construcción de obras civiles

2.1.2. Definiciones

Según la norma UNE36-004, el acero es un material cuyo principal componente es el hierro y su contenido de carbono comúnmente es inferior al 2%.

La escoria es una parte de la producción de la industria de acero conformada principalmente por elementos como: calcio, hierro y silicato de magnesio. Es un elemento producto de los procesos de formación de los metales resultado de las reacciones químicas (Ortega, 2011).

2.1.3. Clasificación de la escoria de acero

La clasificación de la escoria viene dada según el proceso de obtención del hierro y acero. A continuación, se describen las características más importantes de cada uno de estos procesos. La descripción tiene como fin un mejor entendimiento sobre la elaboración de escoria de acero (Ortega, 2011).

2.1.3.1. *Escoria de alto horno BF.*

Este método fue desarrollado por primera vez en Bélgica a mediados del siglo XIV. Este sistema ha evolucionado la obtención del hierro, debido a que se ha dado la necesidad de aplicar procesos técnicos para la producción desde ese entonces hasta la actualidad, y de esta forma se ha logrado aumentar la eficacia y rendimiento del proceso (Ortega, 2011).

La escoria de alto horno tiene una composición mineralógica uniforme conformada principalmente por silicatos cálcicos, y dependiendo de la temperatura de enfriamiento se han podido obtener tres tipos de escorias siderúrgicas (Bonnot, 1980).

- Escoria Granulada: Este tipo de escoria se enfría a gran velocidad con el uso de agua, y es empleada como aditivo para la fabricación de cemento Portland.
- Escoria foamy: Esta escoria es enfriada lentamente con pequeñas cantidades de agua. Es usada como material base para plataformas en la construcción de carreteras.
- Escoria cristalina: Esta escoria tiene una estructura cristalizada y es enfriada al contacto con el aire. Es usada como material para bases y subbases de plataformas en la construcción de carreteras.

2.1.3.2. *Escoria de convertidor de oxigeno BOF.*

Esta técnica permite la producción de 80 a 120 kg de escoria por cada tonelada de acero. Los diferentes tipos de tecnología empleados en la fabricación de esta escoria no influyen en la cantidad de escoria producida, pero si pueden afectar en la composición mineralógica de este tipo de escoria (Formoso, 1996).

Este tipo de escoria se la puede usar para mejorar y corregir suelos agrícolas, en la elaboración de pavimentos de carreras en especial en las capas de rodadura ya que proporciona una resistencia al desgaste y densidad elevada (Formoso, 1996).

Para la utilización de este tipo de escoria es necesario tomar una serie de precauciones, ya que según ensayos realizados tiene un comportamiento expansivo por la presencia de cal (CaO) y magnesia (MgO) (Formoso, 1996).

2.1.3.3. *Escoria de horno de arco eléctrico EAF.*

Esta escoria es producto de un acero de alta aleación, en donde su principal componente es el silicato de calcio y cromo, por lo que se limita la aplicación de esta escoria en especial en la utilización para mejoramiento de suelos agrícolas (Ortega, 2011).

La escoria de horno de arco eléctrico se puede clasificar en escorias blancas y escorias negras, cuyas características se describen a continuación:

Escoria de horno de arco eléctrico blanca

Las escorias blancas presentan un color blanquecino cenizo y tienen un aspecto pulverulento, ya que tienen inclusiones pequeñas de acero color metálico de un tamaño milimétrico. Este tipo de escoria se usa para sustitución de cal en el cemento, debido a que poseen características de hidratación y carbonatación. (Ortega, 2011).

La escoria blanca está conformada por una alta cantidad de finos, producto del proceso de pulverización del silicato bicálcico que resulta del enfriamiento de la escoria (Ortega, 2011).

Los elementos que conforman esta escoria son: el sílice, aluminio, cal y magnesita[2]; entre las cuales también aparecen concentraciones de hierro, magnesio, titanio, fosforo, níquel, cobre, zinc, mercurio y plomo. Algunos de los elementos mencionados anteriormente son perjudícales para la misma por su naturaleza contaminante (Ortega, 2011).

Escoria de horno de arco eléctrico negra

Esta escoria se analizará en el presente trabajo. De manera general, se puede decir que presenta una gran fluidez y por la elevada temperatura a la que es sometida se da un incremento en la viscosidad y en su solidificación, logrando así la formación de masas de escoria fina. La escoria negra enfriada al aire presenta un color grisalino mientras que la escoria enfriada con agua presenta un color mucho más claro (López, 2002).

[2] Magnesita: Mineral compuesto químicamente por carbonato de magnesio e impurezas de hierro, calcio, cobre y níquel (Ortega, 2011).

La escoria negra es producto de la primera etapa del proceso de formación de escoria y está conformada por óxido de hierro, aluminio, calcio y silicio. Esta escoria genera un volumen mayor que la escoria blanca. (López, 2002).

También podemos decir que la escoria negra es un conjunto de aleaciones ferrosas producto de la fundición de chatarra para la producción de acero. Entre las aleaciones más importantes tenemos: trióxido de titanio y hierro ($FeTiO_3$), óxido de magnesio (MgO), trióxido de carbono, trióxido de magnesio ($MgCO_3$) y óxido de hierro (FeO) (Cuásquer y Altamirano, 2015).

2.1.4. Características de la escoria de acero

La escoria utilizada en el presente trabajo es la de la escoria negra de alto horno eléctrico. A continuación, se describen las características físicas, químicas y mineralógicas que presenta este material.

Dentro de las características físicas más importantes de la escoria se puede destacar la forma, la textura y el color.

La forma de la escoria influye directamente en su comportamiento cuando ésta ha sido mezclada con la base granular, ya que esta característica relaciona la trabajabilidad[3] y resistencia. Las formas muy alargadas o escamosas pueden afectar a la trabajabilidad de la misma, mientras que las formas angulares y redondeadas pueden ser beneficiosas, gracias al mejor grado de acomodo de las partículas (Nicolalde, 2008).

La escoria de acero negra presenta una textura artificial, la misma que es obtenida por procesos llevados a cabo por el hombre mediante la manipulación de su forma natural, una vez que ésta es conducida a los depósitos. La textura tiene gran influencia en el comportamiento de la escoria gracias al alto grado de adherencia que proporciona (Nicolalde, 2008).

Estudios realizados en las escorias negras de acero para uso como árido siderúrgico, han podido determinar que el contenido de óxido de calcio (CaO) es mucho mayor en relación al contenido de óxido de magnesio (MgO) que presenta la escoria, motivo por el cual puede presentar expansión y ser perjudicial para su uso (Nicolalde, 2008).

[3] Trabajabilidad: Facilidad para manipular los agregados (Cabanillas , 2015).

2.1.5. Planta siderúrgica proveedora de la escoria de acero en análisis

2.1.3.1. Ubicación

La planta productora de acero "Lasso" se encuentra ubicada en la ciudad de la Latacunga, panamericana Norte, Km 15. Esta planta es una de las tantas plantas productoras de acero que posee la empresa NOVACERO a lo largo del territorio nacional.

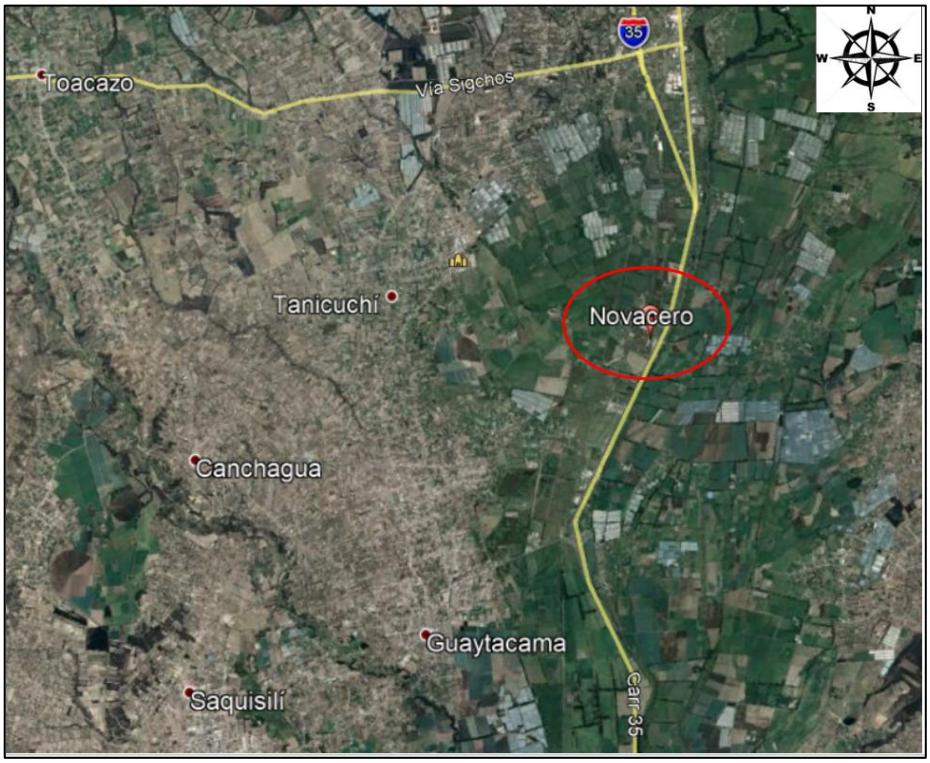


Gráfico 2.1: Ubicación geográfica de la Empresa Siderúrgica

Fuente: (GOOGLE EARTH, 2018)

2.1.3.2. Descripción de la planta

La empresa siderúrgica NOVACERO fue fundada en julio del año 1973. Se inició como parte del grupo multinacional ARMCO enfocado en la fabricación de productos viales. Debido a su gran acogida, en 1983 se inaugura la planta siderúrgica Lasso. Esta planta surgió dedicada a la producción y laminación de productos en caliente y frio (NOVACERO, 2018).

En el año 2005, se experimenta una elevada demanda en la elaboración de laminados en caliente, lo cual coloca a la varilla para refuerzo en el portafolio de productos. En el mismo año se adquiere un moderno tren de laminación que permitió el crecimiento en el negocio y mayor apertura en el mercado (NOVACERO, 2018).

En el año 2009, la producción de acería (y a su vez de escoria) se incrementó gracias a la instalación de un horno eléctrico de 50 toneladas; mejorando así la calidad y competitividad en el mercado (NOVACERO, 2018).

2.1.3.3. Proceso de obtención de la escoria de acero

El proceso de obtención de las escorias de acero en análisis, por el método de horno de arco eléctrico, se describe a continuación:

1. Elección de la chatarra ferrosa: Los recicladores recolectan el material en industrias, botaderos, talleres, entre otros; para ser entregado a los distintos centros de recolección y acopio. Con ayuda de maquinaria, la chatarra es clasificada, compactada y triturada con el objetivo de disminuir su volumen. Finalmente, el material sometido toma la forma de viruta[4] y está listo para dar inicio al proceso de fusión y formación del acero en el horno de arco eléctrico a temperaturas de aproximadamente 1930° (Huerta, Maldonado y Espinosa, 2014).
2. Fundición de la chatarra ferrosa: La chatarra logra ser fundida mediante la inserción de oxígeno a temperaturas de 1580 a 1620°C. Este proceso tarda entre 25 y 30 minutos, lo que da como resultado aproximadamente 16 cargas de chatarra en el día (Huerta, Maldonado y Espinosa, 2014).
3. Obtención de la escoria de acero: Aparece como una especie de película viscosa sobre la superficie de la mezcla fundida, al encontrarse ésta en su punto de ebullición. Finalmente, esta capa de escoria es separada del acero líquido mediante un proceso mecánico para posteriormente ser enfriada al aire libre, pasando así la escoria de estado fluido a una forma cristalizada y solidificada (Huerta, Maldonado y Espinosa, 2014).
4. Colado del acero líquido: El acero líquido que queda en la olla es llevado a un termo en donde cae y se empieza el proceso de colado del mismo, es decir, que el acero líquido empieza otro proceso en el que se realiza el afinamiento (Huerta, Maldonado y Espinosa, 2014).

[4] Viruta: Material en forma de lámina resultante de procesos de cortado de chatarra (Domínguez, 1985).

2.2.BASE GRANULAR

2.2.1. Generalidades

2.2.1.1. Explotación minera en Ecuador

En Ecuador, se conoce que la explotación de fuentes minerales comenzó desde la época incásica. Mediante la presencia de centros ceremoniales estructurados en forma de pirámides conformadas principalmente por tierra, se ha podido evidenciar la puesta en práctica de la extracción de recursos naturales para la construcción (Albornoz, 2008).

La explotación de agregados pétreos se encuentra íntimamente ligada con el desarrollo económico del país. Este material forma parte de la materia prima utilizada en la construcción de infraestructura y servicios básicos, mejorando así la calidad de vida de los ciudadanos (Jiménez, 2012).

Pichincha es una de las provincias que se ven beneficiadas por la explotación de materiales pétreos, siendo éstas sus principales canteras: Pomasqui, Pifo, Pintag, San Antonio y Caspigasí. Los materiales pétreos extraídos con mayor abundancia de estas canteras son: lastre, ripio, arena, piedra y arcilla usada en la fabricación de ladrillos. (Jiménez, 2012).

En el año 2009, el pleno de la comisión legislativa y de fiscalización en ejercicio de sus facultades expidió la Ley de Minería en el Ecuador. Esta ley a través del artículo 142 en conformidad con el artículo 264 de la Constitución, entrega la competencia de regularización, autorización y control de la explotación de materiales áridos y pétreos a los gobiernos municipales (Consejo Metropolitano de Quito, 2014)

2.2.1.2. Tipo de explotación minera en Ecuador

La formación geográfica ecuatoriana da lugar a tres tipos de explotación minera, los cuales se explican a continuación:

- Minería Subterránea: Este tipo de explotación minera genera en un determinado yacimiento problemas de acumulación de polvo, gases nocivos para la salud y peligro de derrumbe de la mina, lo cual demanda un control constante de seguridad. El proceso de explotación a utilizar viene dado por el tipo de roca. En roca blanda es posible extraer los minerales con materiales y maquinaria moderna; mientras que en roca dura el uso de material explosivo facilita la extracción de material pétreo (Amstrong, 2012).

- Explotación a cielo abierto: Este tipo de minas tiene la forma de terrazas. Tiene una forma cilíndrica desde el risco hasta el suelo y generalmente empieza como una explotación superficial hasta el punto en el cual se produce una excesiva acumulación de material. A partir de este instante, este método es reemplazado por métodos de extracción subterránea (Amstrong, 2012).
- Explotación por canteras: Este tipo de explotación es muy similar a la explotación de cielo abierto, con la diferencia que éste se emplea para la extracción de materiales utilizados en la construcción y por este motivo existe menos acumulación de material para desecho. Su ubicación requiere de lugares estratégicos donde facilite el transporte del material extraído y de los trabajadores (Amstrong, 2012).

2.2.1.3. Ubicación y descripción de la cantera.

La concesión minera Tanlahua es la proveedora del material analizado en el presente trabajo. El área minera se encuentra ubicada en la ciudad de Quito, sector San Antonio. Para tener acceso a esta área minera es necesario ingresar a la vía Quito – Sector San Antonio, para de allí acceder a la vía Tanlahua.

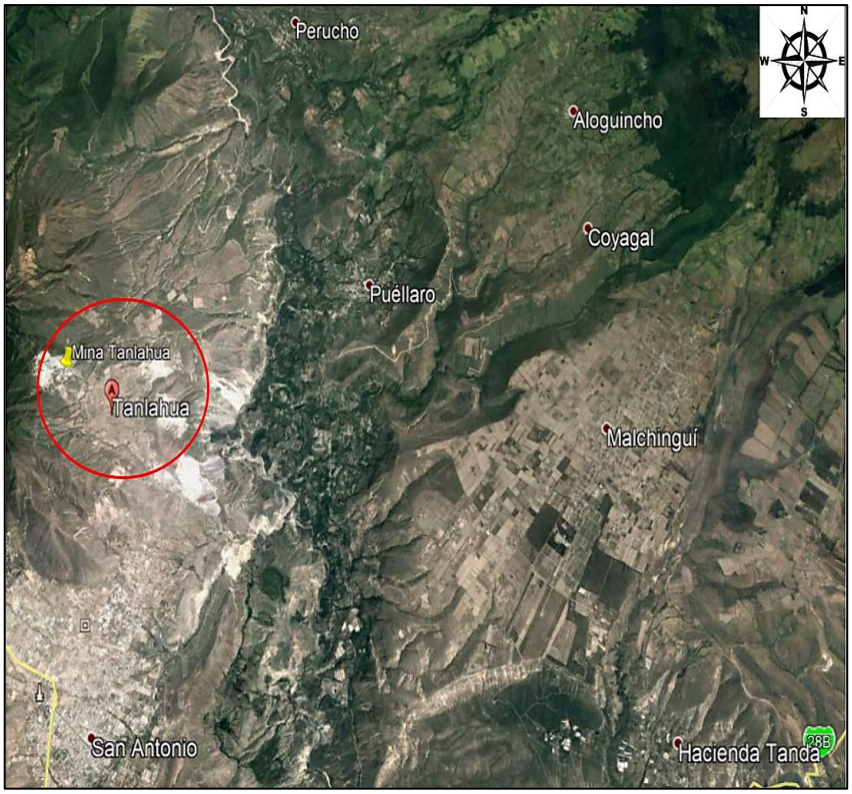


Gráfico 2.2: Ubicación geográfica de la cantera proveedora de la base granular

Fuente: (GOOGLE EARTH, 2018)

2.2.2. Definiciones

El agregado utilizado para base es un material con forma granular de origen pétreo. Está conformado por rocas y minerales, los cuales son sustancias sólidas naturales que muestran una estructura interna ordenada. Este tipo de material atraviesa procesos de erosión e intemperismo, y puede producir partículas de piedra, grava, arena, limos o arcillas. (PCA, 2004).

Una base se puede definir como la capa que forma parte de la estructura de un pavimento asfáltico. Por su proximidad a la superficie, requiere de gran resistencia a la deformación para soportar altas presiones. Está constituida por diferentes materiales granulares que pueden ser procesados o conformados eventualmente con materiales marginales (MOP, 2002).

2.2.3. Características de la base granular de la cantera.

El material procedente del área minera Tanlahua es empleado para la construcción de obras civiles. El sistema de explotación usado es a cielo abierto, ya que es el método más adecuado para este tipo de depósitos por las facilidades que presenta el diseño de una extracción efectiva que permita el aprovechamiento de volúmenes considerables (aproximadamente 180 m^3/día) (Palacios, 2014).

Palacios (2014), determinó que la base granular extraída de la mina Tanlahua tiene origen ígneo[5] y sedimentario. La mina Tanlahua corresponde al área del volcán Pululahua donde existen rocas y material de diferentes edades y características, de origen ígneo lo cual resulta favorable para la explotación minera de la zona. El material de origen sedimentario proviene de terrazas pluviales producidas por el rio Guayllabamba ubicado en la ciudad de Quito.

2.2.4. Clasificación de bases granulares

El Ministerio de transporte y Obras Públicas en su manual "Especificaciones Generales para la Construcción de caminos y Puentes", realiza una clasificación de bases granulares de la siguiente manera:

2.2.4.1. *Base clase I*: Es un tipo de base conformada por agregados finos y gruesos, que son triturados en un 100% y deberán ser graduados

[5] Material ígneo: Es todo aquel material que se ha formado por la solidificación del magma (SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO, 2017)

uniformemente dentro de los límites granulométricos descritos en la siguiente tabla:

Tabla 2.1: Porcentajes granulométricos para base Clase I

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	
	Tipo A	Tipo B
2" (50.8 mm)	100	--
11/2" (38.1 mm)	70 - 100	100
1" (25.4 mm)	55 - 85	70 - 100
3/4" (19.0 mm)	50 - 80	60 - 90
3/8" (9.5 mm)	35 - 60	45 - 75
N°4 (4.76 mm)	25 - 50	30 - 60
N°10 (2.00 mm)	20 - 40	20 - 50
N°40 (0.425 mm)	10 - 25	10 - 25
N°200 (0.075 mm)	2 - 12	2 - 12

Fuente: (MOP, 2002)

2.2.4.2. *Base clase II*: Este tipo de base está conformada por fragmentos de roca o grava, los cuales deben ser triturado por lo menos un 50% del peso total del material y deberán ser graduadas uniformemente dentro de los límites que presenta la siguiente tabla:

Tabla 2.2: Porcentajes granulométricos para base Clase II

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada
1" (25.4 mm)	100
3/4" (19.0 mm)	70 – 100
3/8" (9.5 mm)	50 – 80
N°4 (4.76 mm)	35 – 65
N°10 (2.00 mm)	25 – 50
N°40 (0.425 mm)	15 – 30
N°200 (0.075 mm)	3 – 15

Fuente: (MOP, 2002)

2.2.4.3. Base clase III: Esta base está conformada por gravas trituradas y fragmentos de rocas que deberán ser triturados por lo menos en un 25%

del peso total, este tipo de base debe ser graduada uniformemente y debe cumplir los requisitos de la siguiente tabla:

Tabla 2.3: Porcentajes granulométricos para base Clase III

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada
3/4" (19.0 mm)	100
N°4 (4.76 mm)	45 - 80
N°10 (2.00 mm)	30 - 60
N°40 (0.425 mm)	20 - 35
N°200 (0.075 mm)	3 - 15

Fuente: (MOP, 2002)

2.2.4.4. *Base clase IV*: Esta base se encuentra constituida por agregados de origen de cribado y trituración de piedras fragmentadas de forma natural y deben cumplir con los requisitos que presenta la siguiente tabla:

Tabla 2.4: Porcentajes granulométricos para base Clase IV

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada
2" (50.8 mm)	100
1" (25.4 mm)	60 - 90
N°4 (4.76 mm)	20 - 50
N°200 (0.075 mm)	0 - 15

Fuente: (MOP, 2002)

2.3. ESTABILIZACIÓN DE BASE GRANULAR CON ESCORIA DE ACERO

2.3.1. Generalidades

Estudios realizados en diferentes países del mundo como es el caso de Estados Unidos, Bélgica, Japón, Alemania, entre otros; han logrado demostrar que la correcta selección de escoria de acero puede usarse para mejoramiento de bases granulares en la construcción de caminos o carreteras (Feldman, 1981).

La escoria de acero es utilizada como un agregado convencional en diferentes partes del mundo, y según investigaciones antes mencionadas se ha podido demostrar que la escoria

excede los requisitos mínimos de resistencia para ser usada como base granular (Collins, 1994).

La capacidad de carga que presenta la escoria de acero es una de las ventajas que puede ser usada para aplicaciones de tráfico pesado, debido a que su forma, ángulo de fricción y granulometría producen una adecuada transferencia de carga hacia los agregados menos resistentes (Collins, 1994).

Para que la escoria de acero tenga un efecto favorable al ser mezclada con base granular, se requiere de un control de calidad durante su producción para evitar que fragmentos no deseados (producto del proceso que conlleva la fabricación de la misma) sean incluidos como parte del agregado de escoria y resulte perjudicial para las propiedades que debe presentar la base granular (Kneller y Gupta, 1994).

2.3.2. Factores que afectan a la estabilidad de la escoria de acero

La estabilidad de la escoria al ser mezclada con base granular, se ve afectada por varios factores de características físicas y químicas. El tamaño de la partícula y su granulometría son características físicas que estarían relacionadas con su inestabilidad. Por otra parte, las características químicas asociadas a este fenómeno son los módulos de cal y magnesia libre, debido a que el volumen de la escoria aumenta cuando ésta es hidratada (Feldman, 1981).

