



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación del uso potencial de agregado siderúrgico estabilizado con aditivo a base de zeolitas en infraestructura vial

Jonathan Sneyder Penagos Muñoz

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Área Curricular de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia

2023

Evaluación del uso potencial de agregado siderúrgico estabilizado con aditivo a base de zeolitas en infraestructura vial

Jonathan Sneyder Penagos Muñoz

Trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Geotecnia

Director (a):

Ph.D. Carol Andrea Murillo Feo

Codirector (a):

Ph.D. Álvaro Fabian Pedraza Peña

Línea de Investigación:

Relaciones constitutivas de suelos, rocas y materiales a fines

Grupo de Investigación:

GENKI

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Área Curricular de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2023

Dedicatoria

A Dios, por permitirme cumplir a cabalidad este proceso y darme la oportunidad de ser mejor cada día.

Liliana Muñoz y Luis Penagos, mis padres, porque su esfuerzo, dedicación y amor han hecho posible cada cosa en mi vida.

A Karen Penagos, mi hermana, por su apoyo incondicional y paciencia.

A Pilar Orozco, mi abuelita, por su cariño y confianza para hacer posible este nuevo proyecto.

Declaración de obra original

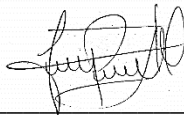
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Nombre: Jonathan Sneyder Penagos Muñoz

Fecha 24/01/2023

Agradecimientos

A cada una de las personas que hicieron parte de este proceso y fueron un apoyo durante el desarrollo de esta investigación, en especial a:

La profesora Carol Murillo y el ingeniero Álvaro Pedraza por orientar esta investigación con dedicación y sabiduría. Por la confianza depositada, las oportunidades que me dieron, y la voluntad de enseñarme y ayudarme a ser mejor en cada cosa.

El profesor Lucas Babadopulos, por su grato acogimiento, su disposición y confianza para escuchar, guiar y enseñar de la mejor manera.

La empresa *I.C Ingeniería y Consultoría S.A.S*, por proveer los insumos necesarios para desarrollar esta investigación, particularmente al ingeniero Oscar Daza por su tiempo, confianza y apoyo durante todo el proceso.

El laboratorio de estructuras de la Universidad Nacional, sede Bogotá y el laboratorio de mezclas asfálticas de la Universidad de Los Andes, por permitir el desarrollo de procedimientos que complementaron la investigación.

El laboratorio de geotecnia de la Universidad Nacional, sede Bogotá y cada una de las personas en él que contribuyeron en la realización de este estudio, particularmente a Jennifer Hernández y Alfredo De Marchena por su ayuda y compromiso.

Tatiana Bernal y Sergio Manjarrés por su incondicional apoyo cada día y en cada circunstancia que se presentó. Por su confianza y aliento en los momentos más importantes.

Resumen

Evaluación del uso potencial de agregado siderúrgico estabilizado con aditivo a base de zeolitas en infraestructura vial

Este estudio permitió caracterizar un material como agregado siderúrgico denominado Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (ECSD) compuesta por escorias de horno de arco eléctrico (EAF) y horno de cuchara (LF). Se evaluó la posibilidad de estabilización del material con diferentes porcentajes de cemento y aditivo a base de zeolitas para ser utilizado como material de construcción en capas de estructuras de pavimento.

En una primera etapa, se caracterizó la ECSD como agregado de acuerdo con normativa nacional e internacional para material granulares. En general, la ECSD cumplió con los estándares establecidos por las especificaciones INVIAS y referencias internacionales.

En una segunda etapa, se presenta la formulación y análisis de comportamiento mecánico de tres mezclas compuestas por la ECSD, cemento hidráulico y aditivo a base de zeolitas. Las mezclas fueron compuestas por 0%, 2% y 6% de cemento en masa. La relación entre aditivo y cemento fue de 1/100. Según la especificación para mezclas ligadas hidráulicamente (NF-14227), las mezclas se clasificaron como $C_{4/5}$ y $C_{5/6}$ de acuerdo con la resistencia en compresión y como tipo T2 y T4 de acuerdo con resistencia en tracción (R_T) y módulo (E_C), además, presentaron un comportamiento cercano al concreto de acuerdo con la resistencia a la fractura (K_{1C}). Adicionalmente, las mezclas evaluadas presentaron valores apropiados de módulo resiliente entre 8892MPa y 34953MPa.

En una etapa final, se realizó la modelación de estructuras de pavimento semirrígidas mediante la metodología mecanicista de diseño de pavimentos incorporando las mezclas formuladas. Las estructuras obtenidas presentaron espesores factibles constructiva y económicamente (entre 27 cm y 55 cm) sobre 5 clases de tráfico y 4 tipos de subrasante.

Palabras clave: Agregado siderúrgico, escoria de horno de arco eléctrico, escoria de horno de cuchara, zeolitas, cemento, pavimentos

Abstract

Evaluation of the potential use of steel aggregate stabilized with zeolite-based additive in road infrastructure

This research allowed characterizing a material as a steel aggregate called Conformed Diaco Steel Slag (ECSD) composed of Electric Arc Furnace slag (EAF) and Ladle Furnace (LF) slag. The possibility of stabilizing the material with different percentages of cement and zeolite-based additive to be used as construction material in pavement structure layers was evaluated.

In a first stage, the ECSD was characterized as aggregate in accordance with national and international regulations. In general, the ECSD complied with the standards established by INVIAS specifications and international references for granular materials.

In a second stage, the formulation and analysis of the mechanical behavior of three mixtures composed of ECSD, hydraulic cement and zeolite-based additive is presented. The mixes were composed of 0%, 2% and 6% cement by mass. The ratio of additive to cement was 1/100. According with *Hydraulically bound mixtures specification* (NF-14227), the mixes were classified as $C_{4/5}$ and $C_{5/6}$ according to compressive strength and as type T2 and T4 according to tensile strength (R_T) and modulus (E_C), in addition, they presented a behavior close to concrete according to fracture toughness (K_{1C}). Additionally, the evaluated mixtures presented appropriate values of resilient modulus between 8892 MPa and 34953 MPa.

In a final stage, semi-rigid pavement structures were modeled using the mechanistic pavement design methodology incorporating the formulated mixtures. The structures obtained showed constructive and economically feasible thicknesses (between 27 cm and 55 cm) evaluating 5 traffic classes and 4 types of subgrades.

Keywords: Steel aggregate, electric arc furnace slag, ladle furnace slag, zeolites, cement, pavement

Contenido

	Pág.
1. Marco teórico.....	5
1.1 Industria siderúrgica	5
1.2 Escoria de siderúrgica.....	8
1.2.1 Procesos de obtención de escoria	9
1.2.2 Tipos de escoria	12
1.3 Propiedades índice del agregado siderúrgico como material granular.....	15
1.3.1 Granulometría (INV-E-213-13).....	15
1.3.2 Límites de consistencia (INV-E-125-13), (INV-E-126-13) y (INV-E-129-13) ...	16
1.3.3 Resistencia a la degradación en Maquina de Los Ángeles (INV-E-218-13) ...	17
1.3.4 Resistencia a la abrasión Micro-Deval (INV-E-238-13)	18
1.3.5 Valor de azul de metileno (INV-E-235-13).....	19
1.3.6 Gravedad específica (Gs) y densidad máxima (EN 12697-5).....	20
1.3.7 Relación humedad – peso unitario seco, Proctor modificado (INV-E-142-13)	20
1.3.8 Succión total - Método del psicrómetro de punto de rocío (ASTM D6836-02)	21
1.3.9 Permeabilidad – Método de carga variable (EN 17892-11)	22
1.3.10 CBR - Californian Bearing Ratio (INV-E-148-13).....	23
1.3.11 IPI – Índice de Portancia Inmediata (EN 13486-47)	25
1.4 Estabilización de materiales con ligantes hidráulicos	26
1.5 Uso de zeolitas en materiales tratados con ligante hidráulico.....	28
1.6 Propiedades mecánicas del agregado siderúrgico estabilizado.....	29
1.6.1 Resistencia en compresión simple (INV-E-614 o EN 13286-41)	29
1.6.2 Resistencia en tracción indirecta (EN 13286-42)	30
1.6.3 Resistencia en flexión (INV-E-616) – (EN 13390-5)	31
1.6.4 Módulo en compresión (INV-E-614 o EN 13286-41)	33
1.6.5 Módulo resiliente de suelos y agregados (INV-E-156)	34
2. Antecedentes.....	38
3. Marco experimental.....	47
3.1 Campaña experimental	47
3.2 Etapa 1. Caracterización de los componentes.....	48
3.2.1 Nomenclatura de componentes	49
3.2.2 Escoria Blanca, Escoria Negra Fina y Escoria Negra Gruesa	49
3.2.3 Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (ECSD)	53
3.2.4 Aditivo a base de zeolitas (<i>RoadCem-PowerCem®</i>).....	66
3.2.5 Ligante hidráulico (Cemento estructural MAX-Argos).....	67
3.3 Etapa 2. Formulación	67
3.3.1 Determinación de dosificaciones y tipo de mezclas	68

3.3.2	Fabricación de probetas	68
3.4	Etapa 3. Evaluación del comportamiento mecánico	70
3.4.1	Nomenclatura de mezclas estabilizadas con cemento y aditivo.....	71
3.4.2	Equipos de laboratorio usados para la ejecución de ensayos mecánicos.....	72
3.4.3	Ensayo en compresión simple (INV-E-614) - (EN 13286-41).....	73
3.4.4	Ensayo en tracción indirecta (EN 13286-42)	74
3.4.5	Ensayo en flexión 4 puntos (INV-E-616) – (EN 12390-5).....	76
3.4.6	Ensayo de módulo en compresión (INV-E-614) - (EN 13286-41)	77
3.4.7	Ensayo de módulo resiliente (INV-E-156).....	78
4.	Análisis de resultados	81
4.1	Caracterización del agregado siderúrgico	81
4.1.1	Parámetros índice	81
4.1.2	Modelación de curvas de succión.....	83
4.1.3	Análisis del Coeficiente de permeabilidad	85
4.1.4	CBR	87
4.1.5	IPI.....	88
4.2	Comportamiento mecánico de las mezclas	89
4.2.1	Resistencia en compresión simple (R_C).....	89
4.2.2	Resistencia en tracción indirecta (R_{TI})	92
4.2.3	Flexión en 4 puntos (F4P)	99
4.2.4	Módulo en compresión (E_C).....	102
4.2.5	Módulo resiliente (E_r)	105
4.3	Clasificación de mezclas.....	110
4.3.1	Respecto a la compresión simple	110
4.3.2	Respecto a la resistencia a la tracción y módulo en compresión	111
4.3.3	Respecto a la resistencia a la fractura y módulo en compresión	112
5.	Modelación de estructuras de pavimento	114
5.1	Tráfico.....	114
5.2	Materiales utilizados para modelación	115
5.2.1	Plataforma (subrasante)	115
5.2.2	Capas de base tratadas con cemento (capas de cuerpo).....	115
5.2.3	Capa de rodadura	116
5.3	Tipos de estructuras para modelación	116
5.4	Parámetros mecanicistas.....	117
5.4.1	Valores admisibles	118
5.5	Catálogo de estructuras conformes	119
6.	Conclusiones y recomendaciones	125
6.1	Conclusiones	125
6.2	Recomendaciones	132

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Producción anual de acero entre 2017 y 2021.....	6
Figura 1-2. Presencia de industrias siderúrgicas en el territorio colombiano.	7
Figura 1-3. Proyección de demanda nacional de acero en Colombia entre 2010 y 2022. 8	8
Figura 1-4. Proceso general de producción de acero.....	9
Figura 1-5. Proceso de producción de acero semi-integrado en siderúrgica <i>Gerdau Diaco</i>	11
Figura 1-6. Escoria granulada BF.	13
Figura 1-7. Escoria BOF de Acería Paz del Rio.	14
Figura 1-8. Escoria EAF de siderúrgica <i>Gerdau Diaco</i>	14
Figura 1-9. Escoria LF de siderúrgica <i>Gerdau Diaco</i>	15
Figura 1-10. Tamizado para determinación de granulometría de materiales.....	16
Figura 1-11. Carta de plasticidad propuesta por Casagrande.	17
Figura 1-12. a) Dispositivo de ejecución del ensayo en Máquina de Los Ángeles (Laboratorio Geotecnia -UNAL). b) Esquema de ejecución de ensayo.	18
Figura 1-13. a) Dispositivo de ejecución del ensayo en Aparato Micro Deval (Laboratorio Geotecnia -UNAL). b) Esquema de ejecución de ensayo.	19
Figura 1-14. Esquema de determinación de densidad máxima de una mezcla de agregados.	20
Figura 1-15. Esquema de ejecución de ensayo Proctor modificado.....	21
Figura 1-16. Esquema interno equipo WP4C para medición de succión total.	22
Figura 1-17. Esquema del sistema de medición de permeabilidad con carga variable... 23	23
Figura 1-18. a) Equipo para ensayo de CBR. b) Esquema del ensayo de penetración para determinación del índice CBR.	24
Figura 1-19. Esquema del ensayo de penetración para determinación del índice IPI. ...	25

Figura 1-20. Tren de estabilización de materiales granulares por medio del método manual.....	27
Figura 1-21. Tren de estabilización de materiales granulares por medio del método in situ.	27
Figura 1-22. Tren de estabilización de materiales granulares por medio del método en central.....	28
Figura 1-23. Distribución porcentual por uso industrial de zeolitas.	28
Figura 1-24. a) Equipo para ejecución de ensayo de compresión simple (Laboratorio Estructuras -UNAL). b) Esquema de proceso de carga en compresión simple.....	30
Figura 1-25. a). Equipo para ejecución de ensayo de tracción indirecta (Laboratorio Estructuras -UNAL). b) Esquema de proceso de carga en ensayo de tracción indirecta.	31
Figura 1-26. a) Equipo para ejecución de ensayo de flexión (Laboratorio Estructuras -UNAL). b) Esquema de ejecución de proceso de carga en ensayo de flexión.....	32
Figura 1-27. Dimensiones de probeta para cálculo de resistencia a la fractura.	32
Figura 1-28. a) Equipo para ejecución de ensayo de módulo en compresión (Laboratorio Mezclas asfálticas -UniAndes). b) Esquema de proceso de carga en compresión con medición de deformación en la muestra.....	34
Figura 1-29. Ciclo de carga en forma de medio seno verso para ensayo de módulo resiliente.	35
Figura 1-30. a) Equipo para ejecución de ensayo de módulo resiliente (Laboratorio Mezclas asfálticas -UniAndes). b) Esquema del periodo de carga en ensayo de módulo resiliente. c) Esquema del periodo de descanso en ensayo de módulo resiliente.	37
Figura 2-1. Resultados de muestras con 4% de cemento y a 28 días de curado con 30%, 50% y 70% evaluadas por Liu et al. (2020).....	42
Figura 2-2 Curvas de compactación para materiales NA, BOF y EAF evaluados por Toffolo et al. (2021).....	43
Figura 2-3. Resultados de mezclas de RCC por Toffolo et al. (2021): a) Resistencia en compresión a 3 y 28 días; b) Módulo de elasticidad.....	44
Figura 2-4. Resultados de mezclas RCC a 3 y 28 días por Toffolo et al. (2021): a) Resistencia a rotura por tracción. b) Resistencia en flexión.	45
Figura 3-1. Etapas del marco experimental del proyecto.....	47
Figura 3-2. Materiales utilizados en el marco experimental.	48

Figura 3-3. Escoria proveniente de siderúrgica <i>Gerdau Diaco</i> . a) Escoria Negra Fina (ENF). b) Escoria Negra Gruesa (ENG). c) Escoria Blanca (EB)	49
Figura 3-4. Distribución granulométrica de escorias EB, ENF y ENG.	50
Figura 3-5. Conglomerados de partículas de tamaño mayor a $\frac{3}{4}$ " presentes en la EB..	51
Figura 3-6. Comparación de composición porcentual de compuestos y elementos de ENF/ENG y EB provenientes de siderúrgica <i>Gerdau Diaco</i>	52
Figura 3-7. Conformación de la ECSD.....	53
Figura 3-8. Distribución granulométrica de escoria ECSD y comparación con rangos de aceptación para gradación. a) BG25. b) BG27. c) BTC25. d) Rangos de gradación establecidos por PIARC	56
Figura 3-9. Ejecución de ensayo de resistencia a degradación en Máquina de Los Ángeles.	57
Figura 3-10. Ejecución de ensayo de resistencia por abrasión en Aparato Micro Deval (Laboratorio de Geotecnia - UNAL).	58
Figura 3-11. Resultado de ensayo azul de metileno usando el procedimiento 1 (Laboratorio de Geotecnia - UNAL).	58
Figura 3-12. Ejecución de ensayo de gravedad específica para gradación completa de la ECSD (Laboratorio de Geotecnia - UNAL).	59
Figura 3-13. Ejecución de ensayos Proctor en 3 muestras de ECSD (Laboratorio de Geotecnia - UNAL). a) Muestra con w menor al w_{OPM} . b) Muestra con w_{OPM} . c) Muestra con w mayor al w_{OPM}	60
Figura 3-14. Curva de compactación (Proctor) de ECSD.....	61
Figura 3-15. Ejecución de ensayos de succión total con equipo WP4C (Laboratorio de Geotecnia - UNAL).	62
Figura 3-16. Curvas de succión de parte fina (< 2.0 mm) de la ECSD, en humedecimiento y secado.....	63
Figura 3-17. Ensayo de permeabilidad con carga variable sobre la ECSD. a) Sistema utilizado para el ensayo. b) Representación esquemática de las condiciones del ensayo.	63
Figura 3-18. Ejecución de ensayos CBR sobre ECSD (Laboratorio de Geotecnia - UNAL).	64
Figura 3-19. Ejecución de ensayo IPI sobre ECSD (Laboratorio de Geotecnia - UNAL).	66
Figura 3-20. Conformación de mezclas a evaluar mecánicamente.	67
Figura 3-21. Proceso general de fabricación de probetas para ensayos mecánicos.	70

Figura 3-22. Nomenclatura utilizada para las probetas en ensayos mecánicos.....	72
Figura 3-23. Ejecución de ensayos en compresión simple (Laboratorio de Estructuras - UNAL).....	73
Figura 3-24. Ejecución de ensayos en tracción indirecta (Laboratorio de Estructuras - UNAL).....	75
Figura 3-25. Ejecución de ensayos de flexión (Laboratorio de Estructuras - UNAL).....	76
Figura 3-26. Ejecución de ensayos en compresión (Laboratorio Mezclas asfálticas – UniAndes).....	77
Figura 3-27. Ejecución de ensayos de módulo resiliente (Laboratorio Mezclas asfálticas – UniAndes).....	78
Figura 4-1. Curvas de contenido volumétrico de agua en función de succión	84
Figura 4-2. Curvas de saturación en función de succión	85
Figura 4-3. Curva de densidad seca (γ_d) – CBR de la ECSD.....	87
Figura 4-4. Curva de densidad seca (γ_d) – IPI de la ECSD.....	88
Figura 4-5. Curvas de esfuerzo vs deformación unitaria ensayo CS. a) LE-R0C0-CS (3d). b) LE-R.02C2-CS (3d). c) LE-R.06C6-CS (3d).....	89
Figura 4-6. Curvas de esfuerzo vs deformación unitaria ensayo CS. a) LE-R0C0-CS (28d). b) LE-R.02C2-CS (28d). c) LE-R.06C6-CS (28d).....	90
Figura 4-7. a) Aumento de R_C en función del contenido de cemento y aditivo empleado. b) Aumento de R_C en función del tiempo de curado.....	91
Figura 4-8. Curvas de fuerza vs desplazamiento ensayo TI. a) LE-R0C0-TI (3d). b) LE-R.02C2-TI (3d). c) LE-R.06C6-TI (3d).....	92
Figura 4-9. Curvas de fuerza vs desplazamiento ensayo TI. a) LE-R0C0-TI (28d). b) LE-R.02C2-TI (28d). c) LE-R.06C6-TI (28d).....	93
Figura 4-10. a) Aumento de R_{TI} en función del contenido de cemento y aditivo empleado. b) Aumento de R_{TI} en función del tiempo de curado.....	94
Figura 4-11. Correlación entre R_{TI} y R_C a 28 días de curado.....	95
Figura 4-12. a) Aumento de R_T en función del contenido de cemento y aditivo empleado. b) Aumento de R_T en función del tiempo de curado.....	96
Figura 4-13. Valores de R_T de las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6 estimados a 28 y 360 días.....	98

Figura 4-14. Curvas de fuerza vs desplazamiento ensayo F4P. a) LE-R.02C2-F4P (7d). c) LE-R.06C6-F4P (7d).....	99
Figura 4-15. Curvas de fuerza vs desplazamiento ensayo F4P. a) LE-R.02C2-F4P (28d). b) LE-R.06C6-F4P (28d).	100
Figura 4-16. a) Aumento de R_F en función del contenido de cemento y aditivo empleado. b) Aumento de R_F en función del tiempo de curado.....	101
Figura 4-17. Comparación de resultados R_F experimentales y por correlación.	102
Figura 4-18. a) Curvas de esfuerzo vs deformación unitaria en ensayo MC hasta falla. b) Curvas de esfuerzo vs deformación unitaria entre 0% a 0.02% (zona elástica).....	103
Figura 4-19. Aumento de E_C en función del contenido de cemento y aditivo empleado.	104
Figura 4-20. Comparación de resultados E_C y E_{360}	105
Figura 4-21. Curvas de esfuerzo cíclico vs deformación unitaria sobre las mezclas LE-R0C0, LE-R.02C2 y LE-R.06C6. a) Secuencia 13. b) Secuencia 8. c) Secuencia 9. d) Secuencia 15.	106
Figura 4-22. Módulo resiliente (E_r) en función del esfuerzo cíclico aplicado (σ_c) para las mezclas LE-R0C0, LE-R.02C2 y LE-R..06C6.....	107
Figura 4-23. Aumento de E_r en función del contenido de cemento y aditivo empleado.	108
Figura 4-24. Comparación de resultados E_r y E_C	108
Figura 4-25. Correlación entre E_r y R_C	109
Figura 4-26. Correlación entre E_r y R_{Tl}	110
Figura 4-27. Clasificación de las mezclas diseñadas en función de E_C y R_{T360} de acuerdo con NF 14227-1 (2013).	112
Figura 4-28. Clasificación de las mezclas LE.R.02C2 y LE.R.06C6 de acuerdo con la resistencia a la fractura (K_{rC}) en función del módulo de rigidez (E_C).....	113
Figura 5-1.a) Esquema general de estructura tipo 1 (ET1). b) Esquema general de estructura tipo 2 (ET2).....	117
Figura 5-2. Esquema de parámetros mecanicistas de verificación.....	117

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1. Recomposición y tipo de agregados de las mezclas evaluadas por Pasetto y Baldo (2013).	40
Tabla 2-2. Resultados de ensayo Proctor de las mezclas evaluadas por Pasetto y Baldo (2013).	40
Tabla 2-3. Propiedades mecánicas en 7 días de edad de las mezclas evaluadas por Pasetto y Baldo (2013).	41
Tabla 2-4. Resultados de ensayos de caracterización física en NA, BOF y EAF evaluados por Toffolo et al. (2021).	43
Tabla 3-1. Nomenclatura de componentes.	49
Tabla 3-2. Características visuales de las escorias EB, ENF y ENG.	50
Tabla 3-3. Clasificación de las escorias EB, ENF y ENG de acuerdo con los sistemas de clasificación SUCS y AASHTO.	51
Tabla 3-4. Resultados de ensayo de FRX de EB y EF.	53
Tabla 3-5. Distribución granulométrica de ECSD y conformación porcentual de EB, ENF y ENG.	54
Tabla 3-6. Materiales granulares INVIAS de evaluación para conformidad en gradación de la ECSD.	54
Tabla 3-7. Conformidad de la curva granulométrica de la ECSD con respecto a estándar INVIAS y gradaciones PIARC.	55
Tabla 3-8. Valores de densidad seca, CBR y expansión lineal obtenidos en laboratorio	65
Tabla 3-9. Valores de densidad seca e IPI obtenidos en laboratorio.	66
Tabla 3-10. Especificaciones técnicas cemento estructural MAX-Argos.	67
Tabla 3-11. Dosificaciones de conformación de mezclas a evaluar mecánicamente	68
Tabla 3-12. Tipos de probetas fabricadas para ensayos mecánicos.	68

Tabla 3-13. Cantidad de cuerpos de prueba ensayados por tipo de mezcla, edad de curado y ensayo.....	71
Tabla 3-14. Equipos de laboratorio utilizados para ensayos mecánicos.....	72
Tabla 3-15. Resultados individuales de ensayo de compresión simple.....	74
Tabla 3-16. Resultados individuales de ensayos de tracción indirecta.....	75
Tabla 3-17. Resultados individuales de ensayos de flexión.....	76
Tabla 3-18. Resultados individuales de ensayos de módulo en compresión.....	78
Tabla 3-19. Resultados de contenido de agua y peso unitario seco ensayos de módulo resiliente.....	79
Tabla 3-20. Resumen de resultados de ensayo de módulo resiliente en mezcla LE-R0C0.....	79
Tabla 3-21. Resumen de resultados de ensayo de módulo resiliente en mezcla LE-R.02C2.....	80
Tabla 3-22. Resumen de resultado de ensayo de módulo resiliente en mezcla LE-R.06C6.....	80
Tabla 4-1. Verificación de conformidad de la ECSD con respecto a los parámetros índice de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Art. 320, Art. 323, Art. 330, Art. 350 (INVIAS, 2022).....	82
Tabla 4-2. Características de categoría de materiales D ₂₁ , de acuerdo con GTR.....	82
Tabla 4-3. Parámetros retenidos del modelo Van Genuchten en secado y humedecimiento.....	84
Tabla 4-4. Clasificación del nivel de drenaje de materiales de acuerdo con el coeficiente de permeabilidad.....	86
Tabla 4-5. Clasificación del nivel de permeabilidad de los materiales de acuerdo con el coeficiente de permeabilidad.....	86
Tabla 4-6. Verificación de conformidad de la ECSD con respecto a los parámetros índice de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Art. 320, Art. 323, Art. 330, Art. 350 (INVIAS, 2022).....	87
Tabla 4-7. Verificación de conformidad del IPI de la ECSD con respecto a los valores de referencia internacional.....	88
Tabla 4-8. Valores promedio en compresión simple de mezclas ensayadas a 3 y 28 días.....	90
Tabla 4-9. Valores promedio en tracción indirecta de mezclas ensayadas a 3 y 28 días.....	93

Tabla 4-10. Valores de R_T obtenidos a partir de la resistencia en tracción indirecta (R_{TI}).	95
Tabla 4-11. Valores de R_T y R_{Fcorr} para las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6.	97
Tabla 4-12. Valores de R_{T360} y E_{360} para las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6.	98
Tabla 4-13. Valores de σ_6 para las mezclas LE-R.02-C2 y LE-R.06C6.	99
Tabla 4-14. Valores promedio en flexión 4 puntos de mezclas ensayadas a 7 y 28 días.	100
Tabla 4-15. Valores medios en módulo en compresión de mezclas ensayadas a 137 días.	103
Tabla 4-16. Resumen de resultados de módulo resiliente para las secuencias 13, 8, 9 y 15 en las mezclas LE-R0C0, LE-R.02C2 y LE-R.06C6.	107
Tabla 4-17. Clasificación de materiales de acuerdo con la resistencia en compresión (R_c)	111
Tabla 4-18. Valores de cálculo para resistencia a la fractura y módulo em compresión de probetas ensayadas en flexión 4 puntos.	113
Tabla 5-1. Clases de tráfico de acuerdo con el número acumulado de vehículos pesados y número de vehículo pesados por día promedio.	115
Tabla 5-2. Propiedades de plataformas utilizadas para modelación.	115
Tabla 5-3. Propiedades de capas de cuerpo utilizadas para modelación.	116
Tabla 5-4. Propiedades de mezcla asfáltica utilizada para la modelación.	116
Tabla 5-5. Valores admisibles de parámetros mecanicistas para estructura tipo 1 (ET1).	118
Tabla 5-6. Valores admisibles de parámetros mecanicistas para estructura tipo 2 (ET2).	119
Tabla 5-7. Catálogo de estructuras diseñadas para ET1.	120
Tabla 5-8. Valores obtenidos de parámetros mecanicistas para el catálogo de ET1.	121
Tabla 5-9. Catálogo de estructuras diseñadas para ET2.	122
Tabla 5-10. Valores obtenidos de parámetros mecanicistas para el catálogo de ET2...	123

Lista de símbolos y abreviaturas

Teniendo en cuenta la variedad y frecuencia de nomenclaturas utilizadas en el desarrollo de este trabajo, a continuación, se presentan las abreviaturas para la denominación de materiales, instituciones y procesos referidos.

Abreviaturas

Abreviatura	Término
--------------------	----------------

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BF	<i>Blast Furnace slag</i>
BOF	<i>Basic Oxygen Furnace slag</i>
BOS	<i>Basic Oxygen Steelmaking</i>
CBR	<i>Californian Bearing Ratio</i>
CS	Ensayo de Compresión Simple
EAF	<i>Electric Arc Furnace slag</i>
EAS	<i>Electric Arc Steelmaking</i>
EB	Escoria Blanca
Ec	Módulo en Compresión
ECSD	Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco
EN	Escoria Negra
ENF	Escoria Negra Fina
ENG	Escoria Negra Gruesa
Er	Módulo Resiliente
F4P	Ensayo de Flexión 4 Puntos
IDU	<i>Instituto de Desarrollo Urbano</i>
INVIAS	Instituto Nacional de Vías

Abreviatura Término

IPI	Índice de Portancia Inmeadita
K_{TC}	Resistencia a la fractura
LA	Desgaste en Máquina de Los Ángeles
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LF	<i>Ladle Furnace slag</i>
MC	Ensayo de Módulo en Compresión
MDE	Abrasión en Aparato Micro Deval
MR	Ensayo de Módulo Resiliente
R_C	Resistencia en compresión
R_F	Resistencia en Flexión
R_T	Resistencia en Tracción Directa
R_{TI}	Resistencia en Tracción Indirecta
TI	Ensayo de Tracción Indirecta
VBS	Valor de azul de metileno
WEF	<i>World Economic Forum</i>

Introducción

Para el año 2021 en Colombia, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) reportó solo un 46.56% de red vial primaria pavimentada en estado bueno, mientras para la red vial primaria no pavimentada, el 86.58% se encuentra en estado regular. Esta última, (red vial en estado regular) representa el 19.53% de la red vial primaria del país (INVÍAS, 2021).

En 2019, de acuerdo con el Foro Económico Mundial (WEF, 2019), con respecto a 141 redes viales evaluadas, Colombia ocupó el puesto 97 en conectividad vial y 87 en calidad de la infraestructura vial respectivamente. Por lo cual, es necesario continuar actualizando e innovando la red vial nacional, más cuando según Ordoñez y Parra (2017), en Colombia el 80% de la carga que se moviliza es transportada por medio terrestre.

La construcción de estructuras de pavimento en Colombia requiere una gran cantidad de agregados, usualmente extraídos de canteras y/o ríos, para garantizar la durabilidad de las vías del país, frente a las solicitudes de vehículos y teniendo en cuenta el crecimiento del tráfico de los mismos.

A pesar de la filosofía de producción el menor desperdicio posible de materias primas para la fabricación de cualquier producto, en la realidad es inevitable la generación de desperdicios durante el desarrollo de diferentes actividades de manufactura, producción y demolición.

Considerando lo anterior, es importante reconocer el uso de remanentes o subproductos de otras industrias dentro del campo de la construcción de infraestructura vial que puedan sustituir, de manera total o parcial, los agregados pétreos utilizados tradicionalmente. Sin embargo, la mayoría de subproductos, provenientes de industrias, no tienen una caracterización adecuada y enfocada a la construcción vial. Por esta razón la mayoría de

estos subproductos son desvalorizados y por lo tanto considerados como residuos (Ochoa, 2019).

La escoria siderúrgica es un subproducto proveniente del proceso de fabricación del acero. Esta se ha convertido, en los últimos años, en uno de los materiales alternativos más estudiados en los países productores del metal, ya que es una de las materias primas que mejor se acoplan a las necesidades de las obras civiles debido a su resistencia y durabilidad al ser utilizados como agregados pétreos (Aquino, 2012).

En Colombia, la industria siderúrgica usa dos (2) procesos principales, la producción integrada y semi-integrada de acero. La integrada, se caracteriza por producir el metal a partir de la explotación natural de los minerales de hierro y carbono. La semi-integrada, incorpora la chatarra como materia prima para la transformación y generación del acero. De esta manera, las escorias son obtenidas en diferentes condiciones y procesos de acuerdo con la etapa y equipo utilizado para la producción del acero.

Los cuatro (4) tipos de escoria más representativos a nivel nacional son:

- Escorias de alto horno (BF), por sus siglas en inglés (*Blast Furnace*).
- Escorias de convertidores (BOF), por sus siglas en inglés (*Basic Oxygen Furnace*).
- Escorias de horno de arco eléctrico o EAF por sus siglas en inglés (*Electric Arc Furnace*)
- Escorias de horno de cuchara o LF por sus siglas en inglés (*Ladle Furnace*)

La planta siderúrgica *Gerdau Diaco*, localizada en el municipio de Tuta en Boyacá, genera escorias EAF y LF como residuo de la elevada producción de acero, a partir de su proceso semi-integrado. Estas escorias corresponden al insumo base de la presente investigación.

El uso de aditivo a base de zeolitas para mejorar el desempeño de materiales tratados con cemento en proyectos carreteros ha tenido lugar en países como Rusia, Bulgaria, Qatar, México, Ecuador, Colombia, entre otros. *PowerCem Technologies*, es una de las compañías pioneras con la implementación del aditivo *RoadCem*, con participación en proyectos en Moscú, San Petersburg, y Amazonía.

Introducción

La compañía *I.C. Ingeniería y Consultoría S.A.S*, como consultora y constructora de obras de infraestructura vial, es especialista en el uso del aditivo a base de zeolitas (*RoadCem*) a nivel nacional.

Dada la experiencia de *I.C. Ingeniería y Consultoría S.A.S* y *Gerdau Diaco* en el uso de sus materiales, se realizó un acuerdo que permitiera caracterizar mejor, tanto el material de residuo siderúrgico como la mezcla de este con aditivo a base de zeolitas y cemento, dentro del campo de la ingeniería de infraestructura vial.

De acuerdo con lo anterior, los objetivos del presente trabajo de investigación son:

Objetivo general: Evaluar el desempeño de agregado siderúrgico estabilizado con aditivo a base de zeolitas como capa de cuerpo para estructuras de pavimento

Objetivos específicos:

- Caracterizar un tipo de agregado siderúrgico colombiano de acuerdo con la normativa nacional vigente.
- Diseñar tipos de mezcla de agregado siderúrgico con diferentes porcentajes de aditivo y cemento.
- Evaluar el comportamiento mecánico de las diferentes mezclas diseñadas.
- Modelar posibles estructuras de pavimento implementando el material de estudio.

Para dar cumplimiento a estos objetivos, este documento presenta los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto y se desarrolla en seis capítulos que se resumen a continuación:

1. Capítulo 1: Marco teórico

Presenta el desarrollo de la industria siderúrgica como productora de escorias y su relación con el campo de la ingeniería de pavimentos. Adicionalmente, se exponen los procesos de obtención y los tipos de escoria que se encuentran a nivel nacional. Igualmente se presentan las propiedades y procesos de caracterización, física y mecánica de este material como agregado siderúrgico para carreteras.

2. Capítulo 2: Antecedentes

Presenta un reconocimiento de las principales investigaciones, a nivel nacional e internacional, relacionadas con el uso de escoria de siderúrgica como material gradado de construcción dentro del campo de la ingeniería civil, enfocándose en las obras de infraestructura vial.

3. Capítulo 3: Marco experimental

Desarrolla los ensayos de caracterización física y mecánica de la escoria o agregado siderúrgico de horno de arco eléctrico (EAF) y de horno de cuchara (LF), como material de constitución de capas de cuerpo para estructuras de pavimentos.

En primer lugar, la caracterización física se realizó sobre el agregado siderúrgico. Posteriormente, se efectuó la caracterización mecánica sobre mezclas del agregado siderúrgico modificado con aditivo a base de zeolitas y cemento en porcentajes de 0%, 2% y 6% (en masa). Los ensayos fueron ejecutados en el laboratorio de geotecnia y pavimentos de la Universidad Nacional de Colombia y parcialmente en la Universidad de los Andes.

4. Capítulo 4: Análisis de resultados

Muestra el análisis de parámetros obtenidos tanto en la caracterización física como mecánica de los materiales, con las variables que afectan su comportamiento. Así mismo se comparan con estándares nacionales e internacionales.

5. El Capítulo 5: Modelación de estructuras de pavimento

Presenta un catálogo de posibles estructuras conformadas por el material de estudio de acuerdo con los parámetros obtenidos en la campaña experimental y utilizados en la modelación mecanicista de pavimentos.

6. El Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

Identifica los resultados más significativos y los puntos principales a tener en cuenta en futuros proyectos relacionados.

1. Marco teórico

1.1 Industria siderúrgica

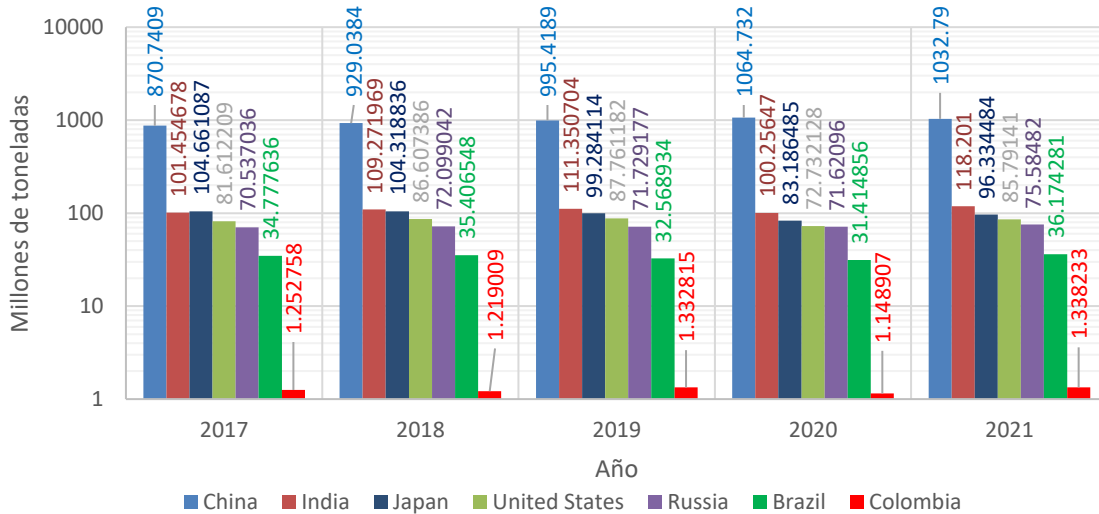
La industria siderúrgica incluye todos los procesos y sistemas que tienen como objetivo la producción y manufactura de elementos compuestos de acero. Estos procesos incluyen la transformación de materia prima de origen natural y/o elementos metálicos con vida útil finalizada que pueden ser reprocesados. Sin embargo, esta industria incorpora la producción de residuos como la escoria de siderúrgica, la cual, en los últimos años se ha convertido en un material alternativo en la construcción de estructuras de pavimento.

La Asociación Mundial del Acero (World Steel Association, 2022), afirma que la producción total de acero en los años 2017 y 2021 fue de 1736 millones de toneladas y 1953 millones de toneladas, respectivamente. Así mismo, destaca a China como la primera potencia en producción de acero con poco más del 50% de la cantidad a nivel mundial, seguido por India, Japón, Estados Unidos y Rusia con el 6%, 5%, 4.5%, y 4%, respectivamente.

En 2021, Colombia contó con una producción de 1.3 millones de toneladas. Para el mismo año, en comparación con los demás países de Latinoamérica, Colombia se ubicó por debajo de Brasil, México y Argentina en la cantidad de acero producida y presentó un crecimiento de 6.82% entre los años 2017 y 2021.

La **Figura 1-1** muestra la evolución de la producción de acero entre los años 2017 y 2021 para los cinco (5) principales países productores a nivel mundial, además de los números correspondientes a Brasil y Colombia.

A pesar de la suspensión entre los años 2020 y 2021 como producto de la pandemia por Covid19, la producción de acero se mantiene durante los últimos cinco (5) años para todos los países y retoma un alza en la producción. Lo anterior, debido a la alta demanda del material en las diferentes industrias entre las que destacan la metalmecánica e infraestructura.

Figura 1-1. Producción anual de acero entre 2017 y 2021.

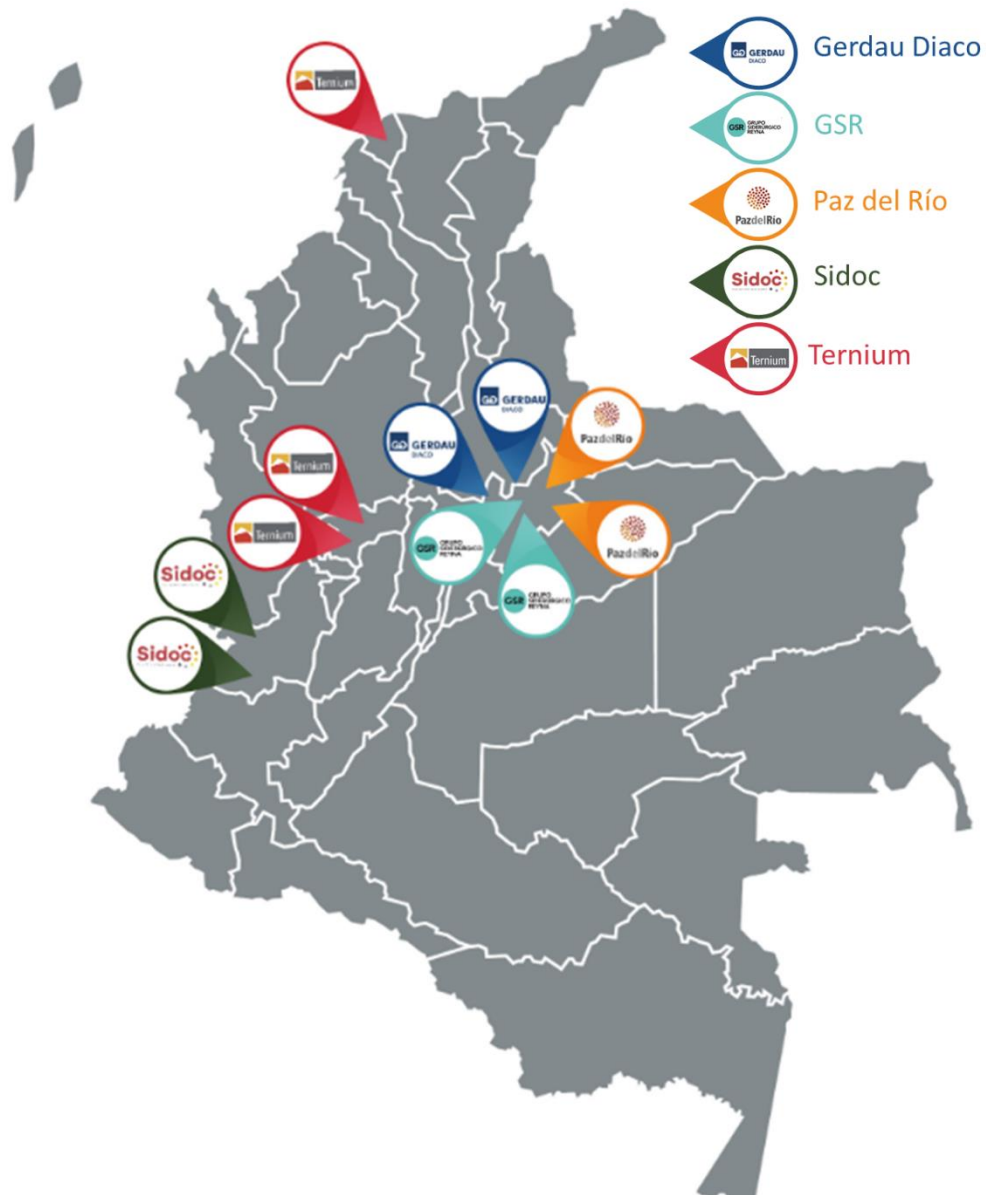
Fuente: (World Steel Association, 2022).

La demanda de acero a nivel mundial para el año 2018 tuvo un crecimiento de 7% con respecto al año anterior con un total de 1706.9 millones de toneladas. Por otro lado, el año 2020 presentó un decrecimiento del 2.4% con respecto al año 2019 como consecuencia de la emergencia sanitaria presentada a nivel mundial, sin embargo, las proyecciones para el año 2022 establecen una demanda de 1924.6 millones de toneladas de acero con un crecimiento de 2.7% con respecto al año 2021 (World Steel Association, 2022).

Históricamente en Colombia, la industria siderúrgica dio inicio en 1938 y actualmente hay doce plantas de laminación en caliente para la producción de aceros largos y cinco (5) siderúrgicas que representan el 100% de la producción de aceros largos en el país las cuales son: Gerdau Diaco, Acerías Paz del Río, GSR, Sidoc y Ternium. Además, la producción nacional está principalmente dirigida al sector de la construcción, infraestructura y obras civiles, donde este último tuvo un crecimiento de 11.2% en el año 2019 (Comité colombiano de productores de acero - ANDI, 2019).

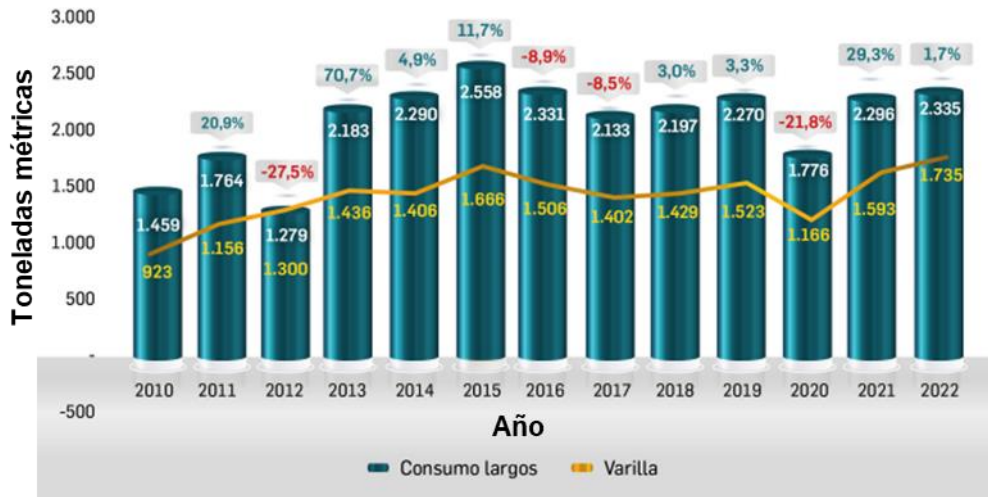
La **Figura 1-2** muestra la presencia de las industrias de siderurgia en el país, la cuales están situadas en 16 departamentos, representan el 10.6% del PIB industrial junto con la cadena metalmeccánica y es un referente mundial en economía circular dada la capacidad de reciclaje de chatarra, la cual destacó en el año 2019 con 1.2 millones de toneladas.

Figura 1-2. Presencia de industrias siderúrgicas en el territorio colombiano.



Fuente: (Comité colombiano de productores de acero - ANDI, 2019).

La **Figura 1-3** muestra la evolución de la demanda de porcentual anual y el porcentaje de crecimiento con respecto a cada año anterior, en Colombia, entre los años 2010 y 2022, tanto de acero de aceros largos como de varillas. Se estima que para después del año 2022 la tendencia sea al alza o constancia con respecto a los años anteriores (Comité colombiano de productores de acero - ANDI, 2019).

Figura 1-3. Proyección de demanda nacional de acero en Colombia entre 2010 y 2022.

Fuente: (Comité colombiano de productores de acero - ANDI, 2019).

1.2 Escoria de siderúrgica

La escoria de siderúrgica es el principal residuo o subproducto sólido proveniente de la industria de siderúrgica. Los diferentes procesos y etapas de producción del metal dan lugar a la singularidad de las escorias obtenidas

La escoria no es considerada un metal, sino un material que se origina por la reacción química de un fundente con los restos de otro material, ceniza de un combustible, y/o con las impurezas oxidadas durante la refinación de un metal. Además, de manera general, la escoria de acería presenta una forma cúbica y angular, y superficialmente rugosa (Aquino, 2012).

La escoria está conformada principalmente de óxidos, sulfuros, aluminatos y fosfatos. Estos elementos le permiten formar una capa superior y sobresalir en el baño metálico. La escoria se caracteriza por su composición básica que corresponde a la relación entre óxidos básicos y ácidos que le confieren la aptitud de absorber y retener sólidamente las impurezas del metal (Zaragoza, 2001).

Internamente, la escoria presenta un aspecto poroso formado por la salida de gases atrapados en el material caliente durante el proceso de enfriado. Adicionalmente, durante el proceso de trituración del material se generan fragmentos cúbicos de morfología

angulosa, rugosa y de peso significativo. Estas características lo hacen un material alternativo de gran rigidez y resistencia que es usado como balasto de vías férreas, bases granulares de carreteras, pavimentos asfálticos, tratamientos superficiales y sellos (Aquino, 2012).