Según Feldman (1981), una mejor interpretación acerca de la inestabilidad volumétrica que presenta la escoria, requiere del análisis de cada una de sus posibles causas para conocer el grado de afección producido, y considerar si este producto es conveniente para su uso en la construcción de obras civiles o su mezcla con base granular. Según estudios realizados, los factores que pueden afectar la estabilidad y funcionamiento de la escoria son los siguientes:

2.3.3.1. *La hidratación de la cal libre*.

La producción de acero de alta calidad, demanda la utilización de grandes cantidades de cal. Como consecuencia de esto, la escoria tiene una importante concentración de Oxido de Calcio (CaO). La cal puede tener un efecto de meteorización cuando se encuentra en contacto con el agua de lluvia o por humedad propia del ambiente, en grado tal que puede incrementar el volumen de la escoria, produciendo un hinchamiento y afectando las propiedades de la misma (Bakker, 1988).

2.3.3.2. La hidratación de la magnesia libre.

La magnesia libre que posee la escoria de acero puede presentarse en varias formas y estados, entre estos tenemos: Magnesia libre no combinada (MgO) libre cristalizada, magnesia (MgO) presente en la composición mineralógica con más de un 70% de contenido en su composición total y magnesia químicamente no presente en la fase vítrea de la escoria (Losañez, 2007).

La hidratación de óxido de magnesio (MgO) se produce de manera similar que el óxido de cal, pero mucho más lento. La hidratación del óxido de magnesio provoca un hinchamiento que afecta la estabilidad de la escoria, por lo que es necesario limitar su concentración (Losañez, 2007).

2.3.3.3. Transformación del silicato bicálcico.

Cuando la escoria se enfría, ésta produce un cambio mineralógico en su composición debido al contacto con el medio ambiente. Por ejemplo, la transformación que sufren los silicatos bicálcicos (C_2S) generan un incremento en el volumen de la escoria de un 10 a 12%. Este proceso provoca la generación de bloques de escoria completamente cuarteados y divididos por tamaños (Jahrbuch, 1998).

Cabe recalcar que esta transformación no afecta por igual a todas escorias, ya que en ciertas ocasiones puede producirse una acumulación mayor de silicato bicálcico, lo cual afectaría su estabilidad de manera desigual (Drissen, 2000).

2.3.3. Factores que afectan al medio ambiente

2.3.3.1. Lixiviación

Se conoce como lixiviación al proceso en el cual contaminantes orgánicos e inorgánicos se liberan total o parcialmente desde que se encuentran en una fase sólida hasta una fase acuosa, producto de la disolución de los minerales que afectan esencialmente al PH del agua. Este proceso es común para todo material que se encuentra en contacto con el agua, ya que dependiendo de la porosidad del material los componentes del mismo se desprenden desde su superficie hasta llegar a su interior (Otegi, 2012).

La escoria de acero tiene componentes tóxicos solubles que al estar en contacto con el agua lluvia, aguas superficiales o subterráneas provocan lixiviación con una concentración

elevada de componentes tóxicos que ocasionan una amenaza potencial para el medio ambiente (Hidalgo y Alonso, 2005).

Por este motivo, se da la necesidad de escoger un porcentaje de escoria equilibrado, es decir, que no provoque una lixiviación excesiva que afecte al medio ambiente y que contribuya al mismo tiempo con un mejoramiento en las propiedades de la base granular.

CAPÍTULO 3 : ENSAYOS Y CÁLCULOS DE LABORATORIO

Este capítulo contiene datos y resultados de los ensayos que se han realizado en la base granular, escoria de acero y en la mezcla base/escoria. Los ensayos están relacionados, en primera estancia, con la caracterización de la base granular y escoria; entre los cuales se pueden mencionar los siguientes: granulometría, abrasión, desgaste a los sulfatos, gravedad específica y equivalente de arena. Posterior a esto y con el afán de poder determinar las propiedades mecánicas de la base granular, escoria y mezcla base/ escoria; se han realizado los ensayos Proctor y CBR. Finalmente se ha elaborado un análisis económico y ambiental con el objetivo de poder determinar el porcentaje adecuado de escoria a ser mezclado con la base granular.

3.1. ENSAYOS EN LA BASE GRANULAR

3.1.1. Granulometría

La pila de material de la cual han sido extraídas las muestras se compone de áridos con diferente tamaño de partícula, en grado que se requiere de un análisis granulométrico para poder establecer la composición porcentual de los distintos tamaños de grano existentes en las muestras receptadas.

La granulometría es un proceso mediante el cual se pretende determinar las proporciones relativas de las múltiples dimensiones que poseen los áridos pertenecientes a un determinado suelo (BOWLES, 1981).

Al contar con una infinidad de tamaños de grano en una misma muestra la normativa dictamina fraccionar el material en rangos de tamaño con la ayuda de tamices debidamente normados. Esto se lleva a cabo mediante la obtención de la cantidad de material que atraviesa por las aberturas de un tamiz y que a su vez es retenido por otro de dimensiones ligeramente

menores al anterior con el objetivo de relacionar dicha cantidad con el total de la muestra ensayada en una serie de tamices. El obtener resultados fiables depende de varios factores, entre ellos se resalta la efectividad con la cual se proceda al realizar el muestreo de los áridos in situ. (NTE INEN 0696, 2011).

Las fórmulas utilizadas en el análisis granulométrico son las que se muestran a continuación:

$$Porcentaje\ retenido\ en\ cada\ tamiz = \frac{Peso\ retenido\ en\ cada\ tamiz}{Peso\ de\ la\ muestra} \qquad Ecuación\ 3.1$$

El porcentaje retenido en cada tamiz es un dato con el cual se determina el porcentaje acumulado que pasa por cada uno de éstos comenzando desde la totalidad del material, es decir desde el 100%. Entonces, el porcentaje acumulado se calcula de la siguiente manera: (BOWLES)

$$Porcentaje\ que\ pasa\ (acumulado) = 100 - Porcentaje\ retenido\ en\ cada\ tamiz \qquad Ecuación\ 3.2$$

3.1.1.1. Cálculos

Agregado grueso

Mo=Masa inicial de la muestra (kg)
Mo= 26,05 kg

Tabla 3.1: Granulometría del agregado grueso. Base granular

MALLA N°	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL (Kg)	MASA RETENIDA ACUMULADA (Kg)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
2 "	51	0,00	0,00	0,00%	100%
1 1/2 "	38,1	0,33	0,33	1,26%	98,74%
1 "	25,4	3,11	3,44	12,05%	87,95%
3/4 "	19	3,19	6,63	12,36%	87,64%
1/2 "	12,7	5,38	12,01	20,85%	79,15%
3/8 "	9,51	3,59	15,60	13,91%	86,09%
4	4,78	5,13	20,73	19,88%	80,12%
PASA N°4		5,08	25,81	19,69%	80,31%
SUMA		25,81		100,00%	

Agregado fino

Mo=Masa inicial de la muestra (gr)
Mo= 577,77 gr

Tabla 3.2: Granulometría del agregado fino. Base granular

MALLA N°	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL (gr)	MASA RETENIDA ACUMULADA (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
8	2,36	0,00	0,00	0,00%	100%
10	2,00	203,60	203,60	35,24%	64,76%
40	0,42	241,10	444,70	41,73%	58,27%
200	0,074	133,00	577,70	23,02%	76,98%
BANDEJA		0,10		0,02%	99,98%
SUMA		577,80		100,00%	

3.1.1.2. Análisis de resultados

Luego de haber determinado la granulometría de la base analizada, se ha comparado los resultados obtenidos con los valores especificados en el MOP (2002), los mismos que se pueden evidenciar en las tablas 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 del presente trabajo. Se ha podido observar que la base proveniente de la mina Tanlahua ubicada en San Antonio de Quito no cumple dichas especificaciones granulométricas para ser considerada como base.

3.1.2. Abrasión

La firmeza que puede ofrecer un pavimento ante la abrasión y desgaste que provoca el tránsito vehicular, depende en gran medida de la resistencia a la degradación que posean los áridos.

Dicha resistencia no solamente se encuentra afectada cuando la estructura está en funcionamiento, sino desde el momento en que el material abandona su sitio de acopio. Por ejemplo, golpes por la colocación del material en la planta asfáltica, impacto que causa un rodillo vibrador al momento de la compactación, cargas de tráfico, entre otros. Son variables que inciden negativamente en las características originales de los agregados ya que originan en éstos acciones tales como: la abrasión, aplastamiento, degradación, desintegración, entre otras.

La granulometría es una de las primeras características en ser afectada. La fractura de los agregados ocasiona un aumento considerable en la cantidad de partículas de árido fino. Con una masa diferente de áridos gruesos y mayor masa de áridos finos con respecto al análisis granulométrico inicial, la graduación de las partículas pasa a ser totalmente diferente y consecuentemente causará un comportamiento de la estructura distinto al previsto en el diseño.

Ante esta situación se encuentra disponible un método a través del cual es posible determinar la resistencia a la abrasión que poseen los agregados. Esta resistencia es determinada a través del uso de la denominada Máquina de los Ángeles.

Este procedimiento tiene como objetivo calcular el deterioro sufrido por el agregado con una granulometría dada. El porcentaje de material degradado es un indicador de la calidad que poseen los agregados. Una muestra que sufre un desgaste notable en este ensayo difícilmente podrá conservar su granulometría original (NTE INEN 0860, 2011).

La norma ecuatoriana NTE INEN 0860 denominada "Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles" tiene como objetivo determinar la reducción de masa de los agregados que han sido gradados previamente de manera normalizada. Reducción de masa que ha sido provocada por el desgaste del material, a causa del impacto recibido por un número de esferas de acero que se encuentran dentro de un tambor giratorio.

El porcentaje de desgaste que posee el material es calculado en base a la diferencia existente entre la masa inicial con la cual se comenzó el ensayo y la masa retenida sobre el tamiz en estado seco luego de haber sido retirado de la máquina de los ángeles.

La norma plantea la siguiente ecuación para el cálculo del valor de la degradación expresada en porcentaje.

$$D = \frac{B - C}{B} \times 100$$

Donde:

D = Porcentaje de abrasión del material [%] *Ecuación 3.3*

B = Masa inicial de la muestra antes del ensayo

C = Masa de la muestra retenida sobre el tamiz No 12

El porcentaje de abrasión calculado del material es comparado con la normativa para su aprobación de acuerdo al uso que corresponda.

3.1.2.1. Cálculos

Tabla 3.3: Masa de las fracciones antes del ensayo de Abrasión

NÚMERO DEL TAMIZ		MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO (gr)
PASA	RETIENE	
1 1/2"	1"	1246,8
1"	3/4"	1253,5
3/4"	1/2"	1245,1
3/8"	1/4"	1246,1
TOTAL (B)		4991,5

B=	4991,5	gr
C=	2183,3	gr
D=	56	%

3.1.2.2. Análisis de resultados

Luego de haber determinado el porcentaje de abrasión de la base granular analizada, se ha comparado éste valor con el especificado en el capítulo VIII del MOP (2002). Se ha podido observar que la base proveniente de la mina Tanlahua ubicada en San Antonio de Quito no cumple dicha especificación de desgaste, ya que presenta un valor del 56% lo cual es mayor al 40% permitido por la normativa.

3.1.3. Desgaste a los sulfatos

El sulfato es un elemento que forma parte de todas las aguas subterráneas, pero con mayor abundancia en aquellas que están en contacto con suelos arcillosos. Los tipos de sulfatos más representativos son: sulfato de sodio, calcio y magnesio. Este elemento cuando entra en contacto con los áridos refleja en su superficie un aspecto blanquecino tipo costra. El sulfato puede llegar a ocasionar, según el tipo de material, quebrantamiento y disminución de su dureza (WILLIAM, 2013).

Asimismo, (WILLIAM, 2013) menciona que la severidad con la cual atacan los sulfatos hacia los agregados depende de factores tales como:

- El tipo de sulfato, los sulfatos de magnesio y amonio son los más perjudiciales.
- La presencia intermitente de agua, los ciclos de mojado y secado tienen mayor incidencia en el material.
- La temperatura, con temperaturas elevadas el ataque es drástico debido a la violenta evaporación del agua.

Los efectos que causa la intemperie en los áridos es similar a la ocasionada por los sulfatos. Es por esta razón que se usa este elemento químico como un método para determinar el desenvolvimiento que tienen los agregados bajo condiciones climáticas diversas. Por ejemplo, cuando los agregados se encuentran formando parte de un pavimento rígido o flexible.

El método consiste en estimar el desempeño que tendrían los agregados en soportar la intemperie, sumergiéndolos en soluciones de sulfato de sodio o magnesio (NTE INEN 0863, 2011).

Para realizar la estimación, la norma NTE INEN 0863 (2011) (Spanish) denominada "Áridos. Determinación de la solidez de los áridos mediante el uso de sulfato de sodio o de sulfato de magnesio" dictamina proceder con repetidas inmersiones de los agregados en sulfato de sodio o magnesio para posteriormente someterlos a procesos de secado en el horno con el objetivo de deshidratar la sal alojada en los poros permeables de las partículas. Al rehidratar con sulfato las sales ocultas en los poros de los agregados, se genera una fuerza interna de carácter expansivo lo cual representa el congelamiento del agua en el interior de los intersticios de los áridos. (NTE INEN 0863, 2011).

La norma plantea las siguientes ecuaciones para el cálculo de desgaste de sulfatos expresado en porcentaje.

$$A=\frac{B}{C}\times 100$$ *Ecuación 3.4*

$$D=\frac{E-F}{E}$$ *Ecuación 3.5*

$$G=\frac{A\times D}{100}$$ *Ecuación 3.6*

Donde :

A = Porcentaje retenido parcial, %

B = Masa retenida parcial, gr

C = Masa total de muestra, gr

D = Porcentaje que pasa el tamiz grueso después del ensayo, %

E = Masa Inicial, gr

F = Masa retenida después del ensayo, gr

G = Porcentaje de desgaste parcial, %

3.1.3.1. Cálculos

Agregado grueso

E=26.05 gr

Tabla 3.4: Granulometría del agregado grueso antes del ensayo. Desgaste a los sulfatos

MALLA N°	ABERTURA (mm)	(B)	MASA RETENIDA ACUMULADA (gr)	(A)	% RETENIDO ACUMULADO
1 1/2"	37.50	0,3251	0,33	1,26%	0,55%
1"	25	3,11	3,44	12,05%	5,85%
3/4"	19	3,19	6,63	12,36%	11,28%
1/2"	12.5	5,38	12,01	20,85%	20,45%
3/8"	9.50	3,59	15,60	13,91%	26,56%
4	4.75	5,13	20,73	19,88%	35,30%
Pasa N° 4		5,08	58,71	19,69%	100,00%
SUMA (C)		25,81	58,71		

Tabla 3.5: Granulometría del agregado grueso después del ensayo. Desgaste a los sulfatos

NÚMERO DEL TAMIZ		% RETENIDO PARCIAL DEL AGREGADO	MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO(gr)	(F)	(D)	(G)
PASA	RETIENE					
3/8"	4	19,88%	300,2	151,3	49,60%	9,86%
1/2"	3/8"	13,91%	332,2	149,2	55,09%	7,66%
3/4"	1/2"	20,85%	670,3	423,3	36,85%	7,68%
1"	3/4"	12,36%	503,2	371,6	26,15%	3,23%
1 1/2"	1"	12,05%	1015,5	753,3	25,82%	3,11%
TOTAL		79,05%	2821,4	1848,7	193,51%	31,55%

%DESGASTE=	31,55%

Agregado fino

E=1945,4 gr

Tabla 3.6: Granulometría del agregado fino antes del ensayo. Desgaste a los sulfatos

MALLA N°	ABERTURA (mm)	(B)	MASA RETENIDA ACUMULADA (gr)	(A)	% RETENIDO ACUMULADO
4	4.75	0,9	0,90	0,05%	0,05%
8	2.36	466,4	467,30	24,00%	24,05%
16	1.18	331,6	798,90	17,07%	41,12%
30	0.6	282,7	1081,60	14,55%	55,67%
50	0.3	294,2	1375,80	15,14%	70,81%
100	0.150	212,6	1588,40	10,94%	81,75%
200	0.075	229,4	1817,80	11,81%	93,56%
BANDEJA		125,20	1943,00	6,44%	100,00%
SUMA		1943,00			

Tabla 3.7: Granulometría del agregado fino después del ensayo. Desgaste a los sulfatos

NÚMERO DEL TAMIZ		(A)	MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO(gr))	(F))	(D)	(G)
PASA	RETIENE					
3/8	4	0,05%	100	30,7	69,30%	0,03%
4	8	24,00%	100	47,6	52,40%	12,58%
8	16	17,07%	100	47,1	52,90%	9,03%
16	30	14,55%	100	65,3	34,70%	5,05%
30	50	15,14%	100	54,5	45,50%	6,89%
TOTAL		70,81%	500	245,2	254,80%	33,58%

%DESGASTE=	33,58%

3.1.3.3. Análisis de resultados

Luego de haber determinado el porcentaje de abrasión de la base granular analizada, se ha comparado éste valor con el especificado en el capítulo VIII del MOP (2002). Se ha podido observar que la base proveniente de la mina Tanlahua ubicada en San Antonio de Quito no cumple dicha especificación de desgaste a los sulfatos, ya que presenta un valor de 33.58% (agregado fino) y 31.55% (agregado grueso) lo cual es mayor al 12% permitido por la normativa.

3.1.4. Gravedad específica

La gravedad específica es otra de las importantes propiedades físicas que poseen los agregados cuya determinación es concluyente para poder conocer el volumen que pueden ocupar los áridos dentro de una mezcla. A su vez, el valor de la gravedad específica también es usado para calcular la relación de vacíos, y con menor frecuencia es empleada en la clasificación de minerales. (BOWLES, 1981)

De manera general, (BOWLES, 1981) define a la gravedad específica como una relación entre el peso unitario del material y el peso unitario del agua destilada a 4°C. Debido a la simplificación de unidades el resultado será adimensional.

Por otra parte, (Portilla Yandun & Pillajo De la Cruz, 2001) definen la gravedad específica como la relación que existe entre el peso de los sólidos y el peso del volumen de agua que éstos pueden desalojar.

Dependiendo del estado en el cual se encuentren los áridos a ensayar, la densidad del material puede tomar las denominaciones que se explican a continuación. (Dobrowolsky & Waddell, 2001)

- Densidad (SH)-Bulk: La masa de las partículas se encuentra seca al horno por unidad de volumen incluyendo el de poros permeables e impermeables, pero sin considerar los vacíos entre áridos.
- Densidad saturada con superficie seca (SSS): La masa de las partículas se encuentra en estado saturado con superficie seca por unidad de volumen incluyendo el de poros impermeables y aquellos llenos de agua, pero sin considerar los vacíos entre áridos.
- Densidad aparente, la masa de los vacíos impermeables por unidad de volumen de las partículas.
- Densidad relativa (gravedad específica): La relación que existe entre la densidad del material y la densidad del agua a temperatura definida. El valor calculado es adimensional.
- Densidad relativa (gravedad específica) (SH): La relación que existe entre la densidad (SH) y la densidad del agua a temperatura definida. El valor calculado es adimensional.

- Densidad relativa (gravedad específica) (SSS): La relación que existe entre la densidad (SSS) y la densidad del agua a temperatura definida. El valor calculado es adimensional.
- Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente): La relación que existe entre la densidad aparente y la densidad del agua a temperatura definida. El valor calculado es adimensional.

El ensayo de gravedad específica a su vez facilita la obtención del porcentaje de absorción de los agregados. Dicho porcentaje es empleado para calcular la variación en masa de las partículas como consecuencia del agua absorbida en los poros de las mismas, partiendo desde un estado seco (NTE INEN 0857, 2010).

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de las densidades y absorción del agregado grueso se muestran a continuación.

Gravedad específica bulk

$$Ge = \frac{A}{B - C}$$

Ge=Gravedad específica
A= Masa de la muestra seca, kg *Ecuación 3.7*
B= Masa de la muestra saturada con superficie seca, kg
C=Masa de la muestra sumergida en agua, kg

Gravedad específica saturada con superficie seca

$$G_{es} = \frac{B}{B - C}$$

G_{es} *=Gravedad especifica saturada con superficie seca* *Ecuación 3.8*
B= Masa de la muestra saturada con superficie seca, kg
C=Masa de la muestra sumergida en agua, kg

Gravedad específica aparente

$$G_{ea} = \frac{A}{A - C}$$

G_{ea}*=Gravedad específica aparente* *Ecuación 3.9*
A= Masa de la muestra seca, kg
C=Masa de la muestra sumergida en agua, kg

Porcentaje de absorción

$$AB = \frac{B - A}{A}$$

AB=Porcentaje de absorción, % *Ecuación 3.10*

A= Masa de la muestra seca, kg

B= Masa de la muestra saturada con superficie seca, kg

3.1.4.1. Cálculos Agregado grueso

A=	9,055	kg
B=	9,355	kg
C=	5,687	kg
Ge=	2,47	
Ges=	2,55	
Gea=	2,69	
AB=	3	%

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de las densidades y absorción del agregado fino se muestran a continuación.

Gravedad específica bulk

$$M_a = Mmw - (Mm + B)$$

M_a = Masa del agua añadida en el matraz, gr

Mmw= Masa del conjunto matraz y muestra, gr *Ecuación 3.11*

Mm=Masa del matraz, gr

B=Masa de muestra saturada con superficie seca, gr

$$Ge = \frac{A}{500 - M_a}$$

Ge=Gravedad específica Bulk *Ecuación 3.12*

A=Masa de muestra seca, gr

M_a = Masa del agua añadida en el matraz, gr

Gravedad especifica saturada con superficie seca

$$G_{es} = \frac{B}{500 - M_a}$$

G_{es}=*Gravedad específica Bulk*

B=Masa de muestra saturada con superficie seca, gr *Ecuación 3.13*

M_a = *Masa del agua añadida en el matraz, gr*

Gravedad específica aparente

$$G_{ea} = \frac{A}{500 + A + Mm - Mmw}$$

G_{ea} = *Gravedad específica aparente*

A=Masa de muestra seca, gr *Ecuación 3.14*

Mm=Masa del matraz, gr

Mmw= Masa del conjunto matraz y muestra, gr

Porcentaje de absorción

$$AB = \frac{B - A}{A}$$

AB=Porcentaje de absorción, % *Ecuación 3.15*

A= Masa de la muestra seca, kg

B= Masa de la muestra saturada con superficie seca, kg

3.1.4.2. Cálculos Agregado fino

Mm=	159,1	gr
Mmw=	957,8	gr
A=	477,3	gr
B=	503,1	gr
Ma=	295,6	gr
Ge=	2,34	
Ges=	2,46	
Gea=	2,67	
AB=	5,4	%

3.1.5. Equivalente de arena

El equivalente de arena es un ensayo que mide la calidad de los agregados que van a ser destinados a formar parte de una mezcla. La calidad es analizada desde el punto de vista de la cantidad de arcilla o polvo fino dañino que poseen los áridos a ser ensayados. La arcilla es un tipo de suelo que puede ocasionar daños severos en la estructura de un pavimento cuando se encuentra en contacto con el agua. Debido a esto, es conveniente que las partículas

posean una cuantía muy pequeña de éste y otros materiales nocivos, para garantizar su buen funcionamiento (UNE-EN 933-8:2000, 2000).

El ensayo consiste en desprender las partículas de arcilla o material fino nocivo de la superficie de los áridos mediante la adición de un líquido coagulante en el interior de dos probetas graduadas, para posteriormente cuantificar el porcentaje de finos sedimentados sobre la porción arenosa. (UNE-EN 933-8:2000, 2000)

Con las medidas registradas en las probetas se procede a realizar los cálculos en base a las siguientes fórmulas.

$$Eq_1 = \left(\frac{h_{21}}{h_{11}}\right) \times 100$$

Eq_1= *Equivalente de arena muestra 1, %* — *Ecuación 3.16*

h_{11}= *Sedimento: Lectura 1, in*

h_{21}=*Sedimento: Lectura 2, in*

$$Eq_2 = \left(\frac{h_{22}}{h_{12}}\right) \times 100$$

Eq_2= *Equivalente de arena muestra 2, %*

h_{22}=*Sedimento: Lectura 1, in* — *Ecuación 3.17*

h_{12}=*Sedimento: Lectura 2, in*

$$Equivalente\ de\ arena = \frac{Eq_1 + Eq_2}{2} \times 100$$ *Ecuación 3.18*

La norma indica que una variación en más de 4 unidades entre las dos probetas ensayadas es un indicador que el ensayo debe repetirse.

3.1.5.1. Cálculos

Muestra 1

h_{11}=	5,5	in
h_{21} =	3,7	in

Eq1=	67,27%
Eq1=	68%

Muestra 2

h_{12} = 5,6 in

h_{22} = 3,6 in

Eq2=	64,29%
Eq2=	65%

$$Equivalente\ de\ arena = \frac{Eq1 + Eq2}{2}$$

Eq=	67%

3.1.5.2. Análisis de resultados

Luego de haber determinado el porcentaje de equivalente de arena de la base granular analizada, se ha comparado éste valor con el especificado en el capítulo VIII del MOP (2002). Se ha podido observar que la base proveniente de la mina Tanlahua ubicada en San Antonio de Quito cumple con lo especificado en la normativa, debido a que presenta un porcentaje de equivalente de arena igual al 67%, siendo éste valor mayor al mínimo de 40% que especifica la norma.

3.1.6. Ensayo Próctor

El ensayo nació en el año de 1933, cuando el ingeniero Ralph Roscoe Proctor decidió presentar cuatro artículos en la revista Engineering New-Record. Los artículos mostrados sirvieron como base para los ensayos de compactación que se usan actualmente (BOWLES, 1981).

(Portilla Yandun & Pillajo De la Cruz, 2001) definen la compactación como un proceso de densificación del suelo a través de la eliminación de aire, como consecuencia de la aplicación de una cantidad de energía.

Inicialmente surgió el denominado ensayo Proctor Estándar. El cual consiste en compactar el material en tres capas con 25 golpes cada una, usando un martillo compactador de 24.4 N (BOWLES, 1981).

Sin embargo, este procedimiento fue reformado en la Segunda Guerra mundial. La necesidad de modificar el ensayo estándar se dio por el requerimiento de mayores densidades de compactación en las subrasantes de los sitios que fueron destinados para uso de pistas de aterrizaje de aviones con gran peso. Debido a esto, el martillo compactador pasó a tener 44.5 N y las 3 capas de compactación se convirtieron en 5 con un número de 56 golpes por cada una. Además, se modificó también la altura de caída del martillo a 0.46m. Consecuentemente, la energía de compactación alcanzó los 2710 kJ/m^3, lo cual representa cerca de 5 veces la energía inicial (BOWLES, 1981).

A pesar de la modificación que se realizó al ensayo original, los dos procedimientos de compactación tienen la misma finalidad.

Ambas técnicas de compactación conducen a la determinación de la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo de la muestra. Esto se logra al compactar una cantidad razonable de cilindros (generalmente 5) en los cuales se ha modificado el contenido de humedad para cada muestra. Al ensayar cilindros con diferentes contenidos de humedad, se logran obtener distintos valores de densidad seca y humedad que posteriormente son representados mediante una gráfica. En la ordenada se ubican los valores de densidad seca, mientras que en las abscisas el contenido de humedad.

Se dice que el valor máximo de densidad seca que puede alcanzar el material se localiza en la ordenada de mayor valor de la curva de compactación, para el cual le corresponderá el valor de humedad óptimo.

La curva de compactación muestra como al incrementar la cantidad de agua, la densidad seca se eleva hasta un punto en el cual ésta comienza a disminuir. Conforme se incrementa la cantidad de agua, se produce una presión de poros de magnitud considerable en cada instante en que se realiza los movimientos con el martillo compactador. La presión en el interior de los poros ocasiona una disminución en la resistencia al corte del suelo y consecuentemente la densidad seca disminuye (BOWLES, 1981).

Las normas ASTM D 698-12 y D1557-12 regulan los procedimientos a seguir para obtener la densidad seca y porcentaje de humedad óptima a través del ensayo Proctor Estándar y Modificado, respectivamente.

Las fórmulas utilizadas en este ensayo son las que se muestran a continuación.

Contenido de humedad

$$\%H = \frac{(P_c + sh) - (P_c + ss)}{(P_c + ss) - (P_c)}$$

$\%H$=Contenido de humedad ,%

P_m = Peso molde , gr

P_c=Peso cápsula, gr *Ecuación 3.19*

P_m+sh=Peso molde + suelo h, gr

P_c+sh=Peso cap. + suelo h, gr

P_c+ss=Peso cap. + suelo seco, gr

Densidad húmeda del suelo

$$\rho m = k \frac{(P_m + sh) - P_m}{V}$$

ρm = Densidad húmeda de la muestra compactada,g/cm^3

$P_m + sh$ = Masa del suelo húmedo en el molde , gr *Ecuación 3.20*

P_m=Volumen del molde de compactación, cm^3

k=Constante de converción

$k = 1$ para g / cm3 y volumen en cm3.

Densidad seca del suelo

$$\rho d = \frac{\rho m}{1 + H\%}$$

ρd = Densidad seca de la muestra compactada,g/cm^3

ρm = Densidad húmeda de la muestra compactada,g/cm^3 *Ecuación 3.21*

$H\%$ = Contenido de humedad de la muestra,%

3.1.6.1. Cálculos Material Base

Tabla 3.8: Datos, base granular. Ensayo Proctor

TIPO MATERIAL :	Base
MÉTODO :	A
PESO MARTILLO :	44,48 N
N° DE CAPAS :	5
N° DE GOLPES POR CAPA :	56
ALTURA DE CAIDA DEL MARTILLO :	457,2 mm

- *Descripción del molde*

Tabla 3.9: Descripción del molde, base granular. Ensayo Proctor

N° de Molde	10	2
Peso del molde (g)	6217	7654
Diámetro (cm)	15,232	15,199
Altura (cm)	11,662	11,889
Volumen (cm3)	2112,00	2125,00

- *Contenido de humedad*

Tabla 3.10: Contenido de humedad, base granular. Ensayo Proctor

ENSAYO	1		2		3		4	
N° Molde	10		10		10		10	
Pm+sh	11.012		11.150		11.229		10.595	
Pc	17,73	16,89	19,03	16,96	16,69	16,88	17,34	17,70
Pc+sh	90,69	104,10	103,12	107,40	115,65	95,92	106,57	119,56
Pc+ss	86,15	98,81	96,18	100,23	106,30	88,41	96,74	108,18
H%	6,64	6,46	9,00	8,61	10,43	10,50	12,38	12,58
PROMEDIO	6,55		8,80		10,47		12,48	

- *Densidad húmeda del suelo*

k= 1 para g/cm3 y volumen en cm3.

Tabla 3.11: Densidad húmeda del suelo, base granular. Ensayo Proctor

ENSAYO	1	2	3	4
ρm	2,270	2,336	2,373	2,073

- *Densidad seca del suelo*

Tabla 3.12: Densidad seca del suelo, base granular. Ensayo Proctor

ENSAYO	1	2	3	4
ρd	2,131	2,147	2,148	1,843

Gráfico peso unitario seco – contenido de humedad

Yd	%H
2,13	6,55
2,15	8,80
2,15	10,47
1,84	12,48

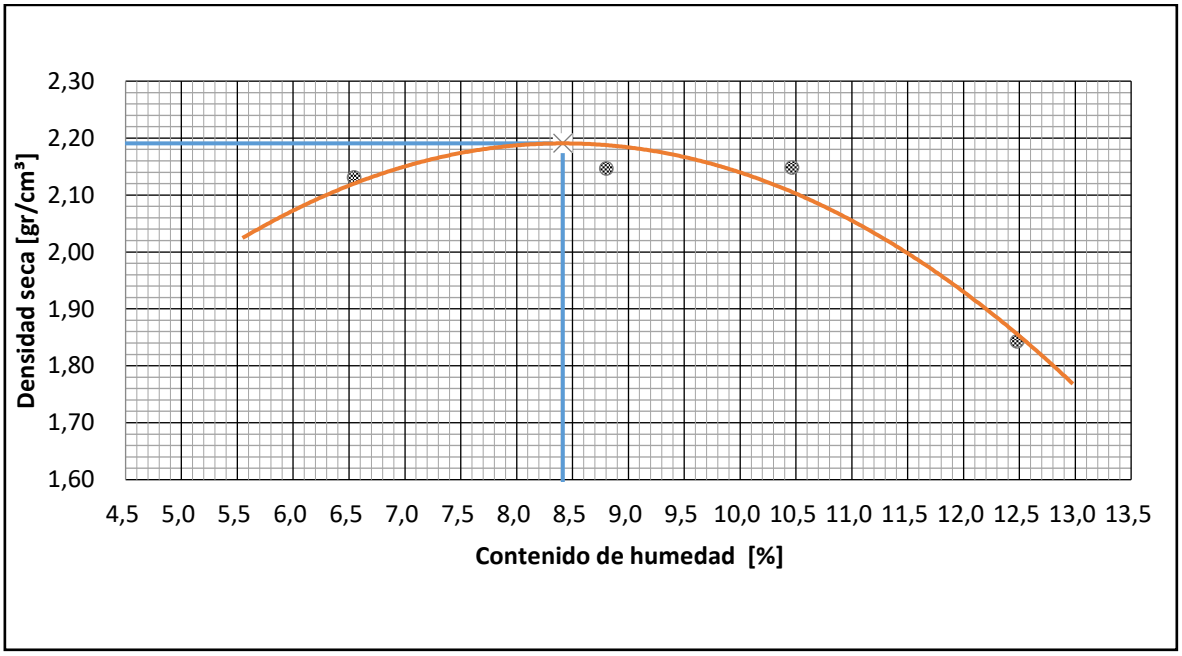


Gráfico 3.1: Peso unitario seco vs contenido de humedad, base granular. Ensayo Proctor

Densidad seca máxima =	2,191	g/cm³
% Humedad óptima =	8,41	%

3.1.7. Ensayo CBR

El ensayo California Bearing Ratio (relación de soporte de California) fue concebido en 1929 por parte de la División de Carreteras de California, con el objetivo de clasificar la capacidad de un suelo a ser utilizado como una subbase o base de carreteras. Al igual que el ensayo Proctor, el ensayo de CBR también fue utilizado durante la Segunda Guerra Mundial para el estudio de suelos destinados a la construcción de aeropuertos (BOWLES, 1981).

Fue James Porter específicamente quién ideó este método. Lo realizó como parte de una investigación acerca de las fallas de las carreteras que formaban parte del estado de California. Mediante la investigación, Porter pudo concluir que las fallas eran consecuencia de un mal proceso de compactación. Esta deficiencia ocasionaba la deformación de la subrasante de la vía por la acción del tránsito vehicular (Vargas Vallejo & Morla Cordero, 2009).

La relación de soporte de California evalúa la resistencia al corte de un suelo que se encuentra en condiciones de densidad y humedad previamente controladas. Esto significa que el valor de CBR calculado depende específicamente de las condiciones en las cuales se encuentre el material al momento de realizar el ensayo. Por tal motivo, no es posible poseer un valor constante para cada tipo de suelo (Portilla Yandun & Pillajo De la Cruz, 2001).

El valor de CBR de un suelo viene dado por la relación que existe entre la carga unitaria requerida para penetrar la muestra con un pistón de área 19.4 cm^2, y una carga patrón necesaria para penetrar la misma profundidad en una muestra estándar. En términos de ecuación, el CBR se calcula de la siguiente manera: (Portilla Yandun & Pillajo De la Cruz, 2001)

$$\%\,CBR = \frac{carga\ unitaria}{carga\ unitaria\ patrón} \times 100 \qquad \textit{Ecuación 3.22}$$

El CBR se determina mediante la relación de las cargas que tienen una profundidad de penetración de 0.1" y 0.2". Los registros restantes son utilizados para darle forma a la gráfica de presión vs deformación.

La cantidad de agua que se va añadir a la muestra para alcanzar la humedad requerida, se calcula de la siguiente manera:

$$\%\ De\ agua\ que\ se\ va\ a\ adicionar = \frac{H-h}{100+h} \times 100$$

Donde: *Ecuación 3.23*

H:Humedad que se quiere alcanzar

h:Humedad en estado natural

La expansión que puede llegar a presentar la muestra durante el tiempo de inmersión en el agua, se calcula de la siguiente manera:

$$\%\ de\ Expansión = \frac{L_2 - L_1}{127} \times 100$$

L_1 : *Lectura inicial en mm* *Ecuación 3.24*

L_2 : *Lectura final en mm*

127: porcentaje referido a la altura del molde

Los datos de presión y penetración que se registraron, son representados mediante una gráfica. El eje de las abscisas pertenecerá a los valores de penetración mientras que el eje de las ordenadas contendrá la magnitud de presión necesaria para producir dicha penetración. La forma de la gráfica deberá ser tal que exista una curva lineal que surja desde el origen, caso contrario, será necesario realizar una corrección. Esto se logra al insertar una línea en la porción recta de la curva con el objetivo de interceptar el eje de las abscisas, convirtiéndose esta intersección en un nuevo origen.

Con los valores corregidos de presión, se procede a encontrar los valores de CBR para 0.1" y 0.2" de penetración.

3.1.7.1. Cálculos

- *Datos del molde*

Tabla 3.13: Datos de moldeo, base granular. Ensayo CBR

MOLDES N°	M1	23	Z7
N° DE GOLPES POR CAPA	56	25	12
Peso molde + suelo húmedo (gr.)	12.116	10.866	11.005
Peso molde (gr.)	7.084	6.149	6.641
Peso suelo húmedo (gr.)	5.032	4.717	4.364
Volumen del molde (cm³)	2.124	2.124	2.132
Densidad húmeda (gr/cm³)	2.370	2.221	2.047

- *Contenido de humedad de moldeo*

Tabla 3.14: Contenido de humedad de moldeo, base granular. Ensayo CBR

Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	285,38	233,92	224,81	174,60	179,66	259,77
Peso cap. + suelo seco (gr.)	265,72	218,35	209,98	163,64	168,30	241,48
Peso cápsula (gr.)	31,85	32,74	33,24	32,56	32,57	22,72
Contenido de humedad (%)	8,41	8,39	8,39	8,36	8,37	8,36
Humedad promedio (%)	8,40		8,38		8,37	
Densidad seca (gr/cm³)	2.186		2.049		1.889	

- *Contenido de humedad posterior a la saturación*

Tabla 3.15: Contenido de humedad posterior a la saturación, base granular. Ensayo CBR

Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	220,06	207,79	213,92	236,05	140,89	181,38
Peso cap. + suelo seco (gr.)	205,26	193,56	200,62	220,33	131,51	169,93
Peso cápsula (gr.)	32,52	33,86	49,32	32,84	22,86	32,64
Contenido de humedad (%)	8,57	8,91	8,79	8,38	8,63	8,34
Humedad promedio (%)	8,74		8,59		8,49	

- *Porcentaje de absorción luego de la saturación*

Tabla 3.16: Porcentaje de absorción luego de la saturación, base granular. Ensayo CBR

Peso molde + suelo húmedo (gr.)	12.166	10.955	11.113
Agua absorbida (gr.)	50	89	108
Agua absorbida (%)	0,99	1,89	2,47

- *Porcentaje de esponjamiento*

Tabla 3.17: Porcentaje de esponjamiento, base granular. Ensayo CBR

MOLDES N°	M1			23			Z7		
Tiempo (dias)	LEC DIAL	ESPONJAMIENTO		LEC DIAL	ESPONJAMIENTO		LEC DIAL	ESPONJAMIENTO	
		pulg	%		pulg	%		pulg	%
0	50	------	------	50	------	------	50	------	------
1	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
2	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
3	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
4	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00

- *Ensayo de penetración*

Tabla 3.18: Ensayo de penetración, base granular. Ensayo CBR

MOLDES N°	M1			23			Z7		
Penetración (pulgadas)	56 Golpes			25 Golpes			12 Golpes		
	DIAL	Presión lb/plg²	Presión corregida lb/plg²	DIAL	Presión lb/plg²	Presión corregida lb/plg²	DIAL	Presión lb/plg²	Presión corregida lb/plg²
0,000	0	0,00	----	0	0,00	-----	0	0,00	----
0,025	122	37,05	----	99	30,06	-----	81	24,60	----
0,050	280	85,03	----	205	62,25	-----	138	41,91	----
0,075	470	142,72	----	330	100,21	-----	184	55,87	----
0,100	660	200,42	260,00	472	143,33	260,00	220	66,81	95,00
0,200	1550	470,68	530,00	1295	393,25	513,00	475	144,24	190,00
0,300	2400	728,80	----	2200	668,07	-----	824	250,22	----
0,400	3200	971,73	----	3000	911,00	-----	1300	394,77	----
0,500	3200	971,73	----	3000	911,00	-----	1880	570,89	----

- *Curva de esfuerzo - penetración*

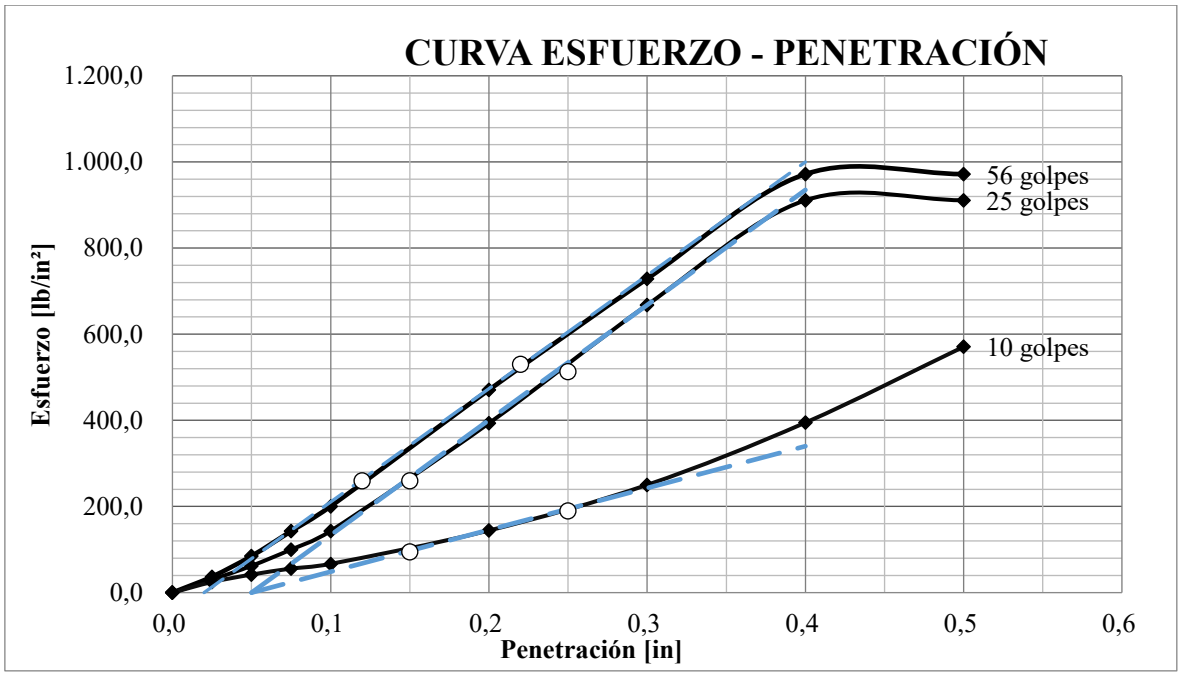


Gráfico 3.2: Esfuerzo vs penetración, base granular. Ensayo CBR

- *Curva de CBR – densidad seca*

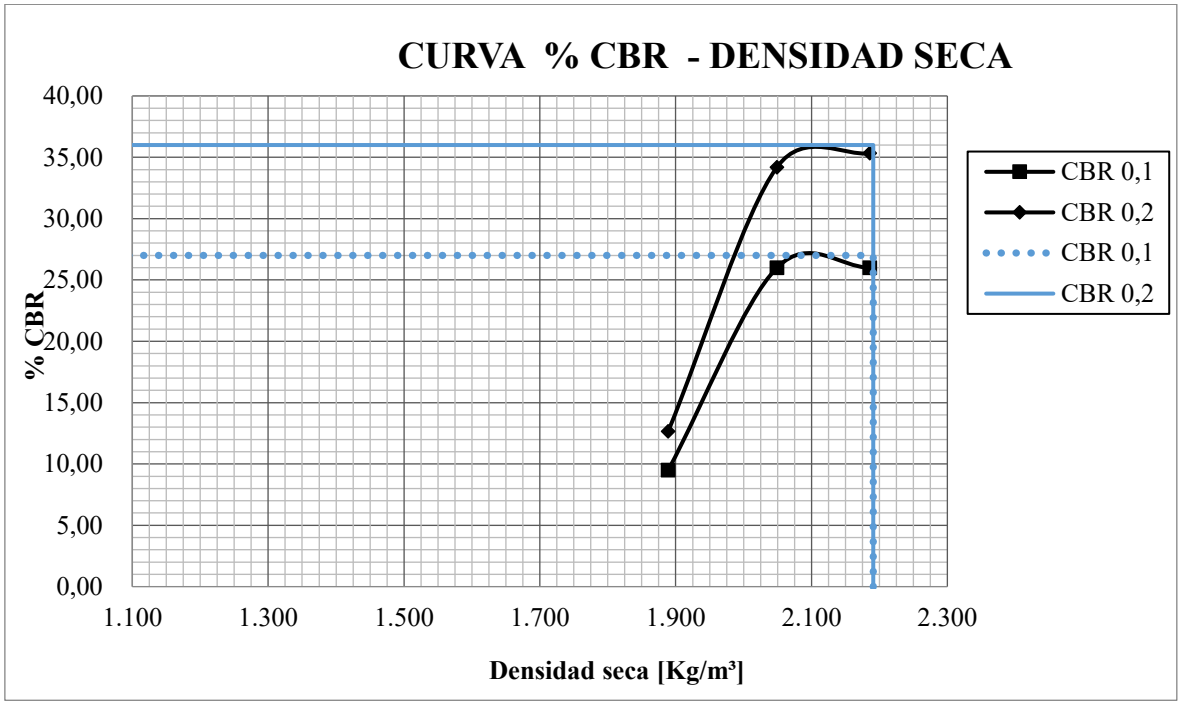


Gráfico 3.3: % CBR vs densidad seca, base granular. Ensayo CBR

- *Porcentajes de CBR*

Tabla 3.19: Porcentajes de CBR, base granular

Presión lb/plg²	Valor CBR 0.1"	Presión lb/plg²	Valor CBR 0.2"
260,00	26,00	530,00	35,33
260,00	26,00	513,00	34,20
95,00	9,50	190,00	12,67
CBR (100% γseco max.)=	27,00	CBR (100% γseco max.) =	36,00

3.2. ENSAYOS EN LA ESCORIA DE ACERO

3.2.1. Granulometría

El ensayo de granulometría de la escoria de acero, se ha realizado conforme el proceso especificado en el literal 3.1.1 "Granulometría". Se ha tomado como referencia la norma citada en dicho literal, ya que ésta contiene los procedimientos necesarios para todo material aquel que vaya a ser usado como árido, incluyendo la escoria de acero.