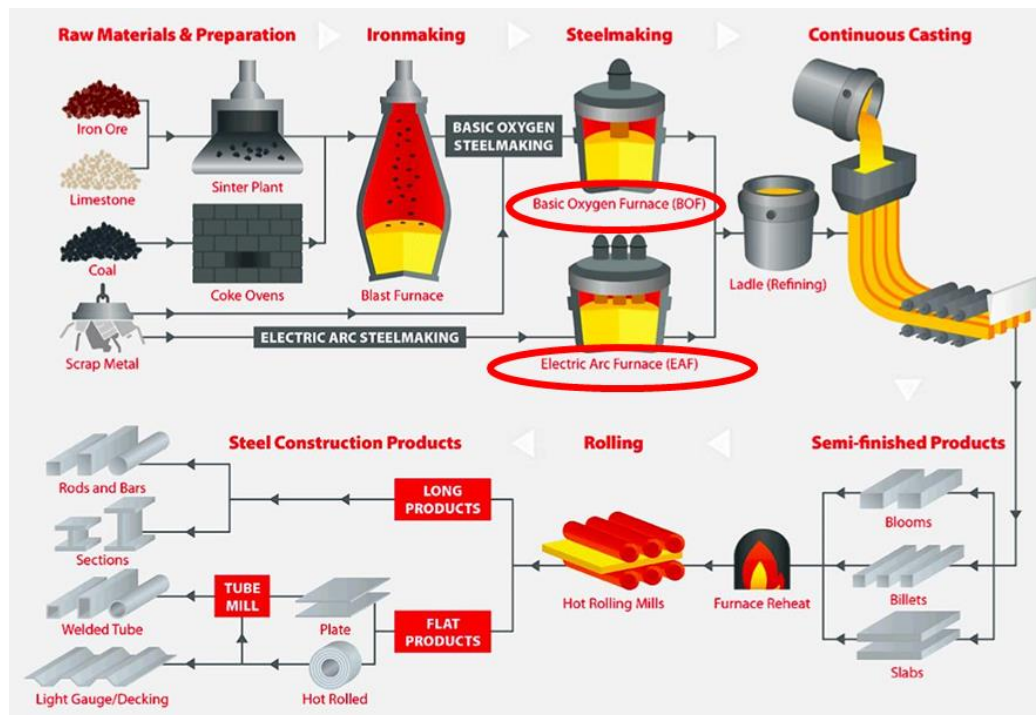
1.2.1 Procesos de obtención de escoria

Existen dos principales procesos para la generación de acero:

- Oxigenación básica o *Basic Oxygen Steelmaking* (BOS): Utiliza el mineral de hierro, coque y caliza como materia prima para la producción de acero.
- Arco eléctrico o *Electric Arc Steelmaking* (EAS): fundamenta su producción mediante la chatarra de hierro o acero, aleaciones metálicas, coque y cal.

La **Figura 1-4** muestra el proceso general de producción de acero. Los métodos BOS y EAS son conocidos también como producción integrada y semi-integrada, respectivamente (Pereira et al., 2021).

Figura 1-4. Proceso general de producción de acero.



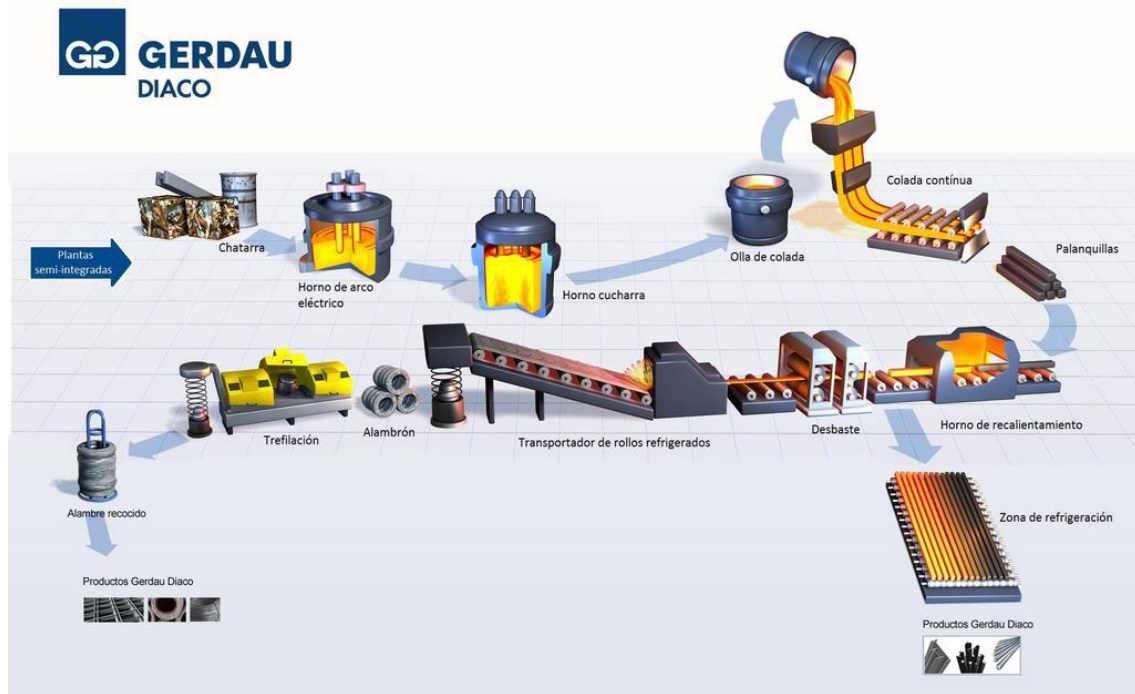
Fuente: (NSC, 2017)

La Acería Paz del Río, es la principal productora de acero por medio del proceso integrado en Colombia. Este proceso se compone de cinco (5) etapas principales (Morcote, 2019).

- Etapa 1 (Fabricación primaria): comprende la explotación de la materia prima sólida para ser transformada en materia prima básica líquida siendo cargada y tratada en altos hornos hasta la obtención de arrabio.
- Etapa 2 (Aceración): es el proceso de desescoriado mecánico para la obtención de un material más homogéneo, así como el tratamiento en los convertidores, en donde mediante un proceso de soplado se genera la oxidación de los elementos provenientes del arrabio, como producto metálico de salida del alto horno y compuesto al menos por 90% de hierro y diferentes minerales como la hematita o la magnetita, removiendo así el carbono.
- Etapa 3 (Procesamiento): corresponde al procesamiento del acero líquido en la planta de colada continua, en donde se producen secciones cuadradas o palanquillas
- Etapa 4 (Laminación): comprende la transformación del acero mediante un proceso de moldeo a altas temperaturas de las palanquillas en la geometría y acabado deseado, ya sea alambre o barras, corrugadas o lisas.
- Etapa 5 (Inspección): es el proceso de reconocimiento del material residual mediante caracterización física y química que permita identificar el material a reprocesar para la obtención más acero.

Gerdau Diaco, es la principal productora de acero mediante siderurgia semi-integrada y la mayor recicladora de chatarra ferrosa de Colombia. Las escorias obtenidas en este proceso corresponden a escorias de horno de arco eléctrico (EAF) y escorias de horno de cuchara (LF). La **Figura 1-5** muestra el proceso general de producción de acero en la planta siderúrgica *Gerdau Diaco*.

Figura 1-5. Proceso de producción de acero semi-integrado en siderúrgica *Gerdau Diaco*.



Fuente: (Gerdau Diaco, 2017)

El proceso de producción es llevado a cabo siguiendo cinco (5) etapas:

- Etapa 1 (Recepción y clasificación): la materia prima o chatarra es recibida, pesada y caracterizada visualmente, para la identificación de elementos que puedan representar peligro para la seguridad del personal de planta.
- Etapa 2 (Preparación): comprende tres (3) procesos mediante los cuales se ajusta el tamaño y composición a las especificaciones requeridas para el ingreso posterior al horno. Estos 3 procesos se denominan, corte, compactación y fragmentación.
- Etapa 3 (Fundición): se realiza mediante horno de arco eléctrico, en donde se incluye pequeñas cantidades de mineral de hierro, prerresiduos, ferroaleaciones, cal, espato-flúor, coque y oxígeno. Esta etapa puede discriminarse en 2 fases principales:
 - Fase A (Fusión): Ocurre totalmente en el horno de arco eléctrico en donde, a partir de oxidación y desfosforación se obtiene el acero líquido y la escoria EAF (Parra & Sánchez, 2010).

- Fase B, (Fundición o afino): Inicia en el horno de arco eléctrico y termina en el horno cuchara. Durante el afino se llevan a cabo diferentes procesos de acuerdo con el tipo de acero que se desea obtener, ya sea acero inoxidable o aceros especiales. De manera general, comprende procesos de desoxidación, desulfuración y vaciado, en donde, la materia prima procesada se lleva al horno de fusión, se transporta mediante cucharas industriales y finaliza recorrido en el horno de afino hasta alcanzar la temperatura y la composición química apropiada. Una vez vaciado el acero líquido el horno es basculado para retirar la escoria de horno de cuchara (LF) formada en la superficie del baño durante el proceso de afino (Parra & Sánchez, 2010).
- Etapa 4 (Laminación): En esta etapa se recalienta, en el horno denominado Bendotti, la palanquilla obtenida a una temperatura entre 1160°C y 1200°C y posteriormente es generada la configuración geométrica requerida en el tren de desbaste y mediante laminadoras. Además, se proporciona el acabado rugoso en caso de ser necesario en un proceso térmico hasta finalmente realizar el corte en secciones de fácil manipulación y transporte mediante una cizalla volante (Parra & Sánchez, 2010). Se desenvuelve en cinco (5) fases:
 - Fase A: Calentamiento
 - Fase B: Desbaste
 - Fase C: Laminado continuo
 - Fase D: Termotratado
 - Fase E: Enfriamiento y corte
- Etapa 5: (Empaquetado y despacho): Comprende el conteo, etiquetado y almacenamiento de las unidades de acero fabricadas.

1.2.2 Tipos de escoria

Existen diversos tipos de escoria de acuerdo con el proceso, subprocesos, materiales y equipos utilizados para la producción de acero. A continuación, se describen los principales tipos de escoria producidos a nivel nacional.

- Escoria de alto horno (BF): Es obtenida en el primer proceso de producción de acero mediante siderurgia integrada en el alto horno. Es una escoria no ferrosa y consiste en silicatos y cal. Pueden producirse 3 tipos de escoria BF (Brockenbrough, 2009):
 - Escoria BF enfriada por aire: Es porosa y adecuada como agregado en concreto, asfalto, bases de carreteras y material de relleno.
 - Escoria BF granulada: puede ser molida para ser utilizada como cemento de escoria. La **Figura 1-6** presenta una muestra de escoria BF granulada.
 - Escoria expandida: suele ser usada como agregado en concreto liviano

Figura 1-6. Escoria granulada BF.



Fuente: (Qin et al., 2021).

- Escoria de convertidores (BOF): Es la escoria granulada obtenida en el proceso secundario de la siderurgia integrada. Corresponde a la escoria mayormente producida y presenta una fuerte alcalinidad, alta angularidad, superficie resistente y rugosa. (Chen et al., 2015). La **Figura 1-7** presenta una muestra de escoria BOF de diámetro nominal promedio entre 2 mm y 4 mm proveniente de la planta siderúrgica Paz del Río.

Figura 1-7. Escoria BOF de Acería Paz del Rio.



Fuente: (Morcote, 2019).

- Escoria de horno de arco eléctrico (EAF): Es la escoria granulada obtenida en el proceso primario de la siderurgia semi-integrada. La escoria EAF es un producto triturado de color aparentemente negro, con apariencia de roca y textura superficial rugosa. La **Figura 1-8** presenta una muestra de escoria EAF de tamaño máximo nominal de 19mm, proveniente de la siderúrgica *Gerdau Diaco*.

Figura 1-8. Escoria EAF de siderúrgica *Gerdau Diaco*.



- Escoria de horno de cuchara (LF): Esta escoria granulada puede ser obtenida tanto en el proceso integrado como semi-integrado durante la etapa de afino en horno de cuchara. Es una escoria de color aparentemente blanco o gris claro con una composición granular particularmente más fina en comparación con los otros tipos

de escoria. La **Figura 1-9** presenta una muestra de escoria LF de tamaño máximo nominal de 19mm, proveniente de la siderúrgica *Diaco*.

Figura 1-9. Escoria LF de siderúrgica *Gerdau Diaco*.



1.3 Propiedades índice del agregado siderúrgico como material granular

El agregado siderúrgico puede caracterizarse de acuerdo con el Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras (INVIAS, 2013).

1.3.1 Granulometría (INV-E-213-13)

Permite determinar los porcentajes en masa correspondientes a los diferentes tamaños de partículas. Se desarrolla a partir de un proceso mecánico de tamizado sobre una muestra representativa de material empleando una serie específica de tamices como se muestra en la **Figura 1-10**.

Los resultados permiten determinar o verificar el esqueleto granular de un material compuesto por varios tamaños de partículas.

Figura 1-10. Tamizado para determinación de granulometría de materiales.



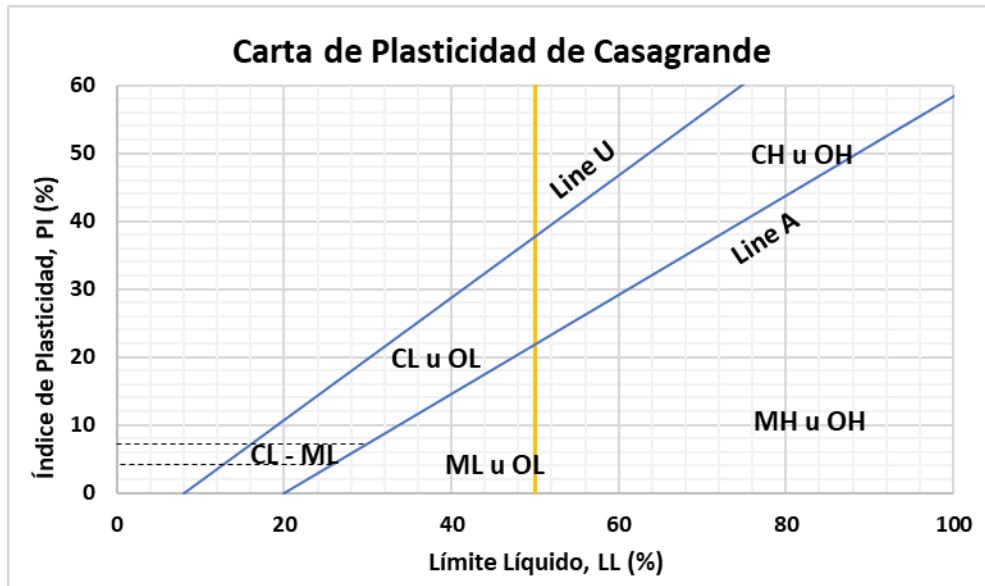
1.3.2 Límites de consistencia (INV-E-125-13), (INV-E-126-13) y (INV-E-129-13)

Permiten identificar los puntos límite entre estados de comportamiento en suelos finos. Además, contribuyen a la clasificación y caracterización de la fracción fina de los suelos. Los límites son:

- Límite líquido (LL): cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido.
- Límite plástico (LP): cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico.
- Límite de retracción o contracción (LC): cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y se contrae al perder humedad.

Relacionados con estos límites, se define el Índice de plasticidad $IP = LL - LP$.

La **Figura 1-11** presenta la gráfica o carta de plasticidad propuesta por Casagrande, la cual permite clasificar suelos finos en función del límite líquido y el índice de plasticidad

Figura 1-11. Carta de plasticidad propuesta por Casagrande.

1.3.3 Resistencia a la degradación en Máquina de Los Ángeles (INV-E-218-13)

Permite determinar la resistencia al impacto, abrasión y molienda de un material granular. Se realiza a través de un tambor de acero rotatorio y en conjunto con una serie de esferas metálicas de 46.8 mm de diámetro y una masa fija, cuya cantidad es función de la granulometría del material. El proceso ocurre en estado seco, con velocidad constante, número fijo de ciclos. Este ensayo es usado como indicador de la calidad y competencia de diferentes materiales.

El porcentaje de pérdidas en este ensayo (LA), se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$LA = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad \text{Ecuación 1-1}$$

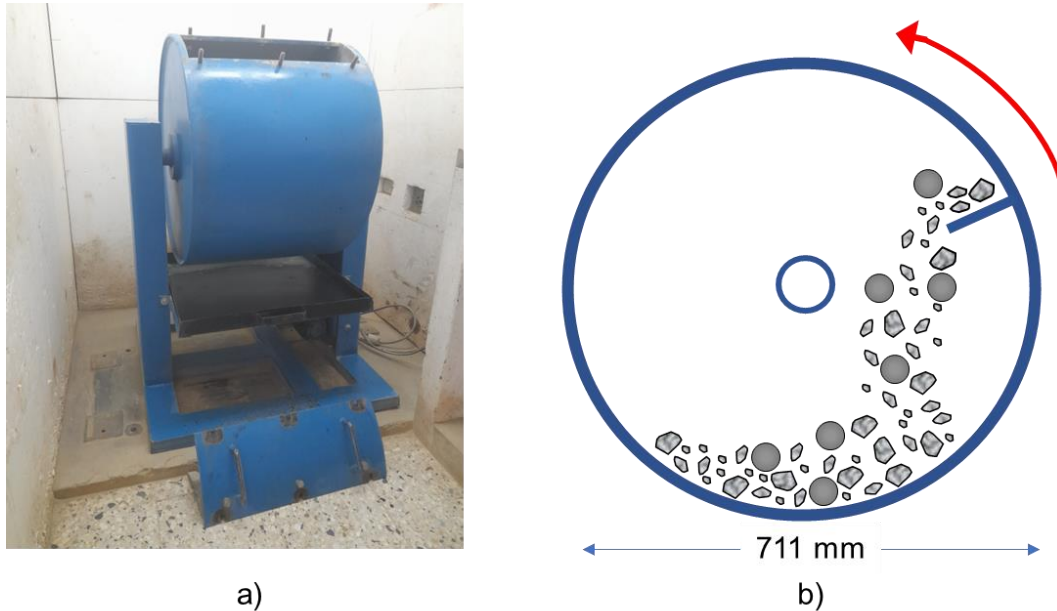
Donde:

P_1 : Masa de la muestra seca antes del ensayo

P_2 : Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz N12

La **Figura 1-12** muestra el esquema de ejecución del ensayo de desgaste en Máquina de Los Ángeles.

Figura 1-12. a) Dispositivo de ejecución del ensayo en Máquina de Los Ángeles (Laboratorio Geotecnia -UNAL). **b)** Esquema de ejecución de ensayo.



1.3.4 Resistencia a la abrasión Micro-Deval (INV-E-238-13)

Determina el desgaste por efecto de la abrasión de agregados grueso en presencia de agua y una carga compuesta por esferas metálicas de 9.5 mm de diámetro y de masa fija. El ensayo es ejecutado en un recipiente de acero de 20cm de diámetro, el cual realiza ciclos a velocidad constante. La cantidad de ciclos y la cantidad de esferas son función de la granulometría del material.

El porcentaje de pérdidas en este ensayo (*MDE*), se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$MDE = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad \text{Ecuación 1-2}$$

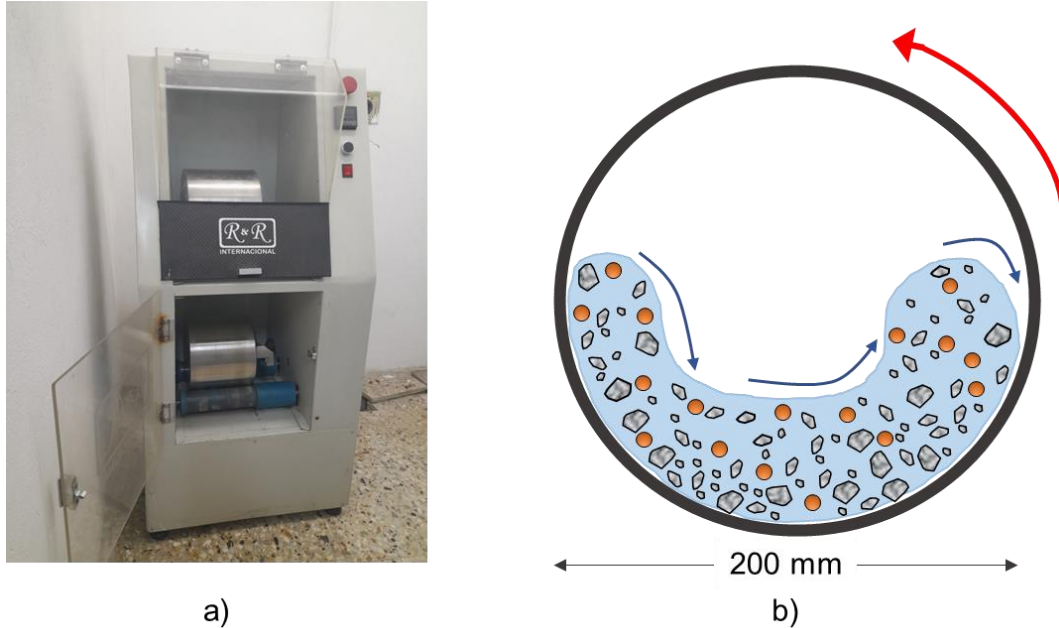
Donde,

A: Masa de la muestra seca antes del ensayo

B: Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz N16

La **Figura 1-13** muestra el esquema de ejecución del ensayo de abrasión en Aparato Micro Deval.

Figura 1-13. a) Dispositivo de ejecución del ensayo en Aparato Micro Deval (Laboratorio Geotecnia -UNAL). **b)** Esquema de ejecución de ensayo.



1.3.5 Valor de azul de metileno (INV-E-235-13)

Este ensayo permite identificar la cantidad de arcilla nociva de un agregado o la capacidad de absorción de un material fino. Consiste en adicionar sucesivamente dosis de una solución de azul de metileno a una suspensión en agua de una muestra representativa hasta que se confirme la presencia de colorante libre. Cuanto mayor sea el resultado, más nocivo puede llegar a ser el material estudiado.

La expresión que permite calcular el valor de azul de metileno (*VBS*) de un material ensayado es:

$$VBS = \frac{V_1}{M_1} \times 10$$

Ecuación 1-3

Donde,

V_1 : Volumen total añadido de la solución colorante

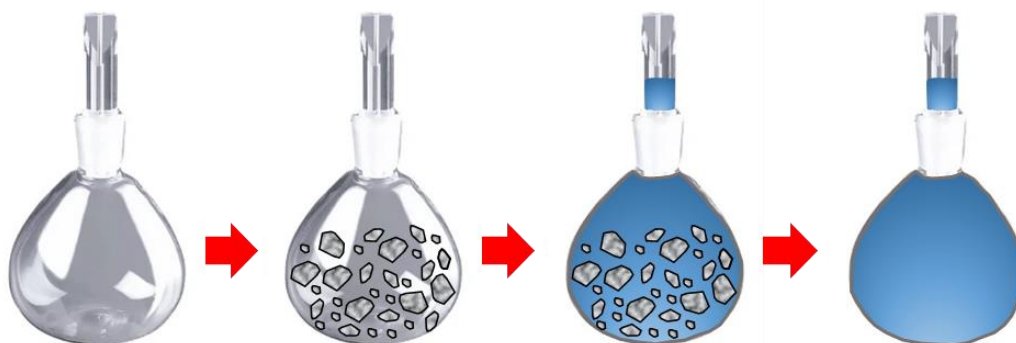
M_1 : Masa aparente de la muestra saturada en agua

1.3.6 Gravedad específica (Gs) y densidad máxima (EN 12697-5)

La gravedad específica (Gs) de un material determina la densidad de las partículas sólidas de una mezcla con respecto a la densidad del agua. La determinación de la gravedad específica para un material compuesto por partículas de diferentes tamaños puede obtenerse a partir de un proceso gravimétrico.

Es empleado un picnómetro de capacidad suficiente para albergar una muestra representativa que incluya todos los tamaños de la muestra. Se determina la masa de la muestra dentro del picnómetro previamente calibrado. Finalmente, se obtiene la masa del picnómetro con muestra y agua destilada a la temperatura de referencia, posterior al proceso de desaireado. La **Figura 1-14** muestra el esquema de ejecución del ensayo.

Figura 1-14. Esquema de determinación de densidad máxima de una mezcla de agregados.



1.3.7 Relación humedad – peso unitario seco, Proctor modificado (INV-E-142-13)

La relación humedad – peso unitario seco es un test mediante el cual se estandariza un procedimiento de compactación bajo diferentes contenidos de agua de un material granular. La densidad de los materiales granulares varía en función del contenido de agua y la energía de compactación. El ensayo Proctor modificado es aplicado en materiales granulares que son utilizados convencionalmente para construcción de carreteras de acuerdo con el nivel de compactación y las cargas elevadas a las que serán sometidos.

El ensayo permite determinar el contenido de agua óptimo (w_{OPM}), el cual conlleva directamente a la obtención del peso unitario seco máximo ($\gamma_{d_{max}}$) del material evaluado.

El contenido de agua (w) de las muestras se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$w [\%] = \frac{M_1}{M_2} \times 100 \quad \text{Ecuación 1-4}$$

Donde,

M_1 : Masa del agua

M_2 : Masa de los sólidos

El peso unitario total (γ_T) de las muestras se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\gamma_T = \frac{M_T}{V_T} \quad \text{Ecuación 1-5}$$

Donde,

M_T : Masa total de la muestra

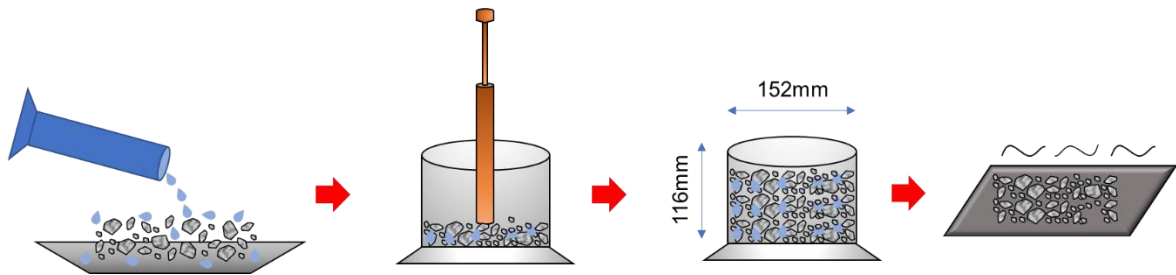
V_T : Volumen total de la muestra

El peso unitario seco (γ_d) de las muestras se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_T}{(1 + w)} \quad \text{Ecuación 1-6}$$

La **Figura 1-15** muestra el esquema general de ejecución del ensayo de Proctor modificado.

Figura 1-15. Esquema de ejecución de ensayo Proctor modificado.



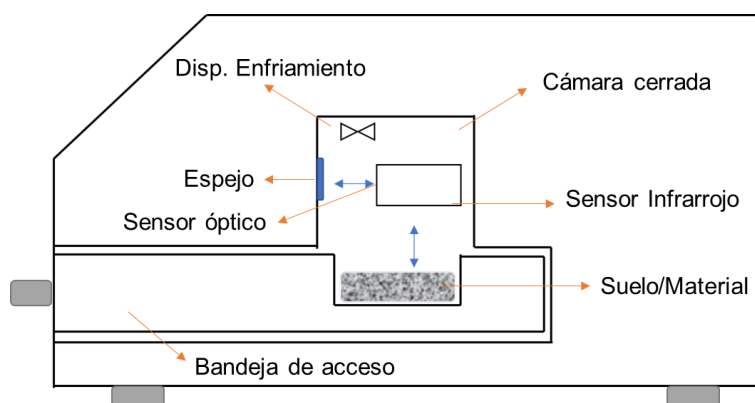
1.3.8 Succión total - Método del psicrómetro de punto de rocío (ASTM D6836-02)

La succión mide la capacidad de un material o un suelo para retener agua en sus poros cuando este se encuentra en una condición parcialmente saturada. El método del psicrómetro estima la succión total de una muestra de material en condiciones isotérmicas. La técnica del punto de rocío de un espejo frío permite equilibrar la fase líquida del agua

de los poros con el valor de agua en el aire dentro de la cámara de medición. Es empleado un dispositivo de enfriamiento que garantiza la formación de una gota de rocío en el espejo y es medida la temperatura de la muestra. Con base en la Ley Psicrométrica se estima la succión total.

La **Figura 1-16** muestra el esquema interno de un equipo (WP4C) empleado para medir succión a partir de la técnica de punto de rocío.

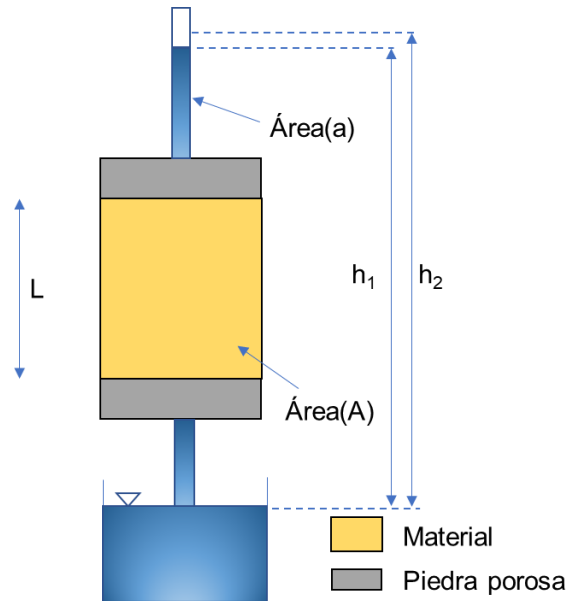
Figura 1-16. Esquema interno equipo WP4C para medición de succión total.



1.3.9 Permeabilidad – Método de carga variable (EN 17892-11)

Este procedimiento permite evaluar la capacidad de permeabilidad de una muestra de material conformada por diferentes tamaños de partículas compactadas en un molde. La evaluación se realiza midiendo de manera indirecta, el agua que pasa por la muestra, a partir de la caída del nivel del agua de un tubo recto colocado sobre la muestra y teniendo en cuenta la geometría tanto de la muestra como del tubo capilar. El coeficiente de permeabilidad (k), expresado en cm/s, sujeto a un gradiente hidráulico unitario, representa la velocidad en la que fluye el agua a través de un material (Angelone et al., 2006).

La **Figura 1-17** muestra el esquema general del sistema utilizado en los ensayos de permeabilidad con carga o cabeza variable.

Figura 1-17. Esquema del sistema de medición de permeabilidad con carga variable.

El coeficiente de permeabilidad se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$K = \frac{a \cdot H}{(A \cdot t) \ln(h_1/h_2)} \quad \text{Ecuación 1-7}$$

Donde,

a: Área transversal del tubo capilar

H: Altura de la muestra

A: Área transversal de la muestra

t: Tiempo transcurrido en lectura inicial y final

h₁: Lectura longitudinal inicial en el tubo capilar

h₂: Lectura final inicial en el tubo capilar

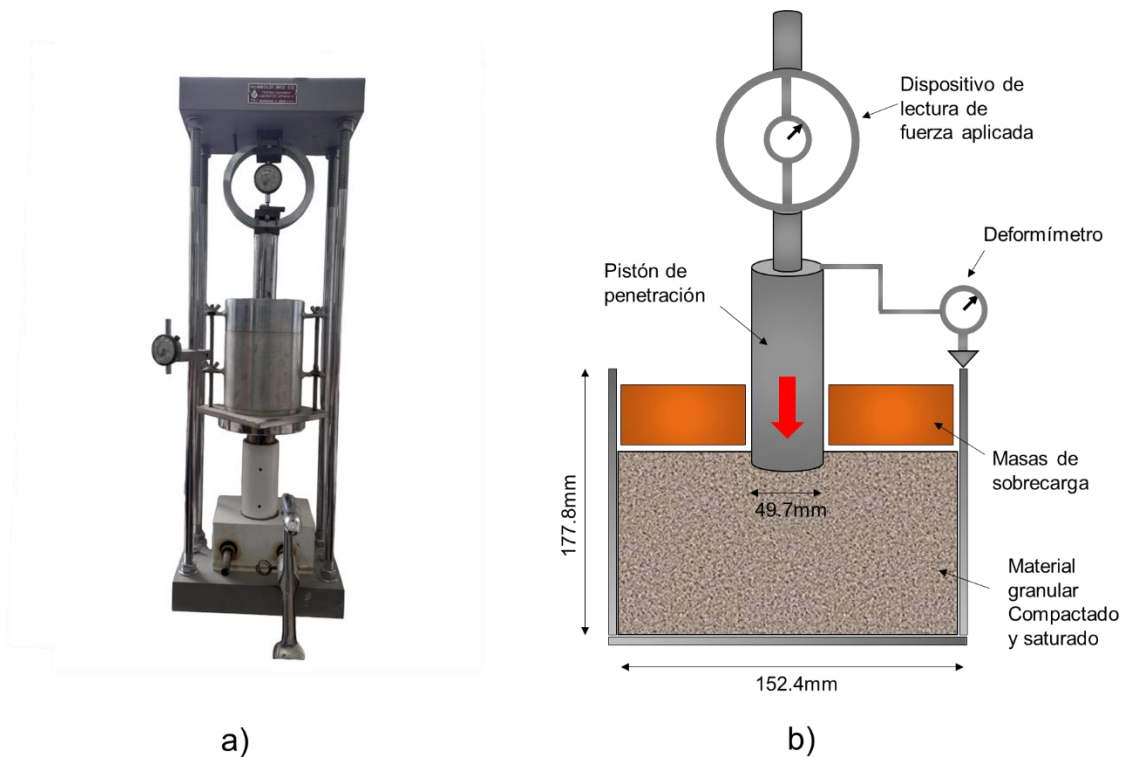
1.3.10 CBR - Californian Bearing Ratio (INV-E-148-13)

El índice CBR permite evaluar la resistencia potencial de materiales de subrasante, subbase y base, así como materiales reciclados, para ser empleados en pavimentos. El CBR se expresa como la relación porcentual entre el esfuerzo requerido para que un pistón circular penetre 2.54mm (0.1") o 5.08mm (0.2") sobre una muestra en estado natural o compactada en laboratorio, y, el esfuerzo requerido para penetrar a las mismas profundidades una muestra patrón. El ensayo es ejecutado a velocidad constante en

condición saturada de la muestra, la cual, se encuentra confinada en un molde metálico y con unas masas de sobrecarga en la parte superior.

La **Figura 1-18** muestra el esquema de ejecución del ensayo de penetración para la determinación del CBR.

Figura 1-18. a) Equipo para ensayo de CBR. **b)** Esquema del ensayo de penetración para determinación del índice CBR.



El esfuerzo (σ_i) de penetración, para penetraciones de 2.54 mm y 5.08 mm, se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A}$$

Ecuación 1-8

Donde,

F_i : Fuerza aplicada en cada penetración (2.54 mm o 5.08 mm)

A : Área del pistón de penetración

La relación de soporte (CBR_i) para penetraciones de 2.54 mm y 5.08 mm se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$CBR_i[\%] = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ref_i}} \quad \text{Ecuación 1-9}$$

Donde,

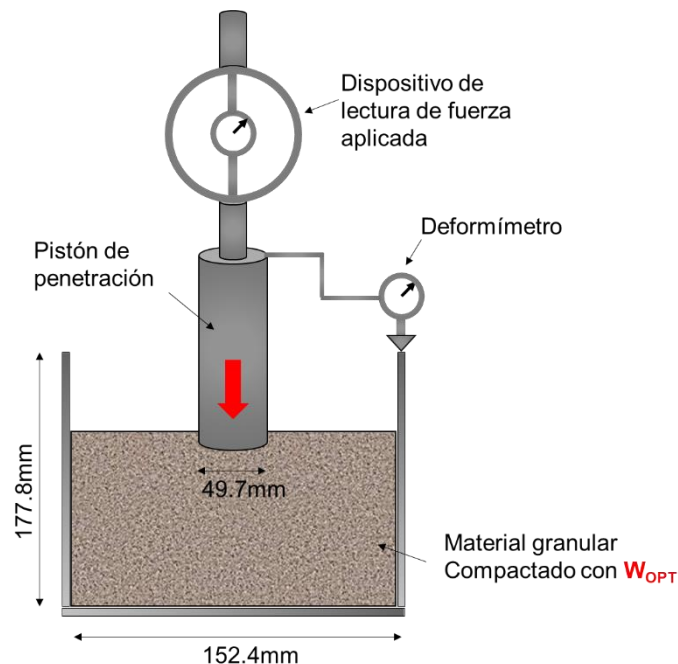
σ_{ref_i} : Esfuerzo de referencia. (6.9 MPa o 1000 lb/pg² para 2.54 mm) y
(10.3 MPa o 1500 lb/pg² para 5.08 mm)

1.3.11 IPI – Índice de Portancia Inmediata (EN 13486-47)

El índice IPI permite evaluar la resistencia de materiales de subrasante, subbase y base, así como materiales reciclados en condición de densidad seca máxima y contenido de agua óptimo. El IPI se expresa como la relación porcentual entre el esfuerzo requerido para que un pistón circular penetre 2.54mm (0.1”) o 5.08mm (0.2”) sobre una muestra en estado natural o compactada en laboratorio, y, el esfuerzo requerido para penetrar a las mismas profundidades una muestra patrón, al igual que el ensayo CBR. El ensayo es ejecutado a velocidad constante con contenido de agua óptimo o natural de la muestra, la cual, se encuentra confinada en un molde metálico y sin sobrecarga.

La **Figura 1-19** muestra el esquema de ejecución del ensayo de penetración para la determinación del IPI.

Figura 1-19. Esquema del ensayo de penetración para determinación del índice IPI.



1.4 Estabilización de materiales con ligantes hidráulicos

Los ligantes hidráulicos son materiales que, al hidratarse, generan elementos microscópicos cristalinos que permiten aglomerar las partículas de un suelo o un material granular (LCPC & SETRA, 2000). Los ligantes hidráulicos confieren una cohesión permanente que depende de aspectos como:

- La naturaleza del material a estabilizar
- El tipo de ligante hidráulico
- La cantidad de ligante suministrada
- La homogenización y compactación de la mezcla
- La temperatura del medio y la edad de la mezcla

Uno de los ligantes hidráulicos más utilizados para la estabilización de suelos y materiales granulares para capas de pavimento es el cemento, gracias a su alta producción, versatilidad, durabilidad y altas propiedades de resistencia conferidas a los materiales.

Los materiales granules tratados con cemento, aumentan significativamente sus propiedades de resistencia a la compresión y tracción, lo último, como producto de la cementación producida sobre las mezclas generadas (LCPC & SETRA, 2000).

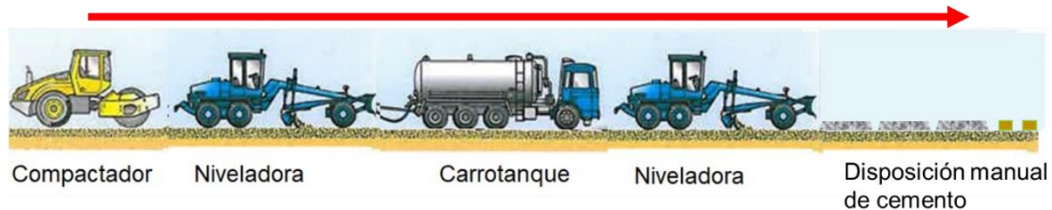
La dosificación de cemento es calculada con respecto al peso seco del material granular a estabilizar. Estos procesos de estabilización son ejecutados mediante tres (3) principales métodos:

- Método Manual: Es uno de los métodos más utilizados en Latinoamérica dada su practicidad. A continuación, se describe de manera general el proceso en campo:
 - Sobre la capa de material granular extendido, se disponen sacos de cemento a una distancia entre ellos, que permita la incorporación de la dosificación de ligante definida sobre todo el volumen a estabilizar
 - El equipo de motonivelado mezcla el material granular y el cemento adicionado.
 - El carrotanque adiciona la cantidad óptima de agua de acuerdo con el ensayo de Proctor. El equipo de motonivelado mezcla nuevamente el material granular estabilizados para homogenizar su humedad.

- El equipo de compactación lleva el material mezclado hasta la cota definida garantizando la densidad de diseño.

La **Figura 1-20** muestra de manera esquemática el método de estabilización manual.

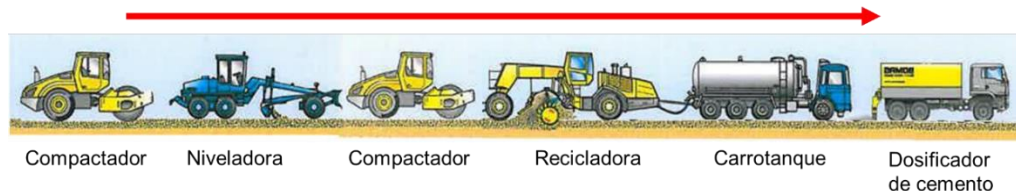
Figura 1-20. Tren de estabilización de materiales granulares por medio del método manual.



- Método in situ: Es uno de los métodos más apropiados para la incorporación de cemento a un material granular. A continuación, se describe de manera general el proceso en campo:
 - Sobre la capa de material granular extendido, el vehículo dosificador de cemento suministra la cantidad de cemento de acuerdo con el diseño.
 - La recicladora mezcla adecuadamente el material granular con el cemento y suministra el contenido de agua óptimo.
 - El equipo de compactación lleva el material mezclado hasta la cota definida, garantizando la densidad de diseño.

La **Figura 1-21** muestra de manera esquemática el método de estabilización in situ.

Figura 1-21. Tren de estabilización de materiales granulares por medio del método in situ.

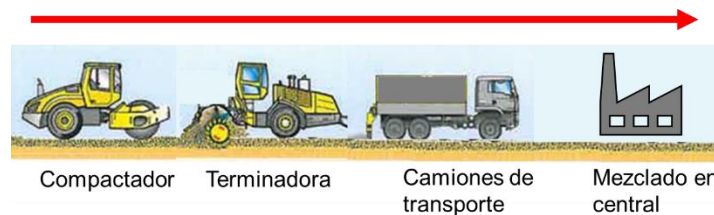


- Método en central: Permite realizar una incorporación apropiada del cemento, sin embargo, se ve limitado por la distancia entre la central y el tramo de obra. A continuación, se describe de manera general el proceso:
 - Mediante una mezcladora especializada se homogeniza el material granular, cemento (almacenado en silos) y la cantidad de agua óptima.
 - Camiones de carga transportan el material mezclado hasta el tramo de obra.

- La colocación en campo puede realizarse desde los camiones o con una terminadora de asfalto.
- El equipo de compactación lleva el material mezclado hasta la cota definida, garantizando la densidad de diseño.

La **Figura 1-22** muestra de manera esquemática el método de estabilización en central.

Figura 1-22. Tren de estabilización de materiales granulares por medio del método en central.

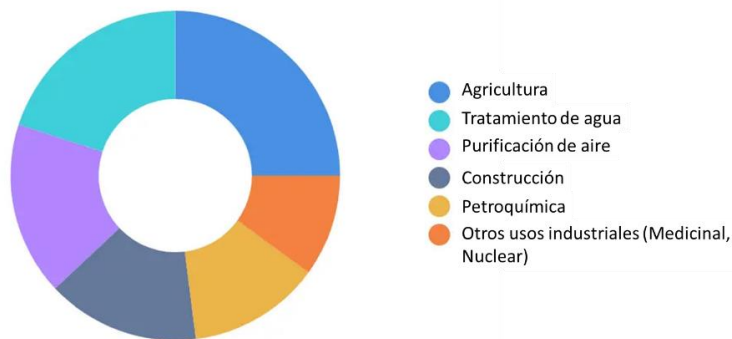


1.5 Uso de zeolitas en materiales tratados con ligante hidráulico

Las zeolitas son materiales compuestos por aluminosilicatos hidratados de metales alcalinos y alcalinotérreos. Las zeolitas naturales y sintéticas han presentado características particulares de adsorción, catalíticas e intercambio iónico (U.S. Geological Survey, s.f).

Las zeolitas son extraídas de rocas volcánicas o pueden ser sintetizadas de manera industrial a partir de geles de aluminosilicato. Los principales usos de las zeolitas se presentan en la **Figura 1-23**.

Figura 1-23. Distribución porcentual por uso industrial de zeolitas.



Fuente: (Mordor Intelligence, 2021).

Actualmente, se conocen al menos 34 tipos de zeolitas naturales y más de 100 variedades de zeolitas sintéticas. Las zeolitas sintéticas son consideradas más aptas para el uso industrializado dada su alta homogeneidad y pureza. (KNT Group, s.f)

Las zeolitas, además de otros materiales puzolánicos, minerales y subproductos industriales han sido estudiados como material de sustitución parcial de cemento para concretos y estabilización química de suelos (Ahmadi Chenarboni et al., 2021).

Las bases granulares estabilizadas con cemento son susceptibles a la fisuración transversal causada por la contracción de la mezcla durante la hidratación del cemento. Los aditivos compuestos por metales alcalinos, alcalinotérreos y zeolitas sintéticas han presentado resultados positivos para eliminar o reducir las fisuras generadas en materiales tratados con cemento. (Wu, 2015).

Algunas investigaciones sugieren que las zeolitas ya sea de origen natural o sintético son adiciones viables en infraestructura vial con el potencial de mejorar las propiedades de durabilidad de los materiales. Aydin et al (2019) investigó el efecto de la adición de zeolitas naturales a mezclas de concreto asfáltico y determinó un mejoramiento en la estabilidad y resistencia a la deformación en las mezclas, mientras que Bao et al (2020) incorporó zeolitas sintéticas como reemplazo de cemento en construcción de carreteras y estableció un comportamiento equiparable entre los materiales convencionalmente utilizado generando un aporte significativo en la construcción sostenible de carreteras.

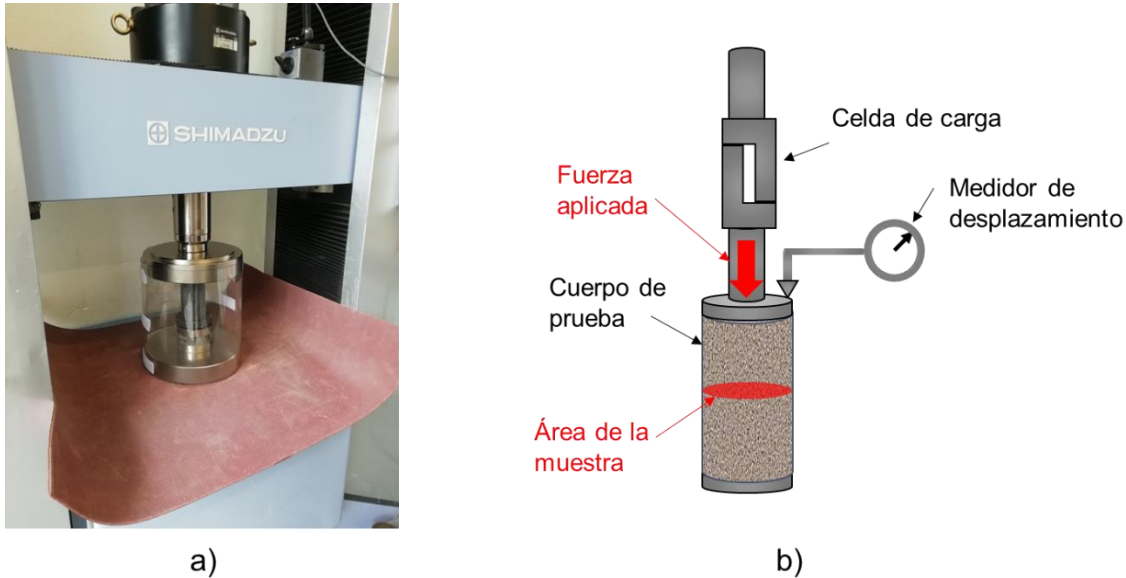
1.6 Propiedades mecánicas del agregado siderúrgico estabilizado

1.6.1 Resistencia en compresión simple (INV-E-614 o EN 13286-41)

Este procedimiento permite evaluar la resistencia máxima de un cuerpo de prueba cilíndrico, previamente compactado y curado, mediante la aplicación de carga monotónica axial sobre el área transversal de la muestra hasta que esta falle. La velocidad de aplicación de carga es constante durante todo el ensayo ($V=0.5 \text{ mm/min}$).

La **Figura 1-24** muestra el esquema de ejecución del ensayo de compresión simple en muestras cilíndricas compactadas.

Figura 1-24. a) Equipo para ejecución de ensayo de compresión simple (Laboratorio Estructuras -UNAL). b) Esquema de proceso de carga en compresión simple.