3.2.1.1. Cálculos

- *Agregado grueso*

Mo= Masa inicial de la muestra (kg)

Mo=24,57 kg

Tabla 3.20: Granulometría del material grueso. Escoria de Acero

MALLA N°	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL (Kg)	MASA RETENIDA ACUMULADA (Kg)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
2 "	51	0,00	0,00	0,00%	100%
1 1/2 "	58,1	1,10	1,10	4,26%	95,74%
1 "	25,4	1,58	2,68	6,12%	93,88%
3/4 "	19	1,41	4,09	5,46%	94,54%
1/2 "	12,7	3,30	7,39	12,79%	87,21%
3/8 "	9,51	2,35	9,74	9,11%	90,89%
4	4,78	6,61	16,35	25,62%	74,38%
PASA N°4		8,10	24,45	31,39%	68,61%
SUMA		24,45		94,75%	

- *Agregado fino*

Mo= Masa inicial de la muestra (gr)

Mo= 558 gr

Tabla 3.21: Granulometría del material fino. Escoria de Acero

MALLA N°	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL (gr)	MASA RETENIDA ACUMULADA (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
8	2,36	0,00	0,00	0,00%	100%
10 "	2,00	350,70	350,70	60,70%	39,30%
40 "	0,42	170,40	521,10	29,49%	70,51%
200 "	0,074	24,60	545,70	4,26%	95,74%
BANDEJA		2,00		0,35%	99,65%
SUMA		547,70		94,79%	

3.3. ENSAYOS EN LA MEZCLA BASE/ESCORIA

3.3.1. Dosificaciones a usar

La adición de escoria en la muestra de base granular, se ha realizado mediante partes porcentuales. Los porcentajes que se han utilizado para mezclar con la base son los siguientes: 5%, 15%, 25%, 35%, 40%. Se ha tomado como valor máximo de escoria un porcentaje del 40%, ya que valores superiores significaría una gran cantidad de escoria para mejorar las propiedades del agregado y esto sería lo menos práctico.

Los ensayos que requieren de adición de escoria para medir el cambio de las propiedades de la base granular son dos. El ensayo de compactación Proctor Modificado y el ensayo CBR.

3.3.2. Ensayo Proctor

A la cantidad de muestra requerida para realizar el ensayo de Proctor, se le han incrementado los porcentajes de escoria mencionados. Como ya es conocido, el ensayo de compactación tiene la finalidad de proveer información acerca del peso específico seco máximo y su correspondiente humedad óptima, que para este caso pertenecerán a la mezcla escoria/base. En vista que el ensayo Proctor requiere de aproximadamente 5 muestras para poder realizar la compactación, se han necesitado alrededor de 25 cilindros con el fin de calcular el peso específico seco máximo y humedad óptima para cada porcentaje de escoria a ser añadido.

Se ha llevado a cabo un proceso de mezclado de materiales muy cuidadosamente. Tratando en lo posible que la escoria se encuentre muy bien distribuida en la muestra de la base, especialmente con los porcentajes de adición más bajos, ya que es aquí donde se produce la segregación de la escoria.

Ambos materiales han sido secados al aire antes de ser sometidos al proceso de compactación.

3.3.2.1. Cálculos

PROCTOR, BASE + 5% DE ESCORIA

Tabla 3.22: Datos, base + 5% de escoria. Ensayo Proctor

PORCENTAJE ESCORIA:	5%
MÉTODO :	A
PESO MARTILLO :	44,48 N
N° DE CAPAS :	5
N° DE GOLPES POR CAPA :	56
ALTURA DE CAIDA DEL MARTILLO :	457,2 mm

- Descripción del molde

Tabla 3.23: Descripción del molde, base + 5% escoria. Ensayo Proctor

N° de Molde	10	2
Peso del Molde (g)	6217	7654
Diámetro (cm)	15,232	15,199
Altura (cm)	11,662	11,889
Volumen (cm3)	2125	2125

- Contenido de humedad

Tabla 3.24: Contenido de humedad, base + 5% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1		2		3		4	
N° Molde	10		10		10		10	
Pm+sh	10.944		11.230		11.263		11.032	
Pc	18,10	19,05	16,74	17,96	18,14	18,18	17,95	17,00
Pc+sh	109,40	95,63	84,22	89,71	108,02	106,64	110,22	94,45
Pc+ss	104,35	91,50	79,22	84,43	99,90	98,67	100,33	86,16
H%	5,86	5,70	8,00	7,94	9,93	9,90	12,01	11,99
PROMEDIO	5,78		7,97		9,92		12,00	

- Densidad húmeda del suelo

K= 1 para g/cm3 y volumen en cm3

Tabla 3.25: Densidad húmeda del suelo, base + 5% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1	2	3	4
ρm	2,224	2,359	2,375	2,266

- Densidad seca del suelo

Tabla 3.26: Densidad seca del suelo, base + 5% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1	2	3	4
ρd	2,103	2,185	2,160	2,023

- Gráfico peso unitario seco – contenido de humedad

Yd	%H
2,10	5,78
2,18	7,97
2,16	9,92
2,02	12,00
0,00	0,00

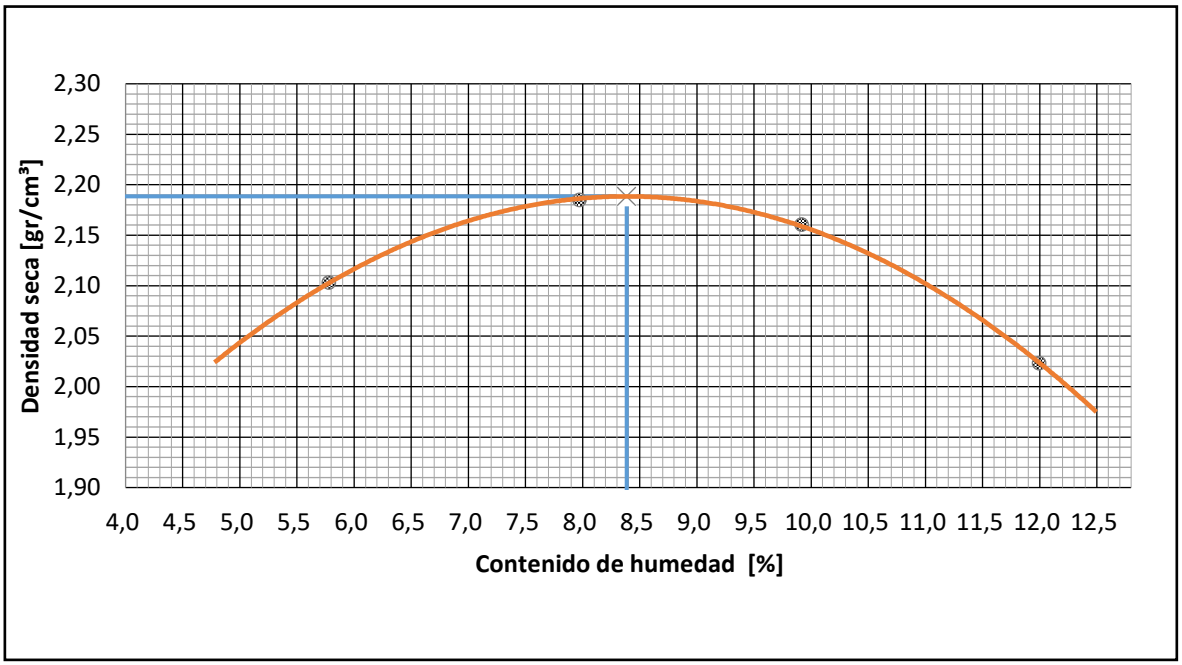


Gráfico 3.4: Peso unitario seco vs contenido de humedad, base + 5% de escoria. Ensayo Proctor

Densidad seca máxima =	2,188	g/cm³
% Humedad óptima =	8,39	%

PROCTOR, BASE + 15% DE ESCORIA

Tabla 3.27: Datos, base + 15% de escoria. Ensayo Proctor

PORCENTAJE ESCORIA:	15%
MÉTODO :	A
PESO MARTILLO :	44,48 N
N° DE CAPAS :	5
N° DE GOLPES POR CAPA :	56
ALTURA DE CAIDA DEL MARTILLO :	457,2 mm

- Descripción del molde

Tabla 3.28: Descripción del molde, base + 15% de escoria. Ensayo Proctor

N° de Molde	10	2
Peso del Molde (g)	6217	7654
Diametro (cm)	15,232	15,199
Altura (cm)	11,662	11,889
Volumen (cm3)	2125	2125

- Contenido de humedad

Tabla 3.29: Contenido de humedad, base + 15% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1		2		3		4	
N° Molde	2		10		2		2	
Pm+sh	12.353		11.335		12.673		11.993	
Pc	18,30	16,72	18,08	18,00	16,85	17,80	18,45	16,98
Pc+sh	95,05	100,29	99,44	96,16	109,43	97,23	118,33	105,47
Pc+ss	90,61	95,48	93,28	89,02	101,05	90,03	107,61	95,94
H%	6,14	6,11	8,19	8,02	9,95	9,97	12,02	12,07
PROMEDIO	6,12		8,11		9,96		12,05	

- Densidad húmeda del Suelo

K= 1 para g/cm3 y volumen en cm3.

Tabla 3.30: Densidad húmeda del suelo, base + 15% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1	2	3	4
ρm	2,211	2,408	2,362	2,042

- Densidad seca del suelo

Tabla 3.31: Densidad seca del suelo, base + 15% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1	2	3	4
ρd	2,084	2,228	2,148	1,822

- Gráfico peso unitario seco – contenido de humedad

Yd	%H
2,08	6,12
2,23	8,11
2,15	9,96
1,82	12,05
0,00	0,00

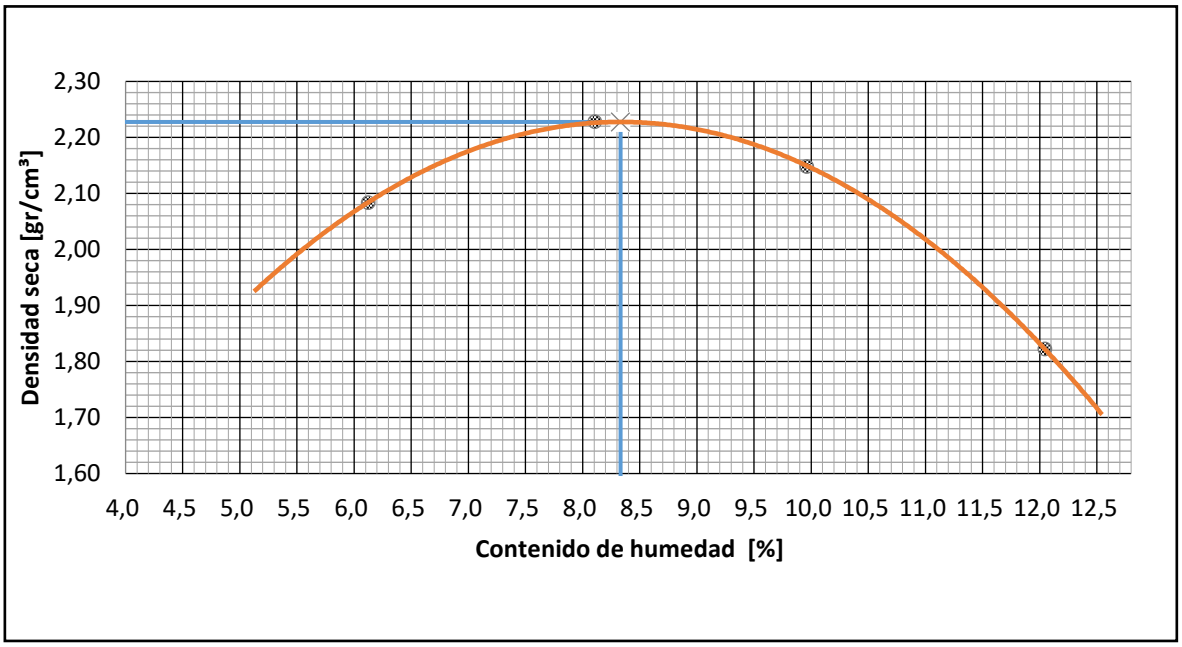


Gráfico 3.5: Peso unitario seco vs contenido de humedad, base + 15% de escoria. Ensayo Proctor

Densidad seca máxima =	2,228	g/cm³
% Humedad óptima =	8,33	

PROCTOR, BASE + 25% DE ESCORIA

Tabla 3.32: Datos, base + 25% de escoria. Ensayo Proctor

PORCENTAJE ESCORIA:	25%	
MÉTODO :	A	
PESO MARTILLO :	44,48	N
N° DE CAPAS :	5	
N° DE GOLPES POR CAPA :	56	
ALTURA DE CAIDA DEL MARTILLO :	457,2	mm

- Descripción del molde

Tabla 3.33: Descripción del molde, base + 25% de escoria. Ensayo Proctor

N° de Molde	10	2
Peso del Molde (g)	6217	7654
Diámetro (cm)	15,232	15,199
Altura (cm)	11,662	11,889
Volumen (cm3)	2125	2125

- Contenido de humedad

Tabla 3.34: Contenido de humedad, base + 25% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1		2		3		4	
N° Molde	2		10		2		10	
Pm+sh	12.579		11.352		12.886		11.167	
Pc	17,94	18,00	18,08	18,18	17,81	17,83	16,68	11,49
Pc+sh	105,82	109,01	99,42	104,37	108,84	107,05	108,55	86,76
Pc+ss	101,35	104,51	93,67	98,36	101,03	99,01	99,09	79,05
H%	5,36	5,20	7,61	7,50	9,38	9,90	11,48	11,41
PROMEDIO	5,28		7,55		9,64		11,45	

- Densidad húmeda del suelo

K= 1 para g/cm3 y volumen en cm3.

Tabla 3.35: Densidad húmeda del suelo, base + 25% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1	2	3	4
ρm	2,318	2,416	2,462	2,329

- Densidad seca del suelo

Tabla 3.36: Densidad seca del suelo, base + 25% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1	2	3	4
ρd	2,201	2,247	2,246	2,090

- Gráfico peso unitario seco – contenido de humedad

Yd	%H
2,20	5,28
2,25	7,55
2,25	9,64
2,09	11,45
0,00	0,00

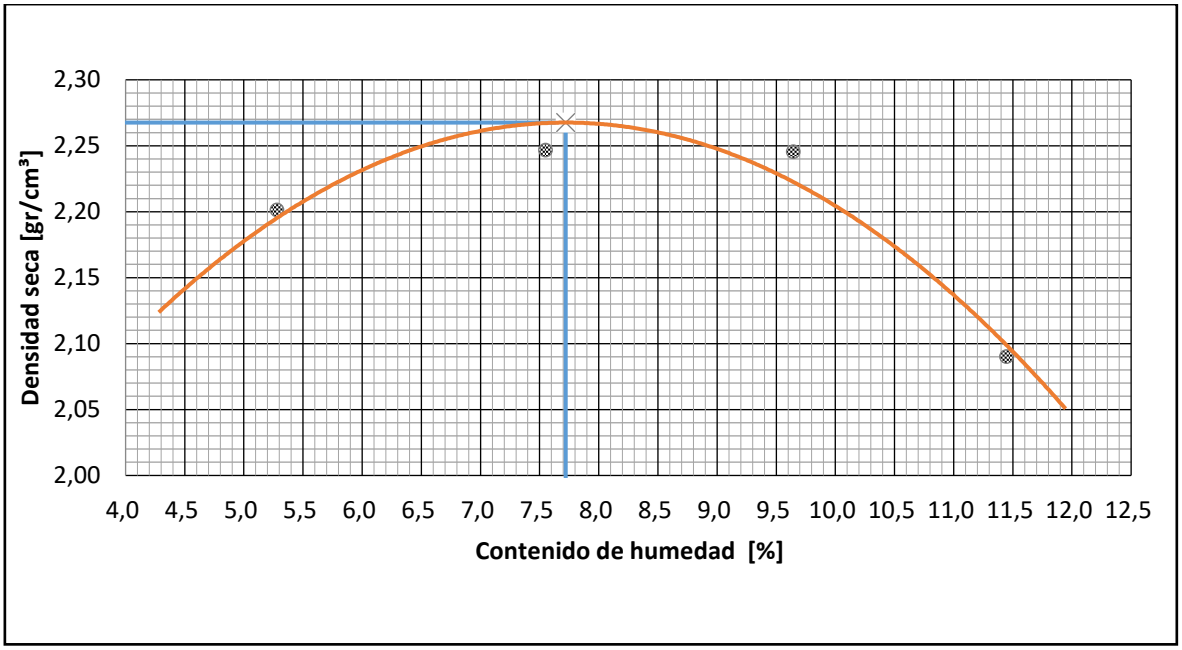


Gráfico 3.6: Peso unitario seco vs contenido de humedad, base + 25% de escoria. Ensayo Proctor

Densidad seca máxima =	2,268 g/cm³
% Humedad óptima =	7,72

PROCTOR, BASE + 35% DE ESCORIA

Tabla 3.37: Datos, base + 35% de escoria. Ensayo Proctor

PORCENTAJE ESCORIA:	35%
MÉTODO :	A
PESO MARTILLO :	44,48 N
N° DE CAPAS :	5
N° DE GOLPES POR CAPA :	56
ALTURA DE CAIDA DEL MARTILLO :	457,2 mm

- Descripción del molde

Tabla 3.38: Descripción del molde, base + 35% de escoria. Ensayo Proctor

N° de Molde	10	2
Peso del Molde (g)	6217	7654
Diámetro (cm)	15,232	15,199
Altura (cm)	11,662	11,889
Volumen (cm3)	2125	2125

- Contenido de humedad

Tabla 3.39: Contenido de humedad, base + 35% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1		2		3		4	
N° Molde	2		10		2		10	
Pm+sh	12.382		11.256		12.926		11.236	
Pc	16,65	18,75	17,85	11,51	17,92	17,73	17,51	18,67
Pc+sh	108,63	129,26	115,03	100,36	118,75	111,62	108,29	116,45
Pc+ss	105,04	124,93	109,53	95,30	111,24	104,60	100,06	107,54
H%	4,06	4,08	6,00	6,04	8,05	8,08	9,97	10,03
PROMEDIO	4,07		6,02		8,06		10,00	

- Densidad húmeda del suelo

K= 1 para g/cm3 y volumen en cm3.

Tabla 3.40: Densidad húmeda del suelo, base + 35% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1	2	3	4
ρm	2,225	2,371	2,481	2,362

- Densidad seca del suelo

Tabla 3.41: Densidad seca del suelo, base + 35% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1	2	3	4
ρd	2,138	2,237	2,296	2,147

- Gráfico peso unitario seco – contenido de humedad

Yd	%H
2,14	4,07
2,24	6,02
2,30	8,06
2,15	10,00
0,00	0,00

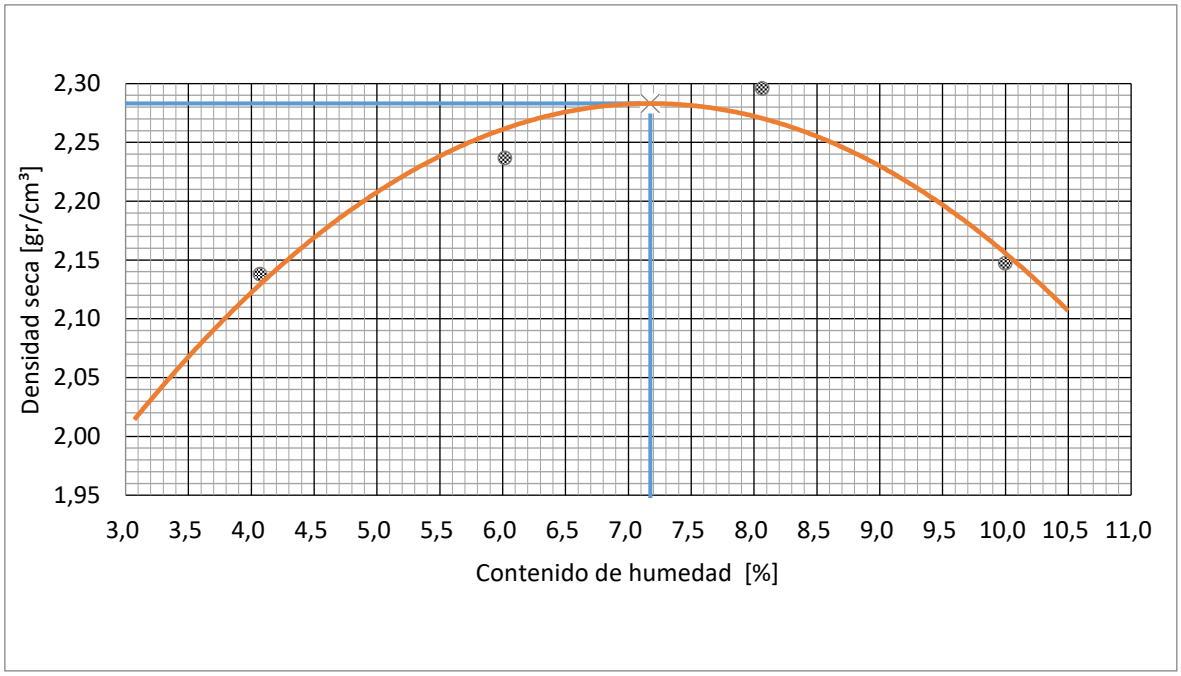


Gráfico 3.7: Peso unitario seco vs contenido de humedad, base + 35% de escoria. Ensayo Proctor

Densidad seca máxima =	2,283 g/cm³
% Humedad óptima =	7,17

PROCTOR, BASE + 40% DE ESCORIA

Tabla 3.42: Datos, base + 40% de escoria. Ensayo Proctor

PORCENTAJE ESCORIA:	40%
MÉTODO :	A
PESO MARTILLO :	44,48 N
N° DE CAPAS :	5
N° DE GOLPES POR CAPA :	56
ALTURA DE CAIDA DEL MARTILLO :	457,2 mm

- Descripción del molde

Tabla 3.43: Descripción del molde, base + 40% de escoria. Ensayo Proctor

N° de molde	10	2
Peso del molde (g)	6217	7654
Diámetro (cm)	15,232	15,199
Altura (cm)	11,662	11,889
Volumen (cm3)	2125,00	2157,00

- Contenido de humedad

Tabla 3.44: Contenido de humedad, base + 40% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1		2		3		4	
N° Molde	2		10		2		10	
Pm+sh	12.399		12.979		12.977		12.044	
Pc	18,71	18,19	17,84	18,17	18,01	17,76	17,57	17,85
Pc+sh	113,91	104,86	112,82	120,57	118,32	105,70	99,68	119,40
Pc+ss	109,36	101,30	106,92	113,99	110,14	98,75	91,98	109,65
H%	5,02	4,28	6,62	6,87	8,88	8,58	10,35	10,62
PROMEDIO	4,65		6,75		8,73		10,48	

- Densidad húmeda del suelo

K= 1 para g/cm3 y volumen en cm3.