El valor de resistencia en compresión simple (R_C) se obtiene a partir de la siguiente expresión.

$$R_C = \frac{F_{MAX}}{A} \quad \text{Ecuación 1-10}$$

Donde,

F_{MAX} : Fuerza máxima alcanzada

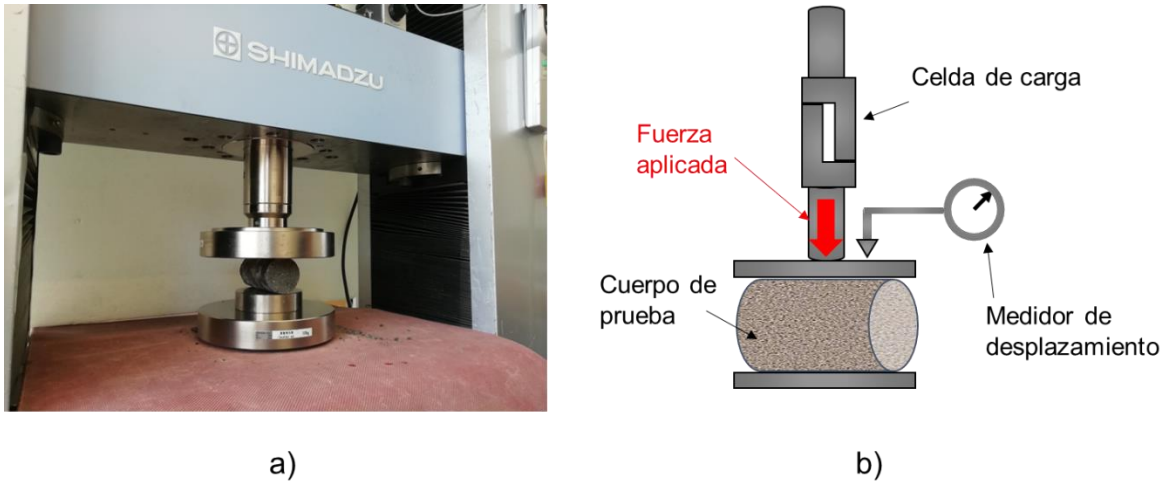
A : Área transversal del cuerpo de prueba

1.6.2 Resistencia en tracción indirecta (EN 13286-42)

Este ensayo permite estimar la resistencia de un material solicitado a esfuerzo de tracción por medio de la aplicación de carga en compresión diametral sobre un cuerpo de prueba cilíndrico hasta que este falle. La velocidad de aplicación de carga es constante durante todo el ensayo ($V=0.5 \text{ mm/min}$).

La **Figura 1-25** muestra el esquema de ejecución del ensayo de tracción indirecta en laboratorio.

Figura 1-25. a). Equipo para ejecución de ensayo de tracción indirecta (Laboratorio Estructuras -UNAL). b) Esquema de proceso de carga en ensayo de tracción indirecta.



El valor de resistencia en tracción indirecta (R_{TI}) se obtiene a partir de la siguiente expresión.

$$R_{TI} = \frac{2F_{MAX}}{\pi HD} \quad \text{Ecuación 1-11}$$

Donde,

F_{MAX} : Fuerza máxima alcanzada

H : Altura del cuerpo de prueba

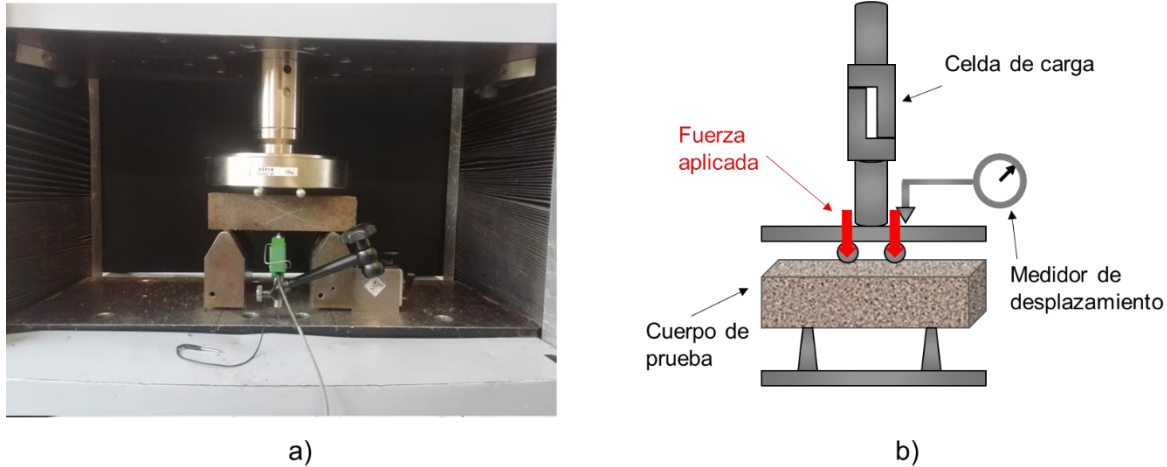
D : Diámetro del cuerpo de prueba

1.6.3 Resistencia en flexión (INV-E-616) – (EN 13390-5)

Este procedimiento permite evaluar la respuesta de un material frente a la sollicitación de esfuerzo en flexión, mediante la aplicación de carga monótonica en un cuerpo de prueba prismático apoyado en dos puntos en su parte inferior, hasta que este falle. La velocidad de aplicación de carga es constante durante todo el ensayo ($V=1\text{kgf/min}$).

La **Figura 1-26** muestra el esquema de ejecución del ensayo de resistencia en flexión sobre un espécimen prismático.

Figura 1-26. a) Equipo para ejecución de ensayo de flexión (Laboratorio Estructuras - UNAL). b) Esquema de ejecución de proceso de carga en ensayo de flexión.



El valor de resistencia en flexión (R_F) se obtiene a partir de la siguiente expresión.

$$R_F = \frac{F_{MAX}L}{bh^2}$$

Ecuación 1-12

Donde,

F_{MAX} : Fuerza máxima alcanzada

L : Distancia entre apoyos inferiores (136.8 mm)

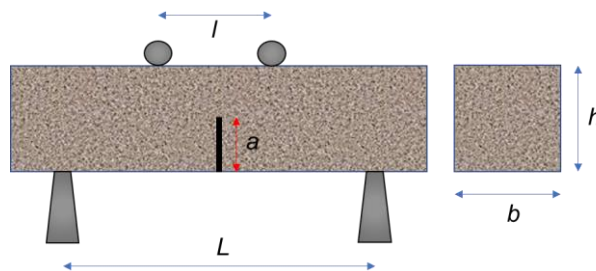
b : Ancho del cuerpo de prueba

h : Altura del cuerpo de prueba

▪ Resistencia a la fractura (K_{1c})

La resistencia a la fractura de una probeta puede determinarse a partir de la geometría de la misma y la carga de rotura en el ensayo de flexión 4 puntos. La **Figura 1-27** muestra las dimensiones de la probeta necesarias para el cálculo.

Figura 1-27. Dimensiones de probeta para cálculo de resistencia a la fractura.



La resistencia a la fractura puede determinarse a partir de la siguiente ecuación.

$$K_{1c} = \frac{3 F_{MAX}(L - l)}{2 bh^2} Y(x)\sqrt{a} \quad \text{Ecuación 1-13}$$

Donde,

F_{MAX} : Fuerza máxima de rotura

L : Distancia entre apoyos inferiores (136.8 mm)

l : Distancia entre apoyos superiores (45.6 mm)

b : Ancho de la probeta

h : Altura de la probeta

a : Altura de la fisura formada en la probeta en el momento de la falla

$Y(x)$: Factor de forma como función de x

x : Profundidad relativa de la fisura (a/h)

El factor de forma $Y(x)$ se define en función de la profundidad relativa de la fisura, es decir la relación entre la altura de la probeta (h) y la altura de la fisura formada en la probeta en el momento de la falla (a), como se muestra a continuación.

$$Y(x) = \frac{3.99}{6} (x)^{-1/2} (1 - x)^{-3/2}; \quad \text{para } x \leq 0.5 \quad \text{Ecuación 1-14}$$

$$Y(x) = 1.99 - 2.47x + 12.97x^2 - 23.17x^3 + 24.80x^4 \text{ para } 0.15 \leq x \leq 0.55 \quad \text{Ecuación 1-15}$$

1.6.4 Módulo en compresión (INV-E-614 o EN 13286-41)

Este procedimiento permite obtener el módulo en compresión (E_c) de un cuerpo de prueba cilíndrico, previamente compactado y curado, mediante la aplicación de carga monotónica axial sobre el área transversal y midiendo la deformación sobre la muestra. La velocidad de aplicación de carga es constante durante todo el ensayo ($V=0.5 \text{ mm/min}$).

El cálculo del módulo en compresión (E_c) se realiza en la zona elástica de carga del ensayo, de acuerdo con la siguiente expresión

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad \text{Ecuación 1-16}$$

Donde,

$\Delta\sigma$: Variación del esfuerzo axial aplicado

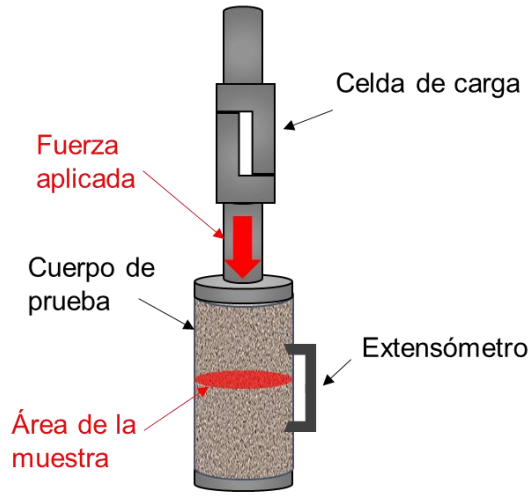
$\Delta\varepsilon$: Variación de la deformación unitaria de la muestra

La **Figura 1-28** muestra el esquema de ejecución del ensayo de módulo en compresión en muestras cilíndricas compactadas

Figura 1-28. a) Equipo para ejecución de ensayo de módulo en compresión (Laboratorio Mezclas asfálticas -UniAndes). b) Esquema de proceso de carga en compresión con medición de deformación en la muestra.



a)



b)

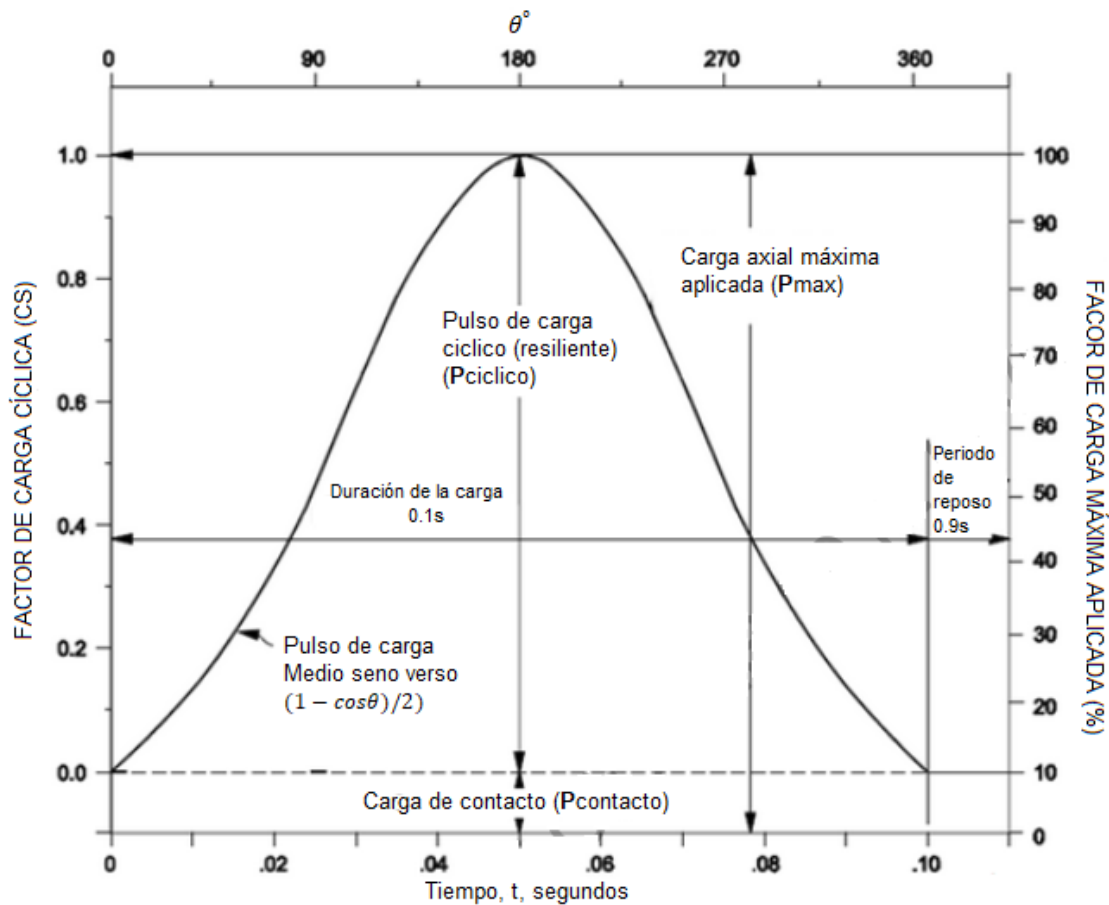
1.6.5 Módulo resiliente de suelos y agregados (INV-E-156)

Este ensayo permite determinar el módulo de resiliencia (E_r) de materiales granulares, a partir de la respuesta en deformación y la aplicación de un esfuerzo axial cíclico sobre un cuerpo de prueba cilíndrico previamente compactado.

El ensayo define un ciclo como la aplicación de una carga durante un periodo de 0.1 s, y un periodo de reposo de 0.9 s. Cada ciclo de carga aplicado en este ensayo es realizado en forma de medio seno verso $(1 - \cos\theta)/2$, como se muestra en la **Figura 1-29**.

El ensayo define una secuencia como un conjunto de ciclos, cada secuencia se compone de 100 ciclos de carga. Para la estimación del módulo resiliente del material, son aplicadas 15 secuencias con aumento en el esfuerzo axial cíclico aplicado entre 0.01 MPa y 0.25 MPa.

Figura 1-29. Ciclo de carga en forma de medio seno verso para ensayo de módulo resiliente.



Fuente: (INVIAS, 2013).

Durante cada secuencia, es aplicado un esfuerzo de contacto en sentido axial correspondiente al 10% del esfuerzo axial máximo aplicado, para garantizar el contacto entre el cuerpo de prueba y la platina de aplicación de carga. Por lo tanto, el esfuerzo axial cíclico corresponde al 90% del esfuerzo axial máximo aplicado.

Durante la ejecución del ensayo se mide la carga axial máxima aplicada mediante una celda de carga que da lugar al esfuerzo cíclico aplicado en cada pulso. Y, mediante deformímetros o extensómetros se mide la deformación axial de la muestra.

El esfuerzo axial cíclico (σ_c) se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\sigma_c = \frac{P_c}{A} \quad \text{Ecuación 1-17}$$

Donde,

P_c : Carga ciclica aplicada (90% de la carga axial máxima aplicada)

A : Área transversal del cuerpo de prueba

La deformación unitaria axial resiliente (ε_r) se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{L} \quad \text{Ecuación 1-18}$$

Donde,

ε : Deformación axial resiliente debida al σ_c

L : Longitud de referencia de la muestra

El módulo resiliente (E_r) se obtiene a partir de la siguiente expresión.

$$E_r = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_r} \quad \text{Ecuación 1-19}$$

Donde,

σ_c : Esfuerzo axial cíclico aplicado en cada pulso

ε_r : Deformación unitaria axial resiliente

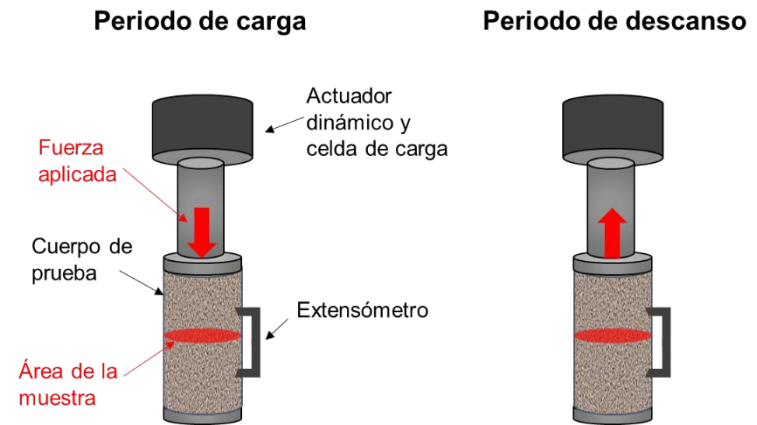
El ensayo de módulo resiliente establece una relación entre el esfuerzo y la deformación de los materiales sometidos a cargas repetidas que simulan, razonablemente, las cargas móviles del tránsito. El parámetro obtenido es aplicable a modelos de análisis estructural de sistemas para pavimentos.

La **Figura 1-30** presenta el esquema de ejecución del ensayo de módulo resiliente en laboratorio.

Figura 1-30. a) Equipo para ejecución de ensayo de módulo resiliente (Laboratorio Mezclas asfálticas -UniAndes). b) Esquema del periodo de carga en ensayo de módulo resiliente. c) Esquema del periodo de descanso en ensayo de módulo resiliente.



a)



b)

c)

2. Antecedentes

Desde hace más de un siglo, la industria del acero se ha posicionado como uno de los sectores de mayor desarrollo y producción, dada la alta demanda del metal dentro de muchos campos económicos a nivel mundial. Entre estos, se destacan los sectores de la construcción, el desarrollo urbano y tecnología. Sin embargo, la siderurgia también representa una de las actividades de mayor potencial contaminante, dada la naturaleza de sus procesos de producción (Parra & Sánchez, 2010).

La escoria como material granular tomó un lugar dentro del mercado de reutilización durante la segunda guerra mundial, donde se les atribuyó un significativo valor residual, pero enfocando el trabajo principalmente a la recuperación del hierro remanente (Aquino, 2012).

Desde finales de la década de los 90, en Cataluña se desarrollaron estudios que tenía como propósito evaluar el comportamiento de material de acería en concretos hidráulicos mediante pruebas de estabilidad volumétrica, durabilidad y la afectación ambiental. Además, establecieron resultados igualmente positivos frente a la reactividad hidráulica al utilizar la escoria como adición en morteros y pastas (Amaral, 1999).

Ortega, 1999 presentó la evaluación y comparación de dos tipos de escorias denominadas blanca y negra. La investigación concluyó que la escoria blanca podía ser utilizada para cementos y morteros, mientras la negra podía ser usada en bases y subbases para pavimentos dada su granulometría y dureza. Se destacó también la reducción de explotación de recursos naturales y menor impacto ambiental en proyectos de ingeniería.

A partir de los años 2000, las productoras de acero se han trazado como objetivo reducir de la alta contaminación ambiental que se genera por sus procesos y la reutilización de subproductos de producción, ha tomado relevancia en países como Estados Unidos, Japón y China (Yi et al., 2012).

En Colombia, Reyes y Camacho (2003), presentaron uno de los primeros estudios realizados sobre el efecto de escorias de siderúrgica, en capas de cuerpo convencionales para estructuras de pavimento. Esta investigación caracterizó y determinó propiedades mecánicas de la escoria de alto horno producida en el departamento de Boyacá, presentando incrementos entre 0.8% y 8.7% en pruebas de CBR en bases y subbases granulares.

Pasetto y Baldo (2010), compararon mezclas bituminosas con agregados naturales y mezclas con incorporación de escorias de siderúrgica en diferentes porcentajes para la sustitución de granulares. Su trabajo de investigación fue realizado mediante pruebas de caracterización química, toxicológica y físico-mecánica. Los resultados presentaron aumento en la densidad de la mezcla con 90% de escoria. El contenido de asfaltos fue superior en las mezclas bituminosas con contenido de escoria, dada la porosidad del material.

Pasetto y Baldo (2013), evaluaron materiales ligados con cemento y con diferentes contenidos de escorias. El estudio se realizó usando tres tipos de escorias:

- Escoria EAF tipo B*
- Escoria EAF tipo C*
- Escoria LF

*Los tipos B y C son denominaciones internas dadas por los autores, de acuerdo con el fabricante de cada escoria.

La **Tabla 2-1** muestra los porcentajes de cada tipo de escoria usados en las cinco (5) mezclas evaluadas.

Tabla 2-1. Recomposición y tipo de agregados de las mezclas evaluadas por Pasetto y Baldo (2013).

Mezcla	Arena de fundición (%)	EAF Tipo B (%)	EAF Tipo C (%)	LF (%)
1	30	50	0	20
2	40	50	0	10
3	40	0	50	10
4	10	70	10	10
5	20	30	40	10

Fuente: (Pasetto & Baldo, 2013).

El contenido de agua óptimo (WOPM) y la densidad seca máxima (ρ_d) obtenidos en el ensayo de Proctor de las cinco (5) mezclas se presentan en la **Tabla 2-2**.

Tabla 2-2. Resultados de ensayo Proctor de las mezclas evaluadas por Pasetto y Baldo (2013).

Mezcla	Propiedades	
	WOPM (%)	ρ_d (g/cm ³)
1	13.0	2159
2	15.5	2100
3	16.0	1855
4	5.5	2677
5	13.5	2114

Fuente: (Pasetto & Baldo, 2013).

La **Tabla 2-3** presenta los resultados de las cinco (5) mezclas a siete (7) días de curado de los siguientes ensayos:

- Resistencia en compresión (R_c)
- Resistencia en tracción (R_t)
- Módulo de rigidez (E_d)

Tabla 2-3. Propiedades mecánicas en 7 días de edad de las mezclas evaluadas por Pasetto y Baldo (2013).

Mezcla	Propiedades		
	<i>Rc (MPa)</i>	<i>Rt (MPa)</i>	<i>Ed (MPa)</i>
1	4.42	0.62	1730
2	4.06	0.42	1748
3	3.84	0.39	1712
4	7.23	0.92	1982
5	5.62	0.73	1928

Fuente: (Pasetto & Baldo, 2013).

Xue et al. (2006) presentan los resultados de un tramo experimental que consistía en una rehabilitación de una antigua vía expresa en pavimento flexible de 2 km de longitud y 24 m de ancho. Las capas de la estructura tenían contenidos de escoria siderúrgica y luego de 2 años de servicio no presentó defectos superficiales.

Wu et al. (2007) presentan un segundo tramo experimental en China realizado en la vía expresa Wuhan-Huangshi. La estructura presenta una capa en mezcla asfáltica cuyos agregados son escoria siderúrgica. Se realizaron pruebas de evaluación sobre la rugosidad y el coeficiente de abrasión y fricción cada 6 meses. Luego de 2 años estos resultados mostraron una reducción del coeficiente de abrasión y fricción de solo 11%, mientras la rugosidad se mantuvo en más del 65%. Además, la inspección visual del tramo no presentó daños significativos, por lo tanto, determinaron un desempeño bueno para este periodo de tiempo de la estructura.

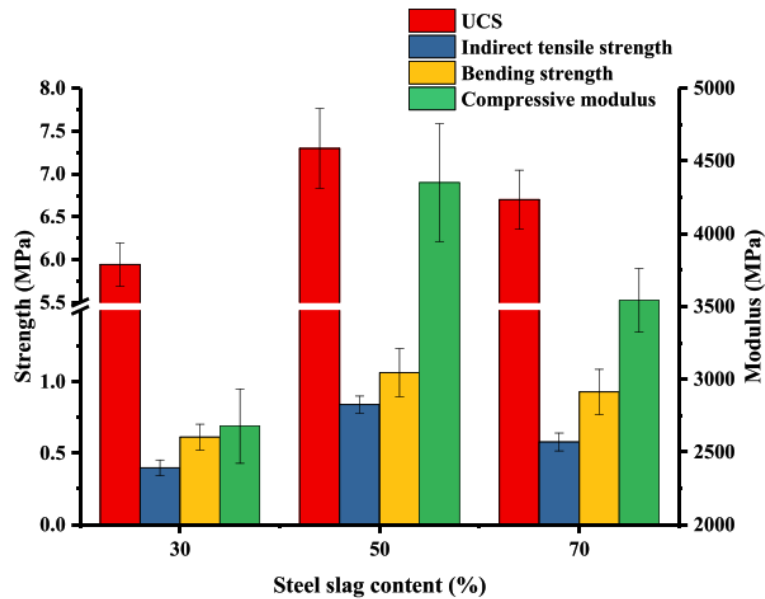
Liu et al. (2022) presentaron un estudio de mezclas de bases tratadas con cemento y con diferentes contenidos de escoria siderúrgica de la planta de acero en Suzhou, China. La escoria presentó una densidad aparente de $\rho_a = 3.4 \text{ g/cm}^3$ y un valor de absorción de $ABS=1.33\%$. Los porcentajes de cemento usados fueron 3.5%, 4.0% y 4.5% y los de escoria 30%, 50% y 70%.

La **Figura 2-1** expone los resultados de las muestras correspondientes a un porcentaje de cemento de 4% y con 28 días de curado, de los siguientes ensayos:

- Compresión simple (*UCS*)
- Resistencia en tracción indirecta (*Indirect tensile strenght*)

- Resistencia en flexión (*Bending strength*)
- Módulo en compresión (*Compressive modulus*)

Figura 2-1. Resultados de muestras con 4% de cemento y a 28 días de curado con 30%, 50% y 70% evaluadas por Liu et al. (2020).



Fuente: (Liu et al., 2020).

Payne (2017) presentó un estudio de estabilización de un suelo tipo A-2-4(0), según la clasificación AASHTO, mediante dos métodos. El primero era la aplicación de escoria de arco eléctrico (EAF) blanca y el segundo la estabilización con cemento. El estudio contempló ensayos de CBR, los cuales presentaron de valores $CBR=56\%$ a 0.1" y $CBR=77\%$ a 0.2" en el suelo lito estabilizado con escoria, los cuales fueron mayores, con respecto al estabilizado con cemento que presentaron un $CBR=54\%$ a 0.1" y $CBR=75\%$ a 0.2". El estudio concluye que el uso de escoria blanca como estabilizante se presenta como una posibilidad más económica con respecto a la estabilización del cemento, además del impacto ambiental positivo que genera la utilización del residuo siderúrgico.

Toffolo et al. (2021) realizaron un estudio en Brasil en el que se evaluó el uso potencial de escoria BOF y EAF como agregado, en comparación con Agregados Naturales (NA), para la composición de concreto compactado con rodillo, en inglés Roller-Compacted Concrete (RCC). El origen de las escorias son dos plantas de acero en el estado de Minas Gerais.

La **Tabla 2-4** muestra los resultados de los ensayos de caracterización física realizada sobre los materiales utilizados.

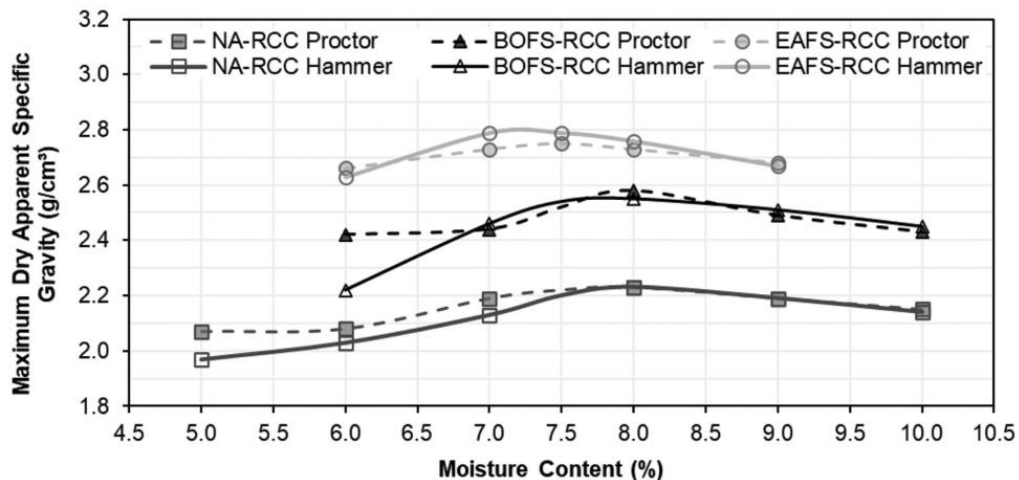
Tabla 2-4.. Resultados de ensayos de caracterización física en NA, BOF y EAF evaluados por Toffolo et al. (2021).

Ensayo	Agregados finos			Agregados gruesos		
	NA	BOF	EAF	NA	BOF	EAF
Gs	2.58	3.14	3.25	2.71	3.41	3.50
Peso unitario (g/cm³)	1.47	1.70	1.93	1.38	1.88	1.89
Contenido de finos <0.075mm (%)	0.80	3.62	1.22	2.34	0.06	0.14
Módulo de finura	2.97	2.63	3.05	6.71	7.26	7.33

Fuente: (Toffolo et al., 2021).

La **Figura 2-2** muestra las curvas obtenidas de los ensayos de compactación, estándar (*Proctor*) y modificado (*Hammer*) realizados. Los agregados de origen EAF presentan un contenido de agua óptimo (W_{OPM}) inferior a los BOF y NA. Por otra parte, las densidades secas (γ_d) de los agregados EAF son superiores a los otros dos con un valor de $\gamma_{d-EAF}=2.8$ g/cm³.

Figura 2-2 Curvas de compactación para materiales NA, BOF y EAF evaluados por Toffolo et al. (2021).



Fuente: (Toffolo et al., 2021).

La **Figura 2-3-a)** muestra un histograma con los resultados de resistencia a la compresión (R_c) de las muestras con una edad de curado de 3 y 28 días. Los resultados muestran una

resistencia a la compresión de los agregados EAF $R_{C-EAF}= 24.7 \text{ MPa}$ a 3 días, las cuales fueron superiores a las de las mezclas con otros agregados.

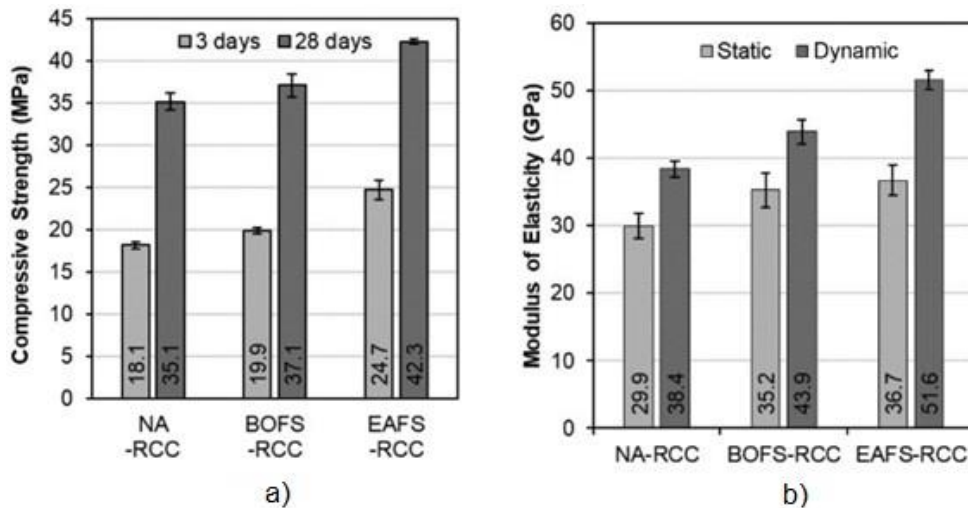
La **Figura 2-3-b)** muestra los módulos de rigidez obtenidos a partir de dos métodos:

- Método estático (compresión simple con seguimiento de deformación), E_s
- Método dinámico (cargas cíclicas con seguimiento de deformación) E_d

Los resultados en condición estática muestran que el módulo de rigidez más elevado de $E_{S-EAFS}= 36.7 \text{ GPa}$ pero son cercanos a los de las mezclas con agregado tipo BOF con un valor de $E_{S-BOF}=35.2 \text{ GPa}$. La mezcla con NA presentó un valor inferior de $E_{d-NA}=29.9 \text{ GPa}$.

Los resultados en condiciones dinámica mostraron un módulo de rigidez superior con un valor de $E_{d-EAFS}= 51.6 \text{ GPa}$ frente a los valores de los otros tipos de agregados $E_{d-BOF}=43.9 \text{ GPa}$ y $E_{d-NA}=38.4 \text{ GPa}$.

Figura 2-3. Resultados de mezclas de RCC por Toffolo et al. (2021): a) Resistencia en compresión a 3 y 28 días; b) Módulo de elasticidad.



Fuente: (Toffolo et al., 2021).

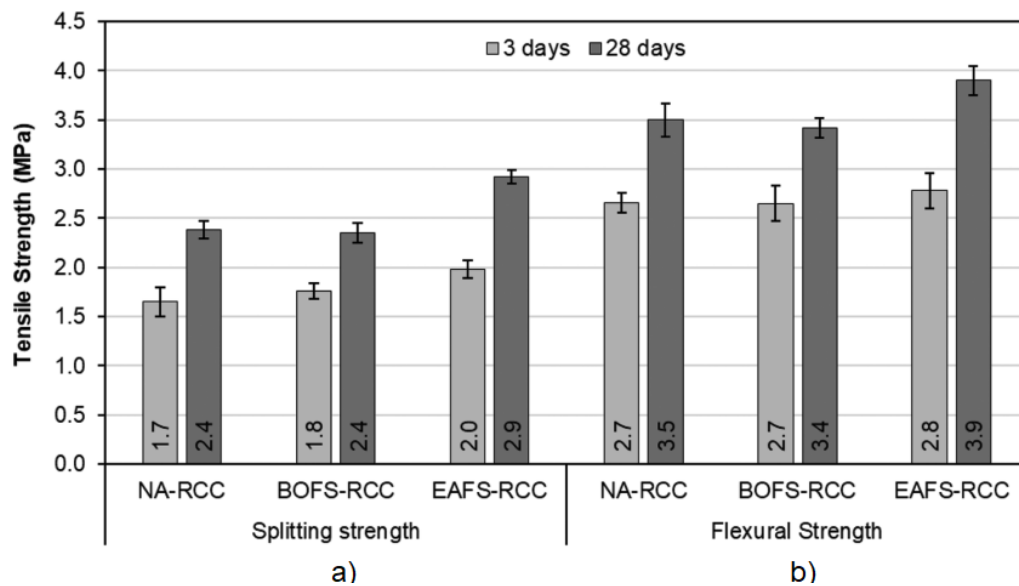
La **Figura 2-4** muestra los resultados de resistencia a la tracción y flexión en mezclas a 3 y 28 días a partir de los siguientes métodos:

- Resistencia a rotura por tracción (R_t)
- Resistencia en flexión (R_f)

Los resultados de R_t , muestran una resistencia superior de las mezclas con contenido de agregado EAF tanto a 3 días como a 28 días. Los valores de mezclas con agregado BOF fueron similares a los de las mezclas con NA.

Respecto a los resultados de R_f las mezclas sin importar el tipo de agregado presentaron valores muy cercanos a 3 días de curado con valores de $R_f \approx 2.7 \text{ MPa}$. Las muestras con agregado BOF y NA a los 28 días de curado presentaron valores similares $R_f \approx 3.5 \text{ MPa}$, sin embargo, una ligera diferencia se presenta con las mezclas con agregado EAF, con una resistencia a la flexión $R_{f-EAF} = 3.9 \text{ MPa}$.

Figura 2-4. Resultados de mezclas RCC a 3 y 28 días por Toffolo et al. (2021): a) Resistencia a rotura por tracción. b) Resistencia en flexión.



Fuente: (Toffolo et al., 2021).

Parra y Sánchez (2010) evaluaron el aprovechamiento de las escorias negras de la siderúrgica *Gerdau Diaco S.A*, producidas en el municipio de Tuta, como agregado en diferentes dosificaciones, desde 25% hasta 100%, en concreto hidráulico. Dentro de los resultados de caracterización de la escoria negra de esta investigación, destacan principalmente: la baja humedad ($w=1.5\%$), alto peso específico ($G_s=3.17$) y desgaste en Máquina de Los Ángeles bajo ($LA=16.02\%$). De acuerdo con el alcance alcanzado, la investigación anterior posibilita la corroboración de resultados sobre los ensayos de caracterización en la escoria negra la cual corresponde a la escoria de arco eléctrico.

Morcote (2019), evaluó el desempeño mecánico de mezclas asfálticas con escorias de la acería Paz del Río, en Boyacá. La escoria fue introducida como parte del esqueleto granular de la mezcla asfáltica sustituyendo el agregado natural de 2mm por escoria BOF.

Los resultados más relevantes dentro de la caracterización de la escoria utilizada (BOF) incluyen:

- Gravedad específica, $G_s = 4.4$
- Micro-Deval, $MDE = 6.4\%$
- Porcentaje de óxido de calcio, $\%CaO = 33.6\%$

Morcote (2019), confirmó la viabilidad de incorporación de escoria dentro del marco de cumplimiento técnico de parámetros de estabilidad (17.625 N) y flujo Marshall (3.7 mm) con respecto al estándar colombiano. El estudio mostro conformidad de valores de ahuellamiento y módulo de rigidez. El desarrollo experimental dentro de la Universidad Nacional de Colombia de la investigación anterior, permitió la incorporación de estrategias procedimentales acertadas para la caracterización de otros tipos de escoria y la evaluación de materiales compuestos con diferentes objetivos, como es el caso del presente trabajo final de maestría.

3. Marco experimental

3.1 Campaña experimental

La campaña experimental se desarrolló en 3 etapas con objetivos específicos en cada una:

- Etapa 1: Caracterización de los materiales componentes de las mezclas.
- Etapa 2: Formulación de mezclas estabilizadas con cemento y aditivo.
- Etapa 3: Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas estabilizadas.

Los procedimientos de caracterización y evaluación de materiales se efectuaron de acuerdo con el Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del INVIAS y mediante procedimientos normalizados internacionalmente (NF, AASHTO y ASTM).

La **Figura 3-1** muestra los materiales y ensayos ejecutados en cada una de las etapas.

Figura 3-1. Etapas del marco experimental del proyecto.



3.2 Etapa 1. Caracterización de los componentes

En esta etapa se caracterizó el agregado siderúrgico, compuesto por escorias de siderúrgica, como material granular. Además, se presentan las características principales del aditivo y del cemento implementados en la fabricación de mezclas. El Anexo A presenta los informes de resultados de los ensayos ejecutados.

La **Figura 3-2** muestra los tres componentes de las mezclas:

- Agregado siderúrgico (*Gerdau Diaco*): Tres (3) tipos de escoria siderúrgica fueron estudiadas:
 - Escoria Blanca (EB): Escoria de horno de cuchara (LF)
 - Escoria Negra Fina (ENF): Escoria de horno de arco eléctrico (EAF)
 - Escoria Negra Gruesa (ENG): Escoria de horno de arco eléctrico (EAF)
- Aditivo a base de zeolitas (*RoadCem-PowerCem®*)
- Ligante hidráulico (Cemento estructural MAX-Argos)

Figura 3-2. Materiales utilizados en el marco experimental.



Para el desarrollo de este proyecto, los 3 materiales fueron proporcionados por la compañía *I.C. Ingeniería y Consultoría S.A.S.*

3.2.1 Nomenclatura de componentes

La **Tabla 3-1** presenta la nomenclatura de los componentes de las mezclas.

Tabla 3-1. Nomenclatura de componentes.

Componente	Nomenclatura
Escoria Blanca	EB
Escoria Negra Fina	ENF
Escoria Negra Gruesa	ENG
Aditivo a base de zeolitas (RoadCem)	R
Ligante hidráulico (Cemento estructural MAX)	C

3.2.2 Escoria Blanca, Escoria Negra Fina y Escoria Negra Gruesa

▪ Características físicas

La caracterización inicial de las escorias EB, ENF y ENG fue llevada a cabo de manera visual. En la **Figura 3-3** se muestran los tres tipos de escorias estudiadas y en la **Tabla 3-2** se presentan las características físicas de cada una. El color de las muestras se estableció de acuerdo con la carta de colores para suelos Munsell (Munsell Soil Color Company, 1950).

Figura 3-3. Escoria proveniente de siderúrgica *Gerdau Diaco*. a) Escoria Negra Fina (ENF). b) Escoria Negra Gruesa (ENG). c) Escoria Blanca (EB).

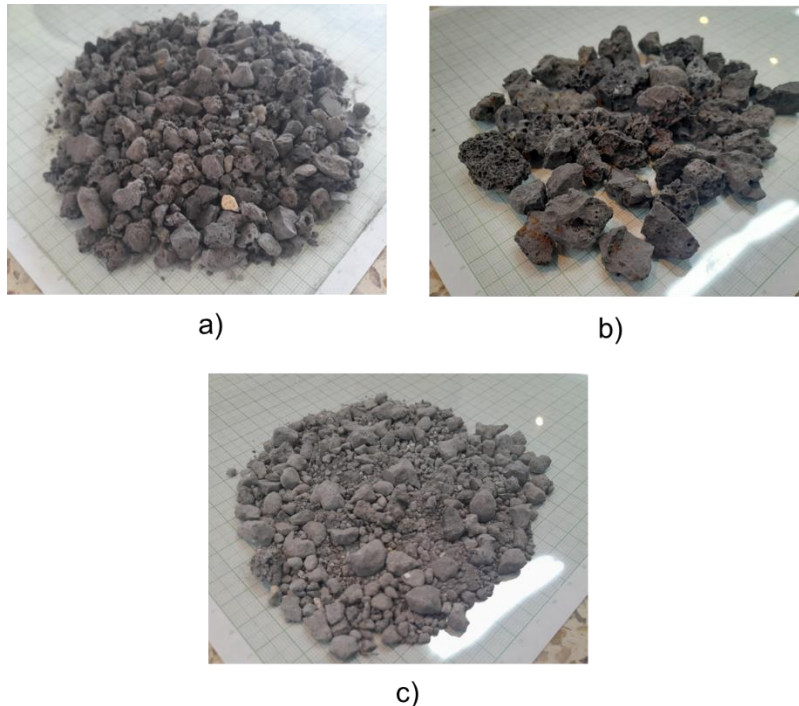
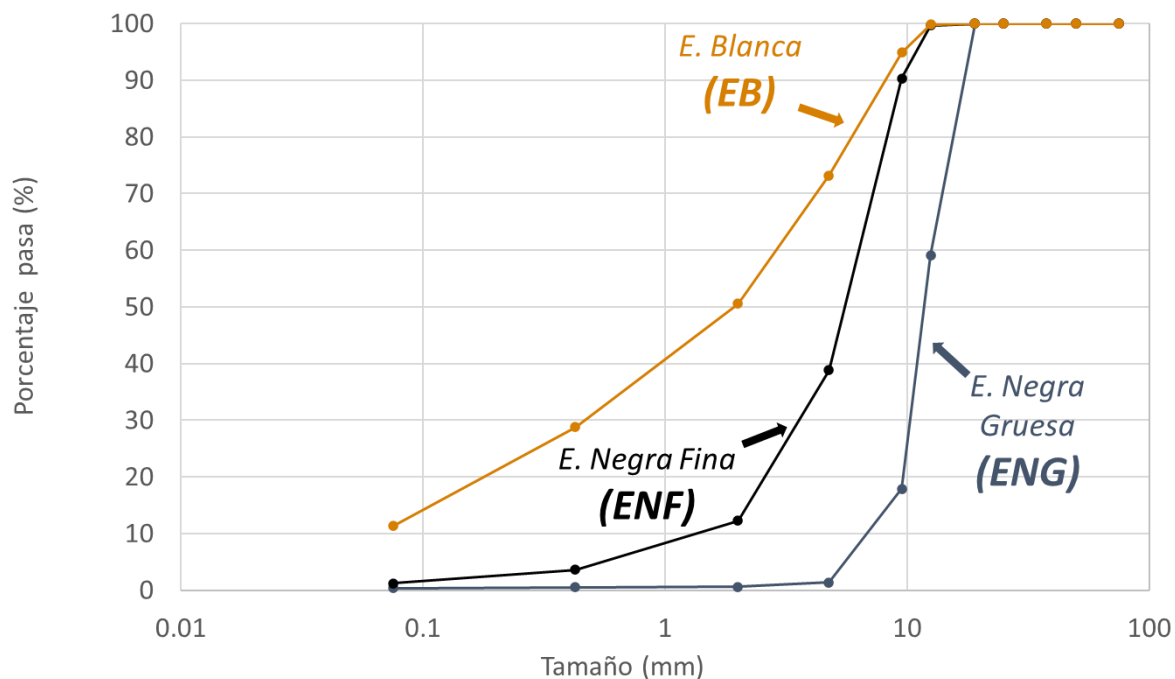


Tabla 3-2. Características visuales de las escorias EB, ENF y ENG.

Característica	EB	ENF	ENG
Aspecto	Granular	Granular	Granular
Tamaño	De 19mm a 0.075mm	De 19mm a 0.075mm	De 19mm a 0.075mm
Color	Gris claro	Negro claro	Negro claro
Forma	Semi redondeada	Angular	Angular
Textura	Semi rugosa	Rugosa	Rugosa
Porosidad	Baja	Alta	Alta
Angulosidad	Media	Alta	Alta

▪ **Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV-E-213-13)**

La **Figura 3-4** muestra las curvas granulométricas obtenidas para la EB, ENF y ENG.

Figura 3-4. Distribución granulométrica de escorias EB, ENF y ENG.

Sobre la base de las curvas granulométricas obtenidas se realizó la clasificación de las escorias EN, ENF y ENG, de acuerdo con:

- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)
- Asociación de Oficiales de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO).

La **Tabla 3-3** presenta la clasificación para cada tipo de escoria.

Tabla 3-3. Clasificación de las escorias EB, ENF y ENG de acuerdo con los sistemas de clasificación SUCS y AASHTO.

Sistema de Clasificación	Escoria		
	EB	ENF	ENG
SUCS	SP	GW	GP
AASHTO	A-1-b	A-1-a	A-1-a

La EB presentó durante el proceso de tamizado la presencia atípica de conglomerados de partículas, los cuales, presentaban un tamaño superior a $\frac{3}{4}$ ". Estos conglomerados no fueron tenidos en cuenta en el desarrollo de la investigación (**Figura 3-5**).

Figura 3-5. Conglomerados de partículas de tamaño mayor a $\frac{3}{4}$ " presentes en la EB.



▪ **Límites de consistencia (INV-E-125-13) y (INV-E-126-13)**

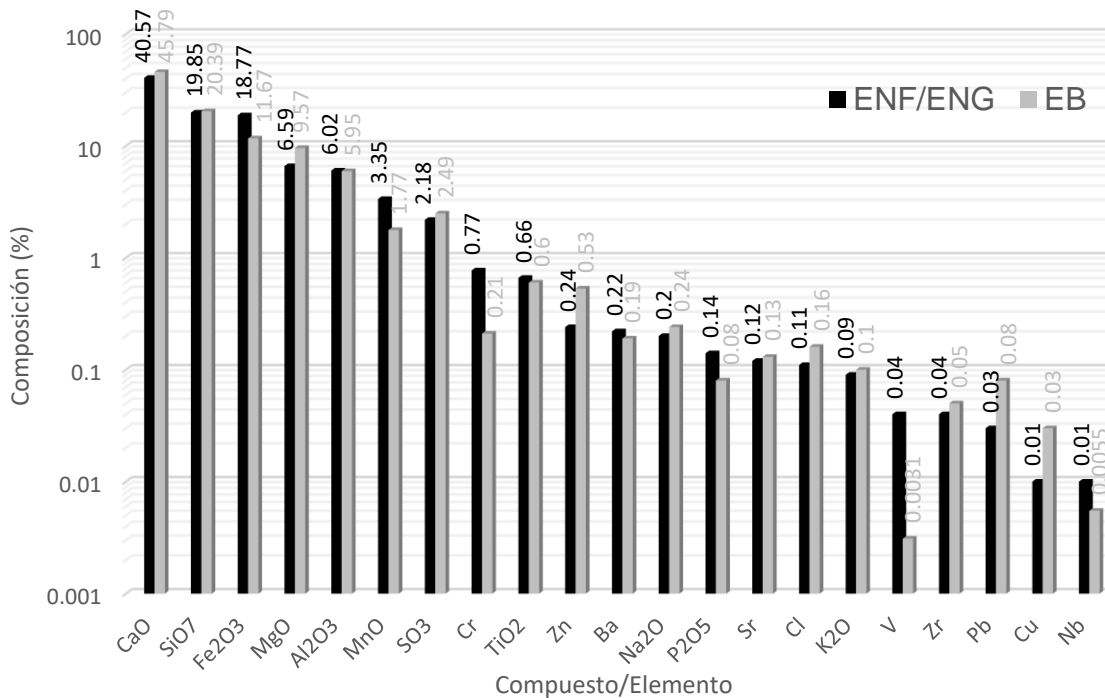
A partir de una muestra representativa con tamaño de partículas menor a 0.425 mm de las escorias EB, ENF y ENG, se realizó el proceso de determinación de límite líquido y límite plástico. Dada la consistencia y el origen del material, el resultado obtenido en todos los casos fue "No Líquido - No Plástico" (NL-NP).

▪ Fluorescencia de rayos X (FRX)

El ensayo de FRX permite identificar la composición química de los materiales. Los resultados del ensayo de FRX fueron proporcionados por la compañía *Gerdau Diaco* y llevados a cabo por la compañía *Ingeniería y Geología LTDA* en el año 2018.

La **Figura 3-6** compara la composición química porcentual entre las escorias y la **Tabla 3-4** presenta numéricamente la composición porcentual de los elementos y compuestos. Dado que las escorias ENF y ENG provienen del mismo proceso fueron analizadas como un solo tipo

Figura 3-6. Comparación de composición porcentual de compuestos y elementos de ENF/ENG y EB provenientes de siderúrgica *Gerdau Diaco*.



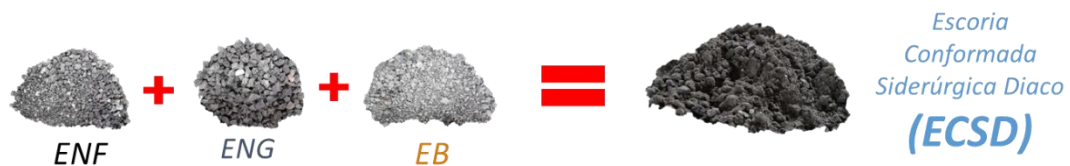
Los resultados destacan, en ambos casos, la cantidad del óxido de calcio (CaO) con más del 40% y el óxido de silicio (SiO₂) con 20% aproximadamente.

Tabla 3-4. Resultados de ensayo de FRX de EB y EF.

Compuesto/Elemento	Composición	
	ENF/ENG	EB
CaO	40.57%	45.79%
SiO ₂	19.85%	20.39%
Fe ₂ O ₃	18.77%	11.67%
MgO	6.59%	9.57%
Al ₂ O ₃	6.02%	5.95%
MnO	3.35%	1.77%
SO ₃	2.18%	2.49%
Cr	0.77%	0.21%
TiO ₂	0.66%	0.60%
Zn	0.24%	0.53%
Ba	0.22%	0.19%
Na ₂ O	0.20%	0.24%
P ₂ O ₅	0.14%	0.08%
Sr	0.12%	0.13%
Cl	0.11%	0.16%
K ₂ O	0.09%	0.10%
V	0.04%	0.00%
Zr	0.04%	0.05%
Pb	0.03%	0.08%
Cu	0.01%	0.03%
Nb	0.01%	0.01%
Total	100.0%	100.0%

3.2.3 Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (ECSD)

Sobre la base de las granulometrías de las escorias ENF, ENG y EB, se realizó una recomposición granulométrica para obtener el agregado siderúrgico como una única Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (ECSD) que fue definida como esqueleto granular de las mezclas a estabilizar. La **Figura 3-7** muestra el principio de la conformación de la ECSD.

Figura 3-7. Conformación de la ECSD.

La **Tabla 3-5** muestra la distribución granulométrica de la ECSD y la conformación porcentual de ENF, ENG y EB para cada tamaño.

El material pasante del tamiz No 200 correspondió al material producto de desgaste con carga abrasiva y trituración de EB. Lo anterior como consecuencia de la escasez de material original de este tamaño.

Tabla 3-5. Distribución granulométrica de ECSD y conformación porcentual de EB, ENF y ENG.

Tamiz	Conformación			Granulometría ECSD		
	EB (%)	ENF (%)	ENG (%)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
3/4"	0	0	0	0	0	100
1/2"	0	50	50	20.59	20.59	79.41
3/8"	0	50	50	25.32	45.90	54.10
No 4	0	100	0	15.28	61.19	38.81
No 10	50	50	50	7.38	68.57	31.43
No 40	50	50	50	15.25	83.81	16.19
No200	50	50	50	9.88	93.69	6.31
Fondo	100	0	0	6.31	93.69	-

Se evaluó la conformidad con la distribución granulométrica de la ECSD al Capítulo 3 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVIAS (INVIAS, 2022). La **Tabla 3-6** muestra los materiales para los cuales se verificó la conformidad.:

Tabla 3-6. Materiales granulares INVIAS de evaluación para conformidad en gradación de la ECSD.

Artículo INVIAS	Material	Tamaño máximo nominal (mm)	Denominación
320	Subbase granular	38	SBG38
	Subbase granular	50	SBG50
323	Subbase granular con agregado siderúrgico	50	SBD50
	Subbase granular con agregado siderúrgico	38	SBD38
330	Base granular	25	BG25
	Base granular	27	BG27
350	Material granular tratado con cemento	25	MGTC25
	Material granular tratado con cemento	38	MGTC38

Adicionalmente, se verificó la conformidad con respecto a los rangos de gradación establecidos por la Asociación Mundial de Carreteras o PIARC, por sus siglas en inglés (*Permanent International Association of Road Congresses*) publicados por Akeroyd y Hicks (1988).

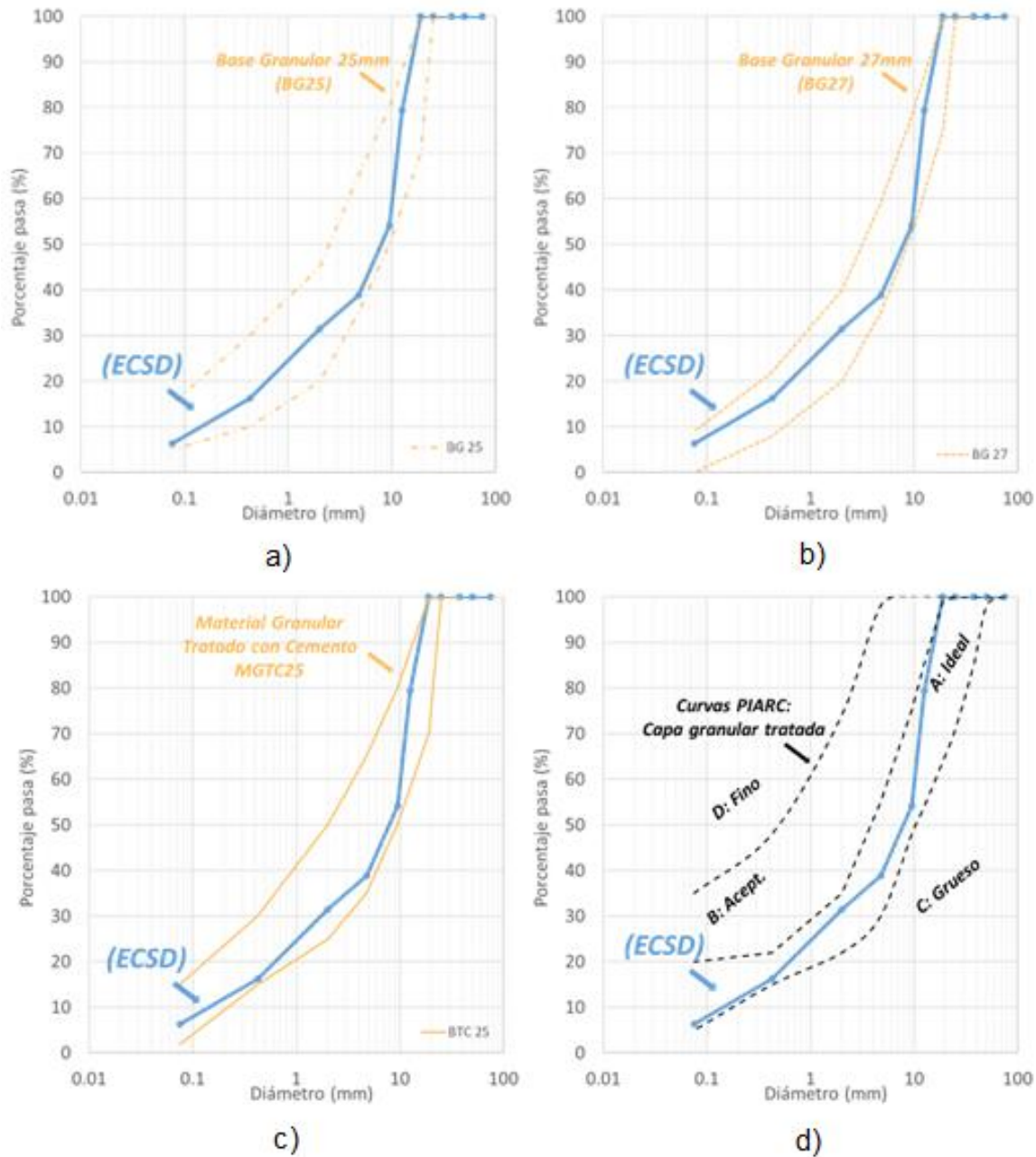
La **Tabla 3-7** muestra la conformidad en gradación de la ECSD con respecto a los criterios de cada tipo de mezclas granulares.

Tabla 3-7. Conformidad de la curva granulométrica de la ECSD con respecto a estándar INVIAS y gradaciones PIARC.

Denominación	Estándar	Conformidad de la ECSD
SBG38	INVIAS	No Conforme
SBG50	INVIAS	No Conforme
SBD50	INVIAS	No Conforme
SBD38	INVIAS	No Conforme
BG25	INVIAS	Conforme
BG27	INVIAS	Conforme
MGTC25	INVIAS	Conforme
MGTC38	INVIAS	No Conforme
Granular	PIARC	Conforme (Zona ideal)

La **Figura 3-8 a), b), c) y d)** muestra la curva granulométrica definida de la ECSD en comparación con los intervalos evaluados para los materiales conformes y el rango ideal según la PIARC.

Figura 3-8. Distribución granulométrica de escoria ECSD y comparación con rangos de aceptación para gradación. a) BG25. b) BG27. c) BTC25. d) Rangos de gradación establecidos por PIARC.



▪ **Resistencia a la degradación Maquina de Los Ángeles (INV-E-218-13)**

El ensayo se realizó sobre una muestra conformada por partículas retenidas en el tamiz $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ " de la ECSD en la misma proporción. La **Figura 3-9** muestra la ejecución del ensayo realizado fijando las condiciones siguientes:

- 500 revoluciones
- 11 esferas metálicas de 4580 g de masa
- 5000.62 g de masa inicial de la muestra

Se obtuvo un valor de desgaste $LA=16.8\%$.

Figura 3-9. Ejecución de ensayo de resistencia a degradación en Maquina de Los Ángeles.



▪ **Resistencia a la abrasión Aparato Micro-Deval (INV-E-238-13)**

El ensayo se realizó sobre una muestra conformada por partículas retenidas en los tamices $\frac{5}{8}$ ", $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ ", en una proporción de 25%, 25% y 50%, respectivamente. La **Figura 3-10** muestra la ejecución del ensayo en Aparato Micro Deval con las condiciones siguientes:

- 12000 revoluciones
- 5000 g de esferas de 9.5mm de diámetro como una carga abrasiva
- 1500.69 g masa inicial

Se obtuvo un porcentaje de pérdidas de $MDE=6.2\%$.

Figura 3-10. Ejecución de ensayo de resistencia por abrasión en Aparato Micro Deval (Laboratorio de Geotecnia - UNAL).



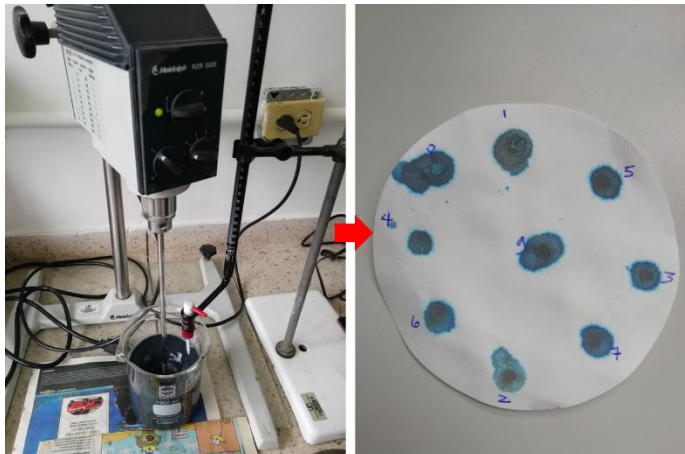
▪ **Valor de azul de metileno en agregados finos (INV-E-235-13)**

Se determinó el valor de azul de metileno (*VBS*) a partir de dos procedimientos:

- Procedimiento 1: Haciendo uso de una muestra de 200 g compuesta por la fracción de tamaño menor a 4.75 mm para el cual se obtuvo un resultado de $VBS=0.5$.
- Procedimiento 2: De acuerdo con el anexo A de la norma INV-E-235-13, sobre una muestra de 30 g de la fracción de tamaño menor a 0.075 mm. Se determinó un $VBS=0.4$

La **Figura 3-11** evidencia la ejecución del ensayo usando el procedimiento 1.

Figura 3-11. Resultado de ensayo azul de metileno usando el procedimiento 1 (Laboratorio de Geotecnia - UNAL).



- **Gravedad específica (EN 12697-5)**

El valor de Gravedad específica (G_s) se determinó mediante el método normalizado por la norma EN 12697-5, en la que se ensayan de manera conjunta todos los tamaños de partículas.

Se realizaron dos pruebas en muestras de 650 g conformadas por la distribución granulométrica completa de la ECSD. El valor de gravedad específica obtenido fue $G_s=3.35$. El valor de G_s obtenido, a pesar de ser un valor elevado con relación a los agregados pétreos convencionalmente utilizados para la construcción de carreteras, se encuentra dentro del rango normalizado para materiales no convencionales obtenidos mediante procesos siderúrgicos como se presentó en el capítulo anterior. Este valor G_s es asociado a la alta presencia de metales y elementos con densidad significativa como producto de los procesos de presión y temperatura dentro de la industria de acería. La **Figura 3-12** evidencia la ejecución del ensayo sobre la ECSD haciendo uso de un picnómetro calibrado de capacidad 1000 ml.

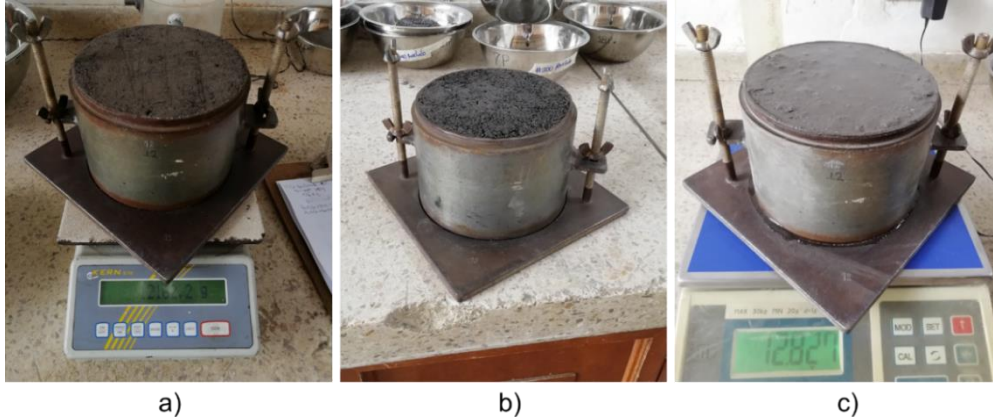
Figura 3-12. Ejecución de ensayo de gravedad específica para gradación completa de la ECSD (Laboratorio de Geotecnia - UNAL).



- **Relación de humedad – peso unitario seco, ensayo modificado de compactación (INV-E-142-13)**

La **Figura 3-13**, presenta el desarrollo de los ensayos Proctor modificado con diferentes contenidos de agua sobre la ECSD.

Figura 3-13. Ejecución de ensayos Proctor en 3 muestras de ECSD (Laboratorio de Geotecnia - UNAL). a) Muestra con w menor al w_{OPM} . b) Muestra con w_{OPM} . c) Muestra con w mayor al w_{OPM} .



Teniendo en cuenta el valor de gravedad específica obtenido ($G_s=3.35$), sobre la curva de compactación de la ECSD, variando los valores de contenido de agua y el grado de saturación (60%, 80% y 100%). La relación de fase utilizada se presenta a continuación:

$$\gamma_d = \frac{G_s}{\left(1 + w \cdot \frac{G_s}{S}\right)} \quad \text{Ecuación 3-1}$$

Donde,

G_s : Gravedad específica

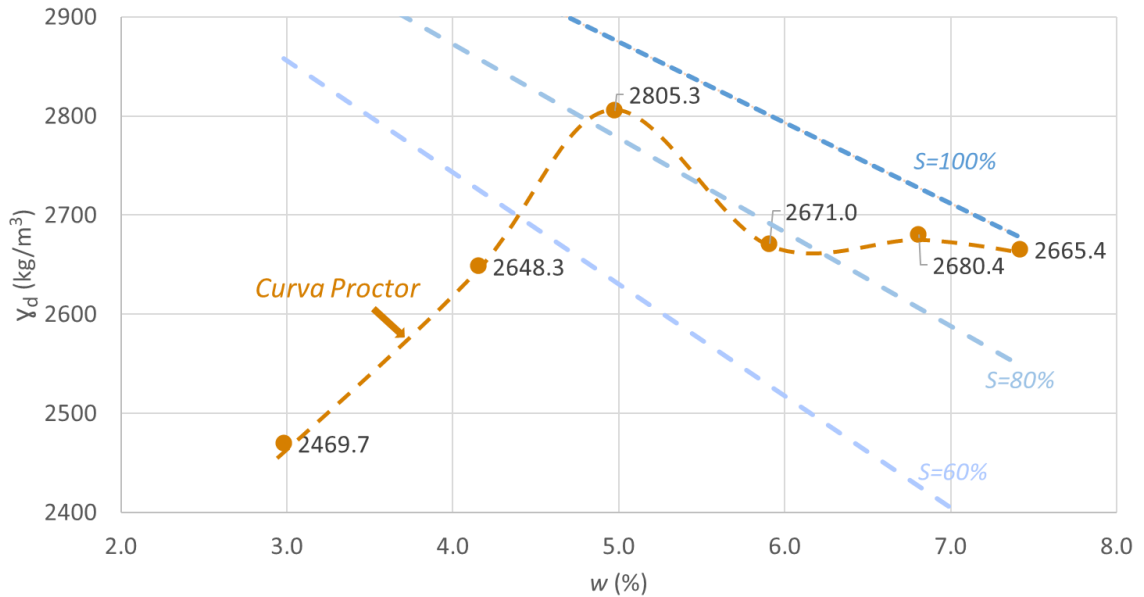
S : grado de saturación (%)

w : contenido de agua (%)

La **Figura 3-14** presenta la curva de compactación de la ECSD, en la cual fue posible identificar:

- Valor de densidad seca máxima de $\gamma_{d_{max}} = 2805.3 \text{ kg/m}^3$
- Contenido de agua óptimo de $w_{OPM} = 5.0\%$.
- Grado de saturación igual a $S = 83 \%$, para condiciones óptimas de compactación.

La densidad seca máxima $\gamma_{d_{max}}$ obtenida es considerada elevada en comparación con los obtenidos para agregados pétreos, sin embargo, además de corroborarse con diferentes investigaciones previas presentadas en el capítulo anterior, este valor es asociado al alto valor de G_s del material estudiado, así como a la gradación utilizada.

Figura 3-14. Curva de compactación (Proctor) de ECSD.

▪ Ensayo de succión total con equipo WP4C (ASTM D6836-02)

Se desarrolló el ensayo para determinación de la succión total sobre la franja fina (< 2.0 mm) de la ECSD mediante el uso del higrómetro de rocío (WP4C).

Diez (10) muestras fueron usadas para este ensayo, las cuales se compactaron según las siguientes condiciones:

- Compactación estática a una velocidad de 1 mm/min
- Moldes metálicos de 37 mm de diámetro hasta una altura de 4.5 mm
- Densidad seca de $\gamma_d = 2500 \text{ kg/m}^3$
- Humedad de fabricación equivalente a la $w_{OPM}=5\%$

El ensayo se ejecutó usando dos condiciones:

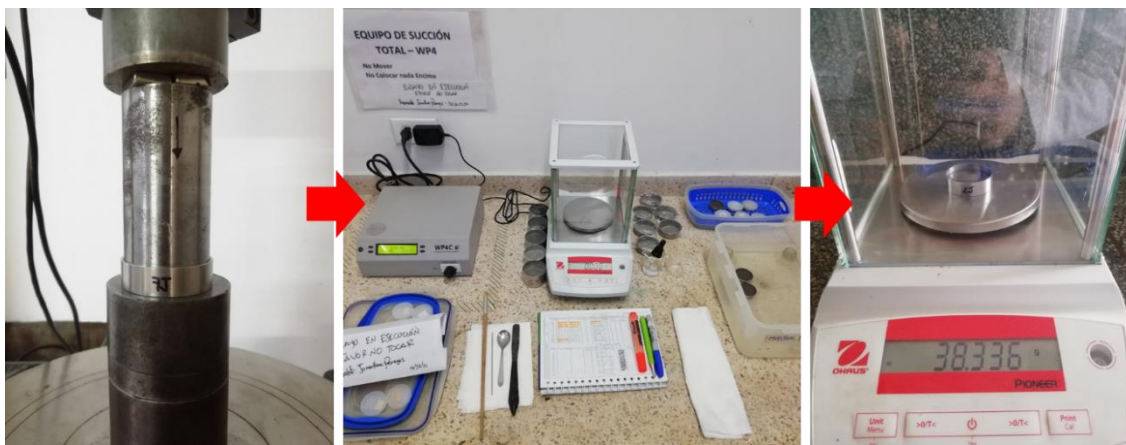
- Secado:
 - Una vez fabricadas las diez muestras fueron sumergidas 24h para tener una condición inicial de saturación $S=100\%$ de todas las muestras.
 - Las muestras fueron dejadas al aire libre para su secado natural.
 - Una vez se garantiza una humedad determinada en una muestra, esta era ensayada en el WP4C.

- Humedecimiento:
 - Una vez fabricadas las diez muestras fueron sumergidas 24h para tener una condición inicial de saturación $S=100\%$ de todas las muestras.
 - Las muestras fueron secadas al aire hasta no presentar humedad (3 días).
 - Las muestras fueron humedecidas de manera homogénea y controlada.
 - Una vez se garantiza una humedad homogénea en una muestra, esta era ensayada en el WP4C.

Fueron utilizadas únicamente las muestras que presentaron valores de succión aceptables (presión negativa).

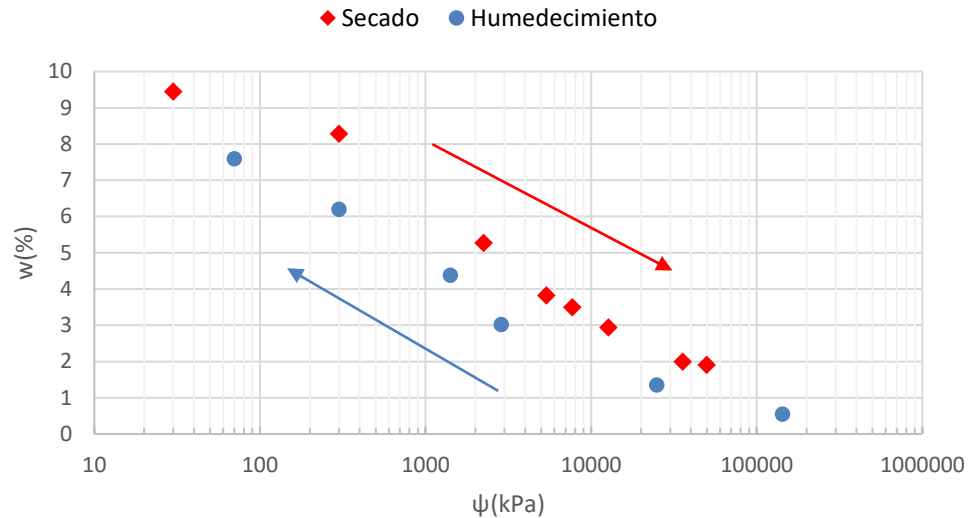
La determinación del contenido de agua de las muestras ensayadas se realizó usando una balanza Ohaus con precisión de 0.001g. La **Figura 3-15** muestra el desarrollo de los ensayos de succión total en laboratorio.

Figura 3-15. Ejecución de ensayos de succión total con equipo WP4C (Laboratorio de Geotecnia - UNAL).



La **Figura 3-16** presenta las curvas características de succión en función de la humedad de las muestras ensayadas, en condición de humedecimiento y de secado. Se puede constatar que las muestras en secado presentan una succión siempre superior, respecto a las de condición de humedecimiento.

Figura 3-16. Curvas de succión de parte fina (< 2.0 mm) de la ECSD, en humedecimiento y secado.



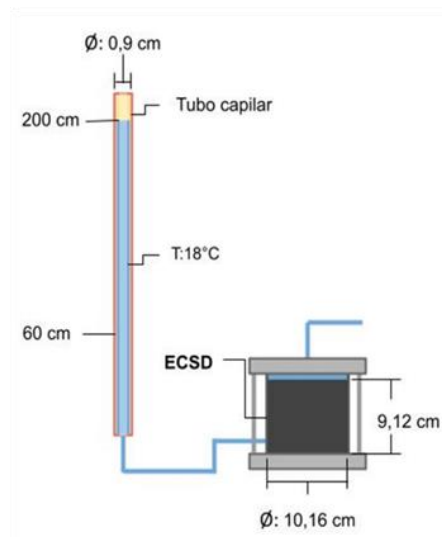
▪ **Permeabilidad de suelos granulares-con carga variable (EN 17892-11)**

La **Figura 3-17** muestra el esquema de ejecución del ensayo en el laboratorio de geotecnia y pavimentos de la Universidad Nacional. Con la muestra de ECSD compactada a una densidad seca equivalente al 79% de la densidad Proctor óptima ($\gamma_d = 2200.1 \text{ kg/m}^3$), se determinó un coeficiente de permeabilidad de $k_w=5.69\text{E-}04 \text{ cm/s}$.

Figura 3-17. Ensayo de permeabilidad con carga variable sobre la ECSD. a) Sistema utilizado para el ensayo. b) Representación esquemática de las condiciones del ensayo.



a)



b)

▪ **Ensayo para la determinación de CBR (California Bearing Ratio) (INV-E-148-13)**

Se determinó el CBR de la ECSD bajo tres (3) condiciones diferentes de compactación, cada una con llenado del molde en 5 capas:

- 12 golpes por capa
- 25 golpes por capa
- 56 golpes por capa

El proceso de penetración se ejecutó bajo la condición saturada del material posterior a un periodo de inmersión de 96 horas. Además, cada ensayo se desarrolló con una masa de sobrecarga de aproximadamente 5.3kg en la parte superior de la muestra.

La penetración se llevó a cabo en la prensa de carga marca Humboldt con una celda de medición de fuerza de capacidad máxima 50kN (resolución de 0.1kN) y con un lector de deformación (LVDT) con extensión máxima de 50mm (resolución de 0.001mm). La **Figura 3-18** muestra el proceso de ejecución de ensayos de CBR en laboratorio.

El porcentaje de expansión lineal de cada muestra fue determinado luego del periodo de inmersión, con respecto a la condición inicial de compactación.

Figura 3-18. Ejecución de ensayos CBR sobre ECSD (Laboratorio de Geotecnia - UNAL).



Los valores de densidad seca, CBR y el porcentaje de expansión lineal obtenidos para las muestras compactadas con 12, 25 y 56 golpes por capa se muestran en la **Tabla 3-8**.

Tabla 3-8. Valores de densidad seca, CBR y expansión lineal obtenidos en laboratorio.

Golpes por capa	γ_d (kg/m³)	CBR 0.1'' (%)	CBR 0.2'' (%)	CBR Seleccionado (%)	Expansión lineal (%)
12	2348.8	56.5	59.2	59.2	0.02
25	2463.7	108.7	148.5	148.5	0.03
56	2768.4	231.9	330.1	231.9	0.04

El valor de CBR a 0.2'' de penetración para la muestra compactada con 56 golpes por capa se obtuvo mediante extrapolación de datos posterior al esfuerzo de 25.4MPa, siendo este el máximo alcanzado por la prensa de carga disponible.

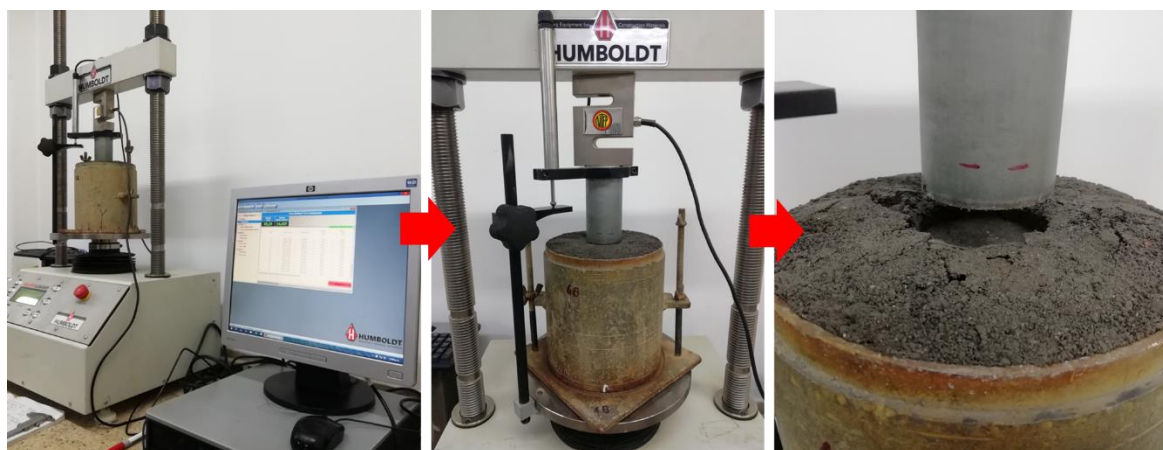
▪ **Ensayo para la determinación de IPI (Índice de Portancia Inmediata) (EN 13286-47)**

El ensayo de IPI permitió conocer la resistencia del material estudiado frente a la penetración de un pistón de sección circular y área igual a 1935 mm² en la parte central de la muestra compactada en condiciones óptimas de contenido de agua y sin sobrecarga.

Se determinó el IPI de la ECSD bajo tres (3) condiciones diferentes de compactación, cada una con llenado del molde en 5 capas:

- 12 golpes por capa
- 25 golpes por capa
- 56 golpes por capa

La penetración se llevó a cabo en la prensa de carga marca Humboldt con una celda de medición de fuerza de capacidad máxima 50kN (resolución de 0.1kN) y con un lector de deformación (LVDT) con extensión máxima de 50mm (resolución de 0.001mm). La **Figura 3-19** muestra el proceso de ejecución del ensayo de IPI en laboratorio.

Figura 3-19. Ejecución de ensayo IPI sobre ECSD (Laboratorio de Geotecnia - UNAL).

Los valores de densidad seca e IPI obtenidos para las muestras compactadas con 12, 25 y 56 golpes por capa se muestran en la **Tabla 3-9**.

Tabla 3-9. Valores de densidad seca e IPI obtenidos en laboratorio.

Golpes por capa	γ_d (kg/m³)	IPI 0.1'' (%)	IPI 0.2'' (%)	IPI Seleccionado (%)
12	2322.3	40.58	55.3	55.3
25	2410.8	73.9	98.1	98.1
56	2738.6	118.1	163.1	163.1

3.2.4 Aditivo a base de zeolitas (*RoadCem-PowerCem*®)

RoadCem es un aditivo tipo ASC (Adiciones a Suelos Cemento) de grano fino que basa su composición en metales alcalinos, alcalinotérreos y zeolitas sintéticas. Está diseñado para ser utilizado en conjunto con cemento en estabilización de materiales granulares. La ficha del aditivo *RoadCem* proporcionada por el proveedor se presenta en el Anexo B.

De acuerdo con el fabricante (*PowerCem Technologies*), este aditivo tiene características neutralizantes, catalíticas, de intercambio iónico y adsorción. Además, destacan las siguientes propiedades de los materiales estabilizados con cemento y *RoadCem*.

- Aumento en la fuerza, rigidez y flexibilidad: Destaca la resistencia a temprana edad debido a los compuestos del aditivo que aceleran y aumentan el grado de hidratación del cemento.

- Reducción en el potencial de contracción: Disminución en la propagación de grietas en bases granulares tratadas con cemento.

3.2.5 Ligante hidráulico (Cemento estructural MAX-Argos)

El ligante hidráulico proporcionado es un cemento estructural tipo ART según la NTC 121, producido por la compañía ARGOS. De acuerdo con el fabricante, este tipo de cemento está diseñado para la producción industrializada de concreto mediante el desarrollo elevado de resistencia a edad temprana y final.

La **Tabla 3-10** presenta las especificaciones técnicas del cemento utilizado. La ficha técnica del producto se presenta en el Anexo B.

Tabla 3-10. Especificaciones técnicas cemento estructural MAX-Argos.

PARÁMETROS FÍSICOS		NORMA DE ENSAYO	NTC 121 TIPO ART	ASTM C-1157 TIPO HE	ESPECIFICACIÓN ARGOS
Finura	Blaine, min, (cm ² /g)	NTC 33	A	A	A
	Retenido Tamiz 45 μm (%)	NTC 294	A	A	A
Cambio de longitud por autoclave expansión, máx (%)		NTC 107	0.8	0.8	0.8
Tiempo de fraguado,	No menos de, minutos	NTC 118	45	45	90
Ensato de Vicat*	No más de, minutos	NTC 118	420	420	360
Expansión de barras de mortero a 14 días, máx (%)		NTC 4927	0.020	0.020	0.020
RESISTENCIA MÍNIMA A LA COMPRESIÓN, (MPa)					
1 día		NTC 220	11.0	12.0	12.0
3 días		NTC 220	22.0	24.0	24.0
28 días		NTC 220	-	-	43.4

Fuente: (ARGOS, 2021).

3.3 Etapa 2. Formulación

La formulación de las mezclas a evaluar mecánicamente se diseñó a partir la ECSD, aditivo a base de zeolitas (*RoadCem*) y cemento como se muestra en la **Figura 3-20**.

Figura 3-20. Conformación de mezclas a evaluar mecánicamente.



3.3.1 Determinación de dosificaciones y tipo de mezclas

De acuerdo con las recomendaciones de las compañías *I.C. Ingeniería y Consultoría S.A.S* y *PowerCem Technologies*, la relación entre la cantidad de aditivo y cemento se estandariza como 1/100, es decir, aplicación de 1 kg de aditivo y 100 kg de cemento por cada metro cúbico de material a estabilizar.

Por otro lado, la investigación previa adelantada por la compañía *I.C. Ingeniería y Consultoría S.A.S* en el año 2019, en el marco del proyecto “Estabilización de suelos vía *Elite Flower*” en el municipio de Sotaquirá, evaluó el comportamiento de mezclas compuestas por escoria de siderúrgica Diaco estabilizada con dosificaciones de aditivo *RoadCem* entre 0.04% y 0.08%, y de cemento estructural entre 4% y 8%.

Teniendo en cuenta lo anterior, la presente investigación efectuó la evaluación del desempeño mecánico sobre 3 tipos de mezclas cuyas dosificaciones se muestran en la **Tabla 3-11**.

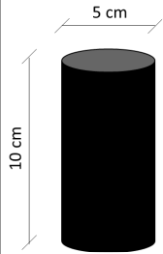
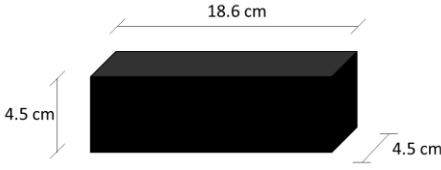
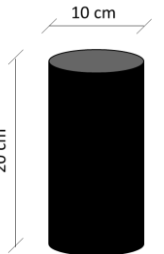
Tabla 3-11. Dosificaciones de conformación de mezclas a evaluar mecánicamente

Tipo de mezcla	Dosificación		
	Escoria (%)	Aditivo (%)	Cemento (%)
LE-R0C0	100.00	0.00	0.00
LE-R.02C2	97.98	0.02	2.00
LE-R.06C6	93.94	0.06	6.00

3.3.2 Fabricación de probetas

De acuerdo con la geometría requerida para la ejecución de los ensayos de la siguiente etapa, se fabricaron 3 tipos de probetas como se presenta en la **Tabla 3-12**.

Tabla 3-12. Tipos de probetas fabricadas para ensayos mecánicos.

Tipo de probeta	A	B	C
Geometría	Cilíndrica	Prismática	Cilíndrica
Esquema			

Se implementó un protocolo de fabricación de probetas, el cual se presenta en el Anexo C. El protocolo incluye los siguientes procesos:

1. Preparación de la muestra: Secado de escorias (EB, ENF y ENG) a 110°C , 24h antes de la preparación de la muestra. Preparación de la muestra de ECSD de acuerdo con la granulometría presentada en la **Tabla 3-5**.
2. Mezclado de componentes:
 - a. Mezclado en seco de ECSD durante 5 minutos.
 - b. Adición de cantidad de cemento y aditivo fijado y mezclado en seco durante 5 minutos.
 - c. Adición de cantidad de agua para $w_{OPM} = 5.0\%$ y mezclado durante 5 minutos.
3. Compactación estática:
 - a. Probetas Tipo A y C: Preparación y lubricación de moldes cilíndricos de acuerdo con la geometría de cada tipo de probeta. Compactación con velocidad de $v=1 \text{ mm/seg}$ y tiempo $t=15 \text{ min}$ para obtener una densidad cercana a $\gamma_d = 2500 \text{ kg/m}^3$, equivalente 90% de la $\gamma_{d_{max}}$.
 - b. Probetas Tipo B: Preparación y lubricación de moldes de sección prismática. Compactación con velocidad de $v=1 \text{ mm/min}$ y tiempo $t=15 \text{ min}$ para obtener una densidad cercana a $\gamma_d = 2250 \text{ kg/m}^3$, equivalente 80% de la $\gamma_{d_{max}}$.
4. Curado de muestras: En un cuarto húmedo con condiciones controladas de temperatura $T^{\circ}=25^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $HR=95\%$. Se fijaron las edades de curado de 3 días, 7 días y 28 días.

La **Figura 3-21** muestra, de manera general, el desarrollo del proceso de fabricación de las probetas.

Figura 3-21. Proceso general de fabricación de probetas para ensayos mecánicos.

Fabricación de probetas

1 Preparación de la muestra
Granulometría (15.9mm -
<0.075mm)



2 Mezclado
ECSD + Agua+ Cemento
+ Powercem

3 Compactación estática

➤ **PROBETAS TIPO A y C**
Densidad 90% γ_{OPM} :
2.500 kg/m³

➤ **PROBETAS TIPO B**
Densidad 80% γ_{OPM} :
2.250 kg/m³



4 Curado de muestras
3, 7 y 28 días
T° = 25°C
HR = 95%



3.4 Etapa 3. Evaluación del comportamiento mecánico

Con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas diseñadas e identificar el efecto de la cantidad de cemento y aditivo adicionado, en la etapa 3 se llevó a cabo la evaluación del desempeño mecánico de las mezclas, mediante la ejecución de ensayos con aplicación de carga monotónica y cíclica:

- Compresión Simple (CS)
- Tracción Indirecta (TI)
- Flexión 4 Puntos (F4P)
- Módulo en compresión (MC)
- Módulo resiliente (MR)

La **Tabla 3-13** relaciona el tipo de ensayo realizado con los tipos de probetas usados, edades de curado evaluadas y cantidad de muestras ensayadas.

Tabla 3-13. Cantidad de cuerpos de prueba ensayados por tipo de mezcla, edad de curado y ensayo.

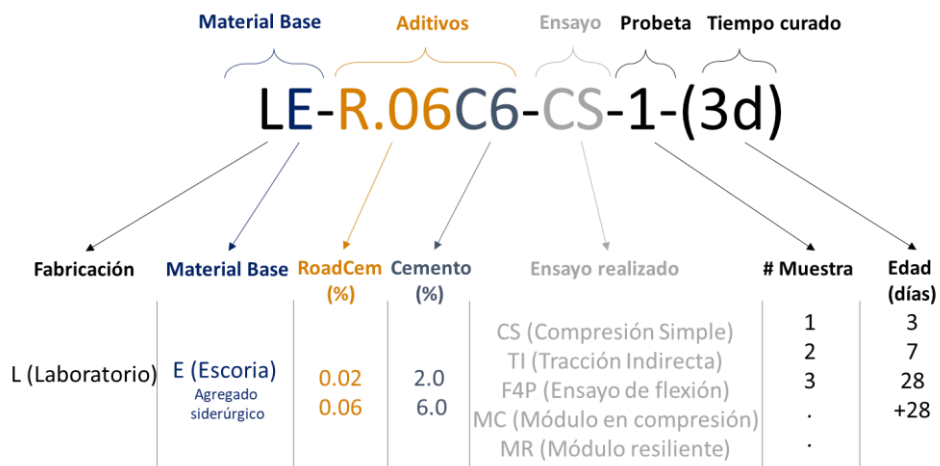
Ensayo	Tipos de probeta	Edad (días)	Muestras ensayadas por tipo de mezcla		
			LE-R0C0	LE-R.02C2	LE-R.06C6
CS	A	3	3	3	3
		28	3	3	3
TI	A	3	3	3	3
		28	3	3	2
F4P	B	7	0	3	2
		28	0	3	3
MC	C	137*	2	2	2
MR	C	106*	1	1	1
Total			15	21	19

*Nota: Edades no estandarizadas por disponibilidad de equipo. Se garantiza un curado superior a 90 días.

En total fueron fabricadas 55 probetas para los diferentes ensayos de laboratorio.

3.4.1 Nomenclatura de mezclas estabilizadas con cemento y aditivo

Se definió una nomenclatura para la identificación de los cuerpos de prueba, teniendo en cuenta el material base, la dosificación de aditivos, el ensayo a realizar y el tiempo de curado, como se muestra en la **Figura 3-22**.

Figura 3-22. Nomenclatura utilizada para las probetas en ensayos mecánicos.

3.4.2 Equipos de laboratorio usados para la ejecución de ensayos mecánicos

La **Tabla 3-14** relaciona los equipos de laboratorio utilizados para ensayos mecánicos.

Tabla 3-14. Equipos de laboratorio utilizados para ensayos mecánicos.

Equipo	Marca	Modelo	Sistema	Ensayo	Carga	Velocidad
	Shimadzu (UNAL)	AG-X plus, 250kN- 300kN	Mecánico servocontrolado de tornillos	CS	Monotónica	0.5mm/min
				TI	Monotónica	0.5mm/min
				F4P	Monotónica	1kgf/min
	MTS (UniAndes)	298.12C	Hidráulico servocontrolado	MC	Monotónica	0.5mm/min
				MR	Cíclica	-

3.4.3 Ensayo en compresión simple (INV-E-614) - (EN 13286-41)

Se realizaron 18 ensayos en compresión simple (CS), sobre las mezclas:

- LE-R0C0
- LE-R.02C2
- LE-R.06C6

La **Figura 3-23** evidencia el desarrollo de los ensayos en laboratorio.

Figura 3-23. Ejecución de ensayos en compresión simple (Laboratorio de Estructuras - UNAL).



La **Tabla 3-15** muestra el resumen de resultados obtenidos para las muestras ensayadas, donde F_{MAX} representa la carga máxima alcanzada en kN y R_C es el valor de resistencia en compresión simple en MPa, obtenida a partir de la **Ecuación 1-10** para cada muestra.

Tabla 3-15. Resultados individuales de ensayo de compresión simple.

	w (%)	γ_d (kg/m ³)	A (mm ²)	F_{MAX} (kN)	R_c (MPa)	σ (MPa)
LE-R0C0-CS-1 (3d)	4.82	2455.45	2019.87	0.99	0.58	0.16
LE-R0C0-CS-2 (3d)	4.90	2455.33	2037.16	0.95	0.47	
LE-R0C0-CS-3 (3d)*	4.77	2393.50	2067.25	0.53	0.25	
LE-R.02C2-CS-1 (3d)	5.50	2438.03	2038.72	2.62	1.29	0.07
LE-R.02C2-CS-2 (3d)	5.33	2395.04	2042.93	2.41	1.18	
LE-R.02C2-CS-3 (3d)	5.16	2440.52	2038.36	2.38	1.17	
LE-R.06C6-CS-1 (3d)	5.66	2431.90	2039.55	5.44	2.67	0.16
LE-R.06C6-CS-2 (3d)	5.08	2447.55	2033.80	4.78	2.35	
LE-R.06C6-CS-3 (3d)	4.78	2446.59	2043.66	5.20	2.55	
LE-R0C0-CS-1 (28d)	3.98	2439.76	2023.73	6.52	3.22	0.19
LE-R0C0-CS-2 (28d)	3.73	2438.93	2033.90	5.87	2.88	
LE-R0C0-CS-3 (28d)	3.62	2446.73	2028.60	6.53	3.22	
LE-R.02C2-CS-1 (28d)	4.60	2468.44	2021.95	7.23	3.58	0.21
LE-R.02C2-CS-2 (28d)	4.68	2463.68	2029.77	7.86	3.87	
LE-R.02C2-CS-3 (28d)	4.85	2464.68	2030.67	8.11	4.00	
LE-R.06C6-CS-1 (28d)*	4.08	2458.71	2014.08	Sin reporte	Sin reporte	0.71
LE-R.06C6-CS-2 (28d)	3.57	2480.27	2033.65	12.28	6.04	
LE-R.06C6-CS-3 (28d)	3.55	2471.09	2026.57	14.27	7.04	

*Nota: Las muestras presentaron alguna anomalía en el proceso de fabricación o falla, por lo cual, no fueron tenidas en cuenta posteriormente.

3.4.4 Ensayo en tracción indirecta (EN 13286-42)

Se realizaron 17 ensayos en tracción indirecta (TI) sobre las mezclas:

- LE-R0C0
- LE-R.02C2
- LE-R.06C6

La **Figura 3-24** evidencia el desarrollo de los ensayos en laboratorio.

Figura 3-24. Ejecución de ensayos en tracción indirecta (Laboratorio de Estructuras - UNAL).



La **Tabla 3-16** muestra los resultados individuales obtenidos sobre las muestras ensayadas en tracción indirecta, F_{MAX} representa la carga máxima alcanzada en kN y R_{TI} es el valor de resistencia en tracción indirecta en MPa, obtenida a partir de la **Ecuación 1-11**.

Tabla 3-16. Resultados individuales de ensayos de tracción indirecta.

	w (%)	γ_d (kg/m ³)	H (mm)	D (mm)	F_{MAX} (kN)	R_{TI} (MPa)	σ (MPa)
LE-R0C0-TI-1 (3d)	5.32	2415.81	103.14	50.51	0.83	0.10	
LE-R0C0-TI-2 (3d)*	4.64	2463.03	102.24	50.45	0.41	0.05	0.03
LE-R0C0-TI-3 (3d)	4.87	2417.38	102.32	50.50	0.59	0.07	
LE-R.02C2-TI-1 (3d)	4.77	2455.74	102.55	50.50	1.36	0.17	
LE-R.02C2-TI-2 (3d)	4.77	2439.14	102.99	50.56	1.06	0.13	0.02
LE-R.02C2-TI-3 (3d)*	5.26	2418.49	102.96	50.62	0.99	0.12	
LE-R.06C6-TI-1 (3d)*	5.09	2429.48	102.65	50.64	4.40	0.54	
LE-R.06C6-TI-2 (3d)	4.48	2446.55	102.90	50.60	3.45	0.42	0.10
LE-R.06C6-TI-3 (3d)	4.77	2448.19	102.66	50.53	2.82	0.35	
LE-R0C0-TI-1 (28d)	4.82	2448.59	102.90	50.55	2.18	0.27	
LE-R0C0-TI-2 (28d)*	4.72	2439.82	102.85	50.58	1.57	0.19	0.04
LE-R0C0-TI-3 (28d)	4.39	2448.96	103.06	50.49	2.03	0.25	
LE-R.02C2-TI-1 (28d)	3.85	2468.16	102.31	50.54	4.29	0.53	
LE-R.02C2-TI-2 (28d)	3.55	2439.16	102.91	50.72	4.89	0.60	0.03
LE-R.02C2-TI-3 (28d)	4.11	2441.87	102.91	50.59	4.57	0.56	
LE-R.06C6-TI-1 (28d)	4.19	2467.80	102.36	50.59	10.91	1.23	0.10
LE-R.06C6-TI-2 (28d)	4.24	2467.07	103.02	50.47	8.94	1.09	

*Nota: Las muestras presentaron alguna anomalía en el proceso de fabricación o falla, por lo cual, no fueron tenidas en cuenta posteriormente

3.4.5 Ensayo en flexión 4 puntos (INV-E-616) – (EN 12390-5)

Los ensayos de resistencia en flexión 4 puntos (F4P) se efectuaron sobre las mezclas:

- LE-R.02C2
- LE-R.06C6

La **Figura 3-25** evidencia la ejecución de los ensayos en laboratorio.

Figura 3-25. Ejecución de ensayos de flexión (Laboratorio de Estructuras - UNAL).



De acuerdo con lo anterior, la **Tabla 3-17** muestra los resultados obtenidos en las muestras ensayadas, F_{MAX} representa la carga máxima alcanzada en kN y R_F es el valor de resistencia en compresión simple en MPa, obtenida a partir de la **Ecuación 1-12**.

Tabla 3-17. Resultados individuales de ensayos de flexión.

	w (%)	γ_d (kg/m ³)	b (mm)	h (mm)	F_{MAX} (N)	R_F (MPa)	σ (MPa)
LE-R.02C2-F4P-1 (7d)	4.29	2276.32	46.79	46.08	340.48	0.47	
LE-R.02C2-F4P-2 (7d)*	4.23	2223.18	45.40	45.63	201.34	0.29	0.10
LE-R.02C2-F4P-3 (7d)	4.80	2319.33	46.10	45.90	315.30	0.44	
LE-R.06C6-F4P-1 (7d)	4.53	2180.78	46.79	45.68	491.98	0.69	
LE-R.06C6-F4P-2 (7d)	4.65	2192.50	45.75	44.95	494.89	0.73	0.03
LE-R.02C2-F4P-1 (28d)	3.23	2252.27	44.44	46.17	729.09	1.05	
LE-R.02C2-F4P-2 (28d)*	3.25	2252.22	43.80	45.68	276.18	0.41	0.33
LE-R.02C2-F4P-3 (28d)	4.11	2297.37	45.72	46.08	640.66	0.90	
LE-R.06C6-F4P-1 (28d)	4.21	2295.54	46.28	45.94	1298.06	1.82	
LE-R.06C6-F4P-2 (28d)*	4.22	2190.99	46.33	46.20	950.18	1.31	0.25
LE-R.06C6-F4P-3 (28d)	4.80	2296.14	46.29	45.82	1144.23	1.61	

*Nota: Las muestras presentaron alguna contrariedad en el proceso de fabricación o falla, por lo cual, no fueron tenidas en cuenta posteriormente.