Tabla 3.45: Densidad húmeda del suelo, base + 40% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1	2	3	4
ρm	2,200	2,469	2,468	2,035

- Densidad seca del suelo

Tabla 3.46: Densidad seca del suelo, base + 40% de escoria. Ensayo Proctor

ENSAYO	1	2	3	4
ρd	2,102	2,313	2,270	1,842

- Gráfico peso unitario seco – contenido de humedad

Yd	%H
2,10	4,65
2,31	6,75
2,27	8,73
1,84	10,48
0,00	0,00

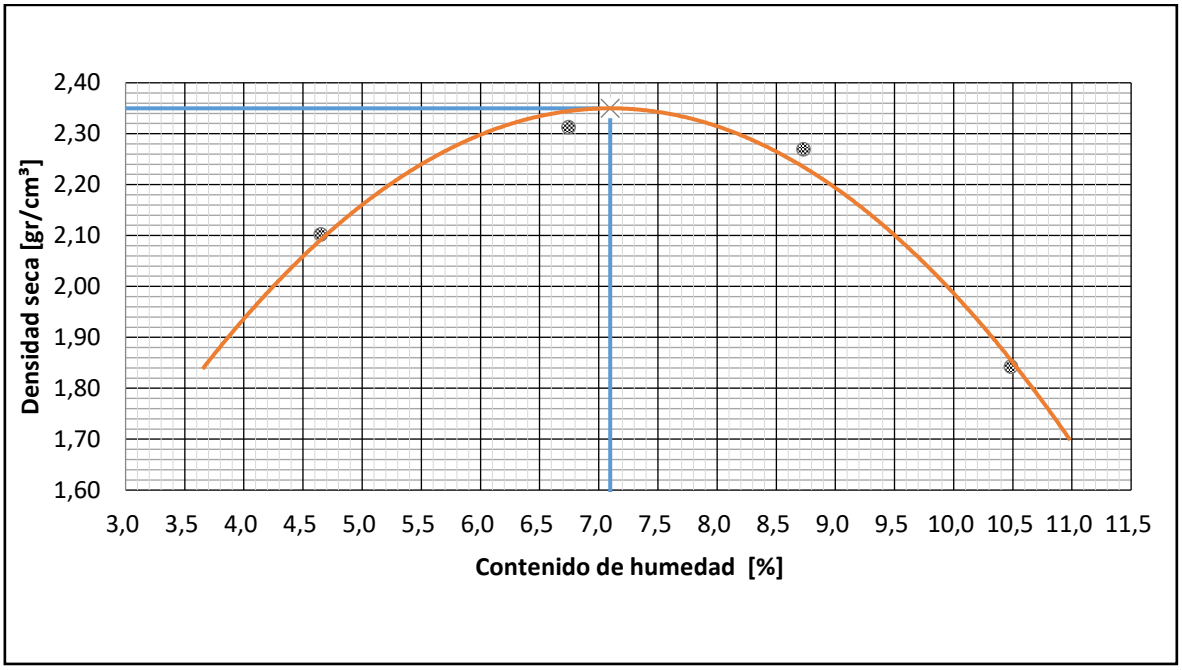


Gráfico 3.8: Peso unitario seco vs contenido de humedad, base + 40% de escoria. Ensayo Proctor

Densidad seca máxima =	2,350 g/cm³
% Humedad óptima =	7,10

3.3.2.2. Análisis de resultados

En los diferentes ensayos de compactación realizados incrementando el porcentaje de escoria en la base granular, se pudo observar que la densidad seca máxima aumenta según se incrementa el porcentaje de escoria, mientras que el porcentaje de humedad óptima disminuye.

3.2.3. Ensayo CBR

El ensayo CBR en la mezcla escoria/base determina el cambio en las propiedades de la base granular, ya sea un incremento o reducción en la resistencia del agregado. Los porcentajes a utilizar son los mismo que fueron comprendido en el ensayo Proctor, pero con un menor número de cilindros. El mismo procedimiento de homogenizado de proctor se ha aplicado para el ensayo de CBR para obtener una mezcla lo más uniforme posible.

El cálculo del CBR se lo ha realizado siguiendo los lineamientos del literal 3.1.7. “Ensayo CBR”.

3.2.3.1. Cálculos

CBR, BASE + 5% DE ESCORIA

- Datos de moldeo

Tabla 3.47: Datos de moldeo, base + 5% Escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	30	29	18M
N° DE GOLPES POR CAPA	56	25	12
Peso molde + suelo húmedo (gr.)	10.999	10.779	11.343
Peso molde (gr.)	5.974	6.287	7.165
Peso suelo húmedo (gr.)	5.025	4.492	4.178
Volumen del molde (cm³)	2.124	2.124	2.132
Densidad húmeda (gr/cm³)	2.366	2.115	1.960

- Contenido de humedad de moldeo

Tabla 3.48: Contenido de humedad de moldeo, base + 5% de escoria. Ensayo CBR

Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	241,81	187,88	281,37	215,53	215,92	203,70
Peso cap. + suelo seco (gr.)	225,53	176,01	260,90	201,01	200,68	190,10
Peso cápsula (gr.)	33,20	32,63	22,72	22,35	22,89	22,63
Contenido de humedad (%)	8,46	8,28	8,59	8,13	8,57	8,12
Humedad promedio (%)	8,37		8,36		8,35	
Densidad seca (gr/cm³)	2.184		1.952		1.809	

- Contenido de humedad posterior a la saturación

Tabla 3.49: Contenido de humedad posterior a la saturación, base + 5% de escoria. Ensayo CBR

Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	157,75	181,41	194,41	220,20	233,42	185,84
Peso cap. + suelo seco (gr.)	147,79	170,60	181,85	206,46	218,55	173,72
Peso cápsula (gr.)	32,65	50,85	33,20	49,96	42,39	33,75
Contenido de humedad (%)	8,65	9,03	8,45	8,78	8,44	8,66
Humedad promedio (%)	8,84		8,61		8,55	

- Porcentaje de absorción luego de la saturación

Tabla 3.50: Porcentaje de absorción luego de la saturación, base + 5% de escoria. Ensayo CBR

Peso molde + suelo húmedo (gr.)	11.027	10.822	11.485
Agua absorbida (gr.)	28	43	142
Agua absorbida (%)	0,56	0,96	3,40

- Porcentaje de esponjamiento

Tabla 3.51: Porcentaje de esponjamiento, base + 5% de escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	30			29			18M		
Tiempo (dias)	LEC DIAL	ESPONJAMIENTO		LEC DIAL	ESPONJAMIENTO		LEC DIAL	ESPONJAMIENTO	
		pulg	%		pulg	%		pulg	%
0	50	------	------	50	------	------	50	------	------
1	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
2	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
3	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
4	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00

- Ensayo de penetración

Tabla 3.52: Ensayo de penetración, base + 5% de escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	30			29			18M		
Penetración (pulgadas)	56 Golpes			25 Golpes			10 Golpes		
	DIAL	Presión lb/plg²	Presión corregida lb/plg²	DIAL	Presión lb/plg²	Presión corregida lb/plg²	DIAL	Presión lb/plg²	Presión corregida lb/plg²
0,000	0	0,00	----	0	0,00	-----	0	0,00	----
0,025	110	33,40	----	79	23,99	-----	16	4,86	----
0,050	270	81,99	----	196	59,52	-----	56	17,01	----
0,075	430	130,58	----	382	116,00	-----	130	39,48	----
0,100	650	197,38	260,00	540	163,98	190,00	200	60,73	100,00
0,200	1537	466,74	520,00	1130	343,14	400,00	510	154,87	200,00
0,300	2427	737,00	----	1820	552,67	-----	855	259,64	----
0,400	3235	982,36	----	2500	759,17	-----	1380	419,06	----
0,500	3235	982,36	----	2500	759,17	-----	1883	571,80	----

- Curva de esfuerzo - penetración

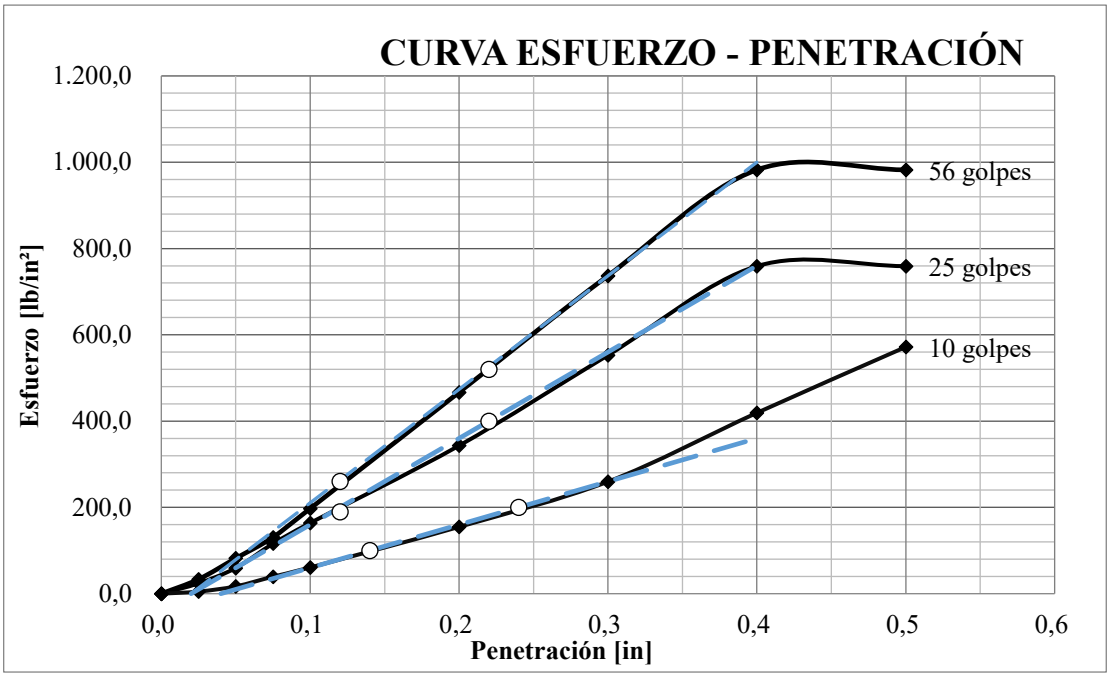


Gráfico 3.9: Esfuerzo vs penetración, base + 5% de escoria. Ensayo CBRCurva de CBR – densidad seca

- Curva de CBR – densidad seca

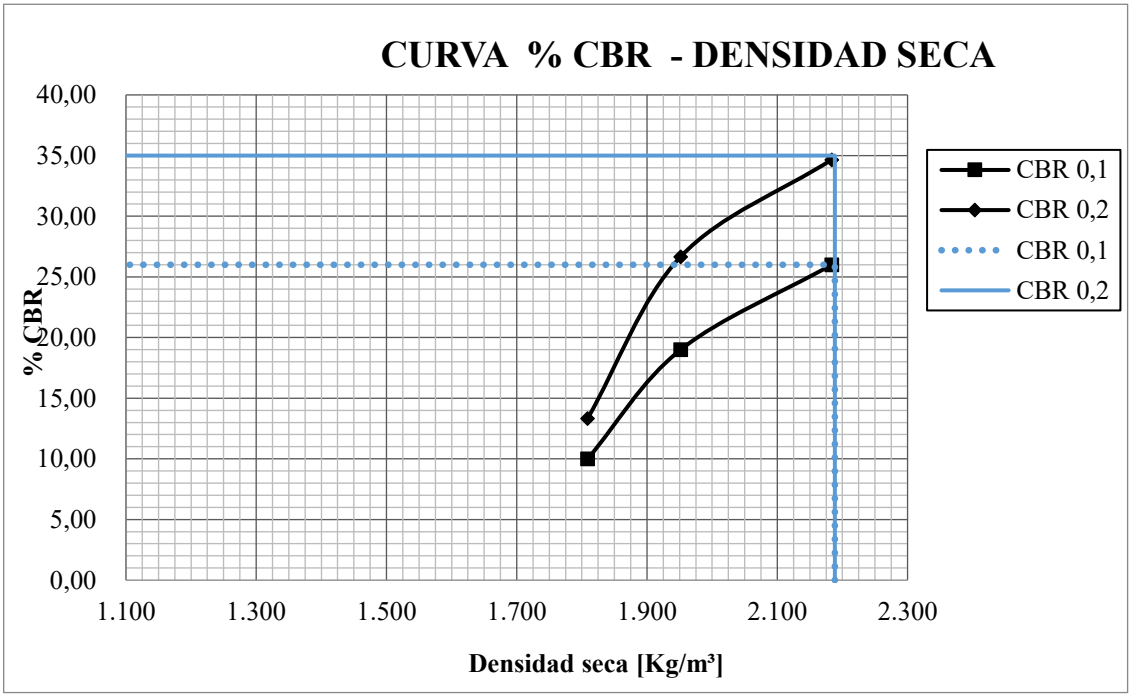


Gráfico 3.10: % CBR vs densidad seca, base + 5% de escoria. Ensayo CBR

- Porcentajes de CBR

Tabla 3.53: Porcentajes de CBR, base + 5% de escoria

Presión lb/plg²	**Valor CBR 0.1"**	**Presión lb/plg²**	**Valor CBR 0.2"**
260,00	26,00	520,00	34,67
190,00	19,00	400,00	26,67
100,00	10,00	200,00	13,33
CBR (100% γseco max.) =	26,00	CBR (100% γseco max.) =	35,00

CBR, BASE + 15% DE ESCORIA

- Datos de moldeo

Tabla 3.54: Datos de moldeo, base + 15% de escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	100	M8	9
N° DE GOLPES POR CAPA	56	25	12
Peso molde + suelo húmedo (gr.)	12.140	12.785	10.533
Peso molde (gr.)	7.026	8.059	6.061
Peso suelo húmedo (gr.)	5.114	4.726	4.472
Volumen del molde (cm³)	2.124	2.124	2.132
Densidad húmeda (gr/cm³)	2.408	2.225	2.098

- Contenido de humedad de moldeo

Tabla 3.55: Contenido de humedad de moldeo, base + 15% de escoria. Ensayo CBR

Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	241,81	187,88	281,37	215,53	215,92	203,70
Peso cap. + suelo seco (gr.)	225,83	176,01	261,10	201,01	200,78	190,10
Peso cápsula (gr.)	33,20	32,63	22,72	22,35	22,89	22,63
Contenido de humedad (%)	8,30	8,28	8,50	8,13	8,51	8,12
Humedad promedio (%)	8,29		8,32		8,32	
Densidad seca (gr/cm³)	2.224		2.054		1.937	

- Contenido de humedad posterior a la saturación

Tabla 3.56: Contenido de humedad posterior a la saturación, base + 15% de escoria. Ensayo CBR

Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	157,75	181,31	194,81	220,10	233,42	185,84
Peso cap. + suelo seco (gr.)	147,69	170,80	181,85	206,53	218,55	173,72
Peso cápsula (gr.)	32,65	50,85	33,20	49,96	42,39	33,75
Contenido de humedad (%)	8,74	8,76	8,72	8,67	8,44	8,66

Humedad promedio (%)	8,75	8,69	8,55

- Porcentaje de absorción luego de la saturación

Tabla 3.57: Porcentaje de absorción luego de la saturación, base + 15% de escoria. Ensayo CBR

Peso molde + suelo húmedo (gr.)	12.186	12.845	10.626
Agua absorbida (gr.)	46	60	93
Agua absorbida (%)	0,90	1,27	2,08

- Porcentaje de esponjamiento

Tabla 3.58: Porcentaje de esponjamiento, base + 15% de escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	**100**			**M8**			**9**		
Tiempo (dias)	**LEC DIAL**	**ESPONJAMIENTO**		**LEC DIAL**	**ESPONJAMIENTO**		**LEC DIAL**	**ESPONJAMIENTO**	
		pulg	**%**		**pulg**	**%**		**pulg**	**%**
0	50	------	------	50	------	------	50	------	------
1	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
2	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
3	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
4	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00

- Ensayo de penetración

Tabla 3.59: Ensayo de penetración, base + 15% de escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	**100**			**M8**			**9**		
Penetración	**56 Golpes**			**25 Golpes**			**10 Golpes**		
(pulgadas)	**DIAL**	**Presión lb/plg²**	**Presión corregida lb/plg²**	**DIAL**	**Presión lb/plg²**	**Presión corregida lb/plg²**	**DIAL**	**Presión lb/plg²**	**Presión corregida lb/plg²**
0,000	0	0,00	----	0	0,00	-----	0	0,00	----
0,025	95	28,85	----	55	16,70	-----	25	7,59	----
0,050	245	74,40	----	132	40,08	-----	55	16,70	----
0,075	450	136,65	----	260	78,95	-----	90	27,33	----
0,100	690	209,53	290,00	437	132,70	265,00	135	41,00	75,00
0,200	1650	501,05	570,00	1240	376,55	530,00	343	104,16	140,00
0,300	2570	780,42	----	2160	655,92	-----	610	185,24	----
0,400	3480	1.056,76	----	3120	947,44	-----	886	269,05	----
0,500	3480	1.056,76	----	3120	947,44	-----	1203	365,31	----

- Curva de esfuerzo - penetración

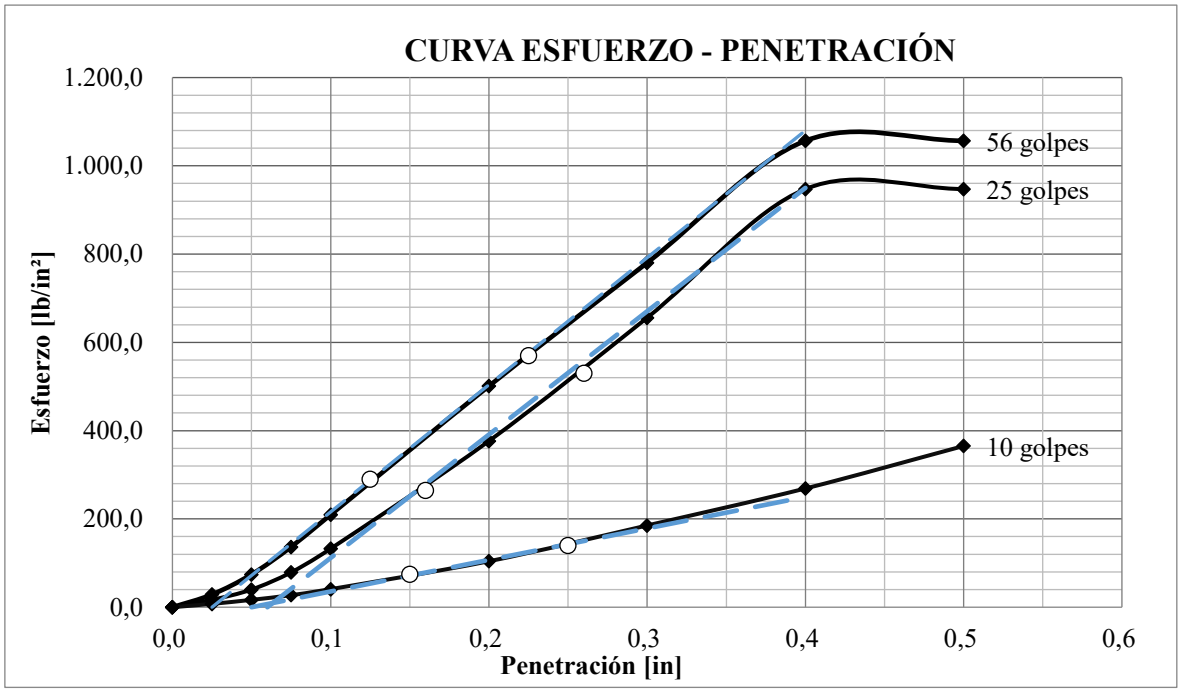


Gráfico 3.11: Esfuerzo vs penetración, base + 15% de escoria. Ensayo CBR

- Curva de CBR – densidad seca

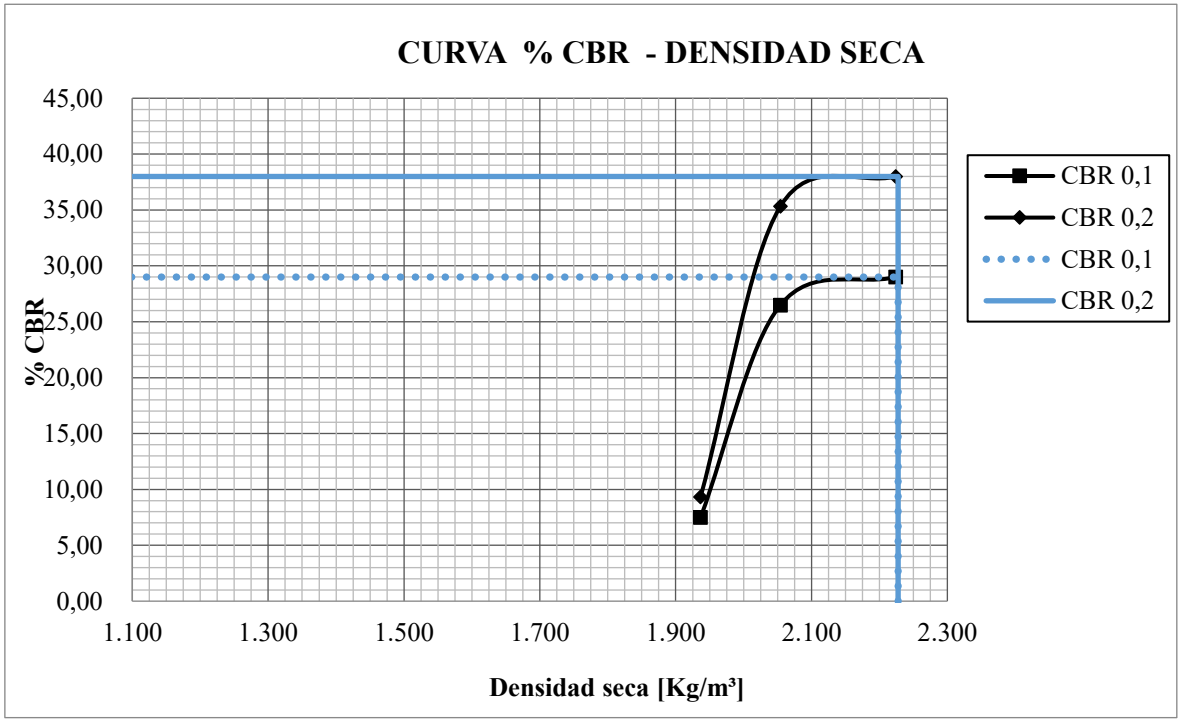


Gráfico 3.12: % CBR vs densidad deca, base + 15% de escoria. Ensayo CBR

- Porcentajes de CBR

Tabla 3.60: Porcentajes de CBR, base + 15% de escoria

Presión lb/plg²	**Valor CBR 0.1"**	**Presión lb/plg²**	**Valor CBR 0.2"**
290,00	29,00	570,00	38,00
265,00	26,50	530,00	35,33
75,00	7,50	140,00	9,33
CBR (100% γseco max.) =	29,00	CBR (100% γseco max.) =	38,00

CBR, BASE + 25% DE ESCORIA

- Datos de moldeo

Tabla 3.61: Datos de moldeo, base + 25% de escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	3	10	7
N° DE GOLPES POR CAPA	56	25	12
Peso molde + suelo húmedo (gr.)	11.261	11.036	9.890
Peso molde (gr.)	6.080	6.246	5.511
Peso suelo húmedo (gr.)	5.181	4.790	4.379
Volumen del molde (cm³)	2.124	2.124	2.132
Densidad húmeda (gr/cm³)	2.440	2.255	2.054

- Contenido de humedad de moldeo

Tabla 3.62: Contenido de humedad de moldeo, base + 25% de escoria. Ensayo CBR

Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	250,12	269,07	229,19	250,16	191,85	185,82
Peso cap. + suelo seco (gr.)	234,62	252,02	215,08	235,93	179,95	174,70
Peso cápsula (gr.)	32,67	32,65	33,01	50,80	32,62	22,56
Contenido de humedad (%)	7,68	7,77	7,75	7,69	8,08	7,31
Humedad promedio (%)	7,72		7,72		7,69	
Densidad seca (gr/cm³)	2.265		2.094		1.907	

- Contenido de humedad posterior a la saturación

Tabla 3.63: Contenido de humedad posterior a la saturación, base + 25% de escoria. Ensayo CBR

Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	170,88	232,02	178,46	181,56	172,72	182,27
Peso cap. + suelo seco (gr.)	160,04	218,52	167,82	169,58	160,87	171,27
Peso cápsula (gr.)	22,40	49,70	33,32	22,57	22,76	32,67
Contenido de humedad (%)	7,88	8,00	7,91	8,15	8,58	7,94