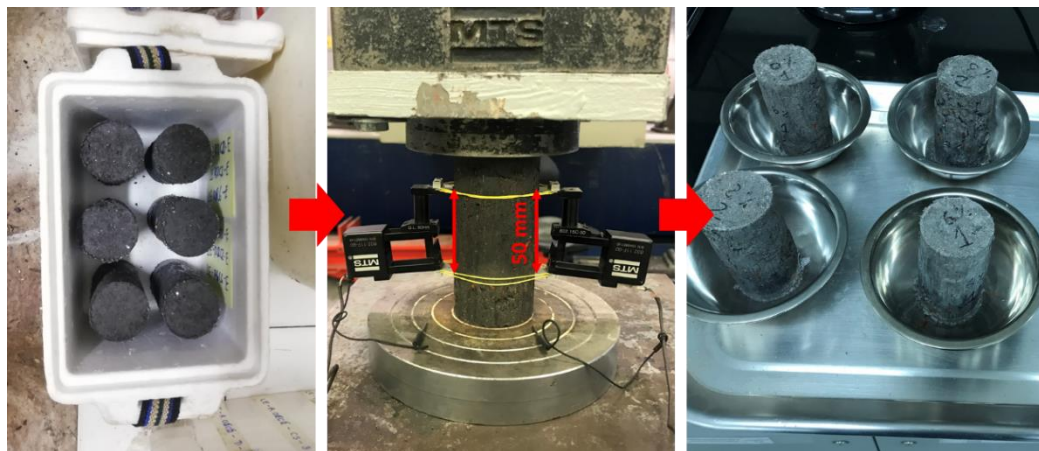
3.4.6 Ensayo de módulo en compresión (INV-E-614) - (EN 13286-41)

Los ensayos de módulo en compresión (MC) se efectuaron sobre las mezclas:

- LE-R0C0
- LE-R.02C2
- LE-R.06C6

Las muestras fueron fabricadas el día 16 de junio de 2022, y teniendo en cuenta la disponibilidad del equipo der La Universidad de Los Andes, los ensayos fueron ejecutados el día 31 de octubre de 2022 (137 días de curado). La **Figura 3-26** evidencia la ejecución de los ensayos en laboratorio.

Figura 3-26. Ejecución de ensayos en compresión (Laboratorio Mezclas asfálticas – UniAndes).



La zona elástica para el cálculo de los módulos en ensayo en compresión (E_c), se definió para la deformación unitaria entre 0% y 0.02% con respecto a la dimensión del extensómetro utilizado ($L=50\text{ mm}$). La **Tabla 3-18** muestra el resumen de resultados obtenidos para todas las muestras ensayadas, donde F_{MAX} representa la carga máxima alcanzada en kN y E_c es el valor de módulo en compresión en MPa obtenido a partir de la **Ecuación 1-16**.

Tabla 3-18. Resultados individuales de ensayos de módulo en compresión.

	w (%)	γ_d (kg/m ³)	σ_{MAX} (MPa)	E_c (MPa)	σ (10 ³) (MPa)
LE-R0C0-MC-1 (137d)	5.43	2509.67	5.18	9867.31	5.18
LE-R0C0-MC-2 (137d)*	6.53	2461.05	3.88	2538.39	
LE-R2C2-MC-1 (137d)	5.89	2453.42	7.14	15601.45	4.02
LE-R2C2-MC-2 (137d)*	6.08	2427.76	5.87	9921.44	
LE-R6C6-MC-1 (137d)*	6.55	2500.03	7.82	2682.71	11.99
LE-R6C6-MC-2 (137d)	7.27	2490.11	8.41	19638.51	

*Nota: Las muestras presentaron alguna anomalía en el proceso de fabricación o falla, por lo cual, no fueron tenidas en cuenta posteriormente.

3.4.7 Ensayo de módulo resiliente (INV-E-156)

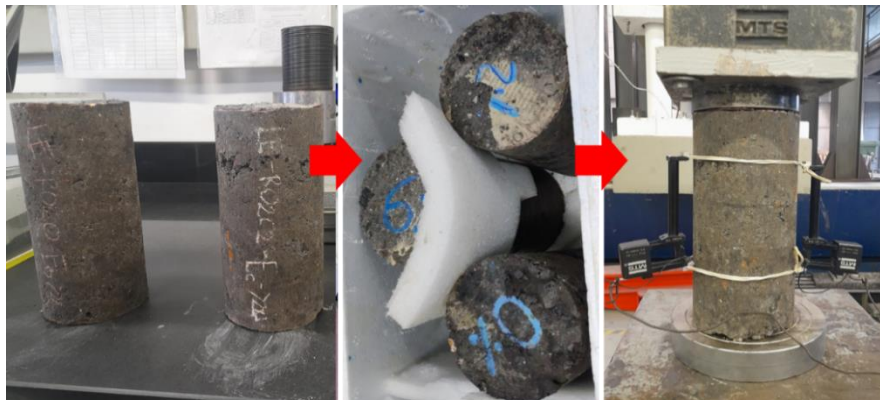
Los ensayos de módulo resiliente (MR) se efectuaron sobre las mezclas:

- LE-R0C0
- LE-R.02C2
- LE-R.06C6

Las muestras fueron fabricadas el día 7 de julio de 2022, y teniendo en cuenta la disponibilidad del equipo de La Universidad de Los Andes, los ensayos fueron ejecutados el día 27 de octubre de 2022 (106 días de curado).

La sollicitación de carga cíclica se realizó en sentido uniaxial sin confinamiento lateral dada la elevada rigidez del material. La **Figura 3-27** evidencia la ejecución de los ensayos en laboratorio.

Figura 3-27. Ejecución de ensayos de módulo resiliente (Laboratorio Mezclas asfálticas – UniAndes).



La **Tabla 3-19** presenta los resultados de contenido de agua y peso unitario seco de la muestra ensayada para cada mezcla.

Tabla 3-19. Resultados de contenido de agua y peso unitario seco ensayos de módulo resiliente.

	w (%)	γ_d (kg/m ³)
LE-R0C0	7.03	2457.49
LE-R.02C2	5.32	2510.85
LE-R.06C6	5.10	2542.68

Se efectuaron 15 secuencias de carga sobre cada muestra variando el esfuerzo cíclico aplicado de acuerdo con la norma INV-E-156. La **Tabla 3-20** muestra el resumen de resultados obtenidos para la mezcla LE-R0C0 obtenidos a partir de la **Ecuación 1-17**, la **Ecuación 1-18** y la **Ecuación 1-19**.

Tabla 3-20. Resumen de resultados de ensayo de módulo resiliente en mezcla LE-R0C0.

Secuencia	Esfuerzo cíclico promedio (σ_c)	Def. Unit. resiliente promedio (ϵ_r)	Módulo resiliente promedio (E_r)	σ (10³)
	(MPa)	(mm/mm)	(MPa)	(MPa)
1	0.01	1.93	8931.84	2.31
2	0.03	1.99	9691.15	2.55
3	0.05	1.53	9406.31	1.23
4	0.03	0.99	9028.44	2.20
5	0.06	0.94	9609.12	0.52
6	0.09	0.98	8997.75	0.74
7	0.06	1.93	9465.78	1.29
8	0.12	1.60	9095.54	0.38
9	0.17	2.94	8847.63	0.17
10	0.06	1.74	8939.47	0.49
11	0.09	1.49	8553.61	0.51
12	0.18	4.35	9277.18	1.01
13	0.09	0.76	9151.53	0.64
14	0.12	1.10	8848.67	0.89
15	0.24	4.56	8891.82	1.29

La **Tabla 3-21** muestra el resumen de resultados obtenidos para la mezcla LE-R.02C2.

Tabla 3-21. Resumen de resultados de ensayo de módulo resiliente en mezcla LE-R.02C2.

Secuencia	Esfuerzo cíclico promedio (σ_c)	Def. Unit. resiliente promedio (ϵ_r)	Módulo resiliente promedio (E_r)	σ (10^3)
	(MPa)	(mm/mm)	(MPa)	(MPa)
1	0.01	0.72	11535.95	3.84
2	0.03	0.75	12208.21	2.55
3	0.05	1.07	11622.92	1.98
4	0.03	1.26	12046.79	4.03
5	0.06	1.23	12024.64	0.56
6	0.08	1.04	11929.57	1.25
7	0.06	0.71	11469.93	1.37
8	0.11	3.05	11771.96	0.98
9	0.18	2.48	12087.64	1.19
10	0.06	1.40	11820.20	2.50
11	0.08	2.89	11448.17	1.26
12	0.18	1.57	11834.32	1.51
13	0.08	1.22	11714.17	0.64
14	0.11	1.71	11427.87	1.13
15	0.24	5.85	11652.68	1.20

La **Tabla 3-22** muestra el resumen de resultados obtenidos para la mezcla LE-R.06C6.

Tabla 3-22. Resumen de resultado de ensayo de módulo resiliente en mezcla LE-R.06C6.

Secuencia	Esfuerzo cíclico promedio (σ_c)	Def. Unit. resiliente promedio (ϵ_r)	Módulo resiliente promedio (E_r)	σ (10^3)
	(MPa)	(mm/mm)	(MPa)	(MPa)
1	0.02	1.61	39009.89	16.60
2	0.04	2.19	32678.85	7.82
3	0.05	2.89	39293.03	12.44
4	0.03	1.09	23421.81	9.07
5	0.06	0.69	32677.96	10.21
6	0.10	1.71	36985.93	11.37
7	0.06	1.28	40965.01	14.33
8	0.13	2.09	33385.51	9.51
9	0.19	1.69	36328.31	3.46
10	0.06	1.91	37003.54	8.15
11	0.10	1.14	34915.82	2.64
12	0.19	1.95	31811.18	5.89
13	0.10	1.14	39575.09	7.35
14	0.13	1.69	34034.80	7.39
15	0.25	1.95	34952.69	0.60

4. Análisis de resultados

Este capítulo analiza los resultados de caracterización del agregado siderúrgico (ECSD) como material para construcción de estructuras de pavimento y la respuesta mecánica obtenida por las mezclas diseñadas. Se realizó una comparación directa con los valores de referencia establecidos en la normativa INVIAS vigente y la bibliografía directamente relacionada con el material de estudio.

4.1 Caracterización del agregado siderúrgico

4.1.1 Parámetros índice

Se analizó el cumplimiento de los parámetros índice de la ECSD como material para conformación de capas de estructuras pavimentos con respecto al nivel de tráfico más alto ($NT3 \geq 5.0 \cdot 10^6$ ejes equivalentes de 80 kN). Los parámetros analizados se listan a continuación:

- Desgaste en Maquina de Los Ángeles (*LA*)
- Abrasión en Aparato Micro-Deval (*MDE*)
- Límite Líquido (*LL*)
- Índice de Plasticidad (*IP*)
- Valor de Azul de Metileno (*VBS*)

La verificación de conformidad se realizó teniendo en cuenta las propiedades de los siguientes materiales.

- Subbase granular (SBG), (Artículo 320 - INVIAS, 2022)
- Subbase granular con agregado siderúrgico (SBD), (Artículo 323 – INVIAS 2022)
- Base granular (BG), (Artículo 330 – INVIAS, 2022)
- Materiales granulares tratados con cemento como capa estructural (MGTC), (Artículo 350 – INVIAS, 2022).

La **Tabla 4-1** muestra la conformidad de la ECSD para cada uno de los parámetros índice evaluados y por tanto, para los requerimientos de cada material de la norma de referencia.

Tabla 4-1. Verificación de conformidad de la ECSD con respecto a los parámetros índice de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Art. 320, Art. 323, Art. 330, Art. 350 (INVIAS, 2022).

Parámetro	ECSD	INVIAS			
		SBG (Artículo 320)	SBD (Artículo 323)	BG (Artículo 330)	MGTC (Artículo 350)
LA (%)	16.8	< 50	< 50	< 35	< 35
MDE (%)	6.2	< 30	< 30	< 25	< 25
LL (%)	-	< 25	< 25	-	< 25
IP (%)	0	< 6	< 6	0	< 6
VBS (g/ml)	0.5	NA	NA	< 10	< 10
Conformidad Global		Conforme	Conforme	Conforme	Conforme

La ECSD se clasificó en la categoría D_{21} de acuerdo con el estándar europeo UNE 16907-2 y la guía técnica “Construcción de terraplenes y explanadas” (GTR). La categoría D_{21} incluye las características que se muestran en la **Tabla 4-2**.

Tabla 4-2. Características de categoría de materiales D_{21} , de acuerdo con GTR.

Característica	Valor
% pasa tamiz No 200	$\leq 12\%$
Tamaño máximo nominal	$\leq 50\text{mm}$
% pasa tamiz No 10	$\leq 70\%$
LA	$\leq 45\%$
MDE	$\leq 45\%$

La categoría D_{21} es definida como un material que no tiene cohesión, no requiere conglomerantes para ser utilizado para explanada, presenta baja susceptibilidad al agua, reduce su potencial de erosión si es compactado y es más adecuado al tráfico cuanto mejor gradado esté (LCPC, 2003).

Los resultados de *LA* y *MDE* (parámetros de dureza), indican una respuesta apropiada del material al desgaste y a la abrasión, como agregado. El valor de *LA* de la ECSD concuerda con los resultados obtenidos, en investigaciones previas sobre escoria EAF, por Parra y

Sánchez (2010) y por Ochoa, (2019) con valores de $LA=16.0\%$ y $LA=17.8\%$, respectivamente.

Los resultados de LL , IP y VBS (parámetros de limpieza) de la ECSD constatan la inactividad o inercia del material. Los resultados de LL e IP coinciden con lo presentado por Payne (2017) y Carrillo y García, (2009) para escoria EAF como material No Líquido – No Plástico.

4.1.2 Modelación de curvas de succión

La relación de vacíos (e) de las muestras fue calculada a partir de la siguiente expresión:

$$e = (1 + w) \left[\left(\frac{G_s}{\gamma} \right) - 1 \right] \quad \text{Ecuación 4-1}$$

Donde,

γ : 2500 kg/m^3 , (obtenida de la geometría y masa húmeda inicial de la muestra)

w_0 : 5.0% , (humedad másica inicial de la muestra)

$G_s = 3.35$, (suponiendo el mismo valor de G_s para la parte fina)

Para el análisis de las curvas de succión, se calcularon las humedades volumétricas (θ) a partir de las humedades másicas (w) obtenidas (**Figura 3-16**). La humedad volumétrica está definida mediante la siguiente expresión.

$$\theta (\%) = \frac{V_w}{V_t} \quad \text{Ecuación 4-2}$$

Donde:

V_w : Volumen de agua (cm^3)

V_t : volumen total de la muestra (cm^3)

La **Figura 4-1** muestra las curvas en secado y humedecimiento del contenido volumétrico de agua en función de succión. La región entre las dos curvas es denominada histéresis de la curva de succión. Para dar límites a dicha zona, las curvas de retención de humedad fueron modeladas siguiendo el modelo Van Genuchten (1980) presentado a continuación.

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + (\alpha|\psi|)^n)^m} \quad \text{Ecuación 4-3}$$

Donde,

θ : Contenido volumétrico de agua correspondiente a una succión ψ

θ_r : Valor residual de contenido de agua

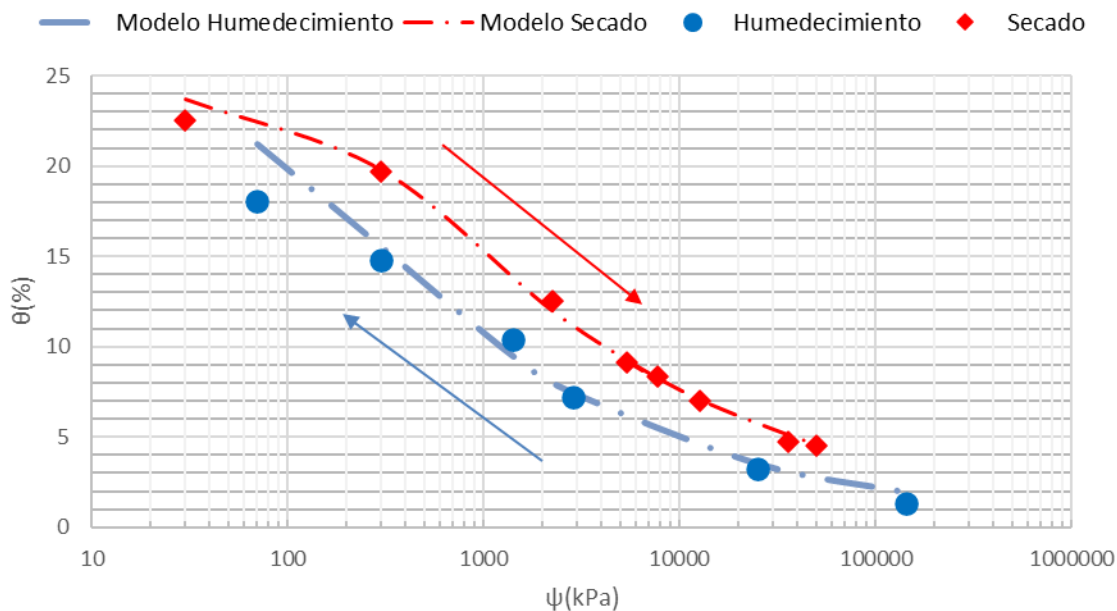
θ_s : Valor de contenido volumétrico de agua en saturación

α : Representa el inverso del valor de la succión de entrada de aire de la curva ($\alpha = \frac{1}{\psi_a}$)

n : Constante mayor a uno (1)

m : Constante $m = 1 - (1/n)$

Figura 4-1. Curvas de contenido volumétrico de agua en función de succión.



La **Tabla 4-3** muestra los parámetros obtenidos para cada uno de los casos (secado y humedecimiento) del modelo Van Genuchten (1980).

Tabla 4-3. Parámetros retenidos del modelo Van Genuchten en secado y humedecimiento.

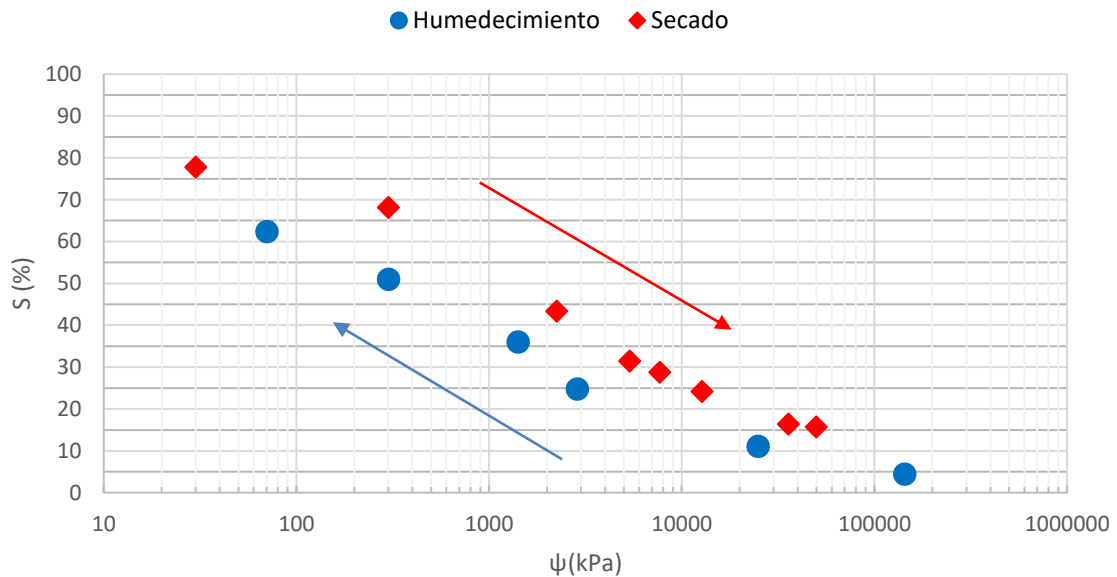
Parámetro	Unidades	Secado	Humedecimiento
θ_r	%	0.030	0.030
θ_s	%	24.000	24.000
n	-	1.311	1.350
m	-	0.200	0.300
α	-	0.004	0.010

El grado de saturación fue calculado en función del contenido volumétrico de agua (θ) y la relación de vacíos (e), a partir de la siguiente expresión.

$$S (\%) = \frac{\theta (e + 1)}{e} \quad \text{Ecuación 4-4}$$

La **Figura 4-2** presenta el grado de saturación en función de la succión. Se puede constatar que se trabajó en grados de saturación entre el $S = 80\%$ y el $S = 5\%$, garantizando un medio parcialmente saturado.

Figura 4-2. Curvas de saturación en función de succión.



4.1.3 Análisis del Coeficiente de permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad obtenido ($K = 5.69E-04 \text{ cm/s} = 5.69E-06 \text{ m/s}$), permitió clasificar la ECSD de acuerdo con dos criterios:

- Material fino con nivel de drenaje bueno, como se muestra en la **Tabla 4-4** (Angelone et al., 2006).
- Material granular fino semipermeable, como se presenta en la **Tabla 4-5** (Renard, 2002).

Tabla 4-4. Clasificación del nivel de drenaje de materiales de acuerdo con el coeficiente de permeabilidad.

K (cm/s)		100	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Drenaje		Bueno							Pobre	Prácticamente impermeable			
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada				Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición				
					Suelos "impermeables" modificados por la vegetación o la descomposición								

Fuente: (Angelone et al., 2006)

Tabla 4-5. Clasificación del nivel de permeabilidad de los materiales de acuerdo con el coeficiente de permeabilidad.

K (m/s)		10^1	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Granulometría	Homogénea	Grava pobre		Arena pobre		Arena muy fina		Limo		Arcilla				
	Variada	Grava gruesa y media	Grava y arena		Arena arcillo limosa									
Grado de permeabilidad		Muy bueno				Mala				Nula				
Tipo de material		Permeable				Semi-permeable				Imperm.				

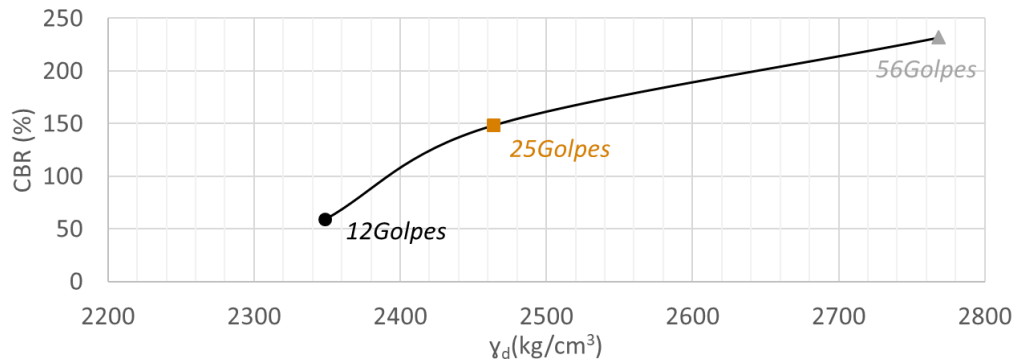
Fuente: (Renard, 2002)

El coeficiente de permeabilidad de la ECSD ($5.69E-04$ cm/s), es comparable con los resultados obtenidos por Valenzuela et al. (2007) sobre escoria de siderúrgica, donde se obtuvo un $K = 2.70 E-03$ cm/s, presentando la misma clasificación de acuerdo con su nivel de drenaje y permeabilidad.

4.1.4 CBR

En la **Figura 4-3** se evidencian los valores de CBR de la ECSD en función de la densidad seca del material compactado.

Figura 4-3. Curva de densidad seca (γ_d) – CBR de la ECSD.



Se compararon los resultados de CBR de la ECSD con los valores de referencia de los materiales mencionados en el numeral 4.1.1. La **Tabla 4-6** presenta la verificación de conformidad de la ECSD.

Tabla 4-6. Verificación de conformidad de la ECSD con respecto a los parámetros índice de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Art. 320, Art. 323, Art. 330, Art. 350 (INVIAS, 2022).

			ECSD (84% Proctor)	ECSD (88% Proctor)	ECSD (99% Proctor)
			59.2	148.5	231.9
320	Sub-base granular	>40	Conforme	Conforme	Conforme
323	Subbase granular con agregado siderúrgico	>40	Conforme	Conforme	Conforme
330	Base granular	>95	No conforme	Conforme	Conforme
350	Suelo cemento	>80	No conforme	Conforme	Conforme

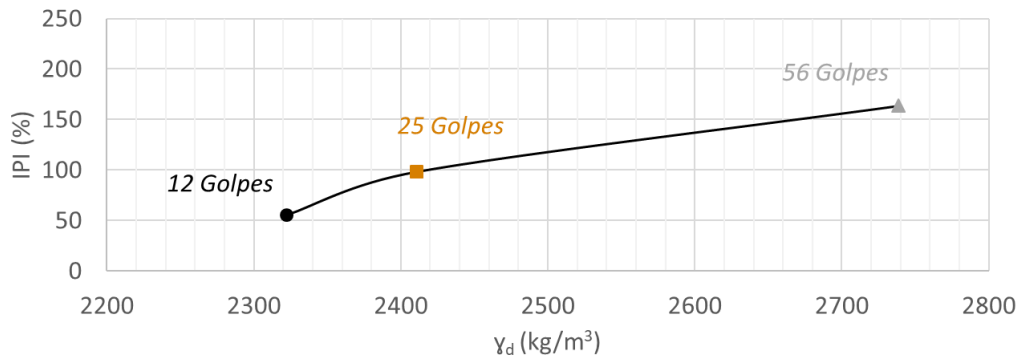
De acuerdo con los resultados presentados se identifica la importancia del nivel de compactación de la ECSD, donde, para una densidad del 84% del Proctor, el CBR no cumple con la especificación para base granular y suelo cemento.

Los resultados de CBR obtenidos, son comparables con el valor de CBR de 134% a 0.2" reportado por Valenzuela et al., 2007 con una densidad 2489 kg/cm³ sobre escoria de acería.

4.1.5 IPI

En la **Figura 4-4** se evidencia el incremento del IPI de la ECSD en función del grado de compactación (número de golpes) y, por ende, también con la densidad seca del material compactado.

Figura 4-4. Curva de densidad seca (γ_d) – IPI de la ECSD.



Teniendo en cuenta que el ensayo IPI no se encuentra normalizado en Colombia, los resultados obtenidos fueron comparados con referencias internacionales. La **Tabla 4-7** presenta la conformidad del IPI de la ECSD con el Proctor, con respecto a los valores de referencia propuestos por LCPC (2003) y NF 14227-1 (2013).

Tabla 4-7. Verificación de conformidad del IPI de la ECSD con respecto a los valores de referencia internacional.

		ECSD (83% Proctor)	ECSD (86% Proctor)	ECSD (98% Proctor)
Ref. Internacional	IPI (%)	55.3	98.1	163.1
LCPC	> 50	Conforme	Conforme	Conforme
NF 14227-1	> 40	Conforme	Conforme	Conforme

La ECSD cumple apropiadamente con los requisitos de ambas referencias internacionales. Cabe resaltar que la referencia de la NF 14227-1, 2013 corresponde a material granular tratado con cemento.

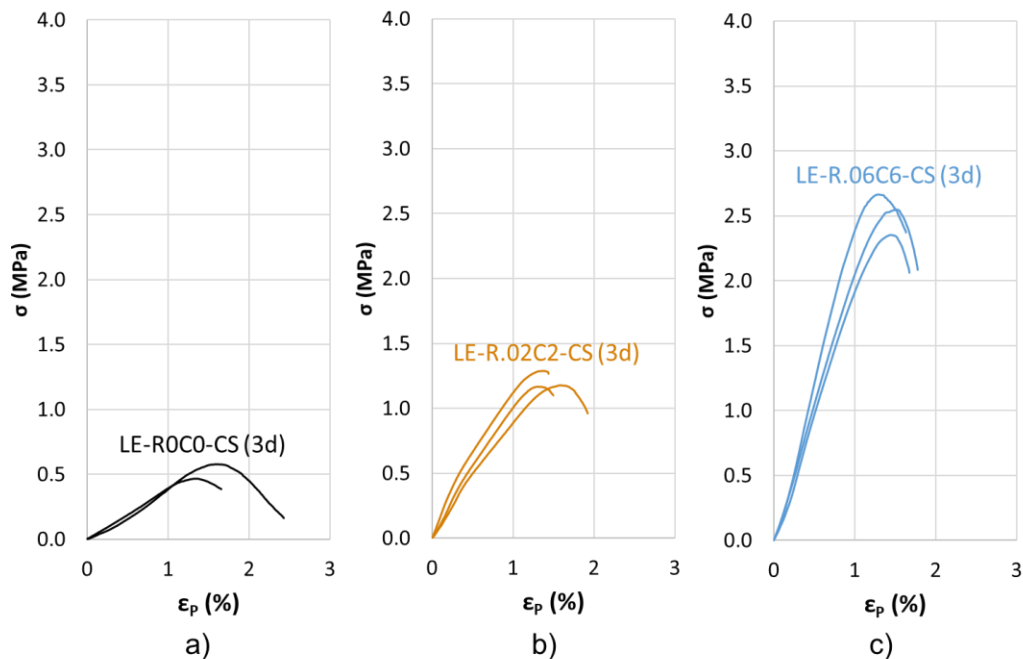
4.2 Comportamiento mecánico de las mezclas

4.2.1 Resistencia en compresión simple (R_c)

Los ensayos de compresión simple permitieron identificar la evolución de la resistencia en compresión uniaxial en condición inconfiada.

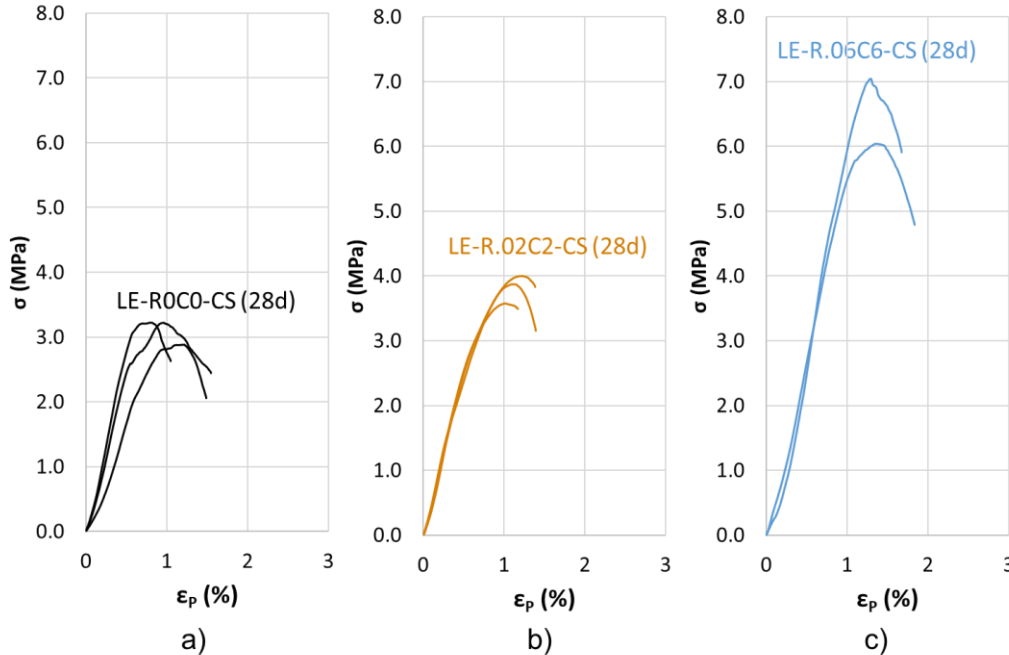
La **Figura 4-5** presenta las curvas de esfuerzo contra deformación unitaria para las muestras ensayadas con 3 días de curado. Las curvas permiten identificar un comportamiento frágil presentando el valor de la resistencia a la compresión (R_c) entre 0.52 MPa y 2.52 MPa. Estos valores se obtienen con deformaciones unitarias del pistón entre 1% y 2% (ϵ_p) en todos los casos.

Figura 4-5. Curvas de esfuerzo vs deformación unitaria ensayo CS. a) LE-R0C0-CS (3d). b) LE-R.02C2-CS (3d). c) LE-R.06C6-CS (3d).



La **Figura 4-6** presenta las curvas de esfuerzo contra deformación unitaria para las muestras ensayadas con 28 días de curado. El comportamiento obtenido también es frágil, con valores de resistencia a la compresión (R_c) entre 3.11 MPa y 6.54 MPa. Sin embargo, el valor de esfuerzo máximo, en esta edad, se presentó con una deformación unitaria del pistón (ϵ_p) entre 0.5% y 1.5 % en todos los casos.

Figura 4-6. Curvas de esfuerzo vs deformación unitaria ensayo CS. a) LE-R0C0-CS (28d). b) LE-R.02C2-CS (28d). c) LE-R.06C6-CS (28d).



La **Tabla 4-8** presenta los valores promedio utilizados para el análisis del ensayo de compresión simple en los tres (3) tipos de mezcla (LE-R0C0, LE-R.02C2 y LE-R.6C6) a las dos (2) edades de curado evaluadas (3 y 28 días).

Tabla 4-8. Valores promedio en compresión simple de mezclas ensayadas a 3 y 28 días.

	w (%)	γ_d (kg/m ³)	F_{MAX} (kN)	R_c (MPa)	σ (MPa)
LE-R0C0-CS(3d)	4.86	2455.39	0.97	0.52	0.08
LE-R.02C2-CS (3d)	5.33	2424.53	2.47	1.21	0.07
LE-R.06C6-CS-(3d)	5.18	2442.02	5.14	2.52	0.16
LE-R0C0-CS (28d)	3.78	2441.81	6.31	3.11	0.19
LE-R.02C2-CS (28d)	4.71	2465.60	7.73	3.81	0.21
LE-R.06C6-CS (28d)	3.56	2475.68	13.28	6.54	0.71

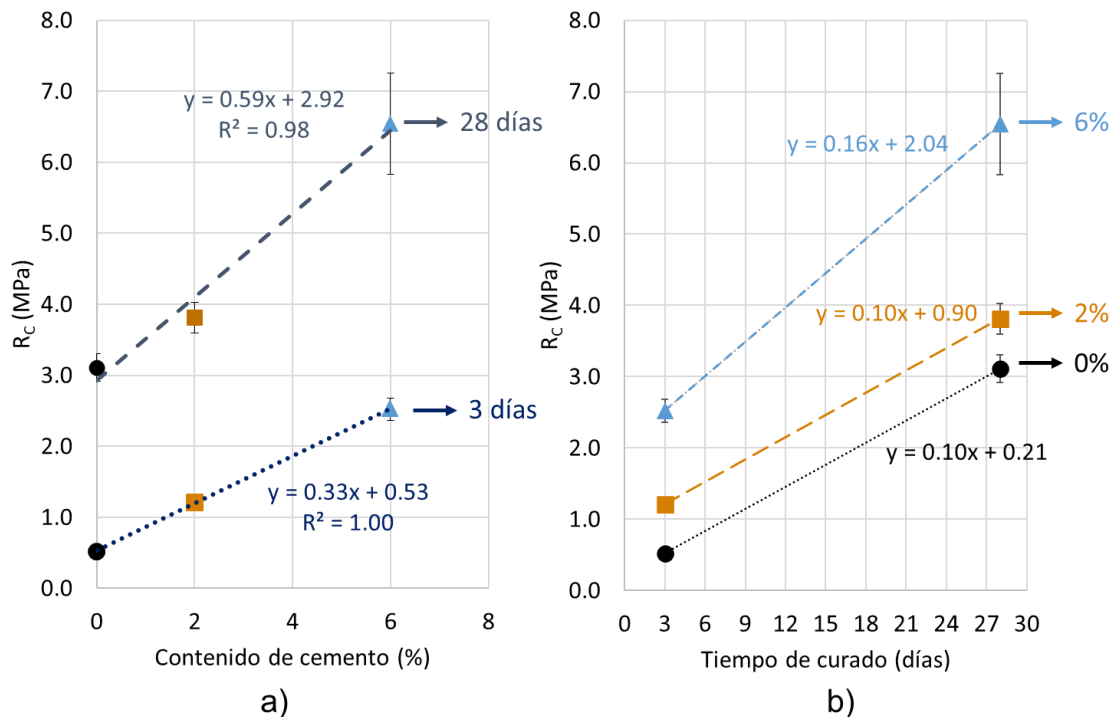
Teniendo en cuenta que la relación entre el contenido de aditivo y cemento es 1/100, la **Figura 4-7 a)** muestra el aumento de la resistencia en compresión (R_c) en función de la cantidad de cemento y aditivo:

- Muestras con 3 días de curado: se identifica un aumento de 0.33 MPa por cada 1% adicional de cemento.

- Muestras con 28 días de curado: se estableció un aumento de 0.59 MPa por cada 1% de cemento adicional.

La **Figura 4-7 b)**, presenta el aumento de R_C en función del tiempo de curado en días. Las mezclas LE-R0C0 y LE-R.02C2 identificaron un aumento de 0.10 MPa por cada día adicional de curado, mientras que, la mezcla LE-R.06C6 presentó un incremento de 0.16 MPa.

Figura 4-7. a) Aumento de R_C en función del contenido de cemento y aditivo empleado. b) Aumento de R_C en función del tiempo de curado.



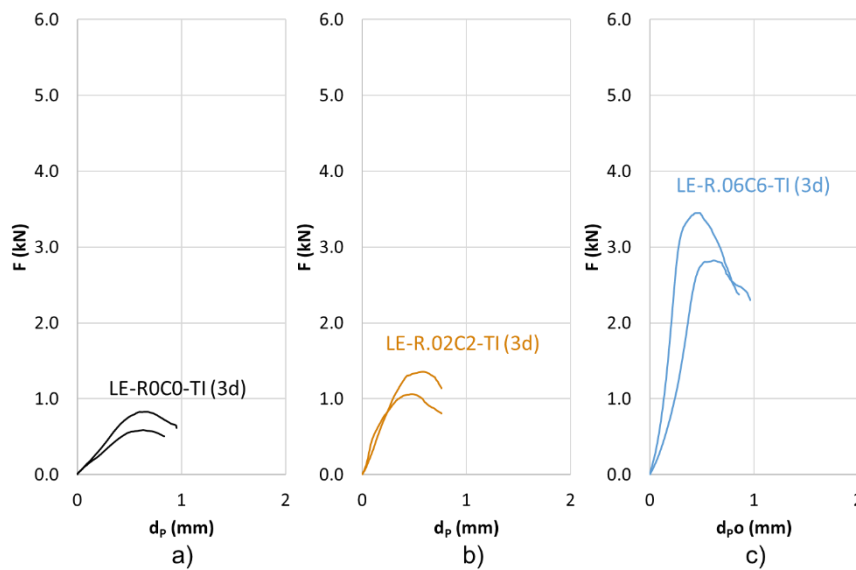
Las mezclas LE-R0C0, LE-R.02C2 y LE-R.06C6 cumplen con lo establecido en las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Art. 350 (INVIAS, 2022) para ser utilizadas como capa de rodadura con un resultado de resistencia en compresión superior a 2.5 MPa a 28 días de curado.

Los valores de R_C obtenidos para las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6 son consecuentes con los valores reportados por Pasetto y Baldo (2013) para escorias tratados con cemento, encontrándose en un rango de resistencia en compresión entre 3.84 MPa y 7.23 (Tabla 2-3).

4.2.2 Resistencia en tracción indirecta (R_{TI})

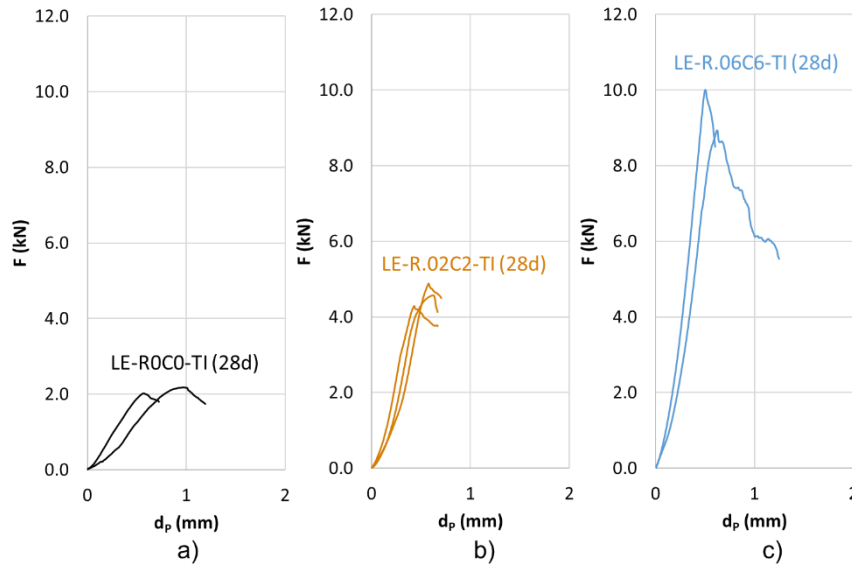
La **Figura 4-8** muestra la fuerza (F) aplicada durante el ensayo en función del desplazamiento del pistón (d_p) para las probetas ensayadas en tracción indirecta con 3 días de curado. La falla de las probetas se presentó, en todos los casos, con un desplazamiento menor a 1 mm. Los valores de fuerza máxima resistida (F_{MAX}), en este caso, variaron entre 0.71 y 3.14 kN (**Tabla 4-9**).

Figura 4-8. Curvas de fuerza vs desplazamiento ensayo TI. a) LE-R0C0-TI (3d). b) LE-R.02C2-TI (3d). c) LE-R.06C6-TI (3d).



La **Figura 4-9** presenta la fuerza (F) aplicada durante el ensayo en función del desplazamiento del pistón (d_p) para las probetas ensayadas en tracción indirecta con 28 días de curado. Igualmente, la falla se presentó con un desplazamiento menor a 1 mm. Los valores de fuerza máxima resistida (F_{MAX}), en este caso, variaron entre 2.01 y 9.47 kN (**Tabla 4-9**).

Figura 4-9. Curvas de fuerza vs desplazamiento ensayo TI. a) LE-R0C0-TI (28d). b) LE-R.02C2-TI (28d). c) LE-R.06C6-TI (28d).



La **Tabla 4-9** presenta los valores promedio utilizados para el análisis del ensayo de tracción indirecta en los tres (3) tipos de mezcla a las dos (2) edades de curado evaluadas (3 y 28 días).

Tabla 4-9. Valores promedio en tracción indirecta de mezclas ensayadas a 3 y 28 días.

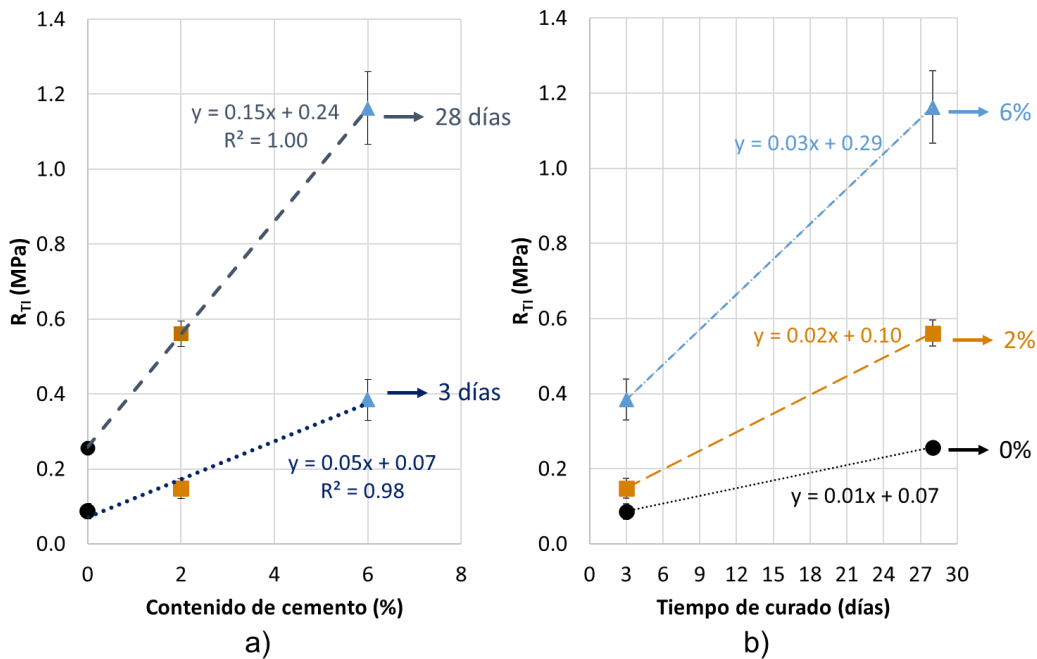
	w (%)	γ_d (kg/m ³)	F_{MAX} (kN)	R_{TI} (MPa)	σ (MPa)
LE-R0C0-TI (3d)	5.09	2416.59	0.71	0.09	0.02
LE-R.02C2-TI (3d)	4.77	2447.44	1.21	0.15	0.03
LE-R.06C6-TI (3d)	4.63	2447.37	3.14	0.38	0.05
LE-R0C0-TI (28d)	4.61	2448.77	2.10	0.26	0.01
LE-R.02C2-TI (28d)	3.84	2449.73	4.59	0.56	0.03
LE-R.06C6-TI-3 (28d)	4.21	2467.44	9.47	1.16	0.10

Teniendo en cuenta que la relación entre el contenido de aditivo y cemento es 1/100, la **Figura 4-10 a)** muestra el aumento de la resistencia en tracción indirecta (R_{TI}) en función de la cantidad de cemento y aditivo:

- Muestras con 3 días de curado: se identificó un aumento de 0.05 MPa por cada 1% adicional de cemento.
- Muestras con 28 días de curado: se estableció un aumento de 0.15 MPa por cada 1% adicional de cemento.

La **Figura 4-10 b)**, presenta el aumento de R_{TI} en función del tiempo de curado en días. La mezcla LE-R0C0 estableció un aumento de 0.01 MPa por cada día adicional de curado, mientras las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6 presentaron un aumento de 0.02 MPa y 0.03 MPa, respectivamente.

Figura 4-10. a) Aumento de R_{TI} en función del contenido de cemento y aditivo empleado. b) Aumento de R_{TI} en función del tiempo de curado.



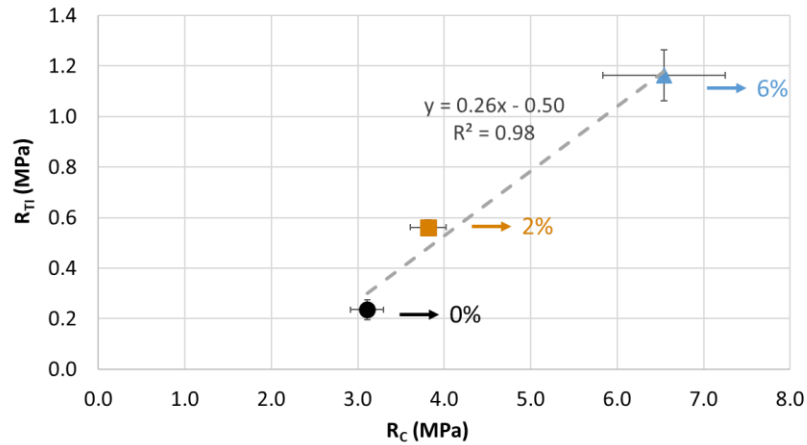
La resistencia en tracción indirecta (R_{TI}) obtenida para la mezcla LE-R.02C2 es consecuente con los valores reportados por Liu et al. (2022) para mezcla de base granular tratada con cemento y escoria siderúrgica (**Figura 2-1**) en un rango de resistencia en compresión entre 0.40 MPa y 0.70 MPa. Sin embargo, la mezcla LE-R.06C6 presentó R_{TI} por encima de lo reportado en la revisión bibliográfica.

▪ Correlación obtenida experimentalmente entre R_C y R_{TI}

La **Figura 4-11** muestra la correlación obtenida a partir de los resultados experimentales de R_C y R_{TI} con una edad de curado de 28 días de curado. Dicha correlación presenta un valor promedio de 0.26 MPa de R_{TI} por cada 1.00 MPa de R_C .

$$\Delta R_{TI} = 0.26 \Delta R_C$$

Ecuación 4-5

Figura 4-11. Correlación entre R_{TI} y R_C a 28 días de curado.

En general, el concreto y materiales tratados con cemento muestran que la resistencia a la tracción indirecta (R_{TI}) es equivalente a 10% de la resistencia en compresión (R_C) (Jourdain et al., 2018). Según los resultados obtenidos, hay un aumento de 26% de dicha equivalencia para la ECSD.

▪ **Estimación de la resistencia en tracción directa (R_T) a partir de R_{TI}**

De acuerdo con NF 14227-1 (2013), la resistencia en tracción directa (R_T) en MPa, puede obtenerse en función de la R_{TI} de acuerdo con la siguiente expresión.

$$R_T = 0.8 R_{TI} \quad \text{Ecuación 4-6}$$

La **Tabla 4-10** presenta los valores de resistencia en tracción directa (R_T) obtenidos usando la expresión anterior, para los tres (3) tipos de mezcla en las dos (2) edades de curado evaluadas.