Humedad promedio (%)	7,94	8,03	8,26

- Porcentaje de absorción luego de la saturación

Tabla 3.64: Porcentaje de absorción luego de la saturación, base + 25% de escoria. Ensayo CBR

Peso molde + suelo húmedo (gr.)	11.289	11.079	10.032
Agua absorbida (gr.)	28	43	142
Agua absorbida (%)	0,54	0,90	3,24

- Porcentaje de esponjamiento

Tabla 3.65: Porcentaje de esponjamiento, base + 25% de escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	**3**			**10**			**7**		
Tiempo (dias)	**LEC DIAL**	**ESPONJAMIENTO**		**LEC DIAL**	**ESPONJAMIENTO**		**LEC DIAL**	**ESPONJAMIENTO**	
		pulg	**%**		**pulg**	**%**		**pulg**	**%**
0	50	------	------	50	------	------	50	------	------
1	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
2	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
3	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
4	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00

- Ensayo de penetración

Tabla 3.66: Ensayo de penetración, base + 25% de escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	**3**			**10**			**7**		
Penetración	**56 Golpes**			**25 Golpes**			**10 Golpes**		
(pulgadas)	**DIAL**	**Presión lb/plg²**	**Presión corregida lb/plg²**	**DIAL**	**Presión lb/plg²**	**Presión corregida lb/plg²**	**DIAL**	**Presión lb/plg²**	**Presión corregida lb/plg²**
0,000	0	0,00	----	0	0,00	-----	0	0,00	----
0,025	111	33,71	----	70	21,26	-----	16	4,86	----
0,050	310	94,14	----	200	60,73	-----	35	10,63	----
0,075	511	155,17	----	400	121,47	-----	53	16,09	----
0,100	735	223,20	300,00	590	179,16	270,00	76	23,08	45,00
0,200	1740	528,38	600,00	1500	455,50	540,00	200	60,73	80,00
0,300	2715	824,46	----	2284	693,57	-----	320	97,17	----
0,400	2715	824,46	----	2284	693,57	-----	499	151,53	----
0,500	2715	824,46	----	2284	693,57	-----	653	198,29	----

- Curva de esfuerzo - penetración

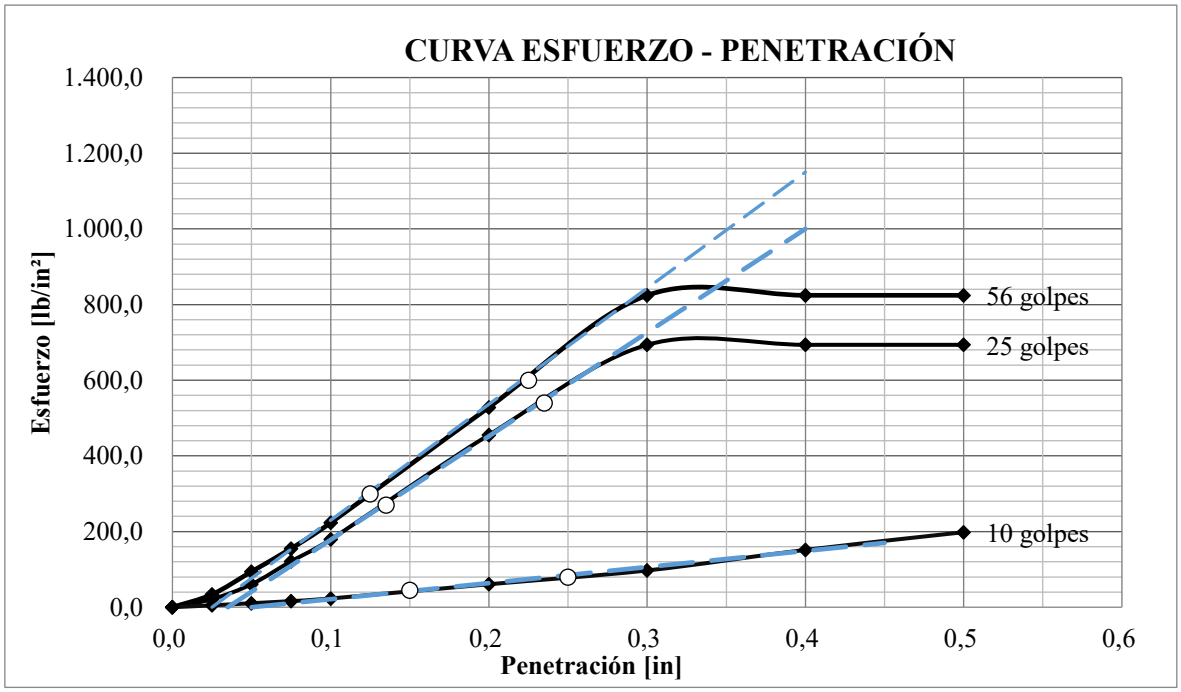


Gráfico 3.13: Esfuerzo vs penetración, base + 25% de escoria. Ensayo CBR

- Curva de CBR – densidad seca

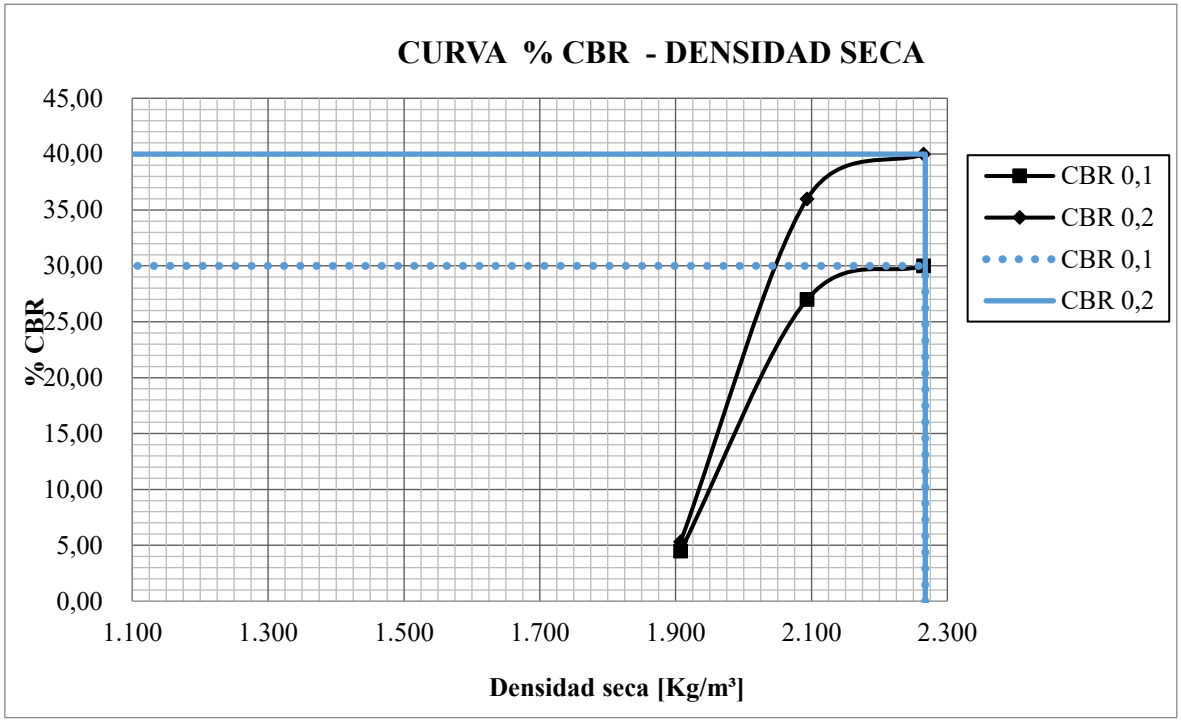


Gráfico 3.14: % CBR vs densidad seca, base + 25% de escoria. Ensayo CBR

- Porcentajes de CBR

Tabla 3.67: Porcentajes de CBR, base + 25% de escoria

Presión lb/plg²	**Valor CBR 0.1"**	**Presión lb/plg²**	**Valor CBR 0.2"**
300,00	30,00	600,00	40,00
270,00	27,00	540,00	36,00
45,00	4,50	80,00	5,33
CBR (100% γseco max.) =	30,00	CBR (100% γseco max.) =	40,00

CBR, BASE + 35% DE ESCORIA

- Datos de moldeo

Tabla 3.68: Datos de moldeo, base + 35% de escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	6	Z5	M4
N° DE GOLPES POR CAPA	56	25	12
Peso molde + suelo húmedo (gr.)	11.459	11.166	12.352
Peso molde (gr.)	6.266	6.654	8.073
Peso suelo húmedo (gr.)	5.193	4.512	4.279
Volumen del molde (cm³)	2.124	2.124	2.132
Densidad húmeda (gr/cm³)	2.445	2.124	2.007

- Contenido de humedad de moldeo

Tabla 3.69: Contenido de humedad de moldeo, base + 35% de escoria. Ensayo CBR

Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	232,59	252,93	275,01	257,83	264,13	246,68
Peso cap. + suelo seco (gr.)	219,42	238,03	258,99	242,75	248,78	232,38
Peso cápsula (gr.)	33,34	32,85	32,45	33,99	33,39	33,53
Contenido de humedad (%)	7,08	7,26	7,07	7,22	7,13	7,19
Humedad promedio (%)	7,17		7,15		7,16	
Densidad seca (gr/cm³)	2.282		1.983		1.873	

- Contenido de humedad posterior a la saturación

Tabla 3.70: Contenido de humedad posterior a la saturación, base + 35% de escoria. Ensayo CBR

Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	212,23	229,76	273,03	169,95	184,20	181,21
Peso cap. + suelo seco (gr.)	199,06	216,17	255,24	159,72	173,08	169,84
Peso cápsula (gr.)	32,62	33,54	33,01	34,04	32,95	32,94
Contenido de Humedad (%)	7,91	7,44	8,01	8,14	7,94	8,31

Humedad promedio (%)	7,68	8,07	8,12

- Porcentaje de absorción luego de la saturación

Tabla 3.71: Porcentaje de absorción luego de la saturación, base + 35% de escoria. Ensayo CBR

Peso molde + suelo húmedo (gr.)	11.511	11.262	12.467
Agua absorbida (gr.)	52	96	115
Agua absorbida (%)	1,00	2,13	2,69

- Porcentaje de esponjamiento

Tabla 3.72: Porcentaje de esponjamiento, base + 35% de escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	**6**			**Z5**			**M4**		
Tiempo (dias)	**LEC DIAL**	**ESPONJAMIENTO**		**LEC DIAL**	**ESPONJAMIENTO**		**LEC DIAL**	**ESPONJAMIENTO**	
		pulg	**%**		**pulg**	**%**		**pulg**	**%**
0	50	------	------	50	------	------	50	------	------
1	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
2	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
3	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
4	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00

- Ensayo de penetración

Tabla 3.73: Ensayo de penetración, base + 35% de escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	**6**			**Z5**			**M4**		
Penetración	**56 Golpes**			**25 Golpes**			**10 Golpes**		
(pulgadas)	**DIAL**	**Presión lb/plg²**	**Presión corregida lb/plg²**	**DIAL**	**Presión lb/plg²**	**Presión corregida lb/plg²**	**DIAL**	**Presión lb/plg²**	**Presión corregida lb/plg²**
0,000	0	0,00	----	0	0,00	-----	0	0,00	----
0,025	190	57,70	----	88	26,72	-----	45	13,67	----
0,050	390	118,43	----	230	69,84	-----	85	25,81	----
0,075	590	179,16	----	380	115,39	-----	135	41,00	----
0,100	850	258,12	330,00	550	167,02	270,00	227	68,93	110,00
0,200	1900	576,97	670,00	1400	425,13	560,00	565	171,57	210,00
0,300	2900	880,63	----	2300	698,43	-----	916	278,16	----
0,400	2900	880,63	----	2300	698,43	-----	1260	382,62	----
0,500	2900	880,63	----	2300	698,43	-----	1645	499,53	----

- Curva de esfuerzo - penetración

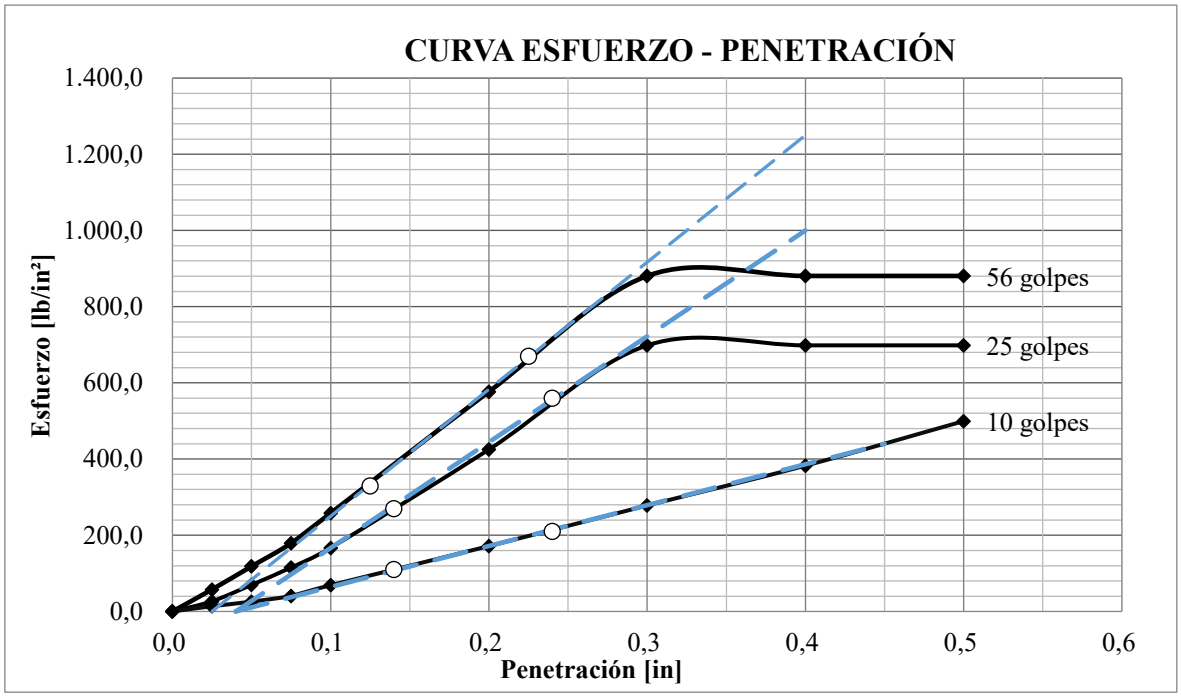


Gráfico 3.15: Esfuerzo vs penetración, base + 35% de escoria. Ensayo CBR

- Curva de CBR – densidad seca

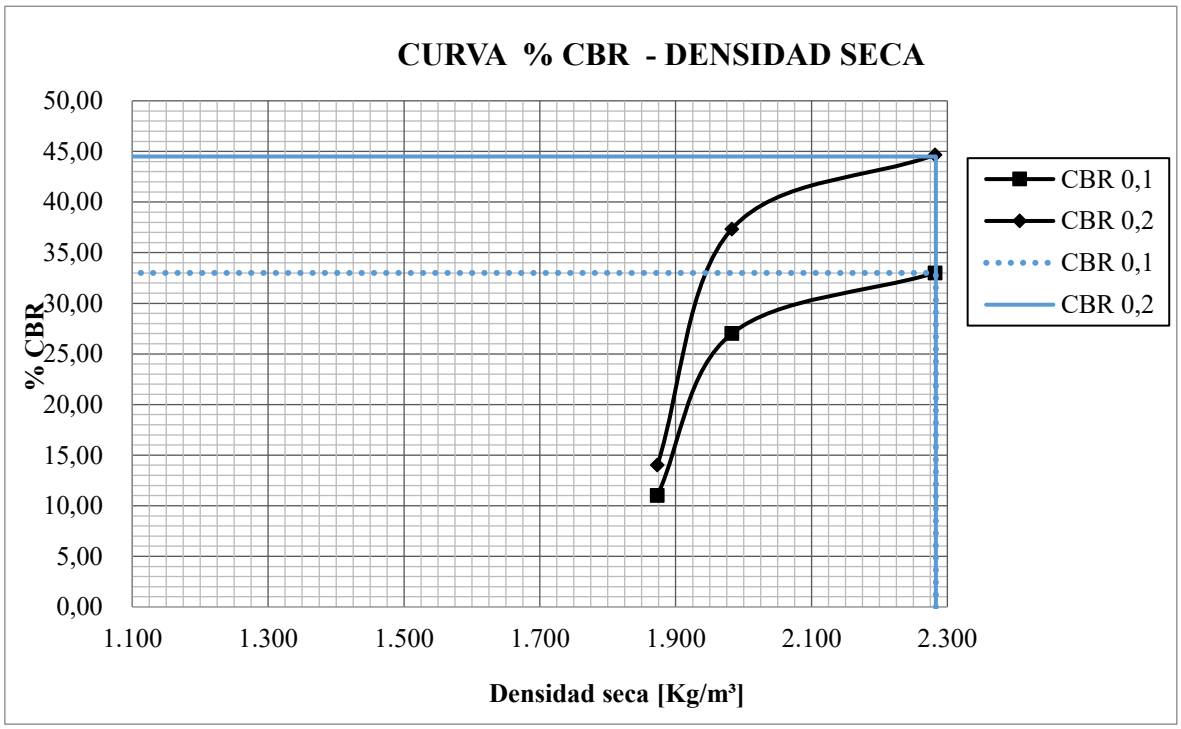


Gráfico 3.16: % CBR vs densidad seca, base + 35% de escoria. Ensayo CBR

- Porcentajes de CBR

Tabla 3.74: Porcentajes de CBR, base + 35% de escoria

Presión lb/plg²	**Valor CBR 0.1"**	**Presión lb/plg²**	**Valor CBR 0.2"**
330,00	33,00	670,00	44,67
270,00	27,00	560,00	37,33
110,00	11,00	210,00	14,00
CBR (100% γseco max.) =	33,00	CBR (100% γseco max.) =	44,50

CBR, BASE + 40% DE ESCORIA

- Datos de moldeo

Tabla 3.75: Datos de moldeo, base + 40% de escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	5	28	21
N° DE GOLPES POR CAPA	56	25	12
Peso molde + suelo húmedo (gr.)	11.495	10.776	10.816
Peso molde (gr.)	6.163	5.844	6.239
Peso suelo húmedo (gr.)	5.332	4.932	4.577
Volumen del molde (cm³)	2.124	2.124	2.132
Densidad húmeda (gr/cm³)	2.511	2.322	2.147

- Contenido de humedad de moldeo

Tabla 3.76: Contenido de humedad de moldeo, base + 40% de escoria. Ensayo CBR

Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	243,26	192,32	272,57	252,71	293,13	253,56
Peso cap. + suelo seco (gr.)	229,26	181,87	257,14	237,80	275,79	239,20
Peso cápsula (gr.)	33,32	32,43	33,39	33,74	32,94	33,52
Contenido de humedad (%)	7,15	6,99	6,90	7,31	7,14	6,98
Humedad promedio (%)	7,07		7,10		7,06	
Densidad seca (gr/cm³)	2.345		2.168		2.005	

- Contenido de humedad posterior a la saturación

Tabla 3.77: Contenido de humedad posterior a la saturación, base + 40% de escoria. Ensayo CBR

Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	208,39	204,66	180,89	242,22	198,69	193,77
Peso cap. + suelo seco (gr.)	194,68	192,12	170,62	228,43	187,41	182,45
Peso cápsula (gr.)	33,51	33,17	33,35	33,80	32,91	33,28
Contenido de humedad (%)	8,51	7,89	7,48	7,09	7,30	7,59

Humedad promedio (%)	8,20	7,28	7,44

- Porcentaje de absorción luego de la saturación

Tabla 3.78: Porcentaje de absorción luego de la saturación, base + 40% de escoria. Ensayo CBR

Peso molde + suelo húmedo (gr.)	11.916	10.857	11.013
Agua absorbida (gr.)	421	81	197
Agua absorbida (%)	7,90	1,64	4,30

- Porcentaje de esponjamiento

Tabla 3.79: Porcentaje de esponjamiento, base + 40% de escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	**5**			**28**			**21**		
Tiempo (dias)	**LEC DIAL**	**ESPONJAMIENTO**		**LEC DIAL**	**ESPONJAMIENTO**		**LEC DIAL**	**ESPONJAMIENTO**	
		pulg	**%**		**pulg**	**%**		**pulg**	**%**
0	50	------	------	50	------	------	50	------	------
1	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
2	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
3	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00
4	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00	50	0,00	0,00

- Ensayo de penetración

Tabla 3.80: Ensayo de penetración, base + 40% de escoria. Ensayo CBR

MOLDES N°	**5**			**28**			**21**		
Penetración	**56 Golpes**			**25 Golpes**			**10 Golpes**		
(pulgadas)	**DIAL**	**Presión lb/plg²**	**Presión corregida lb/plg²**	**DIAL**	**Presión lb/plg²**	**Presión corregida lb/plg²**	**DIAL**	**Presión lb/plg²**	**Presión corregida lb/plg²**
0,000	0	0,00	----	0	0,00	-----	0	0,00	----
0,025	290	88,06	----	188	57,09	-----	36	10,93	----
0,050	610	185,24	----	410	124,50	-----	79	23,99	----
0,075	890	270,26	----	680	206,49	-----	108	32,80	----
0,100	1150	349,22	390,00	895	271,78	300,00	175	53,14	70,00
0,200	2375	721,21	760,00	1950	592,15	610,00	426	129,36	140,00
0,300	3500	1.062,83	----	2895	879,12	-----	699	212,26	----
0,400	3500	1.062,83	----	3100	941,37	-----	870	264,19	----
0,500	3500	1.062,83	----	3100	941,37	-----	1070	324,92	----