Tabla 4-10. Valores de R_T obtenidos a partir de la resistencia en tracción indirecta (R_{TI}).

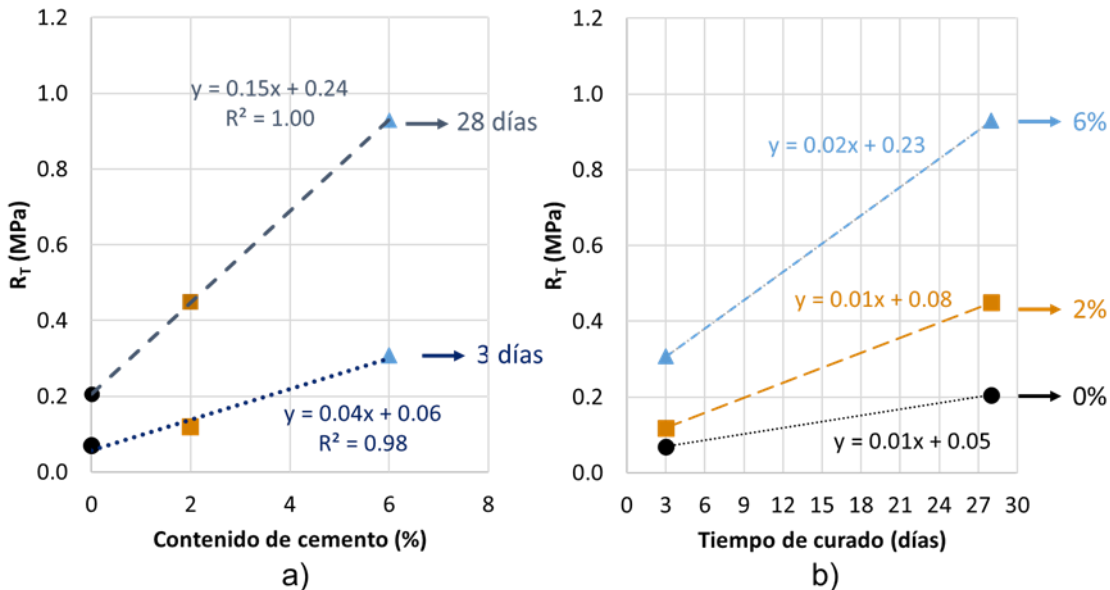
	R_{TI} (MPa)	R_T (MPa)
LE-R0C0-TI (3d)	0.09	0.07
LE-R.02C2-TI (3d)	0.15	0.12
LE-R.06C6-TI (3d)	0.38	0.31
LE-R0C0-TI (28d)	0.26	0.21
LE-R.02C2-TI (28d)	0.56	0.45
LE-R.06C6-TI-3 (28d)	1.16	0.93

De acuerdo con los valores obtenidos, se representó mediante la **Figura 4-12 a)** el aumento de la resistencia en tracción directa (R_T) en función de la cantidad de cemento y aditivo:

- Muestras con 3 días de curado: se presenta un aumento de 0.04 MPa por cada porcentaje adicional de cemento.
- Muestras con 28 días de curado: se identificó un aumento de 0.15 MPa por cada porcentaje adicional de cemento.

Además, la **Figura 4-12 b)** muestra el aumento de R_T en función del tiempo de curado en días. Las mezclas LE-R0C0 y LE-R.02C2 establecieron un aumento de 0.01 MPa por cada día adicional del curado, mientras la mezcla LE-R.06C6 presentó un aumento de 0.02MPa.

Figura 4-12. a) Aumento de R_T en función del contenido de cemento y aditivo empleado. b) Aumento de R_T en función del tiempo de curado.



La resistencia en tracción directa (R_T) obtenida para la mezcla LE-R.02C2 es consecuente con los valores reportados por Pasetto y Baldo (2013) para escorias tratados con cemento, encontrándose en un rango de resistencia en tracción entre 0.42 MPa y 0.92 MPa (**Tabla 2-3**). La mezcla LE-R.06C6 presentó R_T por encima del valor máximo reportado únicamente en 0.01 MPa.

- **Estimación de parámetros a partir de R_T**

- **Resistencia en flexión correlacionada (R_{Fcorr}):**

De acuerdo con NF 14227-1 (2013) y CFTE (2003), la resistencia en flexión (R_{Fcorr}), en MPa, puede ser estimada en función de la resistencia en tracción directa (R_T), para materiales tratados con ligante hidráulico, de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$R_{Fcorr} = 1.88 R_T \quad \text{Ecuación 4-7}$$

La **Tabla 4-11** presenta los valores de R_T y R_{Fcorr} de las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6 con 3 y 28 días de curado.

Tabla 4-11. Valores de R_T y R_{Fcorr} para las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6.

Mezcla	Tiempo de curado (días)	R_T (MPa)	R_{Fcorr} (MPa)
LE-R.02C2	3	0.12	0.22
LE-R.06C6	3	0.31	0.58
LE-R.02C2	28	0.45	0.84
LE-R.06C6	28	0.93	1.75

Estos valores son comparados con los resultados obtenidos experimentalmente en el párrafo 4.2.3 (**Figura 4-17**).

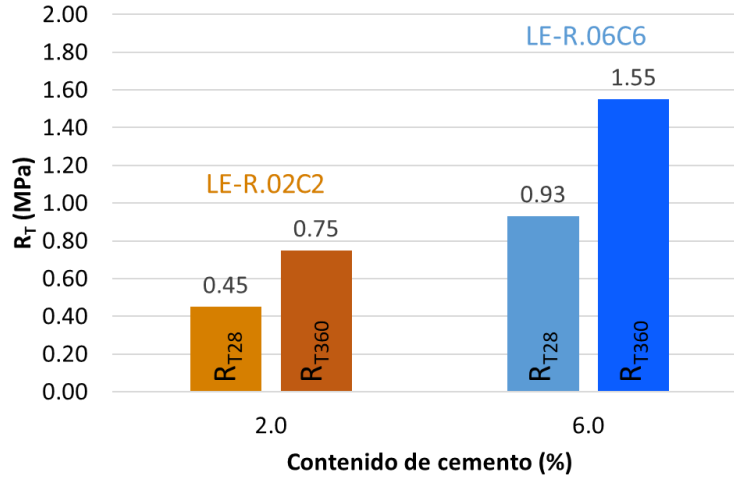
- **Resistencia en tracción directa a 360 días (R_{T360})**

De acuerdo con NF 14227-1 (2013), el valor de la resistencia en tracción directa en MPa de un espécimen curado durante 360 días (R_{T360}) puede obtenerse a partir del valor de resistencia en tracción de una muestra curada durante 28 días (R_{T28}) a partir de la siguiente ecuación.

$$R_{T360} = \frac{R_{T28}}{0.6} \quad \text{Ecuación 4-8}$$

La **Figura 4-13** muestra los valores de resistencia en tracción directa estimados a 360 días (R_{T360}) a partir de los valores de resistencia en tracción directa a 28 días (R_{T28}).

Figura 4-13. Valores de R_T de las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6 estimados a 28 y 360 días.



▪ **Módulo secante a 360 días (E_{360})**

De acuerdo con IDU y Universidad de los Andes (s.f), el valor de módulo secante a 360 días (E_{360}), en MPa, de los materiales granulares tratados con ligante hidráulico o de concretos compactados, puede estimarse a partir de la siguiente ecuación.

$$E_{360} = 12000 \frac{R_{T360}}{0.8} \quad \text{Ecuación 4-9}$$

La **Tabla 4-12** muestra los valores de R_{T360} y E_{360} calculados para las mezclas LE-R.02C2 y LER.06C6.

Tabla 4-12. Valores de R_{T360} y E_{360} para las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6.

Mezcla	R_{T360} (MPa)	E_{360} (MPa)
LE-R.02C2	0.75	11 250
LE-R.06C6	1.55	23 250

- **Esfuerzo de rotura en flexión (σ_6):** De acuerdo con IDU y Universidad de los Andes, (s.f), el valor del esfuerzo de rotura en flexión para una muestra con 360 días de curado y para un millón de ciclos (σ_6), en MPa, para materiales granulares tratados con ligante hidráulico o de concretos compactados, puede estimarse a partir de la siguiente ecuación.

$$\sigma_6 = 0.95 R_{T360} \quad \text{Ecuación 4-10}$$

La **Tabla 4-13** muestra los valores de σ_6 calculados para las mezclas LE-R.02C2 y LER.06C6.

Tabla 4-13. Valores de σ_6 para las mezclas LE-R.02-C2 y LE-R.06C6.

Mezcla	σ_6 (MPa)
LE-R.02C2	0.71
LE-R.06C6	1.47

4.2.3 Flexión en 4 puntos (F4P)

La **Figura 4-14** muestra la fuerza (F) aplicada durante el ensayo en función del desplazamiento del pistón (d_p) para las probetas ensayadas en flexión 4 puntos con 7 días de curado. La falla de las probetas se presentó, en todos los casos, con un desplazamiento menor a 1 mm. Los valores de fuerza máxima resistida (F_{MAX}), se muestran en la **Tabla 4-14**.

Por otro lado, la **Figura 4-15** presenta la fuerza (F) aplicada durante el ensayo en función del desplazamiento del pistón (d_p) para las probetas ensayadas en flexión 4 puntos con 28 días de curado. Igualmente, la falla se presentó con un desplazamiento menor a 1mm. Los valores de fuerza máxima resistida (F_{MAX}), se muestran en la **Tabla 4-14**.

Figura 4-14. Curvas de fuerza vs desplazamiento ensayo F4P. a) LE-R.02C2-F4P (7d). c) LE-R.06C6-F4P (7d).

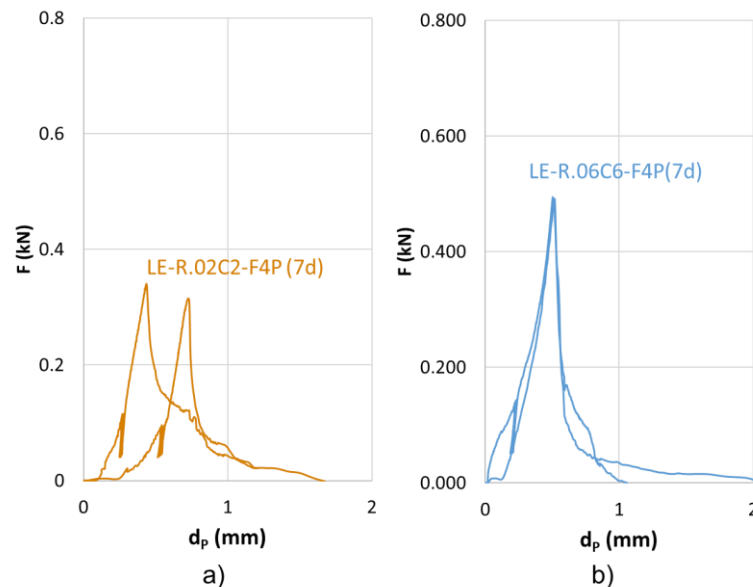
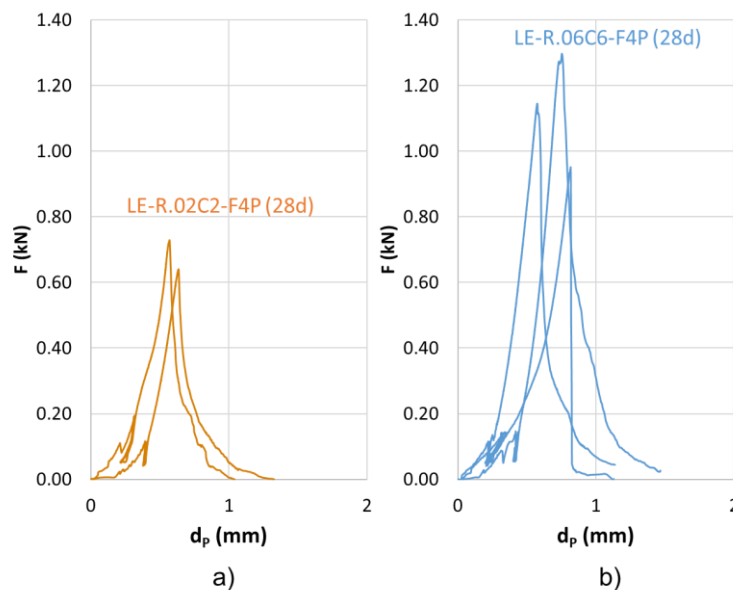


Figura 4-15. Curvas de fuerza vs desplazamiento ensayo F4P. a) LE-R.02C2-F4P (28d). b) LE-R.06C6-F4P (28d).



La **Tabla 4-14** presenta los valores promedio utilizados para el análisis del ensayo de flexión en 4 puntos en los dos (2) tipos de mezcla a las dos (2) edades de curado evaluadas (7 y 28 días).

Tabla 4-14. Valores promedio en flexión 4 puntos de mezclas ensayadas a 7 y 28 días.

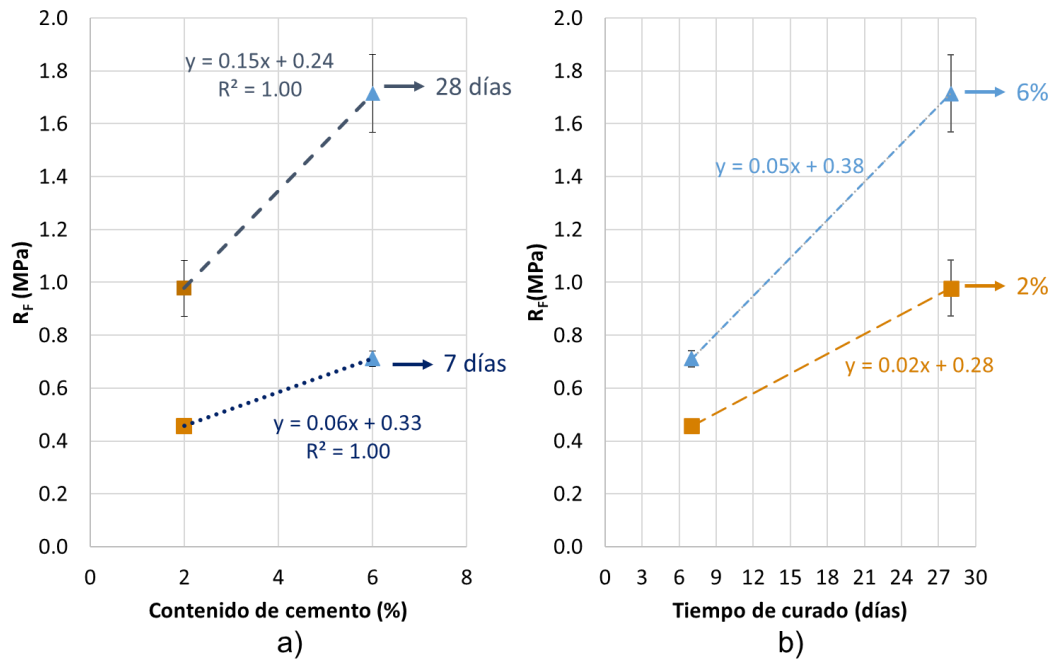
	w (%)	γ_d (kg/m ³)	F_{MAX} (kN)	R_F (MPa)	σ (MPa)
LE-R.02C2-F4P (7d)	4.55	2297.83	0.33	0.46	0.02
LE-R.06C6-F4P (7d)	4.59	2186.64	0.49	0.71	0.03
LE-R.02C2-F4P (28d)	3.67	2274.82	0.68	0.98	0.11
LE-R.06C6-F4P (28d)	4.51	2295.84	1.22	1.71	0.15

Teniendo en cuenta que la relación entre el contenido de aditivo y cemento es 1/100, la **Figura 4-16 a)** presenta el aumento de la resistencia en flexión (R_F) en función de la cantidad de cemento y aditivo.

- Muestras con 7 días de curado: se identificó un aumento de 0.06 MPa por cada 1% adicional de cemento.
- Muestras con 28 días de curado: se estableció un aumento de 0.15 MPa por cada 1% adicional de cemento.

La **Figura 4-16 b)**, muestra el aumento de R_F en función del tiempo de curado en días. La mezcla LE-R.02C2 presentó un aumento de 0.02 MPa por cada día adicional de curado, mientras la mezcla LE-R.06C6 estableció un aumento de 0.05 MPa.

Figura 4-16. a) Aumento de R_F en función del contenido de cemento y aditivo empleado. b) Aumento de R_F en función del tiempo de curado.



La resistencia en flexión (R_F) obtenida para la mezcla LE-R.02C2 es consecuente con los valores reportados por Liu et al. (2022) para mezcla de base granular tratada con cemento y escoria siderúrgica (**Figura 2-1**) en un rango de resistencia en flexión entre 0.60 MPa y 1.00 MPa. Sin embargo, la mezcla LE-R.06C6 presentó R_F por encima de lo reportado.

De manera comparativa, los resultados de resistencia en flexión (R_F), con 28 días de curado, expuestos por Toffolo et al. (2021) en la **Figura 2-4** sobre concreto compactado con rodillo y con conformación granular de escoria EAF, se encontraron 297.96% por encima de R_F de mezcla LE-R.02C2 a 28 días y 128.07% por encima de R_F de la mezcla LE-R.06C6 a la misma edad de curado.

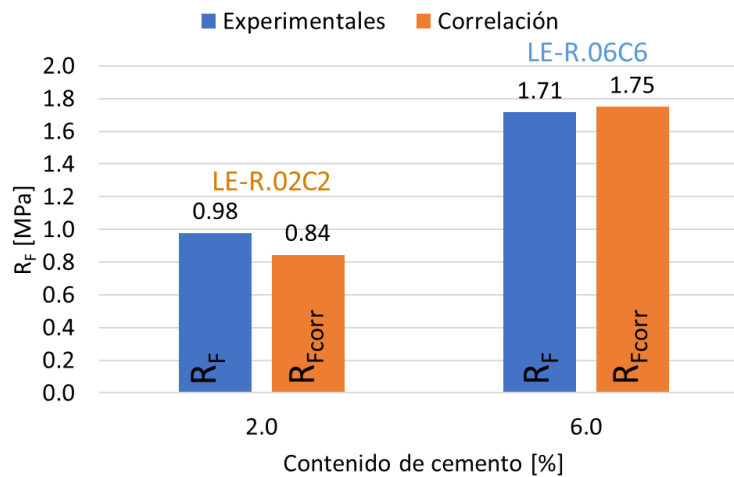
▪ Comparación R_F experimental y correlacionada

Se compararon los resultados de los ensayos de R_F obtenidos experimentalmente sobre las muestras con 28 días de curado y los valores de resistencia en flexión correlacionada (R_{Fcorr}) con la misma edad de curado presentados en la **Tabla 4-11**.

La **Figura 4-17** muestra los valores de R_F y R_{Fcorr} para las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6 para una edad de curado de 28 días. Se identificaron las siguientes variaciones:

- LE-R.02C2: Una disminución de 15.4% de R_{Fcorr} con respecto a R_F experimental.
- LE-R.06C6: Un aumento de 2.3% MPa de R_{Fcorr} con respecto a R_F experimental

Figura 4-17. Comparación de resultados R_F experimentales y por correlación.

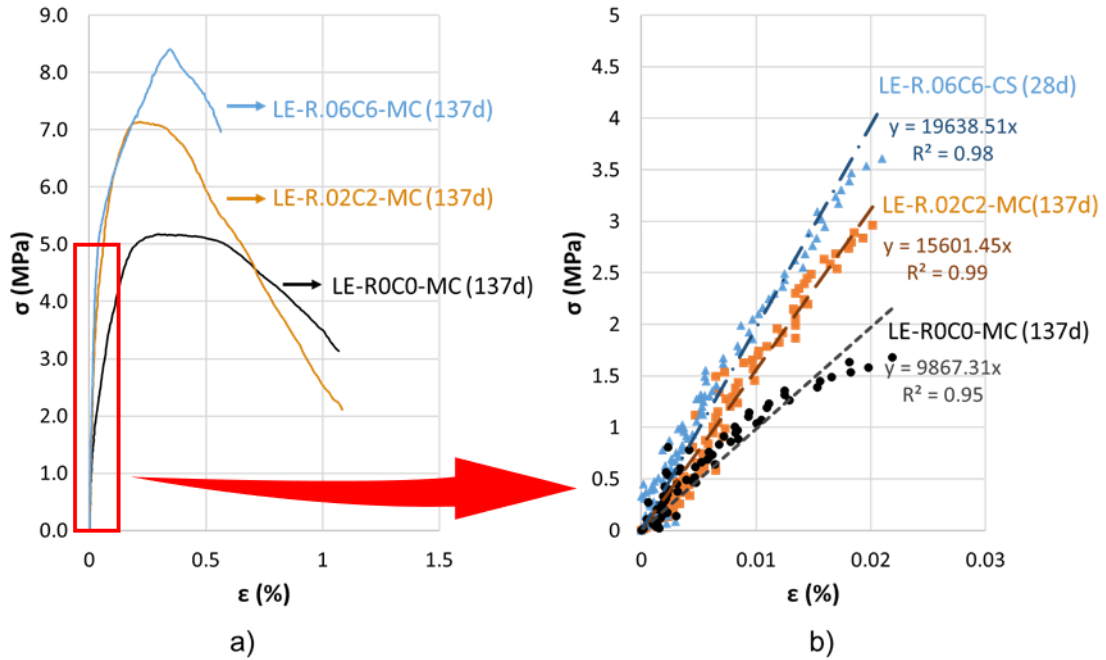


A pesar de presentarse una variación más significativa para las muestras con contenido de cemento de 2%, se considera que la correlación es acertada, sin embargo, se opta por conservar los valores obtenidos experimentalmente.

4.2.4 Módulo en compresión (E_c)

La **Figura 4-18 a)** muestra las curvas de esfuerzo contra deformación unitaria hasta la falla para las mezclas LE-R0C0, LE-R.02C2 y LE-R.06C6 ensayadas con 137 días de curado. La **Figura 4-18 b)** muestra la curva de esfuerzo contra deformación unitaria entre 0% y 0.02%, es decir, la zona elástica del material donde fue calculado el módulo en compresión (E_c).

Figura 4-18. a) Curvas de esfuerzo vs deformación unitaria en ensayo MC hasta falla. b) Curvas de esfuerzo vs deformación unitaria entre 0% a 0.02% (zona elástica).

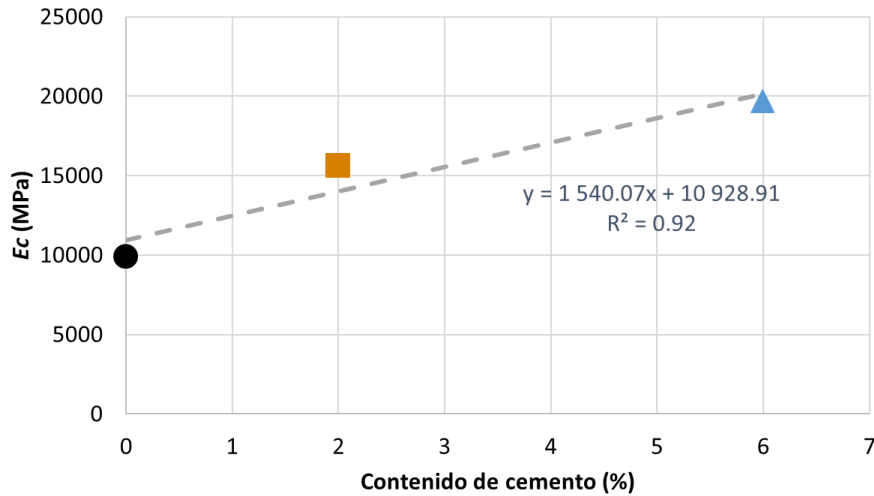


La **Tabla 4-15** muestra los valores definidos de módulo en compresión (E_c) de las mezclas LE-R0C0, LE-R.02C2 y LE-R.06C6 obtenidos para los rangos de deformación unitaria entre 0% y 0.02% con respecto al extensómetro de la muestra, es decir, en la zona elástica.

Tabla 4-15. Valores medios en módulo en compresión de mezclas ensayadas a 137 días.

	w (%)	γ_d (kg/m ³)	σ_{MAX} (Mpa)	E_c (MPa)	σ (MPa).
LE-R0C0-MC-1 (137d)	5.43	2509.67	5.18	9867.31	-
LE-R2C2-MC-1 (137d)	5.89	2453.42	7.14	15601.45	-
LE-R6C6-MC-2 (137d)	7.27	2490.11	8.41	19638.51	-

Teniendo en cuenta que la relación entre el contenido de aditivo y cemento es 1/100, la **Figura 4-19** muestra el aumento de módulo en compresión (E_c), en función de la cantidad de cemento y aditivo. Se identificó un incremento de 1540.07 MPa por cada 1% adicional de cemento.

Figura 4-19. Aumento de E_C en función del contenido de cemento y aditivo empleado.

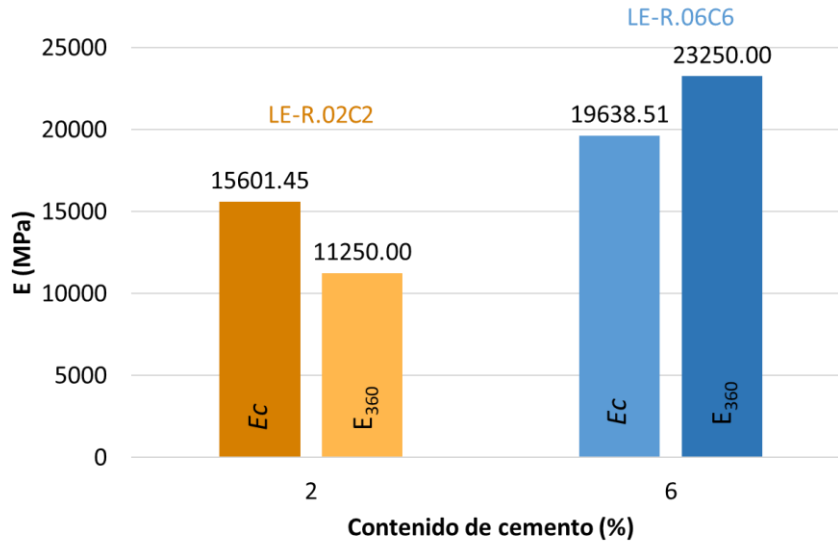
Los valores de módulo en compresión (E_C) obtenidos experimentalmente sobre las mezclas LE-R0C0, LE-R.02C2 y LE-R.06C6 fueron mayores a los valores de módulo de rigidez reportados por Pasetto y Baldo (2013), sobre materiales ligados con cemento y contenido de escorias tipo EAF y LF (**Tabla 2-3**), los cuales presentaron valores entre 1712 MPa y 1982 MPa.

Adicionalmente, los valores de E_C se encontraron por encima de los valores de módulo en compresión presentados por Liu et al. (2020), sobre base granular tratada con cemento y escoria siderúrgica a 28 días de curado (**Figura 2-1**), en donde se reportó un valor máximo de módulo de 4400 MPa en la mezcla con 50% de contenido de escoria de siderúrgica y 4% de cemento.

Sin embargo, en comparación con los resultados de módulo estático con 28 días de curado expuestos por Toffolo et al. (2021) en la **Figura 2-3** sobre concreto compactado con rodillo, la conformación granular de escoria EAF fue 2.4 veces mayor que el E_C de mezcla LE-R.02C2 y 1.9 veces mayor que el E_C de la mezcla LE.R.06C6.

▪ Comparación entre E_C y E_{360}

Se compararon los valores de módulo en compresión (E_C), obtenidos experimentalmente y de módulo secante a 360 días (E_{360}) obtenidos por correlación. La **Figura 4-20** muestra los valores de E_C y E_{360} para las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6.

Figura 4-20. Comparación de resultados E_c y E_{360} .

Según los resultados presentados en la **Figura 4-20** se identificó:

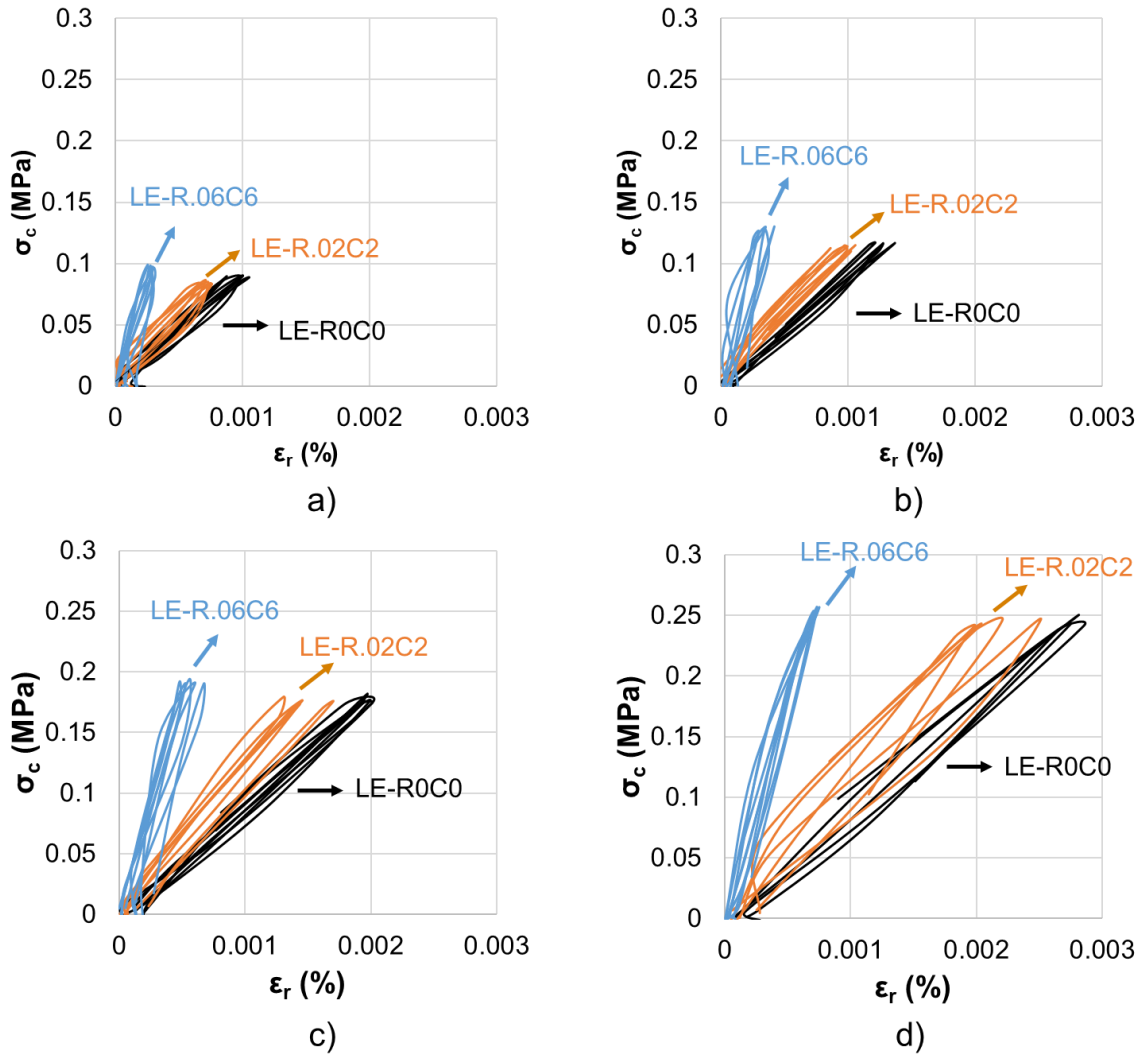
- LE-R.02C2 una disminución de 4351.45 MPa del módulo secante obtenido por correlación con respecto al módulo en compresión.
- LE-R.06C6 un aumento de 3611.49 MPa del módulo secante obtenido por correlación con respecto al módulo en compresión.

4.2.5 Módulo resiliente (E_r)

Teniendo en cuenta la magnitud de esfuerzo cíclico aplicado, la deformación unitaria como respuesta del material y la desviación estándar con relación a las secuencias con esfuerzos cíclicos semejantes, fueron analizadas únicamente las secuencias 13, 8, 9 y 15 de cada mezcla las cuales corresponden a esfuerzos cíclicos axiales aproximadamente de 0.09, 0.12, 0.18 y 0.24, respectivamente.

Las curvas de esfuerzo cíclico contra deformación unitaria resiliente en las secuencias 13, 8, 9 y 15 para las mezclas LE-R0C0, LE-R.02C2 y LE-R.06C6, se presentan en la **Figura 4-21 a), b), c) y d)**, respectivamente.

Figura 4-21. Curvas de esfuerzo cíclico vs deformación unitaria sobre las mezclas LE-R0C0, LE-R.02C2 y LE-R.06C6. a) Secuencia 13. b) Secuencia 8. c) Secuencia 9. d) Secuencia 15.



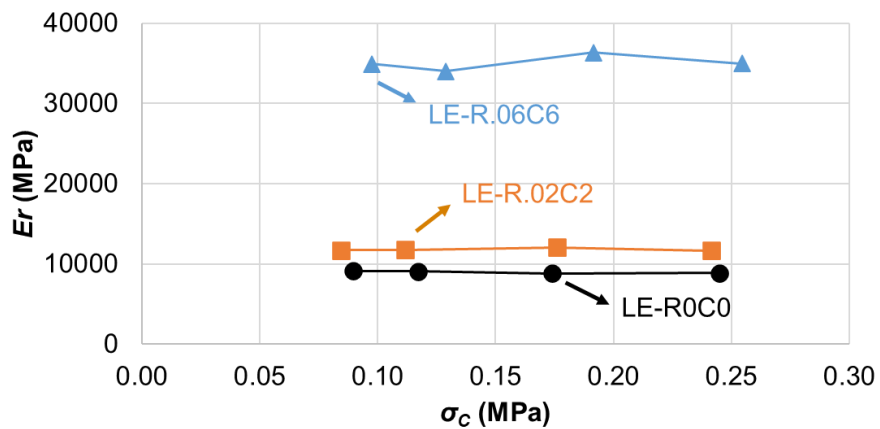
La **Figura 4-21** permite identificar el aumento de la pendiente, es decir, del módulo resiliente conforme aumenta la cantidad de contenido de cemento y aditivo en las mezclas. Adicionalmente, la **Tabla 4-16** presenta el resumen de resultados del ensayo de módulo resiliente obtenidos para las secuencias 13, 8, 9 y 15 para las mezclas LE-R0C0, LE-R.02C2 y LE-R.06C6.

Tabla 4-16. Resumen de resultados de módulo resiliente para las secuencias 13, 8, 9 y 15 en las mezclas LE-R0C0, LE-R.02C2 y LE-R.06C6.

	Secuencia	(σ_c)	(ϵ_r)	(E_r)	σ (MPa)
		(MPa)	(mm/mm)	(MPa)	
LE-R0C0	13	0.09	0.76	9151.53	149.40
	8	0.12	1.60	9095.54	
	9	0.17	2.94	8847.63	
	15	0.24	4.56	8891.82	
LE-R.02C2	13	0.08	1.22	11714.17	193.58
	8	0.11	3.05	11771.96	
	9	0.18	2.48	12087.64	
	15	0.24	5.85	11652.68	
LE-R.06C6	13	0.10	1.14	34915.82	947.26
	8	0.13	1.69	34034.80	
	9	0.19	1.69	36328.31	
	15	0.25	1.95	34952.69	

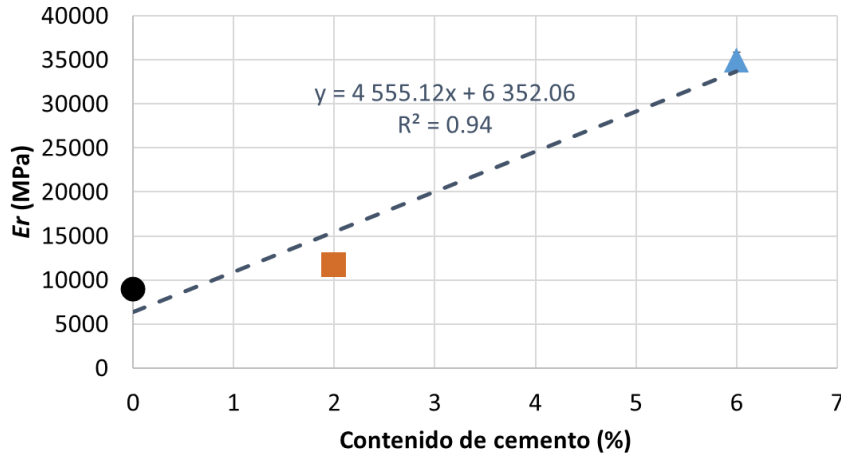
La mezcla LE-R.06C6 presentó la mayor desviación estándar de los módulos resilientes obtenidos (947.26). La **Figura 4-22** presenta los valores de módulo resiliente en función del esfuerzo cíclico aplicado para las tres (3) mezclas evaluadas. De manera independiente en cada mezcla, no se evidencia una tendencia a aumento o decrecimiento del E_r en función del σ_c . Adicionalmente, se recalca el valor de E_r de la mezcla LE-R.06C6, siendo casi 3 veces mayor con respecto a las mezclas LE-R.02C2 y LE-R0C0.

Figura 4-22. Módulo resiliente (E_r) en función del esfuerzo cíclico aplicado (σ_c) para las mezclas LE-R0C0, LE-R.02C2 y LE-R..06C6.



Teniendo en cuenta que la relación entre aditivo y cemento es 1/100, la **Figura 4-23** muestra la variación del módulo resiliente (E_r), obtenido con el mayor esfuerzo cíclico aplicado (secuencia 15), en función de la cantidad de cemento y aditivo. Se identificó un incremento de 4555.12 MPa por cada 1% adicional de cemento.

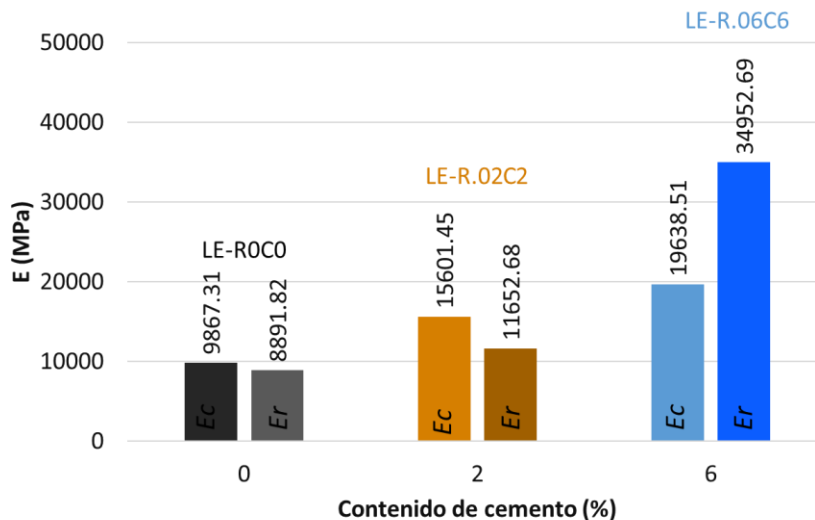
Figura 4-23. Aumento de E_r en función del contenido de cemento y aditivo empleado.



▪ Comparación de E_r y E_c

Se compararon los valores de módulo resiliente (E_r) y módulo en compresión (E_c). La **Figura 4-24** muestra los valores de E_r , E_c para las mezclas LE-R0C0, LE-R.02C2 y LE-R.06C6 obtenidos experimentalmente.

Figura 4-24. Comparación de resultados E_r y E_c .



Según los resultados presentados en la **Figura 4-24** se identificó:

- LE-R0C0 una disminución de 975.46 MPa del módulo resiliente con respecto al módulo en compresión.
- LE-R.02C2 una disminución de 3948.77 MPa del módulo resiliente con respecto al módulo en compresión.
- LE-R.06C6 un aumento de 15314.18 MPa del módulo resiliente con respecto al módulo en compresión.

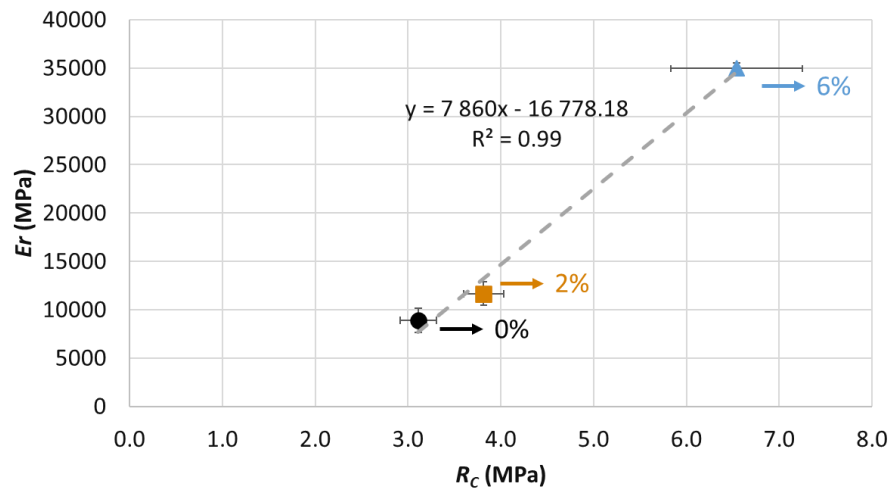
• Correlación obtenida experimentalmente entre E_r y R_c

La **Figura 4-25** muestra la correlación obtenida a partir de los resultados experimentales de E_r y R_c . Dicha correlación presenta un valor promedio de 7860 MPa de E_r por cada 1.00 MPa de R_c .

$$\Delta E_r = 7860 \Delta R_c$$

Ecuación 4-11

Figura 4-25. Correlación entre E_r y R_c .

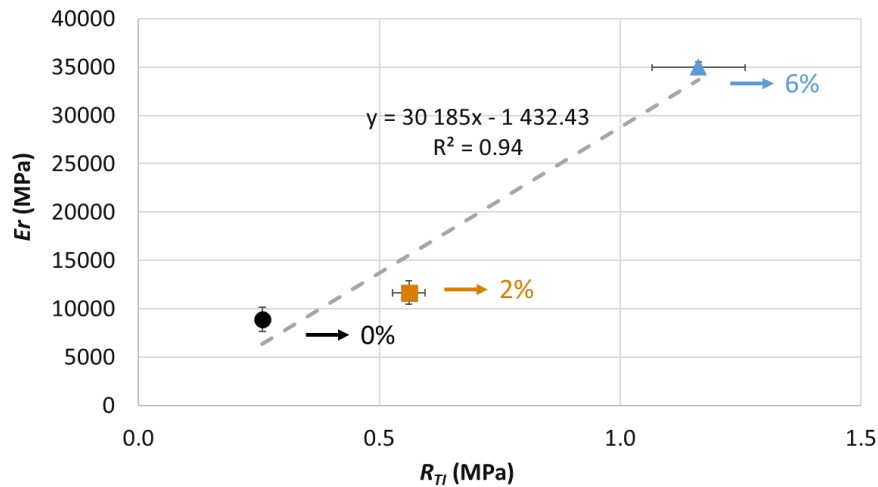


▪ Correlación obtenida experimentalmente entre E_r y R_{TI}

La **Figura 4-26** muestra la correlación obtenida a partir de los resultados experimentales de E_r y R_{TI} . Dicha correlación presenta un valor promedio de 30185 MPa de E_r por cada 1.00 MPa de R_{TI} .

$$\Delta E_r = 30185 \Delta R_{TI}$$

Ecuación 4-12

Figura 4-26. Correlación entre E_r y R_{Tl} .

4.3 Clasificación de mezclas

4.3.1 Respecto a la compresión simple

Teniendo en cuenta el estándar Europeo de materiales granulares tratados con cemento hidráulico (NF 14227-1, 2013) y los valores de R_C a 28 días de curado, presentados en la **Tabla 4-8**, las mezclas evaluadas se clasifican así:

- Mezcla con 2% de cemento (LE-R.02C2): Clase $C_{4/5}$,
- Mezcla con 6% de cemento (LE-R.06C6): Clase $C_{5/6}$

La **Tabla 4-17** presenta las distintas clases definidas por NF 14227-1 (2013), según los valores de R_C en muestras cilíndricas y cúbicas.

Tabla 4-17. Clasificación de materiales de acuerdo con la resistencia en compresión (R_c)

R_c mínima para cilindros relación de esbeltez 2 (MPa)	R_c mínima para cilindros y cubos con relación de esbeltez 1 (MPa)	Clase R_c
0.4	0.5	$C_{0.4/0.5}$
0.8	1	$C_{0.8/1}$
1.5	2	$C_{1.5/2}$
2.3	3	$C_{2.3/3}$
3	4	$C_{3/4}$
4	5	$C_{4/5}$
5	6	$C_{5/6}$
6	8	$C_{6/8}$
8	10	$C_{8/10}$
9	12	$C_{9/12}$
12	16	$C_{12/16}$
15	20	$C_{15/20}$
18	24	$C_{18/24}$
21	28	$C_{21/28}$
24	32	$C_{24/32}$
27	36	$C_{27/36}$
30	40	$C_{30/40}$
33	44	$C_{33/44}$
36	48	$C_{36/48}$
Valor declarado	Valor declarado	C_{DV}

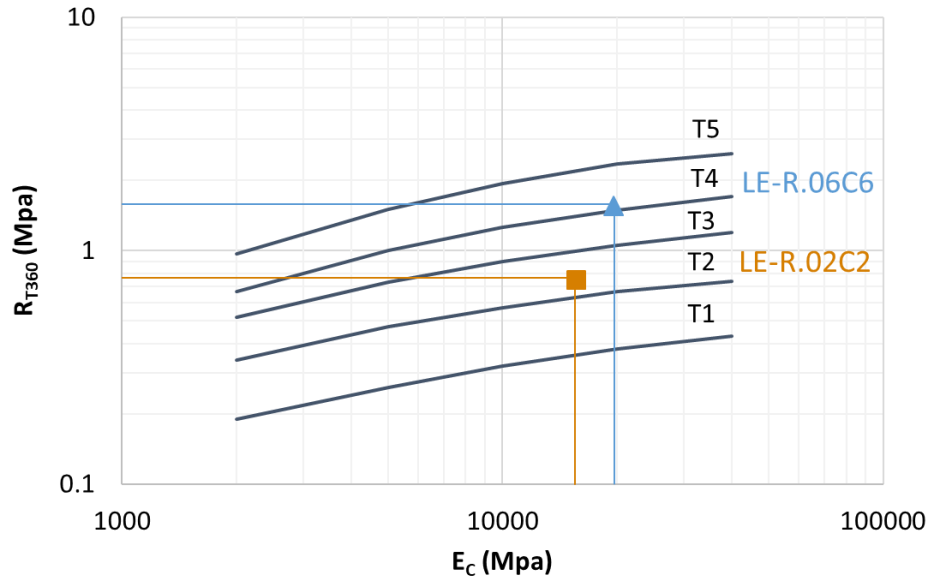
Fuente: (NF 14227-1, 2013)

4.3.2 Respecto a la resistencia a la tracción y módulo en compresión

A partir de los valores de módulo en compresión presentados en la **Tabla 4-15** y de resistencia en tracción directa a 360 días presentado en la **Figura 4-13**, se clasificaron las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6 de acuerdo con NF 14227-1 (2013) como se muestra en la **Figura 4-27**.

- La mezcla LE-R.02C2 se clasificó en el intervalo T2, correspondiente al comportamiento de una arena con cemento.
- La mezcla LE-R.06C6 se clasificó en el intervalo T4, correspondiente al comportamiento de una grava con cemento.

Figura 4-27. Clasificación de las mezclas diseñadas en función de E_c y R_{T360} de acuerdo con NF 14227-1 (2013).



Fuente: (NF 14227-1, 2013)

4.3.3 Respecto a la resistencia a la fractura y módulo en compresión

A partir de la **Ecuación 1.13**, la **Ecuación 1.14** y los ensayos de flexión en 4 puntos se determinó la resistencia a la fractura. La **Tabla 4-18** presenta los valores de resistencia a la fractura obtenidas a partir de la **Ecuación 1-13** y la **Ecuación 1-14** para las probetas ensayadas en flexión 4 puntos con 28 días de curado de acuerdo con el **Título 4.2.3** y los valores de módulo en compresión para cada tipo de mezcla definidos en el **Título 4.2.4**.