- Curva de esfuerzo - penetración

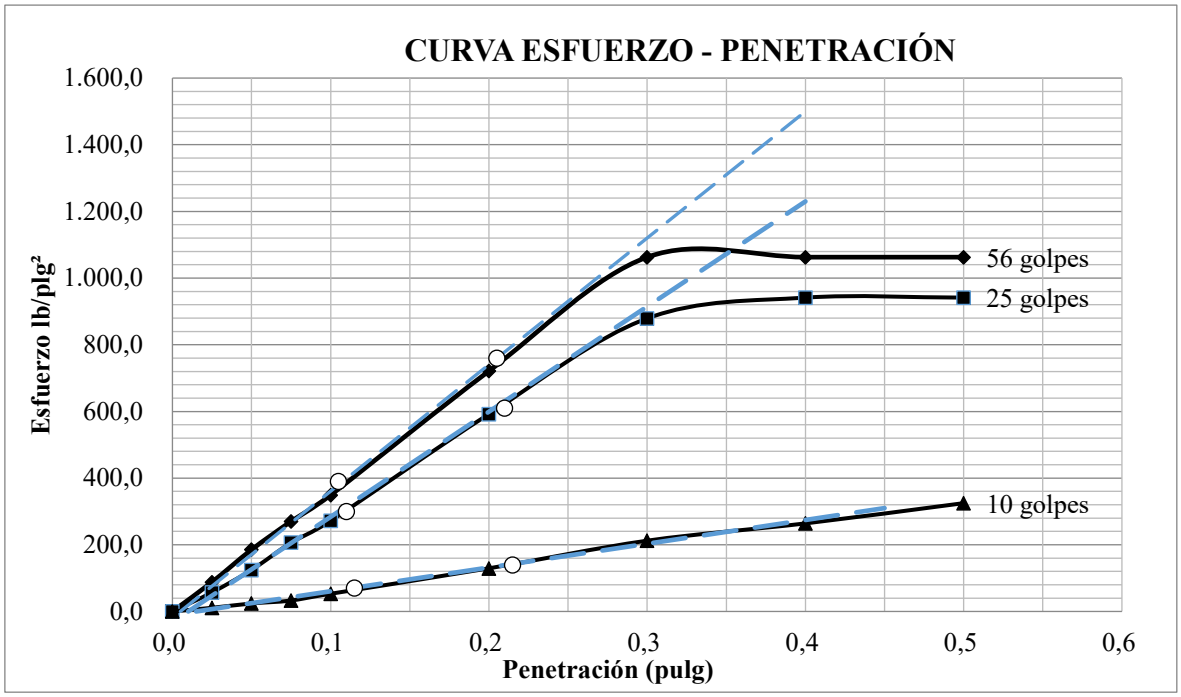


Gráfico 3.17: Esfuerzo vs penetración, base + 40% de escoria. Ensayo CBR

- Curva de CBR – densidad seca

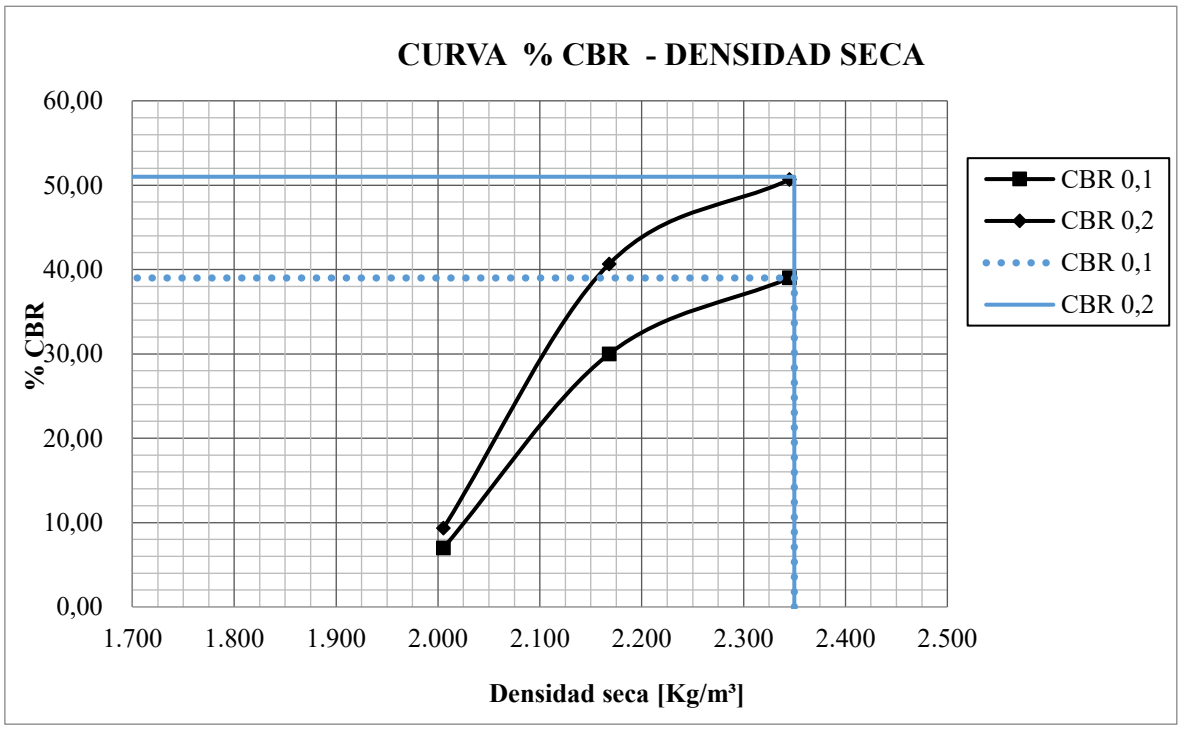


Gráfico 3.18: % CBR vs densidad seca, base + 40% de escoria. Ensayo CBR

- Porcentajes de CBR

Tabla 3.81: Porcentajes de CBR, base + 40% Escoria

Presión lb/plg²	Valor CBR 0.1"	Presión lb/plg²	Valor CBR 0.2"
390,00	39,00	760,00	50,67
300,00	30,00	610,00	40,67
70,00	7,00	140,00	9,33
CBR (100% γseco max.) =	39,00	CBR (100% γseco max.) =	51,00

- *Análisis de resultados*

El Manual del MOP (2002) en el capítulo IV propone un valor mínimo de CBR de 80 para bases granulares. La base utilizada sin la incorporación de escoria presentó un valor de CBR de 27, lo cual no se encuentra en el límite mínimo sugerido por el MOP. Posterior a esto, el CBR de la base granular modificada con escoria aumentó conforme se incrementó su porcentaje, a excepción de la muestra estabilizada con 5% de escoria en donde se observa una minúscula disminución. Por otra parte, el peso específico de las muestras también aumentó de valor en función del porcentaje de escoria añadido.

El mayor porcentaje de escoria que se utilizó corresponde al 40%. El CBR de la muestra ensayada con dicho porcentaje alcanzó un valor de 39 y 51 para valores de penetración de 0.1" y 0.2" respectivamente, incrementando así su resistencia en aproximadamente un 40% con respecto al valor inicial.

El gráfico 3.19 muestra la tendencia que toma el valor de CBR según el porcentaje de escoria utilizado.

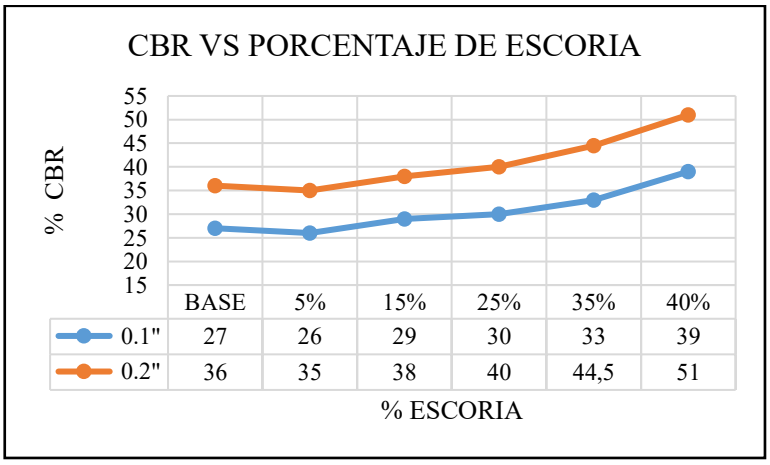


Gráfico 3.19: Gráfica de CBR vs porcentaje de escoria

3.4. ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL

El gráfico 3.19 muestra una tendencia alcista de los resultados de CBR obtenidos en la base granular mezclada con escoria. Se puede observar que el máximo valor de CBR se obtuvo con el mayor de los 5 porcentajes de escoria añadidos, lo cual inicialmente conduciría a elegir a este porcentaje como el óptimo gracias a su aporte en el incremento del CBR. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta otros parámetros que limitarían la utilización de altas proporciones de escoria en la base granular. Dichos parámetros se encuentran relacionados principalmente con la elevación de costos en el rubro de transporte de escoria y la afectación al medio ambiente por generación de lixiviados.

Uno de los rubros de mayor incidencia en la construcción de vías es el rubro de transporte, por este motivo, la incorporación de altos porcentajes de escoria incrementaría el costo total de proyectos que requieran del traslado de este material a grandes distancias. El costo de adquisición de escoria es similar al costo del material granular, por tal razón no se menciona este rubro como una desventaja.

Con el uso de escoria como material de construcción de carreteras, se aporta con la reducción en la acumulación de este residuo siderúrgico en las instalaciones de las plantas productoras de acero y depósitos. Además, se ahorra la energía empleada en la extracción de agregados pétreos producto de la minería y, por ende, se reduce el impacto ambiental que esta actividad provoca. Sin embargo, al incrementar excesivamente la cantidad de escoria, la base granular podría presentar varios problemas como: lixiviación, pérdida de plasticidad por la reducción de áridos finos, corrosión de superficies metálicas por su alto contenido de hierro, la transformación de silicatos bicálcicos e incremento de volumen a causa de la hidratación de cal y magnesia libre.

Con respecto a los valores de CBR obtenidos ciertamente la tendencia muestra un aumento en este valor en función del porcentaje de escoria que se utilice, pero se puede observar un incremento bajo de CBR entre los porcentajes de 15% y 25% de escoria, y por tratarse de un material de mejoramiento y mas no de reemplazo y tomando en cuenta las consideraciones realizadas, se establece un porcentaje óptimo del 25% es escoria.

CAPÍTULO 4 : CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS

En este capítulo se concluye acerca de los resultados que se han obtenido durante la realización de la investigación. Se presenta también recomendaciones en base al estudio, bibliografía y anexos.

4.1. CONCLUSIONES

- Al observar las curvas de compactación para los diferentes porcentajes de escoria, se puede concluir que la densidad seca óptima aumenta conforme se incrementa el porcentaje de escoria, pero la humedad óptima no tiene la misma tendencia ya que ésta disminuye.
- Al agregar 5% de escoria de acero se obtienen resultados de CBR ligeramente menores a los obtenidos en la base sin adición de escoria, por lo que se podría concluir que esta reducción ocurre por la dispersión de las partículas de escoria debido a su bajo porcentaje en relación de la muestra total ensayada, lo cual ocasionaría que no se manifieste un cambio notable. Esto no sucede con porcentajes mayores de escoria ya que se obtiene una mejor compresibilidad de las partículas logrando que los vacíos disminuyan y aumente así el CBR.
- Se establece como porcentaje óptimo de escoria un valor máximo de 25%, ya que porcentajes mayores incrementarían el rubro de transporte en proyectos alejados a la planta siderúrgica. Además, el proceso de lixiviación del material perjudicaría la calidad del agua circundante si éste es utilizado en grandes cantidades.
- Con los resultados obtenidos se concluye que la escoria en análisis es un buen estabilizante para ser utilizado como material de mejoramiento de bases granulares.
- Mediante la incorporación de escoria, se ha logrado incrementar la resistencia de la base en aproximadamente un 40% con respecto a sus condiciones originales. Sin embargo, no se ha logrado cumplir con las especificaciones mínimas de la normativa debido a las deficientes propiedades mecánicas que presenta la base en estudio. Por tal razón, se podría concluir que para logra con dichas especificaciones este procedimiento debe ser aplicado para el mejoramiento de bases que presenten una

deficiencia de alrededor del 40% con respecto a los valores mínimos de CBR que debe cumplir una base granular.

- En base a la investigación realizada, se ha podido conocer que los resultados de los ensayos realizados en escoria procedente de distintas plantas de acería o inclusive de la misma, pero de diferentes coladas; pueden variar notablemente con respecto a los resultados expuestos en el presente trabajo.
- De acuerdo a los registros de expansibilidad realizados en el ensayo CBR, se ha podido determinar que las muestras sumergidas durante 4 días no presentaron un proceso de expansión. Sin embargo, es importante recalcar que este resultado no es un indicador de expansión nula del material analizado, ya que el periodo de contacto con el agua fue bajo en comparación con el tiempo en que la estructura estará expuesta a distintas condiciones de humedad.
- La escoria de acero es un material que podría aportar con el mejoramiento de otras propiedades deficientes de los agregados pétreos, ya que gracias a ensayos adicionales se ha podido conocer que por cada 10 % de escoria añadida se reduce el desgaste a la abrasión de la base en aproximadamente 4%, lo cual permitiría mejorar dicha propiedad en áridos gruesos al ser mezclados con escoria.

4.2. RECOMENDACIONES

- La granulometría de la escoria utilizada presentó un alto porcentaje de áridos gruesos, lo cual afectó considerablemente el grado de acomodo de las partículas al realizar los ensayos de compactación y CBR. Por lo cual, se recomienda realizar una conformación granulométrica que cumpla con los requerimientos de la normativa, de modo que se pueda garantizar un adecuado porcentaje de partículas gruesas y finas.
- A nivel mundial existe cierta normativa que controla el contenido máximo de cal y magnesia libre utilizado en la producción de acero, ya que al hidratarse estos elementos incrementan el volumen de la escoria. Por lo cual, se recomienda controlar este parámetro para evitar problemas futuros.
- Debido al alto contenido de hierro que presenta la escoria de acero, no sería práctico su utilización en contacto con superficies metálicas ya que esto ocasionaría la corrosión de este material.

4.3. BIBLIOGRAFÍA

Albornoz, A. (2008). *La minería en el Ecuador: Contexto, Problemática y Perspectivas* (primera edición ed.). Quito.

Albuja, I. (2014). Escorias de Acero. Aloag, Pichincha, Ecuador.

Amstrong, J. M. (2012). Minas y Canteras. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO.

ASTM D1557-12. (2012). Laboratory Compaction Characteristics of soil using Modified Effort.

Bakker, R. (1998). Initial Perido. Report of the technique Committe. RILEM 60-CSC-Corrosion of Steel in Concrete.

Baverman, C. (1996). Development of Methos to Characterise Solid Wastes and to Determine Factors which Influence their long-term leachability. Stockolm.

Bonnot, J. (1980). Utilisation du Laitier Granulé en Construction Routiere. Rapport Final LCPC. Luxembourg.

BOWLES, J. (1981). *MANUAL DE LABORATORIO DE SUELOS.* MÉXICO: McGRAW-HILL BOOK.

Cabanillas , R. (2015). *Propiedades de los agregados.* Noviembre.

Collins, R., & Ciesielski, S. (1994). *Recycling and Use of Waste Materials and By Products in Highway Construction. National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 199.* Washington DC.

Consejo Metropolitano de Quito. (2014). *Ordenanza Metropolitana No. 0557.* Quito.

Cuásquer , J., & Altamirano, S. (2015). Evaluación del Uso de Escorias de Acero en la Producción de Hormigón. Carrera de Ingeniería Civil. UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS. Sangolquí.

Dobrowolsky, J., & Waddell, J. (2001). *MANUAL DE LA CONSTRUCCIÓN CON CONCRETO.* México: McGraw-Hill.

Domínguez, A. (1985). *Tegnología de los metales II.* La Habana: La Habana.

Drissen, P., & Arlt, K. (2000). Entstehung Feinkorniger Pfannenschalchen. Report des Forschunsinstitus. Pag. 12-16. Germany.

Farmoso, A. (1994). Use of Blast Furnace and Steelwork Slags as Fertilizer. *EC Conference RTD on Industrial technologies*, Pag. 71-72.

Feldman, R. (1981). Tufa Precipitation and Its Effect on Drainage of Highways. KENT STATE UNIVERSITY.

Geyer, R. (1997). The Uncertain Union. Vermont.

Google Earth. (2018). Recuperado el 10 de Octubre de 2018, de earth.google.es

Habashi, F. (1986). Principles of Extractive Metallurgy. London.

Hidalgo, A., & Alonso, C. (2005). *Evaluación del impacto medioambiental debido a la lixiviación de productos de base cemento. Jornadas de investigación en Construcción.*

Huerta, J. M. (2014). Horno de Arco Eléctrico.

Hullsstar. (7 de Noviembre de 2012). *Wordpress*. Obtenido de https://hullsstar.wordpress.com/2012/11/07/aceros-extraduros/

Jahrbuch, S. (1998). Stahl-Eisen Verlag.

Jiménez, B. A. (2012). *Impactos Paisajísticos y Sensibilidad Social, derivados de la explotación minera en la parroquia San Antonio de Pichincha. Caso: Comunidad "Tanlahua.* Trabajo de Titulación de Pregrado, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR, Quito.

Kneller, W., Gupta, M., & Borkowski, D. (1994). Determination of Original Free Lime Content of Weathered Iron and Steel Slags by Thermogravimetric Analysis. Washington DC.

López, M. (2002). Uso de la Escoria para Mejoramiento de Bases y Subbases Granulares. UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA. Bogotá.

Losañes, M. (2007). Aprovechamiento Integral de Escorias Blancas y Negras de Acería Eléctrica en Construcción y Obra Civil. Tesis Doctoral. UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO. España.

Luxan, S. (1995). Auge y Crisis de los Productos de Exportación en el Primer Tercio del Siglo XX. Canarias.

Martinez, L. (2005). FCE - Fondo de Cultura Económica. *3a. ed*. México.

Mills, K., & Keene, B. (s.f.). Physico-Chemical, Properties of BOS alags. final report NPL. European Commission.

MOP. (2002). Manual del Ministerio de Obras Públicas del Ecuador. Quito.

Mora, A. (2016). La Minería Artesanal en el Ecuador y su Legislación. Tesis Doctoral. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL.

Nicolalde, S. (2008). Utilización de Escorias y Polvos de Acería en la Producción de Bloques y Adoquines. ESCUELA POLITÉNICA NACIONAL. Quito.

NOVACERO. (2018). Nuestra Historia. doi:https://www.novacero.comla-empresa/nuestra-historia.html.

NTE INEN 0863. (2011). *Áridos. Determinación de la solidez de los áridos mediante el uso de sulfato de sodio o de sulfato de magnesio.*

NTE INEN 0696. (2011). *Análisis granulométrico en los áridos, finos y grueso.* Quito.

NTE INEN 0857. (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.* Quito.

NTE INEN 0860. (2011). *Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles.* Quito.

NTE INEN 695. (2010). *Áridos Muestreo.*

Ortega, V. (2011). Aprovechamiento de Escorias Blancas (LFS) y Negras (EAFS) de Acería Eléctrica en la estabilización de Suelos y en Capas de Firmes de Caminos Rurales. Tesis Doctoral. UNIVERSIDAD DE BURGOS ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR. España.

Otegi, K. (2012). *Estudio del impacto ambiental por lixiviación de la escoria de acería en capas granulares. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA.* España.

Palacios, W. (s.f.). Estudio Ambiental Mina Tanlahua. Recuperado el 16 de Octubre de 2018, de https://maepichincha.files.wordpress.com/2015/09/cap-5-aa-tanlahua.pdf.

PCA. Diseño de Mezclas de Hormigón, Portland Cement Association. (2004). Estados Unidos.

Pérez, F. (2008). Influencia en la Huella Hídrica en la fabricación de Hormigón con Escoria de Acero y Polvo de Humo. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE INGENIERÍA MECÁNICA.

Portilla Yandun, F. P., & Pillajo De la Cruz, A. D. (2001). *Determinación del CBR de laboratorio en suelos granulares y su correlación con el dcp para la aplicación en el diseño de pavimentos de caminos vecinales.* Quito.

Sammut, J., White, I., & Melville, M. (1996). *Acidification of an estuarine tributary in eastern Australia due to drainage of acid sulfate soils. Marine and Freshwater Research.*

SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO. (2017 de Marzo de 2017). *SGM*. Obtenido de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Rocas-igneas.html

UNE 36-004-78. (1978). Aceros. Madrid.

UNE-EN 933-8:2000. (2000). Equivalente de Arena.

Vargas Vallejo, S., & Morla Cordero, J. (2009). *Determinación del valor del ensayo CBR mediante métodos alternativos.* Quito.

Villavicencio, C. (2014). Diseño y optimización del Sistema de Producción: Proceso de Fabricación de la Varilla de Acero de la Empresa ANDEC S.A. Tesis Ingeniería. UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL.

4.4. ANEXOS

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: ASTM D2419-14
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Granulometría de la base granular

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/08/24

GRANULOMETRIA BASE GRANULAR (AGREGADOS GRUESOS)

MALLA N°	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL (Kg)	MASA RETENIDA ACUMULADA (Kg)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
2 "	51	0,00	0,00	0,00%	100%
1 1/2 "	38,1	0,33	0,33	1,26%	98,74%
1 "	25,4	3,11	3,44	12,05%	87,95%
3/4 "	19	3,19	6,63	12,36%	87,64%
1/2 "	12,7	5,38	12,01	20,85%	79,15%
3/8 "	9,51	3,59	15,60	13,91%	86,09%
4	4,78	5,13	20,73	19,88%	80,12%
PASA N°4		5,08	25,81	19,69%	80,31%
SUMA		25,81		100,00%	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: NTE INEN 0696
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Granulometría de la base granular

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/08/25

GRANULOMETRIA BASE GRANULAR (AGREGADOS FINOS)

MALLA N°	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL (gr)	MASA RETENIDA ACUMULADA (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
8	2,36	0,00	0,00	0,00%	100%
10	2,00	203,60	203,60	35,24%	64,76%
40	0,42	241,10	444,70	41,73%	58,27%
200	0,074	133,00	577,70	23,02%	76,98%
BANDEJA		0,10		0,02%	99,98%
SUMA		577,80		100,00%	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: NTE INEN 0696
Planta Siderúrgica: Navacero
Descripción: Granulometría Escoria

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/08/26

GRANULOMETRIA ESCORIA (AGREGADOS GRUESOS)

MALLA N°	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL (Kg)	MASA RETENIDA ACUMULADA (Kg)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
2 "	51	0,00	0,00	0,00%	100%
1 1/2 "	58,1	1,10	1,10	4,26%	95,74%
1 "	25,4	1,58	2,68	6,12%	93,88%
3/4 "	19	1,41	4,09	5,46%	94,54%
1/2 "	12,7	3,30	7,39	12,79%	87,21%
3/8 "	9,51	2,35	9,74	9,11%	90,89%
4	4,78	6,61	16,35	25,62%	74,38%
PASA N°4		8,10	24,45	31,39%	68,61%
SUMA		24,45		94,75%	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: NTE INEN 0696
Planta Siderúrgica: Navacero
Descripción: Granulometría Escoria

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/08/26

GRANULOMETRIA ESCORIA (AGREGADOS FINOS)

MALLA N°	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL (gr)	MASA RETENIDA ACUMULADA (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
8	2,36	0,00	0,00	0,00%	100%
10 "	2,00	350,70	350,70	60,70%	39,30%
40 "	0,42	170,40	521,10	29,49%	70,51%
200 "	0,074	24,60	545,70	4,26%	95,74%
BANDEJA		2,00		0,35%	99,65%
SUMA		547,70		94,79%	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: NTE INEN 0860
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Abrasión

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/08/26

ENSAYO DE ABRASIÓN

NÚMERO DEL TAMIZ		MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO (gr)
PASA	RETIENE	
1 1/2"	1"	1246,8
1"	3/4"	1253,5
3/4"	1/2"	1245,1
3/8"	1/4"	1246,1
TOTAL (B)		4991,5

Masa inicial de la muestra antes del ensayo=	4991,5 g r
Masa que pasa el tamiz N°12, después del ensayo=	2183,3 g r
Porcentaje de Desgaste=	56 %

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: NTE INEN 0863
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Desgaste a los sulfatos

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/08/31

DURABILIDAD DE LOS AGREGADOS A LA ACCIÓN DE LOS SULFATOS

AGREGADOS GRUESOS

NÚMERO DEL TAMIZ		% RETENIDO PARCIAL DEL AGREGADO	MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO(gr)	MASA DE LAS FRACCIONES DESPUÉS DEL ENSAYO(gr)	% QUE PASA (TAMIZ MAS FINO DESPUES DEL ENSAYO)	% DE DESGASTE PARCIAL
PASA	RETIENE					
3/8"	4	19,88%	300,2	151,3	49,60%	9,86%
1/2"	3/8"	13,91%	332,2	149,2	55,09%	7,66%
3/4"	1/2"	20,85%	670,3	423,3	36,85%	7,68%
1"	3/4"	12,36%	503,2	371,6	26,15%	3,23%
1 1/2"	1"	12,05%	1015,5	753,3	25,82%	3,11%
TOTAL		79,05%	2821,4	1848,7	193,51%	31,55%

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: NTE INEN 0863
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Desgaste a los sulfatos

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/08/31

DURABILIDAD DE LOS AGREGADOS A LA ACCIÓN DE LOS SULFATOS

AGRAGADOS FINOS

NÚMERO DEL TAMIZ		% RETENIDO PARCIAL DEL AGREGADO	MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO(gr))	MASA DE LAS FRACCIONES DESPUÉS DEL ENSAYO(gr)	% QUE PASA (TAMIZ MAS FINO DESPUES DEL ENSAYO)	% DE DESGASTE PARCIAL
PASA	RETIENE					
3/8	4	0,05%	100	30,7	69,30%	0,03%
4	8	24,00%	100	47,6	52,40%	12,58%
8	16	17,07%	100	47,1	52,90%	9,03%
16	30	14,55%	100	65,3	34,70%	5,05%
30	50	15,14%	100	54,5	45,50%	6,89%
TOTAL		70,81%	500	245,2	254,80%	33,58%

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: NTE INEN 0857
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Gravedad Específica

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/08

GRAVEDAD ESPECÍFICA- AGREGADO GRUESO

MASA DE MUESTRA SATURADA CON SUPERFICIE SECA	9,355	Kg
MASA DE MUESTRA SECA	9,055	Kg
MASA DE LA MUESTRA SUMERGIDA EN AGUA	5,47	Kg
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK	2,47	
GRAVEDAD SATURADA CON SUPERFICIE SECA	2,55	
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE	2,69	
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN	3	%

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: NTE INEN 0856
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Gravedad Específica

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/10

GRAVEDAD ESPECÍFICA- AGREGADO FINO

MASA DE MUESTRA SATURADA CON SUPERFICIE SECA	503,1	Gr
MASA DE MUESTRA SECA	477,3	Gr
MASA DEL CONJUNTO, MATRAZ, AGUA Y MUESTRA	957,8	Gr
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK	2,34	
GRAVEDAD SATURADA CON SUPERFICIE SECA	2,46	
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE	2,67	
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN	5,4	%

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: NTE INEN 0856
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Equivalente de Arena

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/10

EQUIVALENTE DE ARENA

	MUESTRA 1	**MUESTRA 2**
Lectura Inicial (in)	5,5	5,6
Lectura final (in)	3,7	3,6
Equivalente de Arena (%)	68%	65%
Equivalente de Arena Final (%)	67%	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: ASTM D1557-12
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Ensayo de Compactación

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/15

HOJA DE CAMPO- ENSAYO DE COMPACTACIÓN –BASE GRANULAR

- DESCRIPCIÓN DEL MOLDE

N° de Molde	10
Peso del molde (g)	6217
Diámetro (cm)	15,232
Altura (cm)	11,662
Volumen (cm3)	2112,00

- CONTENIDO DE HUMEDAD

ENSAYO	1		2		3		4	
N° Molde	10		10		10		10	
Peso molde + Suelo húmedo, gr	11.012		11.150		11.229		10.595	
Peso de cápsula , gr	17,73	16,89	19,03	16,96	16,69	16,88	17,34	17,70
Peso cap.+ suelo humedo , gr	90,69	104,10	103,12	107,40	115,65	95,92	106,57	119,56
Peso cap.+ suelo seco, gr	86,15	98,81	96,18	100,23	106,30	88,41	96,74	108,18
Porcentaje humedad (%)	6,64	6,46	9,00	8,61	10,43	10,50	12,38	12,58
PROMEDIO	6,55		8,80		10,47		12,48	

- DATOS PARA REALIZACIÓN DE CBR O MOLDEO DE ESPECÍMENES

Densidad Seca Máxima: 2,191 gr/cm^3 Humedad Óptima: 8,41%

HUMEDAD DE MUESTRA GUARDADA EN FUNDA		
Peso cápsula, gr	22,86	33,16
Peso cap. + suelo húmedo, gr	211,95	266,11
Peso cap. + suelo seco , gr	210,7	264,7
Porcentaje humedad (%)	0,68%	0,61%
PROMEDIO	0,63%	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: ASTM D1557-12
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Ensayo de Compactación

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/16

HOJA DE CAMPO- ENSAYO DE COMPACTACIÓN –BASE GRANULAR+5% ESCORIA

- DESCRIPCIÓN DEL MOLDE

N° de Molde	10
Peso del molde (g)	6217
Diámetro (cm)	15,232
Altura (cm)	11,662
Volumen (cm3)	2112,00

- CONTENIDO DE HUMEDAD

ENSAYO	1		2		3		4	
N° Molde	10		10		10		10	
Peso molde + Suelo húmedo, gr	10.944		11.230		11.263		11.032	
Peso de cápsula , gr	18,10	19,05	16,74	17,96	18,14	18,18	17,95	17,00
Peso cap.+ suelo humedo , gr	109,40	95,63	84,22	89,71	108,02	106,64	110,22	94,45
Peso cap.+ suelo seco, gr	104,35	91,50	79,22	84,43	99,90	98,67	100,33	86,16
Porcentaje humedad (%)	5,86	5,70	8,00	7,94	9,93	9,90	12,01	11,99
PROMEDIO	5,78		7,97		9,92		12,00	

- DATOS PARA REALIZACIÓN DE CBR O MOLDEO DE ESPECÍMENES

Densidad Seca Máxima: 2,188 gr/cm^3 Humedad Óptima: 8,39 %

HUMEDAD DE MUESTRA GUARDADA EN FUNDA		
Peso cápsula, gr	32,48	49,29
Peso cap. + suelo húmedo, gr	222,46	226,36
Peso cap. + suelo seco , gr	221,3	225,3
Porcentaje humedad (%)	0,61%	0,60%
PROMEDIO	0,61%	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: ASTM D1557-12
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Ensayo de Compactación

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/17

HOJA DE CAMPO- ENSAYO DE COMPACTACIÓN –BASE GRANULAR+15% ESCORIA

- DESCRIPCIÓN DEL MOLDE

N° de Molde	10	2
Peso del molde (g)	6217	7654
Diámetro (cm)	15,232	15,199
Altura (cm)	11,662	11,889
Volumen (cm3)	2112,00	2125,00

- CONTENIDO DE HUMEDAD

ENSAYO	1		2		3		4	
N° Molde	2		10		2		2	
Peso molde + Suelo húmedo, gr	12.353		11.335		12.673		11.993	
Peso de cápsula , gr	18,30	16,72	18,08	18,00	16,85	17,80	18,45	16,98
Peso cap.+ suelo humedo , gr	95,05	100,29	99,44	96,16	109,43	97,23	118,33	105,47
Peso cap.+ suelo seco, gr	90,61	95,48	93,28	89,02	101,05	90,03	107,61	95,94
Porcentaje humedad (%)	6,14	6,11	8,19	8,02	9,95	9,97	12,02	12,07
PROMEDIO	6,12		8,11		9,96		12,05	

- DATOS PARA REALIZACIÓN DE CBR O MOLDEO DE ESPECÍMENES

Densidad Seca Máxima: 2,228 gr/cm^3 Humedad Óptima: 8,33%

HUMEDAD DE MUESTRA GUARDADA EN FUNDA		
Peso cápsula, gr	22,61	22,72
Peso cap. + suelo húmedo, gr	187,67	181,27
Peso cap. + suelo seco , gr	186,7	180,5
Porcentaje humedad (%)	0,59%	0,49%
PROMEDIO	0,55%	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: ASTM D1557-12
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Ensayo de Compactación

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/18

HOJA DE CAMPO- ENSAYO DE COMPACTACIÓN –BASE GRANULAR+25% ESCORIA

- DESCRIPCIÓN DEL MOLDE

N° de Molde	10	2
Peso del molde (g)	6217	7654
Diámetro (cm)	15,232	15,199
Altura (cm)	11,662	11,889
Volumen (cm3)	2112,00	2125,00

- CONTENIDO DE HUMEDAD

ENSAYO	1		2		3		4	
N° Molde	2		10		2		10	
Peso molde + Suelo húmedo, gr	12.579		11.352		12.886		11.167	
Peso de cápsula , gr	17,94	18,00	18,08	18,18	17,81	17,83	16,68	11,49
Peso cap.+ suelo humedo , gr	105,82	109,01	99,42	104,37	108,84	107,05	108,55	86,76
Peso cap.+ suelo seco, gr	101,35	104,51	93,67	98,36	101,03	99,01	99,09	79,05
Porcentaje humedad (%)	5,36	5,20	7,61	7,50	9,38	9,90	11,48	11,41
PROMEDIO	5,28		7,55		9,64		11,45	

- DATOS PARA REALIZACIÓN DE CBR O MOLDEO DE ESPECÍMENES

Densidad Seca Máxima: 2,268 gr/cm^3 Humedad Óptima: 7,72%

HUMEDAD DE MUESTRA GUARDADA EN FUNDA		
Peso cápsula, gr	22,36	22,52
Peso cap. + suelo húmedo, gr	247,27	205,73
Peso cap. + suelo seco , gr	246,00	204,50
Porcentaje humedad (%)	0,57%	0,67%
PROMEDIO	0,62%	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: ASTM D1557-12
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Ensayo de Compactación

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/19

HOJA DE CAMPO- ENSAYO DE COMPACTACIÓN –BASE GRANULAR+35% ESCORIA

- DESCRIPCIÓN DEL MOLDE

N° de Molde	10	2
Peso del molde (g)	6217	7654
Diámetro (cm)	15,232	15,199
Altura (cm)	11,662	11,889
Volumen (cm3)	2112,00	2125,00

- CONTENIDO DE HUMEDAD

ENSAYO	1		2		3		4	
N° Molde	2		10		2		10	
Peso molde + Suelo húmedo, gr	12.382		11.256		12.926		11.236	
Peso de cápsula , gr	16,65	18,75	17,85	11,51	17,92	17,73	17,51	18,67
Peso cap.+ suelo humedo , gr	108,63	129,26	115,03	100,36	118,75	111,62	108,29	116,45
Peso cap.+ suelo seco, gr	105,04	124,93	109,53	95,30	111,24	104,60	100,06	107,54
Porcentaje humedad (%)	4,06	4,08	6,00	6,04	8,05	8,08	9,97	10,03
PROMEDIO	4,07		6,02		8,06		10,00	

- DATOS PARA REALIZACIÓN DE CBR O MOLDEO DE ESPECÍMENES

Densidad Seca Máxima: 2,283 gr/cm^3 Humedad Óptima: 7,17%

HUMEDAD DE MUESTRA GUARDADA EN FUNDA		
Peso cápsula, gr	31,77	49,92
Peso cap. + suelo húmedo, gr	346,54	294,88
Peso cap. + suelo seco , gr	345,1	293,6
Porcentaje humedad (%)	0,46%	0,53%
PROMEDIO	0,49%	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: ASTM D1557-12
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Ensayo de Compactación

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/19

HOJA DE CAMPO- ENSAYO DE COMPACTACIÓN –BASE GRANULAR+40% ESCORIA

- DESCRIPCIÓN DEL MOLDE

N° de Molde	10	2
Peso del molde (g)	6217	7654
Diámetro (cm)	15,232	15,199
Altura (cm)	11,662	11,889
Volumen (cm3)	2112,00	2125,00

- CONTENIDO DE HUMEDAD

ENSAYO	1		2		3		4	
N° Molde	2		10		2		10	
Peso molde + Suelo húmedo, gr	12.399		12.979		12.977		12.044	
Peso de cápsula , gr	18,71	18,19	17,84	18,17	18,01	17,76	17,57	17,85
Peso cap.+ suelo húmedo , gr	113,91	104,86	112,82	120,57	118,32	105,70	99,68	119,40
Peso cap.+ suelo seco, gr	109,36	101,30	106,92	113,99	110,14	98,75	91,98	109,65
Porcentaje humedad (%)	5,02	4,28	6,62	6,87	8,88	8,58	10,35	10,62
PROMEDIO	4,65		6,75		8,73		10,48	

- DATOS PARA REALIZACIÓN DE CBR O MOLDEO DE ESPECÍMENES

Densidad Seca Máxima: 2,350 gr/cm^3 Humedad Óptima: 7,10%

HUMEDAD DE MUESTRA GUARDADA EN FUNDA		
Peso cápsula, gr	32,55	32,61
Peso cap. + suelo húmedo, gr	295,71	307,11
Peso cap. + suelo seco , gr	294,40	305,80
Porcentaje humedad (%)	0,50%	0,48%
PROMEDIO	0,49%	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: ASTM D188-16
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Ensayo CBR

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/22

HOJA DE CAMPO
ENSAYO CALIFORMIA BEARNING RATIO (CBR) - BASE GRANULAR

- DATOS DE MOLDEO

MOLDES N°	M1		23		Z7	
N° DE GOLPES POR CAPA	56		25		12	
Peso molde + suelo húmedo (gr.)	12.116		10.866		11.005	
Peso molde (gr.)	7.084		6.149		6.641	
Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	285,38	233,92	224,81	174,60	179,66	259,77
Peso cap. + suelo seco (gr.)	265,72	218,35	209,98	163,64	168,30	241,48
Peso cápsula (gr.)	31,85	32,74	33,24	32,56	32,57	22,72

- DATOS DE EXPANSIÓN

FECHA	LECTURA DIAL	LECTURA DIAL	LECTURA DIAL
26/09/2018	50	50	50
29/09/2018	50	50	50
30/09/2018	50	50	50
31/09/2018	50	50	50

- DATOS DESPUES DE LA SATURACIÓN

Peso molde + suelo húmedo (gr.)	12.166		10.955		11.113	
Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	220,06	207,79	213,92	236,05	140,89	181,38
Peso cap. + suelo seco (gr.)	205,26	193,56	200,62	220,33	131,51	169,93
Peso cápsula (gr.)	32,52	33,86	49,32	32,84	22,86	32,64

- DATOS DE LA PENETRACIÓN

TIEMPO	PENETRACIÓN		Lectura anillo	Lectura anillo	Lectura anillo
minutos	mm	plg			
0,5	0,63	0,025	122	99	81
1,0	1,27	0,050	280	205	138
1,5	1,90	0,075	470	330	184
2,0	2,54	0,100	660	472	220
4,0	5,08	0,200	1550	1295	475
6,0	7,62	0,300	2400	2200	824
8,0	10,16	0,400	3200	3000	1300
10,9	12,70	0,500	3200	3000	1880

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: ASTM D188-16
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Ensayo CBR

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/22

HOJA DE CAMPO
ENSAYO CALIFORMIA BEARNING RATIO (CBR) - BASE GRANULAR+5% ESCORIA

- DATOS DE MOLDEO

MOLDES N°	30		29		18M	
N° DE GOLPES POR CAPA	56		25		12	
Peso molde + suelo húmedo (gr.)	10.999		10.779		11.343	
Peso molde (gr.)	5.974		6.287		7.165	
Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	241,81	187,88	281,37	215,53	215,92	203,70
Peso cap. + suelo seco (gr.)	225,53	176,01	260,90	201,01	200,68	190,10
Peso cápsula (gr.)	33,20	32,63	22,72	22,35	22,89	22,63

- DATOS DE EXPANSIÓN

FECHA	LECTURA DIAL	LECTURA DIAL	LECTURA DIAL
26/09/2018	50	50	50
29/09/2018	50	50	50
30/09/2018	50	50	50
31/09/2018	50	50	50

- DATOS DESPUES DE LA SATURACIÓN

Peso molde + suelo húmedo (gr.)	11.027		10.822		11.485	
Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	157,75	181,41	194,41	220,20	233,42	185,84
Peso cap. + suelo seco (gr.)	147,79	170,60	181,85	206,46	218,55	173,72
Peso cápsula (gr.)	32,65	50,85	33,20	49,96	42,39	33,75

- DATOS DE LA PENETRACIÓN

TIEMPO	PENETRACIÓN		Lectura anillo	Lectura anillo	Lectura anillo
minutos	mm	plg			
0,5	0,63	0,025	110	79	16
1,0	1,27	0,050	270	196	56
1,5	1,90	0,075	430	382	130
2,0	2,54	0,100	650	540	200
4,0	5,08	0,200	1537	1130	510
6,0	7,62	0,300	2427	1820	855
8,0	10,16	0,400	3235	2500	1380
10,9	12,70	0,500	3235	2500	1883

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: ASTM D188-16
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Ensayo CBR

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/23

HOJA DE CAMPO
ENSAYO CALIFORMIA BEARNING RATIO (CBR) - BASE GRANULAR+ 15% ESCORIA

- DATOS DE MOLDEO

MOLDES N°	100		M8		9	
N° DE GOLPES POR CAPA	56		25		12	
Peso molde + suelo húmedo (gr.)	12.140		12.785		10.533	
Peso molde (gr.)	7.026		8.059		6.061	
Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	241,81	187,88	281,37	215,53	215,92	203,70
Peso cap. + suelo seco (gr.)	225,83	176,01	261,10	201,01	200,78	190,10
Peso cápsula (gr.)	33,20	32,63	22,72	22,35	22,89	22,63

- DATOS DE EXPANSIÓN

FECHA	LECTURA DIAL	LECTURA DIAL	LECTURA DIAL
26/09/2018	50	50	50
29/09/2018	50	50	50
30/09/2018	50	50	50
31/09/2018	50	50	50

- DATOS DESPUES DE LA SATURACIÓN

Peso molde + suelo húmedo (gr.)	12.186		12.845		10.626	
Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	220,06	207,79	213,92	236,05	140,89	181,38
Peso cap. + suelo seco (gr.)	205,26	193,56	200,62	220,33	131,51	169,93
Peso cápsula (gr.)	32,52	33,86	49,32	32,84	22,86	32,64

- DATOS DE LA PENETRACIÓN

TIEMPO	PENETRACIÓN		Lectura anillo	Lectura anillo	Lectura anillo
minutos	mm	plg			
0,5	0,63	0,025	95	55	25
1,0	1,27	0,050	245	132	55
1,5	1,90	0,075	450	260	90
2,0	2,54	0,100	690	437	135
4,0	5,08	0,200	1650	1240	343
6,0	7,62	0,300	2570	2160	610
8,0	10,16	0,400	3480	3120	886
10,9	12,70	0,500	3480	3120	1203

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: ASTM D188-16
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Ensayo CBR

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/23

HOJA DE CAMPO
ENSAYO CALIFORMIA BEARNING RATIO (CBR) - BASE GRANULAR+ 25% ESCORIA

- DATOS DE MOLDEO

MOLDES N°	3		10		7	
N° DE GOLPES POR CAPA	56		25		12	
Peso molde + suelo húmedo (gr.)	11.261		11.036		9.890	
Peso molde (gr.)	6.080		6.246		5.511	
Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	241,81	187,88	281,37	215,53	215,92	203,70
Peso cap. + suelo seco (gr.)	225,53	176,01	260,90	201,01	200,68	190,10
Peso cápsula (gr.)	33,20	32,63	22,72	22,35	22,89	22,63

- DATOS DE EXPANSIÓN

FECHA	LECTURA DIAL	LECTURA DIAL	LECTURA DIAL
26/09/2018	50	50	50
29/09/2018	50	50	50
30/09/2018	50	50	50
31/09/2018	50	50	50

- DATOS DESPUES DE LA SATURACIÓN

Peso molde + suelo húmedo (gr.)	11.289		11.079		10.032	
Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	170,88	232,02	178,46	181,56	172,72	182,27
Peso cap. + suelo seco (gr.)	160,04	218,52	167,82	169,58	160,87	171,27
Peso cápsula (gr.)	22,40	49,70	33,32	22,57	22,76	32,67

- DATOS DE LA PENETRACIÓN

TIEMPO	PENETRACIÓN		Lectura anillo	Lectura anillo	Lectura anillo
minutos	mm	plg			
0,5	0,63	0,025	111	70	16
1,0	1,27	0,050	310	200	35
1,5	1,90	0,075	511	400	53
2,0	2,54	0,100	735	590	76
4,0	5,08	0,200	1740	1500	200
6,0	7,62	0,300	2715	2284	320
8,0	10,16	0,400	2715	2284	499
10,9	12,70	0,500	2715	2284	653

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: ASTM D188-16
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Ensayo CBR

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/24

HOJA DE CAMPO
ENSAYO CALIFORMIA BEARNING RATIO (CBR) - BASE GRANULAR+ 35% ESCORIA

- DATOS DE MOLDEO

MOLDES N°	6		Z5		M4	
N° DE GOLPES POR CAPA	56		25		12	
Peso molde + suelo húmedo (gr.)	11.459		11.166		12.352	
Peso molde (gr.)	6.266		6.654		8.073	
Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	232,59	252,93	275,01	257,83	264,13	246,68
Peso cap. + suelo seco (gr.)	219,42	238,03	258,99	242,75	248,78	232,38
Peso cápsula (gr.)	33,34	32,85	32,45	33,99	33,39	33,53

- DATOS DE EXPANSIÓN

FECHA	LECTURA DIAL	LECTURA DIAL	LECTURA DIAL
26/09/2018	50	50	50
29/09/2018	50	50	50
30/09/2018	50	50	50
31/09/2018	50	50	50

- DATOS DESPUES DE LA SATURACIÓN

Peso molde + suelo húmedo (gr.)	11.511		11.262		12.467	
Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	212,23	229,76	273,03	169,95	184,20	181,21
Peso cap. + suelo seco (gr.)	199,06	216,17	255,24	159,72	173,08	169,84
Peso cápsula (gr.)	32,62	33,54	33,01	34,04	32,95	32,94

- DATOS DE LA PENETRACIÓN

TIEMPO	PENETRACIÓN		Lectura anillo	Lectura anillo	Lectura anillo
minutos	mm	plg			
0,5	0,63	0,025	190	88	45
1,0	1,27	0,050	390	230	85
1,5	1,90	0,075	590	380	135
2,0	2,54	0,100	850	550	227
4,0	5,08	0,200	1900	1400	565
6,0	7,62	0,300	2900	2300	916
8,0	10,16	0,400	2900	2300	1260
10,9	12,70	0,500	2900	2300	1645

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE MÉCANICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Proyecto de ensayo: Trabajo de titulación
Norma de ensayo: ASTM D188-16
Cantera: San Antonio-Tanlahua
Descripción: Ensayo CBR

Solicitado por: Ing. Gustavo Yánez
Ensayado por: Gallegos M. – Paredes E.
Revisado por: Ing. Gustavo Yánez
Fecha: 2018/09/24

HOJA DE CAMPO
ENSAYO CALIFORMIA BEARNING RATIO (CBR) - BASE GRANULAR+ 40% ESCORIA

- DATOS DE MOLDEO

MOLDES N°	5		28		21	
N° DE GOLPES POR CAPA	56		25		12	
Peso molde + suelo húmedo (gr.)	11.495		10.776		10.816	
Peso molde (gr.)	6.163		5.844		6.239	
Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	243,26	192,32	272,57	252,71	293,13	253,56
Peso cap. + suelo seco (gr.)	229,26	181,87	257,14	237,80	275,79	239,20
Peso cápsula (gr.)	33,32	32,43	33,39	33,74	32,94	33,52

- DATOS DE EXPANSIÓN

FECHA	LECTURA DIAL	LECTURA DIAL	LECTURA DIAL
26/09/2018	50	50	50
29/09/2018	50	50	50
30/09/2018	50	50	50
31/09/2018	50	50	50

- DATOS DESPUES DE LA SATURACIÓN

Peso molde + suelo húmedo (gr.)	11.916		10.857		11.013	
Peso cap. + suelo húmedo (gr.)	208,39	204,66	180,89	242,22	198,69	193,77
Peso cap. + suelo seco (gr.)	194,68	192,12	170,62	228,43	187,41	182,45
Peso cápsula (gr.)	33,51	33,17	33,35	33,80	32,91	33,28

- DATOS DE LA PENETRACIÓN

TIEMPO	PENETRACIÓN		Lectura anillo	Lectura anillo	Lectura anillo
minutos	mm	plg			
0,5	0,63	0,025	290	188	36
1,0	1,27	0,050	610	410	79
1,5	1,90	0,075	890	680	108
2,0	2,54	0,100	1150	895	175
4,0	5,08	0,200	2375	1950	426
6,0	7,62	0,300	3500	2895	699
8,0	10,16	0,400	3500	3100	870
10,9	12,70	0,500	3500	3100	1070