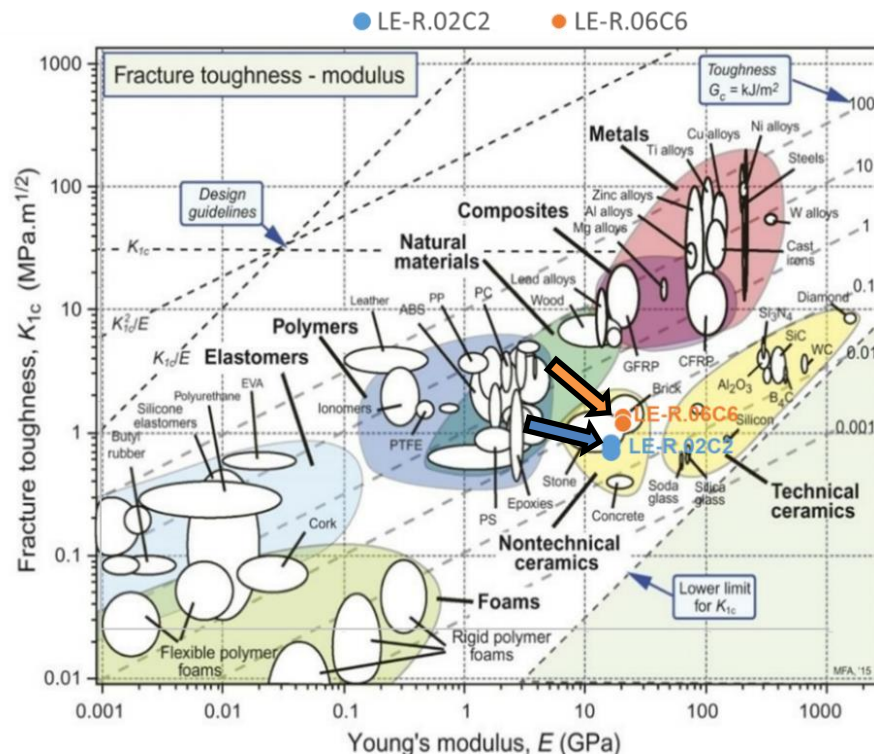
La **Figura 4-28** muestra la clasificación de las mezclas LE-R.02C2 y LE.R.06C6 de acuerdo con la resistencia a la fractura y el módulo elástico de las mismas en el diagrama presentado por Rasheed y Fawad (2016).

Tabla 4-18. Valores de cálculo para resistencia a la fractura y módulo em compresión de probetas ensayadas en flexión 4 puntos.

	F_{max} (N)	L (m)	I (m)	B (m)	W (m)	x (m)	γ	K_{Ic} (MPa m ^{1/2})	E_c (Gpa)
LE-R.02C2-F4P-1 (28d)	729.09	0.14	0.05	0.04	0.05	0.50	2.66	0.43	15.60
LE-R.02C2-F4P-3 (28d)	640.66	0.14	0.05	0.05	0.05	0.50	2.66	0.36	15.60
LE-R.06C6-F4P-1 (28d)	1298.06	0.14	0.05	0.05	0.05	0.50	2.66	0.73	19.64
LE-R.06C6-F4P-3 (28d)	1144.23	0.14	0.05	0.05	0.05	0.50	2.66	0.65	19.64

Teniendo el diagrama de resistencia a la fractura (K_{Ic}) en función del módulo de rigidez (E_c) las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6 se ubican en una zona cercana al comportamiento del concreto.

Figura 4-28. Clasificación de las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6 de acuerdo con la resistencia a la fractura (K_{Ic}) en función del módulo de rigidez (E_c).



Fuente: (Rasheed & Fawad, 2016)

5. Modelación de estructuras de pavimento

Siguiendo la metodología mecanicista del Manual de Diseño de Pavimentos para Bogotá D.C, presentado por IDU y Universidad de los Andes (s.f), y haciendo uso del software ALIZE, se desarrolló la modelación de posibles estructuras de pavimento que incorporan las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6 como materiales de conformación de capas de cuerpo.

La modelación comprende la definición del tráfico, materiales, estructuras, y parámetros mecanicistas de verificación.

5.1 Tráfico

El tráfico equivalente utilizado corresponde al número equivalente de ejes de referencia o número de vehículos pesados acumulados, multiplicado por el Coeficiente de Agresividad Media del tráfico (CAM) para cada material de la estructura de pavimento. El eje de referencia es un eje con carga de 130kN de ruedas gemelas con radio 12.5 cm².

Se utilizaron las 5 clases de tráfico presentadas en el Manual de Diseño de Pavimentos para Bogotá D.C, presentado por IDU y Universidad de los Andes (s.f), para la modelación de estructuras. La **Tabla 5-1** relaciona la clase de tráfico con el número acumulado de vehículos pesados y su equivalencia en número de vehículo pesados por día promedio.

Tabla 5-1. Clases de tráfico de acuerdo con el número acumulado de vehículos pesados y número de vehículo pesados por día promedio.

Clase de tráfico	Número acumulado de vehículos pesados (N)	Número de vehículos pesados por día promedio (VP)
T1	$N \leq 5.0 \cdot 10^5$	$VP/día \leq 50$
T2	$5.0 \cdot 10^5 < N \leq 1.5 \cdot 10^6$	$50 < VP/día \leq 150$
T3	$1.5 \cdot 10^6 < N \leq 4.0 \cdot 10^6$	$150 < VP/día \leq 300$
T4	$4.0 \cdot 10^6 < N \leq 1.0 \cdot 10^7$	$300 < VP/día \leq 750$
T5	$1.0 \cdot 10^7 < N \leq 2.0 \cdot 10^7$	$750 < VP/día \leq 2000$

Fuente: (IDU & Universidad de los Andes, s.f)

5.2 Materiales utilizados para modelación

5.2.1 Plataforma (subrasante)

Se utilizaron cuatro (4) tipos de plataforma o subrasante (PF1, PF2, PF3 y PF4). La **Tabla 5-2** muestra las propiedades utilizadas para la modelación de cada tipo de plataforma.

Tabla 5-2. Propiedades de plataformas utilizadas para modelación.

Característica	Notación	PF1	PF2	PF3	PF4
Módulo (MPa)	E (MPa)	20	50	120	200
Coeficiente de Poisson	ν	0.35	0.35	0.35	0.35
Coeficiente de Agresividad Media	(CAM)	1.0	1.0	1.0	1.0

5.2.2 Capas de base tratadas con cemento (capas de cuerpo)

Se utilizaron las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6 como capas cuerpo. La **Tabla 5-3** muestra las propiedades de las mezclas utilizadas para la modelación.

Tabla 5-3. Propiedades de capas de cuerpo utilizadas para modelación.

Característica	Notación	LE-R.02C2	LE-R.06C6
Módulo (MPa)	E (MPa)	11652.68	3495.59
Coeficiente de Poisson	ν	0.25	0.25
Esf. Max. 1 millón de ciclos (MPa)	σ_6	0.71	1.47
Pendiente de fatiga	-1/b	10	16
Dispersión ensayo de fatiga	SN	0.8	1
Dispersión espesor de capa	Sh (m)	0.025	0.03
Coef. calibración Lab - In situ	Kc	1.5	1.5
Coef. reducción por fisuración	Kd	1	0.8
Coeficiente de Agresividad Media	CAM	1.3	1.3

5.2.3 Capa de rodadura

Se utilizó una mezcla asfáltica tipo *Béton Bitumineux (BB)* de acuerdo con la librería de materiales normalizados en el software ALIZE, correspondiente a una mezcla convencional. La **Tabla 5-4** muestra las propiedades de la mezcla asfáltica utilizadas para la modelación.

Tabla 5-4. Propiedades de mezcla asfáltica utilizada para la modelación.

Característica	Notación	BB
Módulo a 10 Hz y 15°C (MPa)	E (MPa)	5400
Coeficiente de Poisson	ν	0.35
Deformación a 1 millón de ciclos	ϵ_6	100
Pendiente de fatiga	-1/b	5
Dispersión ensayo de fatiga	SN	0.25
Dispersión espesor de capa	Sh (m)	0.025
Coef. calibración Lab - In situ	Kc	1.5
Coeficiente de Agresividad Media	CAM	1.0

5.3 Tipos de estructuras para modelación

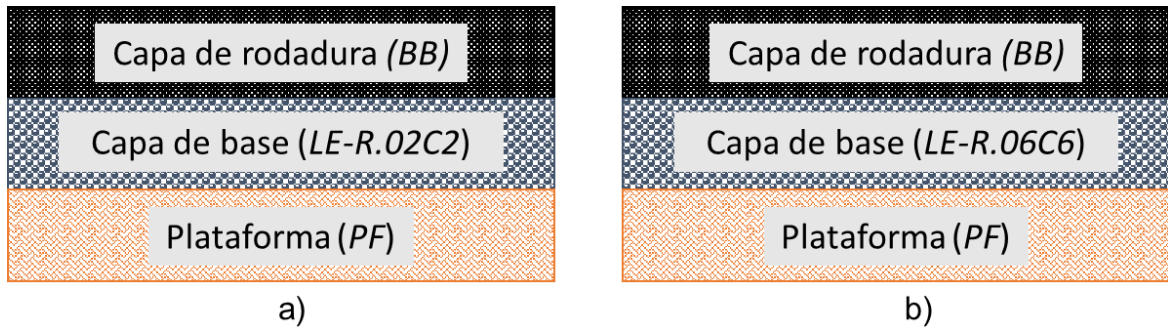
Se definieron dos (2) tipos de estructuras semirrígida para el cálculo y verificación de valores de parámetros mecanicistas.

- Estructura tipo 1 (ET1): Incluye una capa de rodadura (*BB*) con espesor fijo de 10 cm y capa de base compuesta por la mezcla LE-R.02C2.

- Estructura tipo 2 (ET2): Incluye una capa de rodadura (*BB*) con espesor fijo de 10 cm y capa de base compuesta por la mezcla LE-R.06C6.

La **Figura 5-1 a)** muestra el esquema general de la estructura tipo 1 (ET1), mientras la **Figura 5-1 b)** presenta el esquema general de la estructura tipo 2 (ET2).

Figura 5-1.a) Esquema general de estructura tipo 1 (ET1). **b)** Esquema general de estructura tipo 2 (ET2).

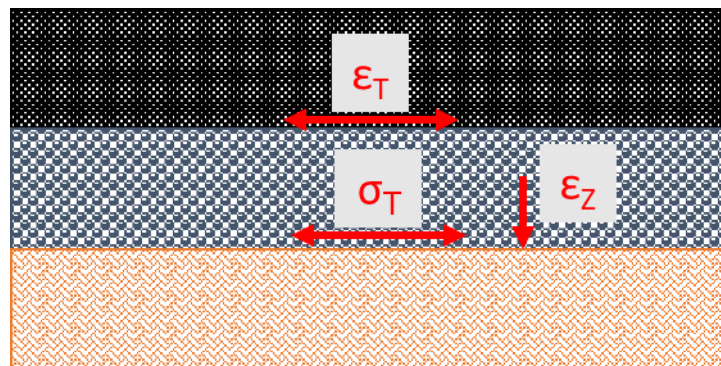


5.4 Parámetros mecanicistas

Los parámetros mecanicistas evaluados se ilustran en la **Figura 5-2** y se listan a continuación.

- Deformación en tracción en la base de la capa de rodadura (ϵ_T).
- Esfuerzo en tracción en la parte inferior de la capa de base tratada con cemento (σ_T).
- Deformación axial en la superficie de la plataforma o subrasante (ϵ_Z).

Figura 5-2. Esquema de parámetros mecanicistas de verificación.



5.4.1 Valores admisibles

▪ Estructura tipo 1 (ET1)

La **Tabla 5-5** muestra los valores admisibles de los parámetros mecanicistas calculados para las diferentes clases de tráfico y tipos de plataforma en la estructura tipo 1 (ET1).

Tabla 5-5. Valores admisibles de parámetros mecanicistas para estructura tipo 1 (ET1).

		PF1	PF2	PF3	PF4
T1	ε_T (μdef)	168.9	168.9	168.9	168.9
	σ_T (MPa)	0.801	0.873	0.873	0.961
	ε_Z (μdef)	868.9	868.9	868.9	868.9
T2	ε_T (μdef)	129.9	129.9	129.9	129.9
	σ_T (MPa)	0.692	0.754	0.754	0.83
	ε_Z (μdef)	680.8	680.8	680.8	680.8
T3	ε_T (μdef)	101.9	101.9	101.9	101.9
	σ_T (MPa)	0.601	0.655	0.655	0.721
	ε_Z (μdef)	410.7	410.7	410.7	410.7
T4	ε_T (μdef)	76.9	76.9	76.9	76.9
	σ_T (MPa)	0.52	0.567	0.567	0.624
	ε_Z (μdef)	335.1	335.1	335.1	335.1
T5	ε_T (μdef)	63.0	63.0	63.0	63.0
	σ_T (MPa)	0.449	0.489	0.489	0.449
	ε_Z (μdef)	287.3	287.3	287.3	287.3

▪ Estructura tipo 2 (ET2)

La **Tabla 5-6** muestra los valores admisibles de los parámetros mecanicistas calculados para las diferentes clases de tráfico y tipos de plataforma en la estructura tipo 2 (ET2).

Tabla 5-6. Valores admisibles de parámetros mecanicistas para estructura tipo 2 (ET2).

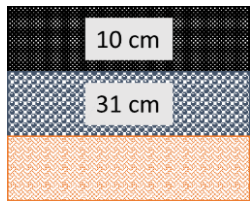
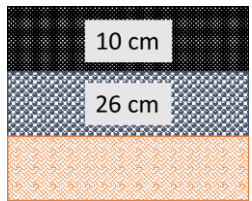
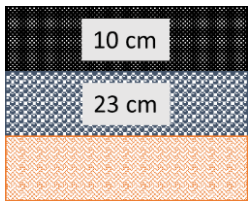
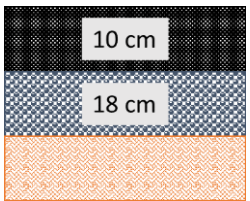
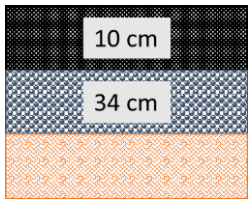
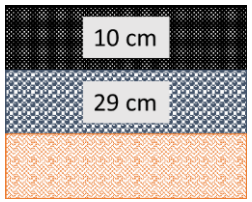
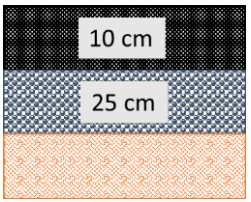
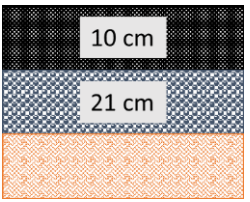
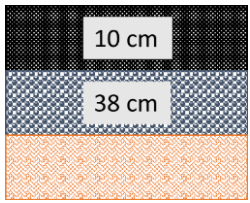
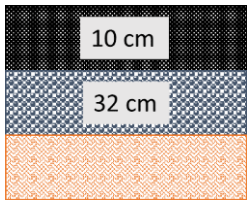
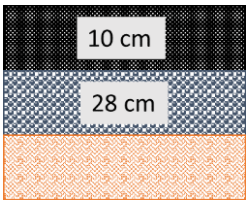
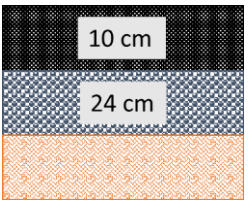
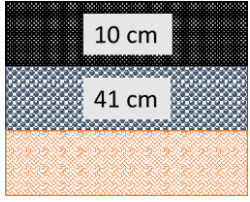
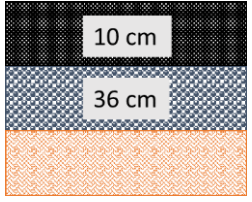
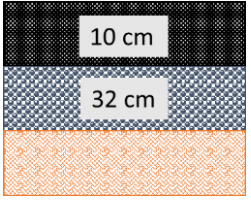
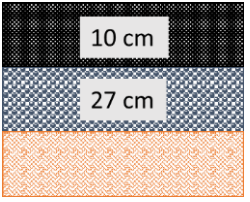
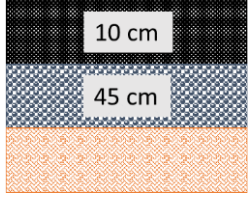
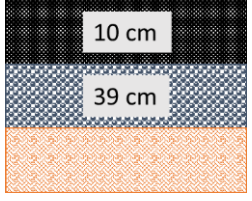
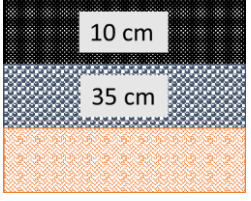
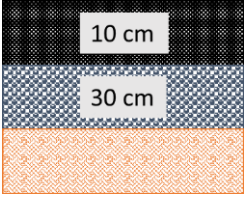
		PF1	PF2	PF3	PF4
T1	ε_T (μdef)	168.9	168.9	168.9	168.9
	σ_T (MPa)	1.32	1.44	1.44	1.584
	ε_Z (μdef)	868.9	868.9	868.9	868.9
T2	ε_T (μdef)	129.9	129.9	129.9	129.9
	σ_T (MPa)	1.191	1.3	1.3	1.43
	ε_Z (μdef)	680.8	680.8	680.8	680.8
T3	ε_T (μdef)	101.9	101.9	101.9	101.9
	σ_T (MPa)	1.078	1.176	1.176	1.294
	ε_Z (μdef)	410.7	410.7	410.7	410.7
T4	ε_T (μdef)	76.9	76.9	76.9	76.9
	σ_T (MPa)	0.969	1.057	1.057	1.163
	ε_Z (μdef)	335.1	335.1	335.1	335.1
T5	ε_T (μdef)	63.0	63.0	63.0	63.0
	σ_T (MPa)	0.863	0.942	0.942	1.036
	ε_Z (μdef)	287.3	287.3	287.3	287.3

5.5 Catálogo de estructuras conformes

▪ Estructura tipo 1 (ET1)

La **Tabla 5-7** presenta el catálogo de las estructuras diseñadas que cumplen con los valores admisibles presentados en la **Tabla 5-5** para la estructura tipo 1 (ET1).

Tabla 5-7. Catálogo de estructuras diseñadas para ET1.

	PF1	PF2	PF3	PF4
T1				
T2				
T3				
T4				
T5				

Los espesores obtenidos se encuentran en los intervalos sugeridos por Cerema (2016) para materiales tratados con ligante hidráulico en capas de base tratada con ligante hidráulico.

La **Tabla 5-8** muestra los valores obtenidos de los parámetros mecanicistas para las estructuras presentadas en el catálogo de ET1 (**Tabla 5-7**) los cuales, son menores a los valores admisibles.

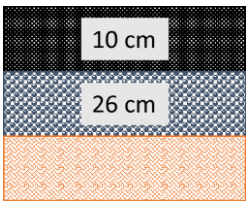
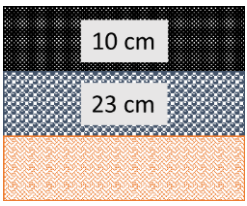
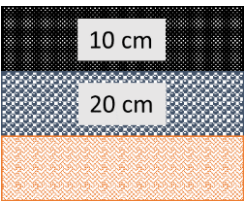
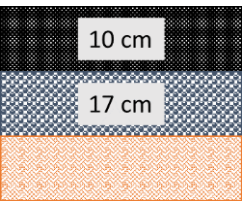
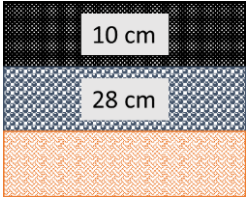
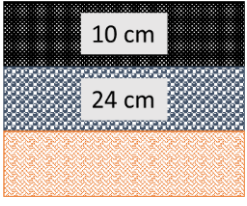
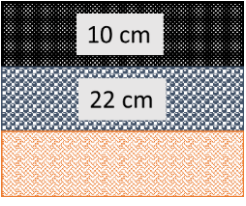
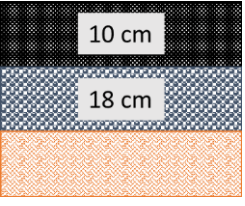
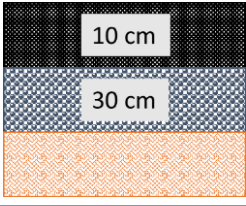
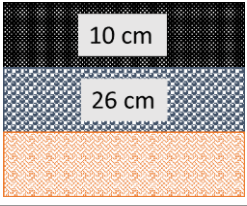
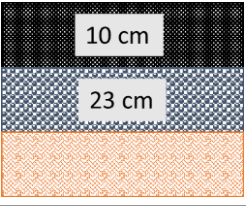
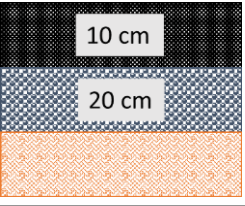
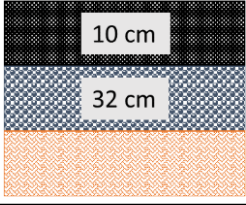
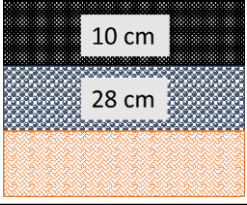
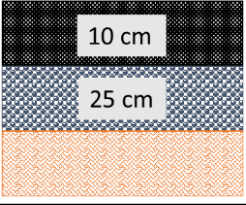
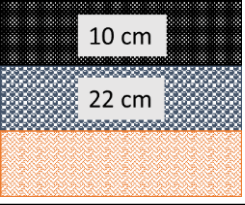
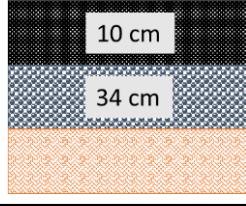
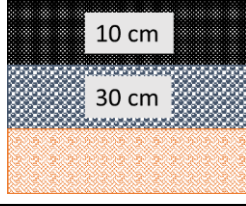
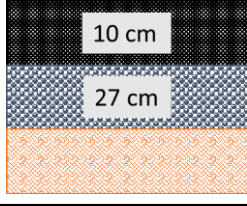
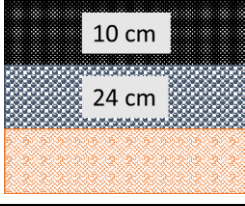
Tabla 5-8. Valores obtenidos de parámetros mecanicistas para el catálogo de ET1.

		PF1	PF2	PF3	PF4
T1	ε_T (μdef)	32.5	35.5	37.8	43.8
	σ_T (MPa)	0.792	0.866	0.833	0.933
	ε_Z (μdef)	222.5	217.4	188.9	206.6
T2	ε_T (μdef)	31.7	33.8	36.1	39.3
	σ_T (MPa)	0.691	0.747	0.753	0.800
	ε_Z (μdef)	191.8	184.9	169.1	172.8
T3	ε_T (μdef)	31.2	32.8	34.5	36.6
	σ_T (MPa)	0.583	0.651	0.653	0.691
	ε_Z (μdef)	159.8	159.2	144.7	146.7
T4	ε_T (μdef)	31.0	32.1	33.3	35.0
	σ_T (MPa)	0.517	0.548	0.547	0.601
	ε_Z (μdef)	140.7	132.4	119.5	126.1
T5	ε_T (μdef)	31.0	31.8	32.8	34.0
	σ_T (MPa)	0.446	0.486	0.482	0.526
	ε_Z (μdef)	120.2	116.5	104.7	109.4

- **Estructura tipo 2 (ET2)**

La **Tabla 5-9** presenta el catálogo de las estructuras diseñadas que cumplen con los valores admisibles presentados en la **Tabla 5-6** para la estructura tipo 2 (ET2).

Tabla 5-9. Catálogo de estructuras diseñadas para ET2.

	PF1	PF2	PF3	PF4
T1				
T2				
T3				
T4				
T5				

Los espesores obtenidos son inferiores a los sugeridos por SETRA & LCPC, (1998), teniendo en cuenta que el módulo de base en este caso fue 25000 MPa. Por otro lado, los espesores se encuentran del intervalo sugerido por Cerema (2016), excepto para la plataforma PF4 con tránsito T1 y T2, los cuales son menores.

La **Tabla 5-10** muestra los valores obtenidos de los parámetros mecanicistas para las estructuras presentadas en el catálogo de ET2 (**Tabla 5-9**), los cuales, son menores a los valores admisibles.

Tabla 5-10. Valores obtenidos de parámetros mecanicistas para el catálogo de ET2.

		PF1	PF2	PF3	PF4
T1	ε_T (μdef)	23.0	24.1	25.5	27.6
	σ_T (MPa)	1.299	1.354	1.388	1.501
	ε_Z (μdef)	152.0	138.3	126.5	130.6
T2	ε_T (μdef)	22.9	23.9	24.8	26.8
	σ_T (MPa)	1.161	1.275	1.226	1.405
	ε_Z (μdef)	134.1	129.2	109.9	120.9
T3	ε_T (μdef)	22.8	23.6	24.5	25.7
	σ_T (MPa)	1.043	1.136	1.155	1.238
	ε_Z (μdef)	119.1	113.6	102.8	104.6
T4	ε_T (μdef)	22.9	23.4	24.2	25.0
	σ_T (MPa)	0.943	1.018	1.031	1.099
	ε_Z (μdef)	106.6	100.6	90.5	91.4
T5	ε_T (μdef)	23.0	23.4	24.0	24.6
	σ_T (MPa)	0.856	0.918	0.925	0.981
	ε_Z (μdef)	95.9	89.7	80.3	80.5

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Este estudio permitió caracterizar un agregado siderúrgico denominado Escoria Conformada de Siderúrgica Diaca (ECSD) y evaluar su desempeño al estabilizarlo con cemento y aditivo a base de zeolitas, para ser utilizado como material de construcción para capas de cuerpo en estructuras de pavimento.

Objetivo 1: Caracterizar un tipo de agregado siderúrgico colombiano de acuerdo con la normativa nacional vigente.

La caracterización del ECSD se llevó a cabo mediante ensayos de laboratorio de acuerdo con la normativa aplicable al material presentada en la Sección 100 y Sección 200 del Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras (INVIAS, 2013). Además, fueron realizados ensayos adicionales de caracterización de acuerdo con normativa internacional.

Sobre la base de los resultados se concluye que:

- El ECSD cumplió adecuadamente con los rangos de aceptación para gradación de los siguientes materiales establecidos por el INVIAS (Artículo 300, INVIAS (2022)):
 - Base granular (BG): con tamaño máximo nominal 25 mm (BG25) y 27 mm (BG27),
 - Material granular tratado con cemento (MGTC25): base tratada con cemento con tamaño máximo nominal 25 mm.
- La granulometría del ECSD se ubicó dentro del rango de gradación ideal propuesto por PIARC.
- La caracterización de parámetros de dureza del agregado siderúrgico presentó valores de $LA=16.8\%$ y $MDE=6.2\%$. La caracterización de parámetros de limpieza

identificó un valor de $VBS=0.5$ y un resultado $NL-NP$ para la fracción fina del ECSD. Los anteriores parámetros cumplen adecuadamente con respecto a las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Art. 320, Art. 323, Art. 330, Art. 350 (INVIAS, 2022).

- Se identificó un valor de gravedad específica del material de $G_s=3.35$, el cual se ajusta adecuadamente respecto a los valores presentados en la revisión bibliográfica para escorias de naturaleza similar.
- El ensayo de Proctor modificado permitió identificar un valor de densidad seca máxima de $\gamma_{dmax}=2805.3 \text{ kg/m}^3$, debido a la gradación continua del ECSD y el valor de G_s , con un contenido de agua óptimo de $w_{opt}=5.0\%$.
- El agregado siderúrgico (ECSD) presentó valores de succión total, en su fracción fina, entre 30 kPa y 150000 kPa en un rango de grado de saturación entre $S=80\%$ y $S=5\%$.
- El ECSD presentó un coeficiente de permeabilidad de $K = 5.69E-04 \text{ cm/s}$ clasificándolo como material fino con nivel de drenaje bueno y semipermeable.
- La caracterización de resistencia a la penetración del agregado siderúrgico presentó un valor de $CBR=231.9\%$ y $CBR=148.5\%$ con una densidad seca con respecto al ensayo de Proctor modificado de 99% y 88%, respectivamente. En estos casos, el ECSD cumple adecuadamente con respecto a las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Art. 320, Art. 323, Art. 330, Art. 350 (INVIAS, 2022).
- El Índice de Portancia Inmediata del ECSD más bajo obtenido experimentalmente ($IPI=55.3\%$) con una densidad seca con respecto al ensayo de Proctor modificado de 83%, cumple apropiadamente con las referencias internacionales LCPC (2003) y NF 14227-1 (2013).

Objetivo 2: Diseñar tipos de mezcla de agregado siderúrgico con diferentes porcentajes de aditivo y cemento.

Se estabilizó el agregado siderúrgico (ECSD) con aditivo a base de zeolitas (*RoadCem*) y ligante hidráulico (Cemento estructural) para diseñar los siguientes tres (3) tipos de mezclas:

- LE-R0C0: Compuesta únicamente por el ECSD, sin cemento y sin aditivo, esta muestra fue utilizada como punto de control para evaluar impacto de la adición de cemento y aditivo.
- LE-R.02C2: Compuesta por 2% de cemento en masa y 0.02% de aditivo, esta muestra fue establecida para evaluar porcentajes mínimos de cemento y aditivo como mejoramiento del ECSD.
- LE-R.06C6: Compuesta por 6% de cemento en masa y 0.06% de aditivo, esta muestra fue establecida para evaluar porcentajes habituales de cemento y aditivo para estabilización del ECSD.

Objetivo 3: Evaluar el comportamiento mecánico de las diferentes mezclas diseñadas.

Para la evaluación del comportamiento mecánico de las mezclas diseñadas se realizaron cinco (5) ensayos, compresión simple (CS), tracción indirecta (TI), flexión 4 puntos (F4P), módulo en compresión (MC) y módulo resiliente (MR).

Con respecto al ensayo de compresión simple se concluye que:

- Con 28 días de curado, la resistencia en compresión (R_C) de la mezcla LE-R0C0 fue $R_C=3.11$ MPa, para la mezcla LE-R.02C2 fue $R_C=3.81$ MPa, y para la mezcla LE-R.06C6 fue $R_C=6.54$ MPa. En todos los casos, las mezclas cumplieron con el valor mínimo (2.5 MPa) de resistencia en compresión a 28 días para materiales tratados con cemento de acuerdo con lo establecido en las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Art. 350 (INVIAS, 2022).
- La mezcla LE-R.06C6 presentó un incremento de 110.29% con respecto a la mezcla LE-R0C0, mientras la mezcla LE-R.02C2 presentó un incremento de 22.51% con respecto a la mezcla LE-R0C0.
- Se estableció un aumento de 0.59 MPa por cada 1% de cemento adicional con 28 días de curado.
- Teniendo en cuenta los resultados de compresión simple obtenidos con 3 días de curado sobre las mezclas, se estableció un aumento de 0.10 MPa por cada día adicional de curado para las mezclas LE-R0C0 y LE-R.02C2 y un aumento de 0.16 MPa para la mezcla LE-R.06C6.

- Teniendo en cuenta los incrementos porcentuales, la mezcla LE-R.06C6 presenta un mejor desempeño en compresión simple que la mezcla LE-R.02C2 con respecto a la cantidad de aditivo y cemento incorporados.
- De acuerdo con NF 14227-1 (2013), la mezcla LE-R.02C2 se clasificó como clase $C_{4/5}$ y la mezcla LE-R.06C6 como clase $C_{5/6}$, como función de la resistencia en compresión en MPa a 28 días.

Con respecto al ensayo de tracción indirecta se concluye que:

- Con 28 días de curado, la resistencia en tracción indirecta (R_{TI}) de la mezcla LE-R0C0 fue $R_{TI}=0.26$ MPa, para la mezcla LE-R.02C2 fue $R_{TI}=0.56$ MPa, y para la mezcla LE-R.06C6 fue $R_{TI}=1.16$ MPa.
- La mezcla LE-R.06C6 presentó un aumento de 346.15% con respecto a la mezcla LE-R0C0, mientras la mezcla LE-R.02C2 presentó un aumento de 115.38% con respecto a la mezcla LE-R0C0.
- Teniendo en cuenta que la mezcla LE-R.06C6 presentó un aumento de 107.14% con respecto a la mezcla LE-R.02C2, la mezcla LE-R.02C2 evidenció un comportamiento más eficiente en tracción indirecta con respecto a la cantidad de cemento y aditivo incorporados.
- Se estableció un aumento de 0.15 MPa por cada 1% de cemento adicional a 28 días de curado.
- Se obtuvo la correlación experimental a 28 días, $\Delta R_{TI}=0.26\Delta R_C$. Esta correlación permite la estimación de la resistencia en tracción indirecta como el 26% de la resistencia a la compresión simple, para futuras investigaciones.

Con respecto al ensayo de flexión en 4 puntos se concluye que:

- El valor de resistencia en flexión (R_f) a 28 días obtenido para la mezcla LE-R.02C2 fue $R_f=0.98$ MPa, y para la mezcla LE-R.06C6 fue $R_f=1.71$ MPa. El aumento porcentual en este caso fue únicamente de 74.49%.
- Se estableció un aumento de 0.15 MPa por cada 1% de cemento adicional con 28 días de curado.
- Se calculó la resistencia a la fractura (K_{IC}) de dos probetas para las mezclas con cemento y aditivo, obteniendo valores independientes de 0.43 MPa $m^{1/2}$ y

0.36 MPa m^{1/2} para la mezcla LE-R.02C2, y de 0.73 MPa m^{1/2} y 0.65 MPa m^{1/2} para la mezcla LE-R.06C6. De acuerdo con lo anterior, la mezcla LE-R.02C2 es más eficiente con respecto a la resistencia a la fractura, teniendo en cuenta que la mezcla LE-R.06C6 presentó únicamente un aumento en promedio de 167.09% con relación a la LE-R.02C2.

Con respecto al ensayo de módulo en compresión se concluye que:

- El valor de módulo en compresión (E_C) a 137 días de curado obtenido para la mezcla LE-R0C0 fue $E_C=9867.31$ MPa, para la mezcla LE-R.02C2 fue $E_C=15601.45$ MPa, y para la mezcla LE-R.06C6 fue $E_C=19638.51$ MPa.
- Teniendo en cuenta que la mezcla LE-R.02C2 incrementó en 58.11% con respecto a LE-R0C0 y la mezcla LE-R.06C6 aumentó únicamente 99.03% con respecto a la mezcla LE-R0C0, la mezcla LE-R.02C2 presenta una mayor eficiencia con respecto al módulo en compresión en función de la cantidad de aditivo y cemento incorporado.
- Se estableció un aumento de 1540.07 MPa por cada 1% de cemento adicional.
- De acuerdo con NF 14227-1 (2013), teniendo los resultados de resistencia en tracción y módulo en compresión, se clasificó la mezcla LE-R.02C2 en el intervalo T2, correspondiente al comportamiento de una arena con cemento y la mezcla LE-R.06C6 en el intervalo T4, correspondiente al comportamiento de una grava con cemento.
- Teniendo en cuenta la resistencia a la fractura y el módulo en compresión, las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6 se ubicaron en una zona cercana al comportamiento del concreto según el diagrama de tenacidad en función de módulo.

Con respecto al ensayo de módulo resiliente se concluye que:

- El valor de módulo resiliente (E_r) promedio obtenido para la mezcla LE-R0C0 fue de $E_r=8891.82$ MPa, para la mezcla LE-R.02C2 fue de $E_r=11652.68$ MPa y para la mezcla LE-R.06C6 fue de $E_r=34952.69$ MPa.
- La mezcla LE-R.02C2 presentó un aumento únicamente de 31.05% con relación a la mezcla LE-R0C0, mientras la mezcla LE-R.06C6 presentó un incremento de

293.09% con respecto a la mezcla LE-R0C0 y de 199.95% con respecto a la mezcla LE-R.02C2.

- De acuerdo con los resultados obtenidos, la mezcla LE-R.06C6 presenta una mayor eficiencia con respecto al ensayo de módulo resiliente atribuido al aumento de rigidez en la mezcla dada la cantidad de aditivo y cemento incorporados.

De manera general, teniendo en cuenta los resultados experimentales de comportamiento mecánico se concluye que:

- La mezcla LE-R0C0 presentó valores de resistencia en compresión, tracción y módulo consecuentes con la revisión bibliográfica para materiales compuestos por escoria de siderúrgica, sin embargo, la ausencia de cohesión dificulta la evaluación de propiedades como flexión, por lo cual, se hace necesaria la incorporación de cemento y aditivo.
- La mezcla LE-R.02C2 muestra una mayor eficiencia en tracción, flexión y módulo en compresión con respecto a la mezcla LE-R.06C6, ya que, con un porcentaje menor de cemento y aditivo, se obtuvieron valores conformes a las propiedades de una capa de material granular tratado con cemento para estructuras de pavimento.
- La mezcla LE-R.06C6 presentó una mayor eficiencia en compresión y módulo resiliente con respecto a la mezcla LE-R.02C2 dado el aumento de rigidez y diferencia porcentual en resultados obtenidos sobre estas mezclas.
- La comparación y clasificación de las mezclas se realizó con respecto a normativa internacional NF 14227-1 (2013), dado que no existe, a la fecha, parámetros mínimos en la normativa INVIAS, exceptuando resistencia en compresión a 28 días.

Objetivo 4: Modelar posibles estructuras de pavimento implementando el material de estudio.

Se utilizó la metodología mecanicista para modelar dos (2) tipos de estructura semirrígida compuesta por una plataforma (*PF*) con módulo entre 20 y 200 MPa, capa de base tratada con cemento utilizando las mezclas LE-R.02C2 y LE-R.06C6, y una capa de rodadura de diez (10) cm de espesor en mezcla asfáltica (*BB*). El espesor de la capa de base tratada con cemento fue variado en función del tráfico y el módulo de la plataforma.

Sobre la base de los resultados se concluye que:

- El esfuerzo en tracción en la parte inferior de la capa de base tratada con cemento (σ_T), en todos los casos, fue la variable crítica para el cumplimiento de los espesores definidos en las estructuras evaluadas.
- Los espesores de la capa de base conformada por la mezcla LE-R.02C2 variaron entre 18 cm y 45 cm.
- Los espesores de la capa de base conformada por la mezcla LE-R.06C6 variaron entre 17 cm y 34 cm.
- De manera general, los espesores se encontraron dentro de los intervalos definidos por las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Art. 350 (INVIAS, 2022) y referencias internacionales para materiales tratados con cemento como capa de base en estructura semirrígida.
- Las estructuras modeladas con las propiedades obtenidas de los materiales (LE-R.02C2 y LE-R.06C6) son viables para tráfico entre 50 y 2000 vehículos pesados por día promedio y plataformas entre 20 MPa y 200 MPa utilizadas en la modelación.
- Es recomendable utilizar la mezcla LE-R.02C2 para estructuras solicitadas a tráfico menores a 150 vehículos pesados por día promedio y plataforma con módulo igual o superior a 120 MPa.
- Es recomendable utilizar la mezcla LE-R.06C6 para estructuras solicitadas a tráfico mayor a 300 vehículos pesado por día promedio y plataformas con módulo igual o menor a 50 MPa.
- Para las condiciones intermedias la selección dependerá de la facilidad de acceso a los materiales y precios locales de suministro de los mismos.

Finalmente, teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos y el alcance de esta investigación, se establece la mezcla LE-R.02C2 como la mezcla más acertada para la implementación en construcción de estructuras de pavimento dada la cohesión conferida con un porcentaje bajo de cemento (2%) y de aditivo (0.02%), y los resultados sobresalientes ante esfuerzos en tracción, flexión y módulo de rigidez, los cuales, representan un comportamiento adecuado en campo.

Adicionalmente, siendo menores los espesores de estructuras de pavimento obtenidos en la modelación con respecto a estructuras convencionales, la mezcla LE-R.02C2 evidencia una inversión económicamente factible.

6.2 Recomendaciones

Para la realización de futuras investigaciones que incluyan los materiales y procedimientos utilizados en este trabajo, se sugiere considerar los siguientes aspectos.

- Complementar la caracterización del agregado siderúrgico incorporando ensayos como microscopia, resistencia mecánica por el método del 10% de finos, pérdida en ensayo de solidez en sulfatos y proporción de sulfatos del material.
- Complementar la caracterización del ligante hidráulico y aditivo a base de zeolitas mediante procedimiento como microscopia, fluorescencia o difracción de rayos X.
- Evaluar el comportamiento mecánico de mezclas diseñadas con contenidos de cemento y aditivo intermedios para corroborar la evolución de las propiedades.
- Evaluar la respuesta física y química en el tiempo de las probetas compactadas y curadas teniendo en cuenta la posible oxidación y afloramiento de sustancias ajenas sobre las muestras.
- Realizar ensayos complementarios de caracterización mecánica como fatiga con control de esfuerzo que permitan obtener parámetros experimentales como pendiente de fatiga y esfuerzo máximo en un millón de ciclos.
- Realizar ensayos complementarios de flexión 4 puntos que permitan medir experimentalmente la propagación de la fisura formada en la probeta durante en ensayo.
- Realizar ensayos de módulo resiliente con esfuerzos cíclicos mayores a 0.25 MPa, que permitan ampliar el rango de resultados obtenidos en función de los futuros esfuerzos a los que se vería sometido y teniendo en cuenta la rigidez de los materiales tratados con ligante hidráulico y la dureza del agregado siderúrgico.
- Realizar tramos experimentales respetando la formulación de este estudio que permitan verificar el comportamiento de los materiales en campo.
- Se sugiere realizar una recolección mayor de datos a nivel nacional que permitan dar una clasificación general para los materiales granulares tratados con ligante hidráulico, teniendo en cuenta que no se identificó un estándar local, razón por la cual el presente estudio clasificó el material mediante normativa internacional.

Bibliografía

- Ahmadi Chenarboni, H., Hamid Lajevardi, S., MolaAbasi, H., & Zeighami, E. (2021). The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils. *Construction and Building Materials*, 272, 121630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121630>
- Akeroyd, F., & Hicks, B. (1988). Foamed bitumen road recycling. *Highways*, 56(1933).
- Amaral, L. (1999). *Hormigones con escoria de horno eléctrico como áridos: Propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Angelone, S., Garibay, M., & Cauhapé, M. (2006). *Permeabilidad de suelos*. Universidad Nacional de Rosario.
- Aquino, E. (2012). *Aplicación de escoria de siderúrgica como agregado en las mezclas de concreto para pavimento rígido*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- ARGOS. (2021). *Ficha técnica cemento estructural MAX*. 8, 6.
- ASTM D6836-02. (2008). *Standard Test Methods For Determination Of The Soil Water Characteristic Curve For Desorption Using A Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, And/Or Centrifuge*.
- Aydın, M., Karacasu, M., & Kaya, S. (2019). Investigation of the effect of zeolite addition on the properties of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 214, 166-172. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.177.
- Baalamurugan, J., Ganesh Kumar, V., Chandrasekaran, S., Balasundar, S., Venkatraman, B., Padmapriya, R., & Bupesh Raja, V. K. (2021). Recycling of steel slag aggregates for the development of high density concrete: Alternative & environment-friendly radiation shielding composite. *Composites*.
- Bao, S., Wang, X., Zhang, Q., Guo, X., Wang, W., & Li, L. (2020). Characterization of zeolite-based materials for sustainable road construction. *Construction and Building Materials*, 232, 117245. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117245.
- Brockenbrough, R. (2009). *Highway engineering handbook* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Carret, J.-C., Pedraza, A., Di Benedetto, H., & Sauzeat, C. (2018). Comparison of the 3-dim linear viscoelastic behavior of asphalt mixes determined with tension-compression and dynamic tests. *Construction and Building Materials*, 174, 529–536. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.156>
- Carrillo, A., & García, E. (2009). *Uso de las escorias de acería de horno eléctrico en obras viales*.

- Cerema. (2016). *Diagnostic et conception des renforcements de chaussées*.
- CFTE, C. F. por les T. R. (2003). *Retraitement en place à froid des anciennes chaussées, guide technique* (SETRA, Le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes).
- Chen, Z., Wu, S., Yue, X., Zeng, W., Yi, M., & Wan, J. (2015). Effect of hydration and silicone resin on Basic Oxygen Furnace slag and its asphalt mixture. *Journal of leaner production*, 112.
- Comité colombiano de productores de acero - ANDI. (2019). *Informe del sector siderúrgico*.
- Correa, N., & Murillo, C. (2018). Detection of landslides with SAR polarimetry: Case study of south-eastern Colombia. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII. <https://doi.org/10.5194>
- Das, P., Upaghyay, S., Dubey, S., & Singh, K. K. (2021). Waste to wealth: Recovery of value-added products from steel slag. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- EN 12390-5. (2000). *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas*.
- EN 12697-5. (2018). *Determination of the maximum density*.
- EN 13286-41. (2003). *Mezclas de áridos sin ligante y con conglomerante hidráulico. Parte 41: Método de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión de las mezclas de áridos con conglomerante hidráulico*.
- Eyo, E. U., Ng'ambi, S., & Abbey, S. J. (2020). Incorporation of a nanotechnology-based additive in cementitious products for clay stabilisation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(5), 1056–1069. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.12.018>
- Faleschini, F., Brunelli, K., Zanini, M., Dabalà, M., & Pellegrino, C. (2016). Electric arc furnace slag as coarse recycled aggregate for concrete production. *J. Sustain. Metall*, 2. <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0029-1>
- Feng, C., Dou, Y., & Li, D. (2011). Steel slag used as admixture in composite cement. *J. Nanjing Tech University*.
- Gerdau Diaco. (2017). *Proceso de Corte y Doble. Manejo de acero en obra*. <https://docplayer.es/66383233-Agenda-reglamento-sismo-resistente-gerdau-diacoproceso-de-corte-y-doble-manejo-de-acero-en-obra.html>
- IDU, I. de D. U., & Universidad de los Andes. (s.f). *MANUAL DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA BOGOTÁ D.C.*
- INVIAS. (2013). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*.
- INVIAS. (2022). *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras*.
- INVÍAS, (Instituto Nacional de Vías. (2021). *Estado de la Red Vial*. <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial>

- Jerez, L., Gómez, O., & Murillo, C. (2018). Stabilization of Colombian lateritic soil with a hydrophobic compound (organosilane). *International Journal of Pavement Research and Technology*, *11*, 639–646.
- Jourdain, X., Horsin Molirano, H., & Soleilhet, F. (2018). Essais destructifs sur éprouvettes en béton et acier d'armature. *École normale supérieure Paris-Saclay*.
- KNT Group. (s.f). *Types and Structure of Synthetic Zeolites (Molecular sieves)*. https://www.kntgroup.ru/en/about_zeolites/types_and_structure
- Latorre, A., Murillo, C., & Cruz, J. (2019). Comportamiento volumétrico de un suelo no saturado derivado de cenizas volcánicas del departamento del Cauca, Colombia. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*. <https://doi.org/10.3233/STAL190105>
- LCPC, L. C. des P. et C. (2003). *Guide technique “Réalisation des remblais et des couches de formes”*.
- LCPC, L. C. des P. et C., & SETRA, L. S. d'Etudes T. des R. et A. (2000). *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, guide technique* (LCPC). Ministère de l'Équipement, des Transports, et du Logement.
- Liu, J., Yu, B., & Wang, Q. (2020). *Application of steel slag in cement treated aggregate base course*. <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121733>
- Lv, Y., Wu, S., Cui, P., Lui, Q., Li, Y., Xu, H., & Zhao, Y. (2021). Environmental and feasible analysis of recycling steel slag as aggregate treated by silicone resin. *Construction and Building Materials*.
- Maghool, F., Arulrajah, A., Du, Y.-J., Horpibulsuk, S., & Chinkulkijniwat, A. (2017). Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials. *J. Clean Tech Environ Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1289-6>
- Morcote, C. (2019). *Evaluación del desempeño mecánico de mezclas asfálticas con escorias de acero*. Universidad Nacional de Colombia.
- Mordor Intelligence. (2021). *Mercado de Zeolitas, Participación, tamaño y crecimiento de la industria*. <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/zeolites-market>
- Munsell Soil Color Company. (1950). *Munsell soil color chart*. Macbeth Division of Kollmorgen Corporation.
- NF 14227-1. (2013). *Hydraulically bound mixtures—Specification—Part 1: Cement bound granular mixtures*.
- NF 16907-2. (2018). *Terrassement—Partie 2: Classification des matériaux*.
- NF 17892-11. (2019). *Geotechnical investigation and testing—Laboratory testing of soil—Part 11: Permeability tests*.
- NF EN 13286-47. (2004). *Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques*.

- NF P 98-114-1. (1992). *Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques—Partie 1: Graves traitées aux liants hydrauliques*.
- NSC. (2017). An introduction to steelmaking. *Newsteelconstruction.Com*.
<https://www.newsteelconstruction.com/wp/an-introduction-to-steelmaking/>
- Ochoa, R. (2019). ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO CON RESIDUOS SIDERÚRGICOS COMO AGREGADOS. *Congreso Latinoamericano de Ingeniería*, 1–12.
- Ordoñez, K. S., & Parra, V. J. (2017). *Infraestructura de transporte vial: Un factor de atraso para la competitividad de Colombia en la Alianza del Pacífico*. Universidad de la Salle.
- Ortega, V. (1999). *Utilización de escoria siderúrgica para construir caminos y estabilizar suelos*. Universidad de Burgos.
- Parra, L. M., & Sánchez, D. P. (2010). *Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco. Municipio de Tuta Boyacá* (Universidad de la Salle). *Universidad de la Salle*, Art. Universidad de la Salle.
- Pasetto, M., & Baldo, N. (2010). *Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag*. Universidad de Padua.
- Pasetto, M., & Baldo, N. (2013). Cement bound mixtures with metallurgical slags for road constructions: Mix design and mechanical characterization. *Journal Polish Mineral Engineering Society*.
- Payne, D. (2017). *Estabilización de la subrasante de carreteras empleando escorias de acería*. Universidad de Holguín, Cuba.
- Pedraza, Á. (2014). *Impacto de contaminantes en la evolución de la estructura y propiedades de suelos excavados*. Universidad Nacional de Colombia.
- Pedraza, Á. (2018). *Propriétés thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés*. Université de Lyon.
- Pedraza, A., Benedetto, H. D., Sauzéat, C., & Pouget, S. (2022). Properties at Low Temperatures of Asphalt Mixes Containing High Content of Multi-recycled RAP. *Journal of Testing and Evaluation*, 50(2), 939–950.
<https://doi.org/10.1520/JTE20210209>
- Pedraza, A., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., & Pouget, S. (2019). 3D Linear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures containing high content of multi-recycled RAP. *Road Materials and Pavement Design*, 20(7), 1709–1721.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1594054>
- Pedraza, Á., Selmi, M., Mesticou, Z., Dubujet, P., Kacem, M., & Murillo, C. (2014). Characterization of excavated soil by TBM and treated with surfactant. *XIV Congresos Colombiano de geotecnia & IV congreso suramericano de ingenieros jóvenes geotécnicos, Bogotá D.C.*

- Pedraza, Á., Selmi, M., Mesticou, Z., Dubujet, P., Kacem, M., & Murillo, C. (2015). Temporal analysis of side effects produced by foam agents in the soil excavated with Earth Pressure Balance (EPB). *15th PACSMG*.
- Pereira, A., Franco, J., Barbosa, L., Dias, H., Varela, T., Lopes, J., Gonçalves, L., & Fiorotti, R. (2021). Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications and performance. *Construction and Building Materials*.
- Pouget, S., Marsac, P., Pedraza, A., Sauzeat, C., Di Benedetto, H., Gaudefroy, V., Boulangé, L., Pévère, A., & Mouillet, V. (2021). Advanced characterisation of multi-recycled warm asphalt pavement (MRWAP) with high content of recycled asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2021.2018352>
- Qin, Y., Zhang, K., Wu, X., Ling, Q., Hu, J., Li, X., & Liu, H. (2021). Effect of oily sludge treatment with molten blast furnace slag on the mineral phase reconstruction of water-quenched slag properties. *Materials*, *14*(7285). <https://doi.org/10.3390/ma14237285>
- Rasheed, A., & Fawad, I. (2016). *Modeling and simulation of graphene based polymer nanocomposites: Advances in the last decade*. Department of Mechanical and Construction Engineering, Faculty of Engineering and Environment, Northumbria University, Newcastle, UK.
- Renard, F. (2002). *Cours d'Hydrogéologie*. Master Professionnel-DESS.
- Reyes, O., & Camacho, J. (2003). Efecto del desperdicio de una siderúrgica en bases y subbases granulares. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, *25*–29.
- Sánchez, H. (2016). Estado del arte sobre las escorias negras de horno de arco eléctrico y sus aplicaciones en pavimentos. *L'èspirit Ingèniux*, *63*–72.
- Serna, A. (2012). *Selección de tecnologías apropiadas para el aprovechamiento de la escoria de la escoria en el sector siderúrgico*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- SETRA, L. S. d'Etudes T. des R. et A., & LCPC, L. C. des P. et C. (1998). *Catalogue des structures types de chaussées neuves*.
- Song, Q., Guo, M.-Z., Wang, L., & Ling, T.-C. (2021). Use of steel slag as sustainable construction materials: A review of accelerated carbonation treatment. *Resource, Conservation & Recycling*.
- Toffolo, R., Moro, T., Santos, D., Costa, L., Mendes, J., & Peixoto, R. (2021). Roller-compacted concrete pavements produced entirely with steelmaking slag aggregates. *Aci Material Journal*.
- U.S. Geological Survey. (s.f). *Zeolites Statistics and Information*. National Minerals Information Center | U.S. Geological Survey.

- <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/zeolites-statistics-and-information>
- Valenzuela, M., Toledo, P., Hermosilla, M., & Saffirio, A. (2007). *Análisis geomecánico de escorias de acería. Posibilidades de uso en obras viales*. Universidad de Concepción.
- Van Genuchten, M. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 898-898.
- Wang, G., Wang, Y., & Gao, Z. (2010). Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. *Journal of Hazardous Materials*.
- WEF, W. E. F. (2019). *The Global Competitiveness Report 2019* (https://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019).
- World Steel Association. (2022). Total production of crude steel. *Worldsteel.Org*. https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/annual-production-steel-data/P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND
- Wu, P. (2015). *Cement Stabilized Materials with Use of RoadCem Additive* [PhD]. Delft University of Technology.
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., & Chen, Y. (2007). Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment*, 42(7), 2580–2585. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.008>
- Xiao, B., Wen, Z., Miao, S., & Gao, Q. (2021). Utilization of steel slag for cemented tailings backfill: Hydration, strength, pore structure, and cost analysis. *Case Studies in Construction Materials*.
- Xue, Y., Wu, S., Hou, H., & Zha, J. (2006). Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture. *J. Hazard Mater.*
- Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., & Chen, H. (2012). An Overview of Utilization of Steel Slag. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 791–801. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108>
- Yildirim, I., & Prezzi, M. (2009). *Use of steel slag in subgrade application*. Purdue University.
- Zaragoza, V. (2001). *Utilización de las escorias de los hornos de arco eléctrico y de cuchara como materiales de construcción*. Unidad Docente Metalúrgia “Antillana de Acero”, La Habana: Facultad Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echevarría”.
- Zhu, H., Ma, M., He, X., Zheng, Z., Su, Y., Yang, J., & Zhao, H. (2021). Effect of wet-grinding steel slag on the properties of Portland cement: An activated method and rheology analysis. *Construction and Building Materials*.

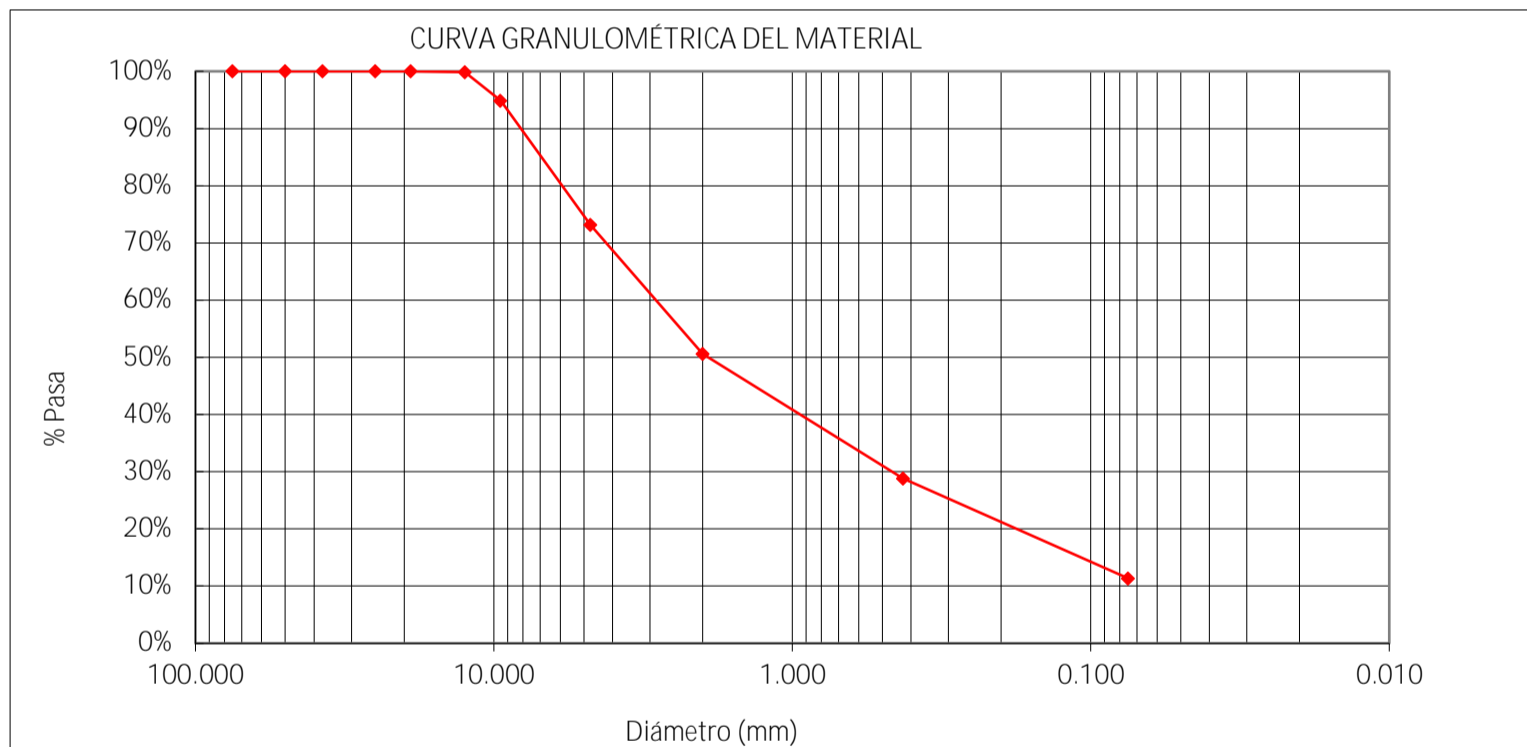
A. Anexo: Informes de resultados de ensayos en laboratorio

Material Escoria Blanca de Siderúrgica Diaco (TMN:19.0mm)
Nomenclatura EB 19.0
Ensayo Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV-E-213

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA		Fracción Gruesa (lavado sobre tamiz No. 200)	
Recipiente	AB	Recipiente	E40
Peso Recipiente + Muestra húmeda (g)	296.37	Peso seco inicial (g)	2500
Peso recipiente + Muestra seca (g)	282.3	Peso recipiente + M. seca (g)	2502.38
Peso del Recipiente (g)	41.58	Peso recipiente (g)	257.3
Contenido de Agua (%)	5.84	Peso seco material lavado (g)	2245.08

TAMIZ	Peso Retenido (g)	Peso Retenido Corregido(g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% que pasa
3"					100
2"					100
1 1/2"					100
1"					100
3/4"					100
1/2"	4.00	4.04	0.16	0.16	99.84
3/8"	122.29	123.41	4.94	5.10	94.90
No. 4	538.52	543.45	21.74	26.84	73.16
No. 10	559.83	564.96	22.60	49.43	50.57
No. 40	539.44	544.38	21.78	71.21	28.79
No. 200	431.84	435.80	17.43	88.64	11.36
Pasa No. 200	28.78	29.04	11.36	100.00	
Σ	2224.70	2241.04	100.00		
Error (%)	0.92				

PORCENTAJES			GRADACIÓN	
Grava	Arena	Finos	Cu	
26.84%	61.81%	11.36%	Cc	



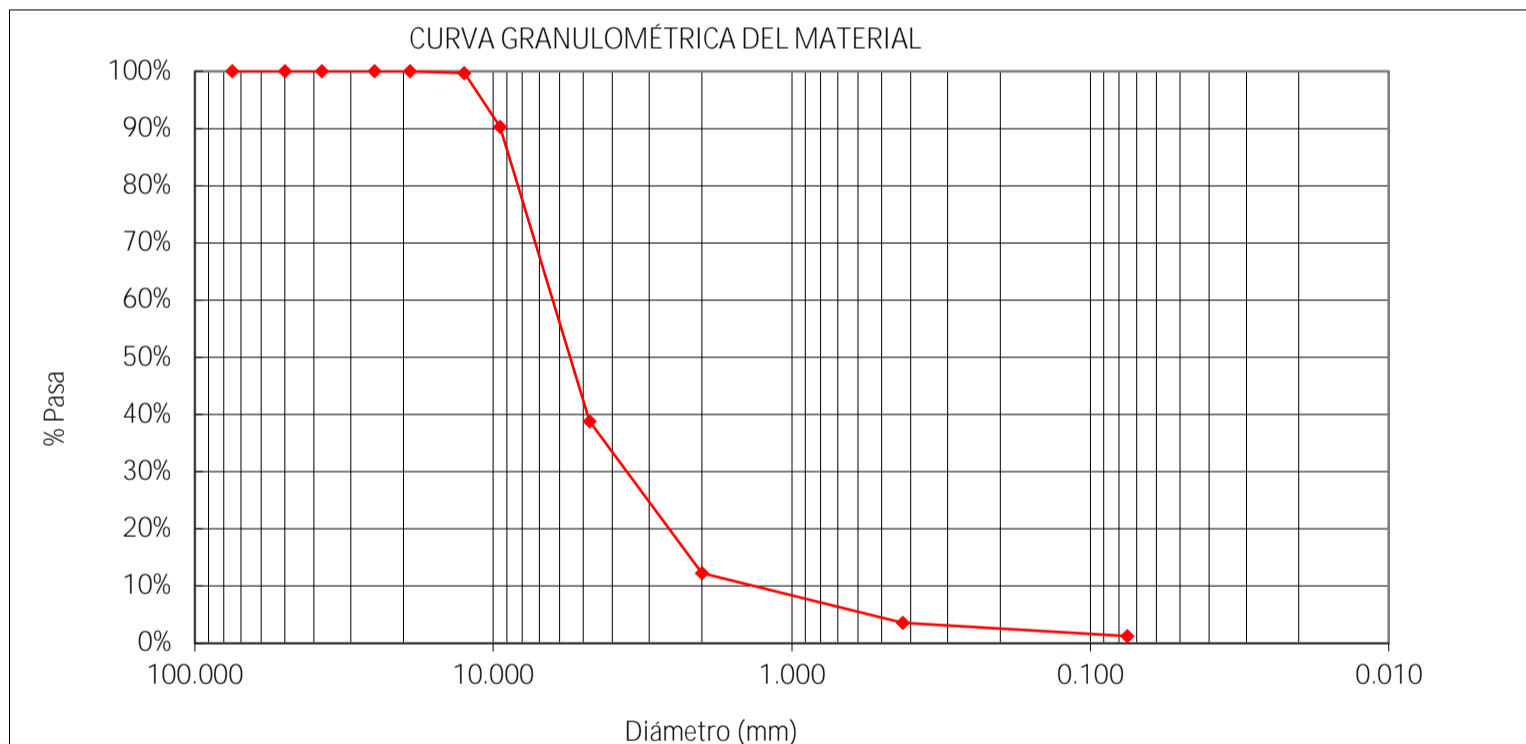
Laboratorio de Geotecnia - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Negra Fina de Siderúrgica Diaco (TMN:19.0mm)
Nomenclatura ENF 19.0
Ensayo Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV-E-213

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA		Fracción Gruesa (lavado sobre tamiz No. 200)	
Recipiente	45	Recipiente	E38
Peso Recipiente + Muestra húmeda (g)	481.5	Peso seco inicial (g)	2500
Peso recipiente + Muestra seca (g)	480.8	Peso recipiente + M. seca (g)	2729.3
Peso del Recipiente (g)	60.22	Peso recipiente (g)	257.3
Contenido de Agua (%)	0.17	Peso seco material lavado (g)	2472

TAMIZ	Peso Retenido (g)	Peso Retenido Corregido(g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% que pasa
3"					100
2"					100
1 1/2"					100
1"					100
3/4"					100
1/2"	8.49	8.49	0.34	0.34	99.66
3/8"	233.48	233.43	9.34	9.68	90.32
No. 4	1288.03	1287.75	51.51	61.19	38.81
No. 10	662.94	662.80	26.51	87.70	12.30
No. 40	217.96	217.91	8.72	96.42	3.58
No. 200	58.23	58.22	2.33	98.74	1.26
Pasa No. 200	3.40	3.40	1.26	100.00	
Σ	2472.53	2463.51	100.00		
Error (%)	0.02				

PORCENTAJES			GRADACIÓN	
Grava	Arena	Finos	Cu	4.75
61.19%	37.56%	1.26%	Cc	1.51



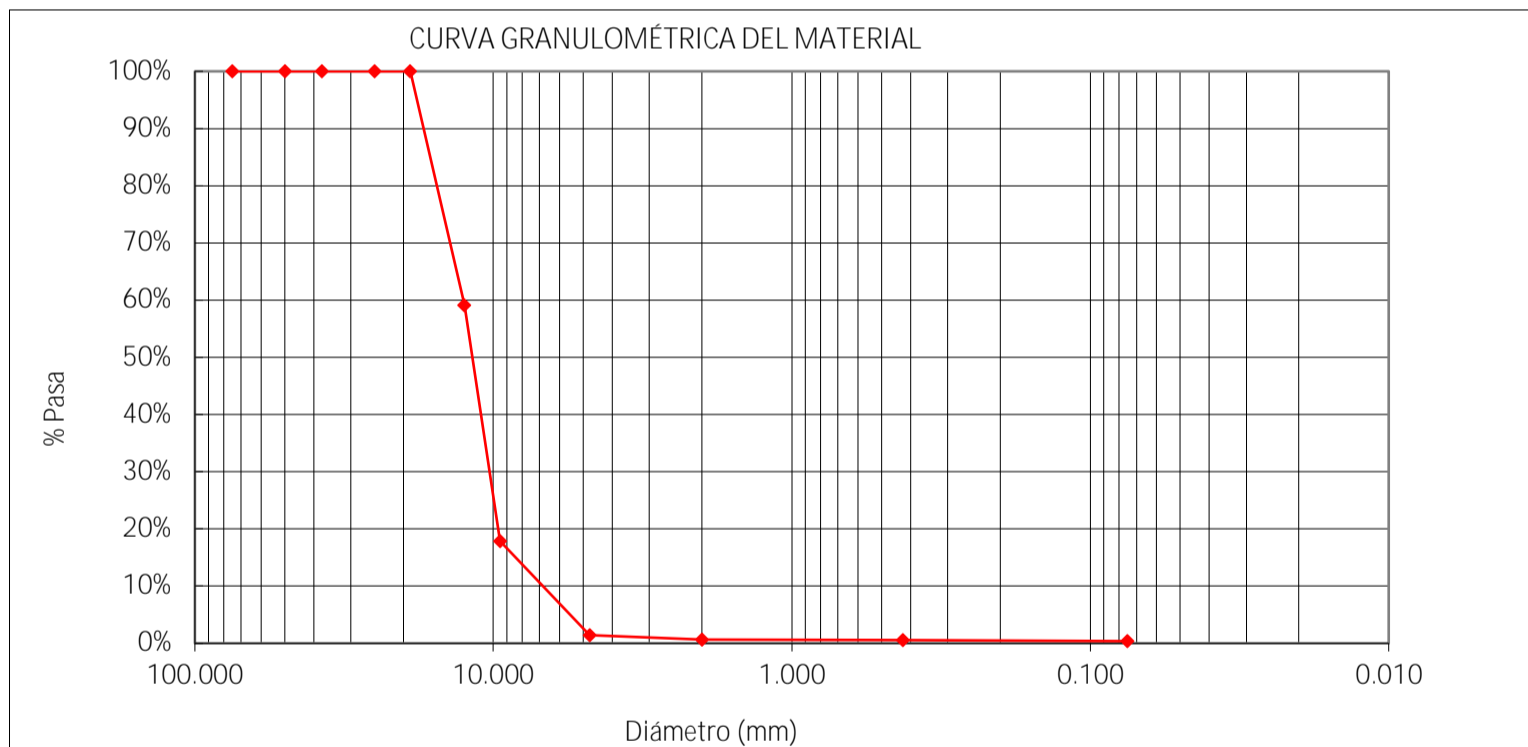
Laboratorio de Geotecnia - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Negra Gruesa de Siderúrgica Diaco (TMN:19.0mm)
Nomenclatura ENG 19.0
Ensayo Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV-E-213

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA		Fracción Gruesa (lavado sobre tamiz No. 200)	
Recipiente	AA	Recipiente	E43
Peso Recipiente + Muestra húmeda (g)	590.8	Peso seco inicial (g)	2577.06
Peso recipiente + Muestra seca (g)	590.49	Peso recipiente + M. seca (g)	2833.72
Peso del Recipiente (g)	36.8	Peso recipiente (g)	265.92
Contenido de Agua (%)	0.06	Peso seco material lavado (g)	2567.8

TAMIZ	Peso Retenido (g)	Peso Retenido Corregido(g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% que pasa
3"					100
2"					100
1 1/2"					100
1"					100
3/4"					100
1/2"	1052.38	1052.32	40.83	40.83	59.17
3/8"	1064.24	1064.18	41.29	82.13	17.87
No. 4	424.16	424.14	16.46	98.59	1.41
No. 10	19.90	19.90	0.77	99.36	0.64
No. 40	2.40	2.40	0.09	99.45	0.55
No. 200	4.43	4.43	0.17	99.62	0.38
Pasa No. 200	0.44	0.44	0.38	100.00	
Σ	2567.95	1515.48	100.00		
Error (%)	0.01				

PORCENTAJES			GRADACIÓN	
Grava	Arena	Finos	Cu	1.90
98.59%	1.04%	0.38%	Cc	1.20



Laboratorio de Geotecnia - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:12.5mm)

Nomenclatura ECSD 15.9

Ensayo Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5mm (1 1/2") por medio de la Máquina de Los Ángeles INV-E-218

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN: 12.5mm)

Tamaño de la muestra: Pasa tamiz 3/4",
Retiene tamiz 3/8"

Datos:

Gradación utilizada:

<i>Pasa</i>	<i>Retiene</i>	<i>%</i>
3/4"	1/2"	50.0
1/2"	3/8"	50.0

Masa total de la muestra (g):

5000.62

Masa lavada en tamiz No 16 y seca al horno (g):

4160.34

Porcentaje de pérdidas (%):

16.8

Registro Fotográfico:



Laboratorio de Geotecnia - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura ECSD 15.9
Ensayo Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval INV-E-238

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN: 12.5mm) **Tamaño de la muestra:** Pasa tamiz 3/4",
 Retiene tamiz 3/8"

Datos:

Gradación utilizada:

Pasa	Retiene	%
3/4"	5/8"	25.0
5/8"	1/2"	25.0
1/2"	3/8"	50.0

Masa total de la muestra (g):

1500.69

Masa lavada en tamiz No 16 y seca al horno (g):

1407.51

Porcentaje de pérdidas (%):

6.2

Registro Fotográfico:



Laboratorio de Geotecnia - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura ECSD 15.9
Ensayo Valor de azul de metileno en agregados finos INV-E-235

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN: 12.5mm) **Tamaño de la muestra:** Pasa tamiz No 4

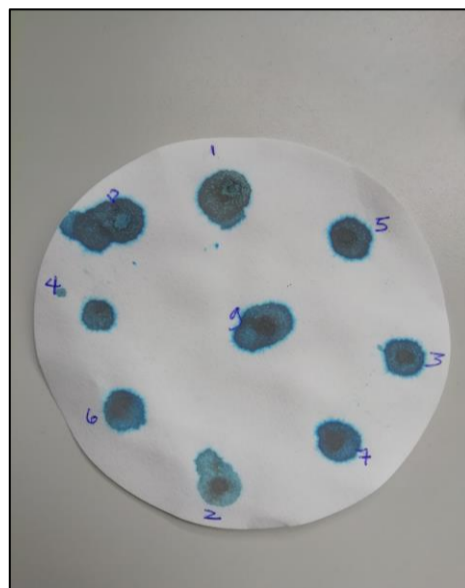
1) **Datos:**

Gradación utilizada:

Pasa	Retiene	%	Cantidad (g)
No 4	No 10	19.01	38.03
No 10	No 40	39.28	78.56
No 40	No 200	25.46	50.91
No 200	-	16.25	32.50
		100.00	200.00

Masa de material seco (M1)	200 g
Volumen total solución colorante (V1)	10 ml
Ensayos de coloración hechos	9
Valor de azul de metileno	0.5 g/ml

Registro Fotográfico:



2) **Datos:**

Gradación utilizada:

Pasa	Retiene	%	Cantidad (g)
No 200	-	100.00	30.00
		100	30.00

Masa de material seco (M1)	30 g
Volumen total solución colorante (V1)	1.2 ml
Ensayos de coloración hechos	8
Valor de azul de metileno	0.4 g/ml

Registro Fotográfico:



Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura ECSD 15.9
Ensayo Determinación de la densidad máxima - EN 12697-5

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN: 12.5mm)

Tamaño de la muestra: Pasa tamiz 3/4",

Gradación utilizada:

Pasa	Retiene	%
3/4"	1/2"	20.6%
1/2"	3/8"	25.3%
3/8"	No 4	15.3%
No 4	No 10	7.4%
No 10	No 40	15.3%
No 40	No 200	9.9%
No 200	-	6.3%

Datos:

Masa picnometro + Tapa (g)
275.00

Masa picnometro + Tapa + Muestra (g)
924.80

Masa picnómetro + Tapa + Muestra + Agua (g)
1727.94

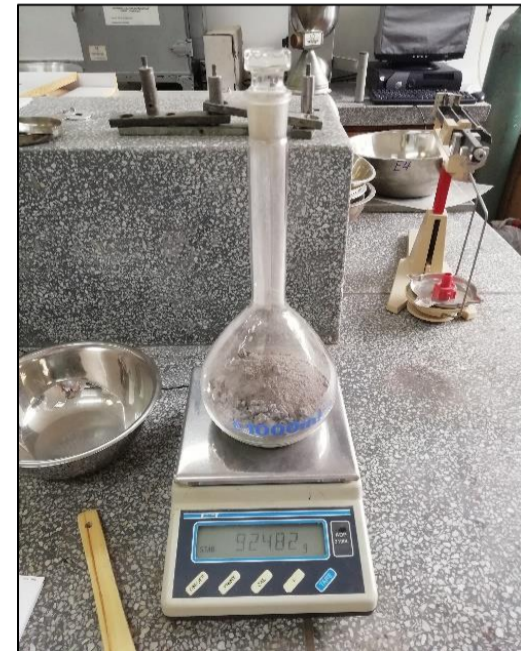
Resultados:

Volumen del picnómetro (m3)
0.0009991

Densidad máxima (kg/m3)
3355.73

Gravedad Específica
3.350

Registro Fotográfico:



Laboratorio de Geotecnia - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura ECSD 15.9
Ensayo Relaciones de Humedad - Peso Unitario Seco en los suelos (Ensayo Modificado de Compactación) INV-E-142

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN: 12.5mm) **Tamaño de la muestra:** Pasa tamiz 3/4",

Datos:

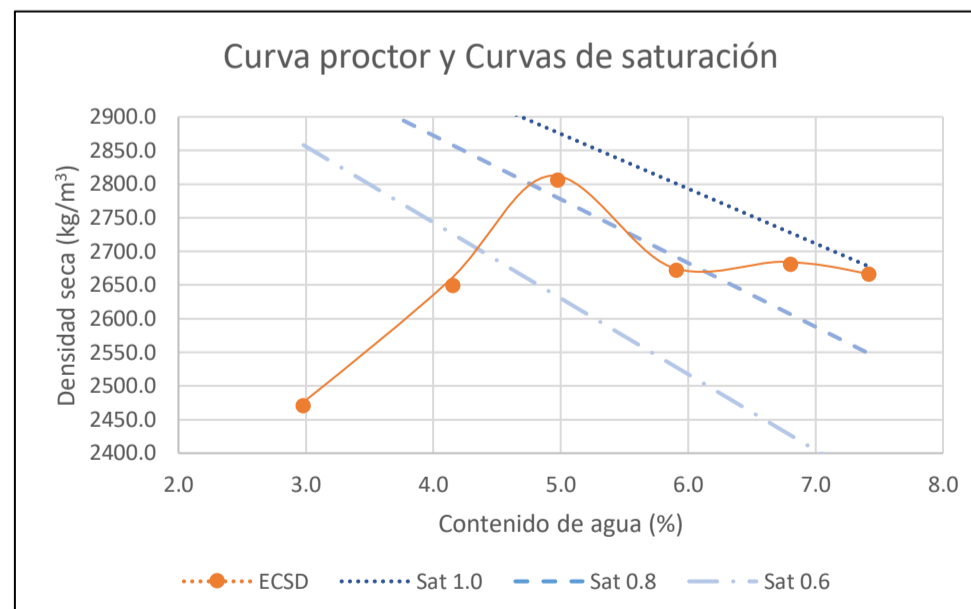
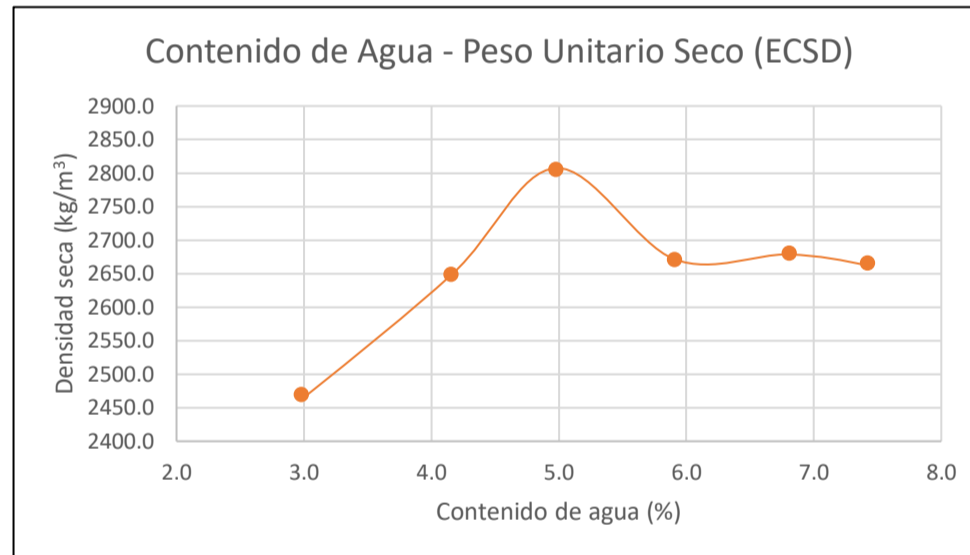
Golpes/capa:	<u>56</u>	No de capas:	<u>5</u>	Peso martillo (kg):	<u>4.5455</u>
Diam. Molde (m):	<u>0.15</u>	Altura molde (m):	<u>0.1</u> 0.1	Volumen molde (m ³):	<u>0.00211</u>
Gs:	<u>3.35</u>	Altura caída (m):	<u>0.457</u>	Energía (kN.m/m ³):	<u>2710</u>

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA

Probeta No	1	2	6	3	4	5
Recipiente No	7P	5P	34P	44P	40P	21P
P rec + P humedo (P1) g:	631.38	635.53	631.87	625.89	632.08	808.49
P rec + P seco (P2) g:	616.9	615.33	603.80	593.89	597.52	776.17
P recipiente (P3) g:	131.23	129.28	128.80	123.81	131.77	126.81
Contenido de agua (%)	2.98%	4.16%	5.91%	6.81%	7.42%	4.98%

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

Probeta No	1	2	6	3	4	5
Peso molde (g):	6799.0	6799.0	6771.0	6799.0	6771.0	6799.0
Peso molde + suelo (g)	12157.0	12610.0	12710.0	12830.0	12782.0	13003.0
Peso suelo humedo (g)	5358.0	5811.0	5939.0	6031.0	6011.0	6204.0
Densidad húmeda (kg/m ³)	2543.4	2758.4	2828.9	2862.8	2863.2	2944.9
Densidad seca (kg/m ³)	2469.7	2648.3	2671.0	2680.4	2665.4	2805.3



Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura ECSD 15.9
Ensayo Succión total con equipo WP4C

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN: 2.0 mm)

Tamaño de la muestra: Pasa tamiz No 10

Datos proceso de secado:

Muestra	Succión (MPa)	pF	Temperatura (°C)	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	w (%)	θ (%)	S (%)	Modelo	
										Succión (kPa)	θ (%)
1	0.03	2.48	24.9	38.004	36.810	24.173	9.448	22.496	77.770	30	23.660
2	0.3	3.49	24.9	38.089	37.040	24.377	8.284	19.724	68.185	300	19.764
3	2.24	4.37	24.6	37.869	37.202	24.544	5.269	12.546	43.372	2240	11.993
4	7.69	4.9	24.9	37.230	36.787	24.110	3.495	8.320	28.763	7690	8.267
5	5.36	4.74	24.9	37.762	37.277	24.586	3.822	9.099	31.455	5360	9.231
6	12.72	5.12	24.9	37.139	36.766	24.099	2.945	7.011	24.237	12720	7.082
7	35.76	5.76	24.8	37.085	36.832	24.135	1.993	4.744	16.401	35760	5.149
8	49.77	5.71	24.1	37.080	36.838	24.161	1.909	4.545	15.713	49770	4.649

θ _r	0.03	%
θ _s	24.00	%
e	0.41	-
n	1.35	-
l	0.5	-
α	0.01	-
m	0.3	-
	100	

Temperatura	20	°C
P3	24.5518	g
P2	50.7063	g
Altura de la muestra	0.973	cm
Diametro de la muestra	3.7	cm
Volumen de la muestra	10.46	cm ³
γ _h	25.00	kN/m ³
γ _s	33.5	kN/m ³
σ _{ini}	-	kPa

P1	27.351	g
P2	24.2578	g
P3	11.2065	g
w _i (%)	5.0	%
e ₀	0.41	-
n ₀	0.29	-
Si	41.15	%

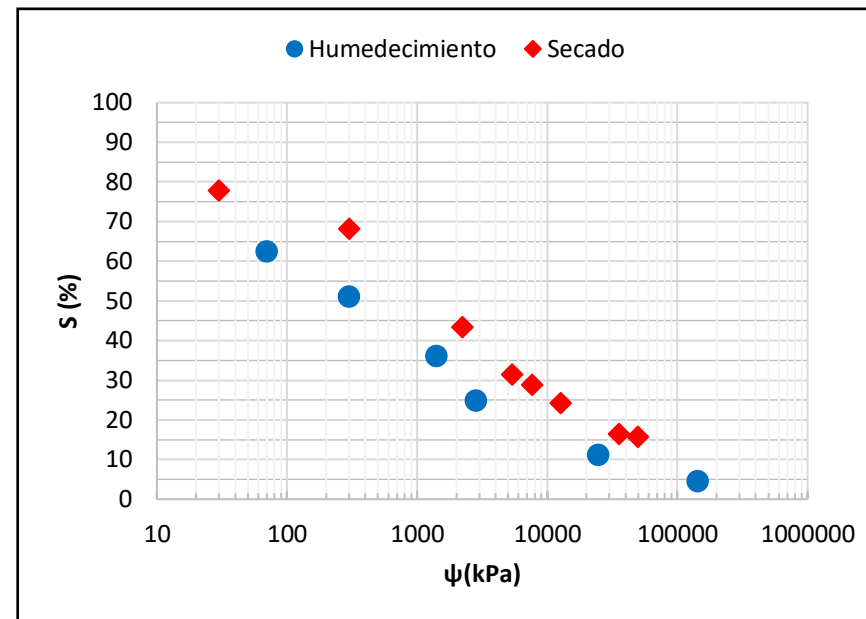
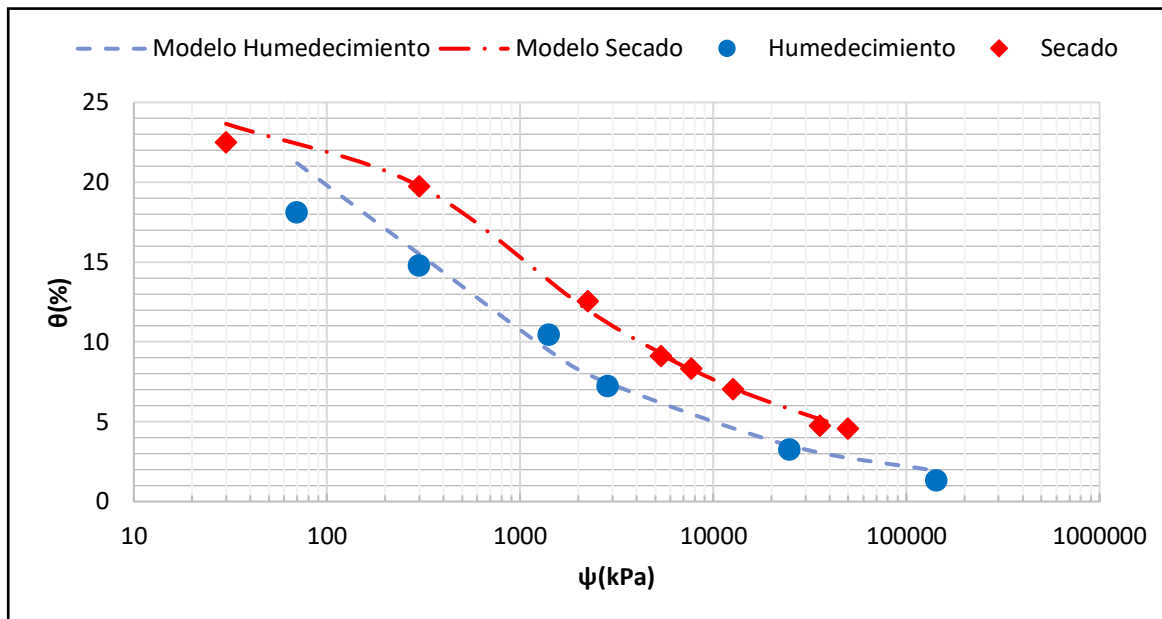
Datos proceso de humedecimiento:

Muestra	Succión (MPa)	pF	Temperatura (°C)	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	w (%)	θ (%)	S (%)	Modelo	
										Succión (kPa)	θ (%)
1	0.07	2.88	24.9	37.761	36.798	24.110	7.590	18.071	62.472	70	21.189
2	0.3	3.49	24.9	38.002	37.216	24.544	6.203	14.768	51.054	300	15.506
3	1.41	4.17	24.8	37.619	37.063	24.377	4.383	10.435	36.075	1410	9.456
4	2.86	4.47	24.9	37.206	36.824	24.173	3.020	7.189	24.854	2860	7.421
5	24.88	5.41	24.9	36.899	36.729	24.145	1.351	3.216	11.119	24880	3.506
6	143.39	6.17	24.9	37.211	37.142	24.520	0.547	1.302	4.500	143390	1.913

θ _r	0.03	%
θ _s	24.00	%
e	0.41	-
n	1.311	-
l	0.5	-
α	0.004	-
m	0.2	-
	250	

Temperatura	20	°C
P3	24.5518	g
P2	50.7063	g
Altura de la muestra	0.973	cm
Diametro de la muestra	3.7	cm
Volumen de la muestra	10.46	cm ³
γ _h	25.00	kN/m ³
γ _s	33.5	kN/m ³
σ _{ini}	-	kPa

P1	27.351	g
P2	24.2578	g
P3	11.2065	g
w _i (%)	5.0	%
e ₀	0.41	-
n ₀	0.29	-
Si	41.15	%



Laboratorio de Geotecnia - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura ECSD 15.9
Ensayo Permeabilidad de suelos granulares (Cabeza variable)

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN: 12.5mm) **Tamaño de la muestra:** Pasa tamiz 3/4",

Datos:

Golpes/capa:	<u>25</u>	No de capas:	<u>3</u>	Peso martillo (kg):	<u>2.50</u>
Diam. Molde (m):	<u>0.10</u>	Altura molde (m):	<u>0.1</u>	Volumen molde (m ³):	<u>0.00094</u>
		Altura caída (m):	<u>0.305</u>	Energía (kN.m/m ³):	<u>595</u>

**DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA
COMPACTACIÓN DE LA MUESTRA**

Recipiente No	P1
P rec + P humedo (P1) g:	301.31
P rec + P seco (P2) g:	290.17
P recipiente (P3) g:	36.2
Contenido de agua (%)	4.4

**DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD
LUEGO DE COMPACTACIÓN**

Peso molde (g):	3033.6
Peso molde + suelo (g)	5197.2
Peso suelo humedo (g)	2163.6
Densidad húmeda (kg/m ³)	2296.6
Densidad seca (kg/m ³)	2200.1

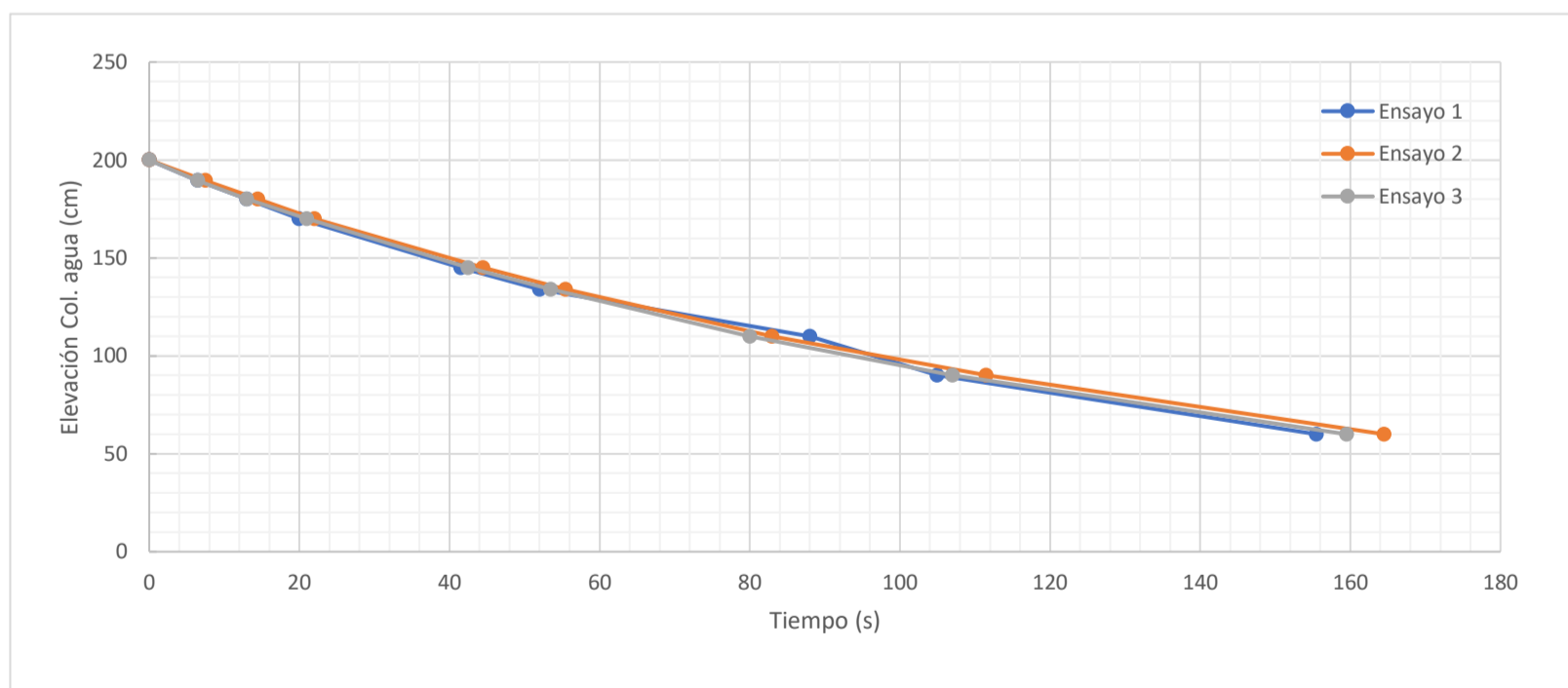
Cálculo de Coeficiente de permeabilidad (K):

Área de la muestra (cm ²)	81.07
Altura de la muestra (cm)	9.12

Área del tubo capilar (cm ²)	0.64
Temperatura del agua (°C)	18.00

Altura total (m)	Tiempo (s)				K (cm/seg)	K Corregido (cm/seg)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio		
2.000	0	0	0	0.0		
1.895	6.5	7.5	6.5	6.8	0.000565	0.000594
1.800	13	14.5	13	13.5	0.000552	0.000580
1.700	20	22	21	21.0	0.000545	0.000573
1.450	41.5	44.5	42.5	42.8	0.000521	0.000548
1.340	52	55.5	53.5	53.7	0.000521	0.000548
1.100	88	83	80	83.7	0.000471	0.000495
0.900	105	111.5	107	107.8	0.000594	0.000625
0.600	155.5	164.5	159.5	159.8	0.000558	0.000586

K promedio (cm/seg)
0.000569



Laboratorio de Geotecnia - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura ECSD 15.9
Ensayo CBR de suelos compactador en el laboratorio y sobre muestra inalterada INV-E-148

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN: 12.5mm) **Tamaño de la muestra:** Pasa tamiz 3/4",

Datos:

Golpes/capa:	<u>12</u>	No de capas:	<u>5</u>	Peso martillo (kg):	<u>4.5455</u>
Diam. Molde (m):	<u>0.15</u>	Altura molde (m):	<u>0.1</u>	Volumen molde (m ³):	<u>0.00211</u>
		Altura caída (m):	<u>0.457</u>	Energía (kN.m/m ³):	<u>579</u>

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA		
	INICIAL	FINAL
Recipiente No	P1	13
P rec + P humedo (P1) g:	544.39	672.11
P rec + P seco (P2) g:	519.07	623.56
P recipiente (P3) g:	36.12	83.66
Contenido de agua (%)	5.24	8.99

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD		
	INICIAL	FINAL
Peso molde (g):	9942.0	6980.0
Peso molde + suelo (g)	15105.0	12388.0
Peso suelo humedo (g)	5163.0	5408.0
Densidad húmeda (kg/m3)	2444.1	2560.0
Densidad seca (kg/m3)	2322.3	2348.8

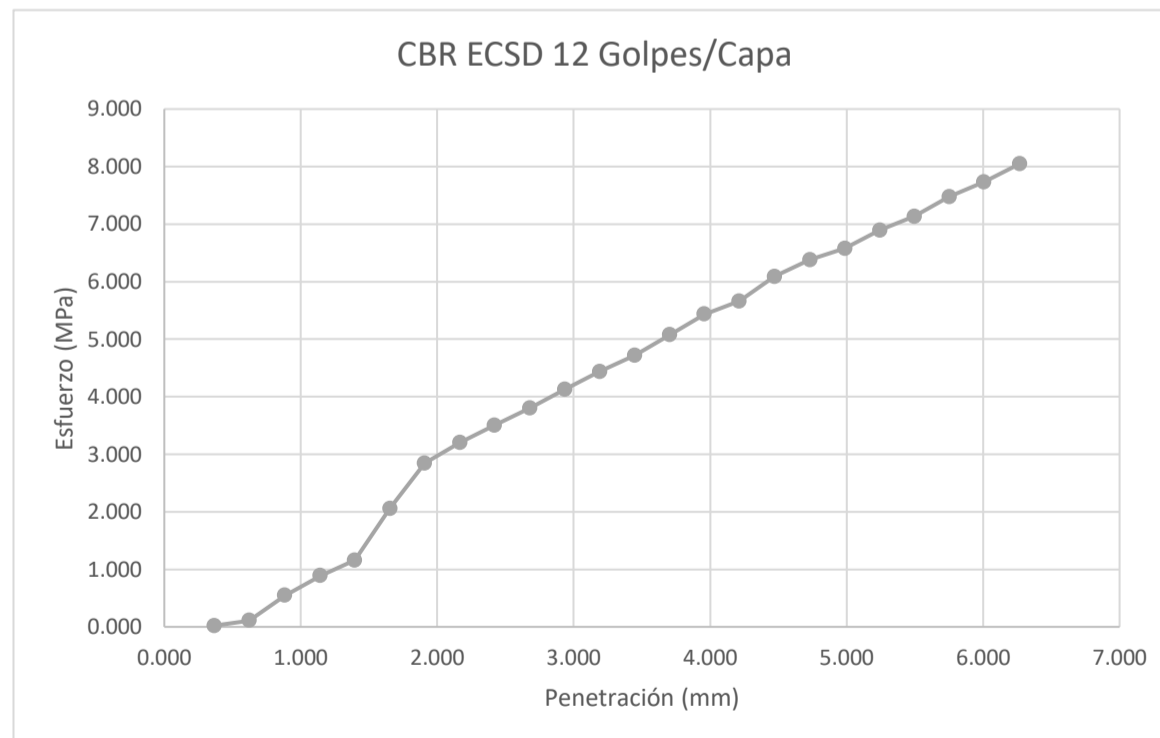
DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE EXPANSIÓN		
	INICIAL	FINAL
Fecha	14/10/2021	14/10/2021
Hora	11:30	11:30
Lectura Deformimetro (mm)	8.0518	8.0772
Tiempo total de Inmersión (h)	96	
Expansión por Inmersión (%)	0.0225	

REGISTRO CURVA ESFUERZO - PENETRACIÓN

Penetración(mm)	Esfuerzo (MPa)
0.366	0.023
0.622	0.111
0.884	0.546
1.143	0.889
1.396	1.156
1.654	2.061
1.907	2.847
2.167	3.202
2.421	3.507
2.679	3.805
2.936	4.129
3.191	4.438
3.449	4.721
3.703	5.076
3.958	5.434
4.215	5.663
4.472	6.091
4.731	6.381
4.988	6.579
5.244	6.896
5.496	7.136
5.753	7.476
6.007	7.732
6.268	8.048

Sobrecarga (kg)	5316
-----------------	------

CBR 0.1"	56.52
CBR 0.2"	59.22



Laboratorio de Geotecnia - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura ECSD 15.9
Ensayo CBR de suelos compactador en el laboratorio y sobre muestra inalterada INV-E-148

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN: 12.5mm) **Tamaño de la muestra:** Pasa tamiz 3/4",

Datos:

Golpes/capa:	<u>25</u>	No de capas:	<u>5</u>	Peso martillo (kg):	<u>4.5455</u>
Diam. Molde (m):	<u>0.15</u>	Altura molde (m):	<u>0.1</u>	Volumen molde (m ³):	<u>0.00215</u>
		Altura caída (m):	<u>0.457</u>	Energía (kN.m/m ³):	<u>1184</u>

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA		
	INICIAL	FINAL
Recipiente No	11	26P
P rec + P humedo (P1) g:	529.49	762.85
P rec + P seco (P2) g:	507.33	728.26
P recipiente (P3) g:	36.75	133.61
Contenido de agua (%)	4.71	5.82

REGISTRO CURVA ESFUERZO - PENETRACIÓN

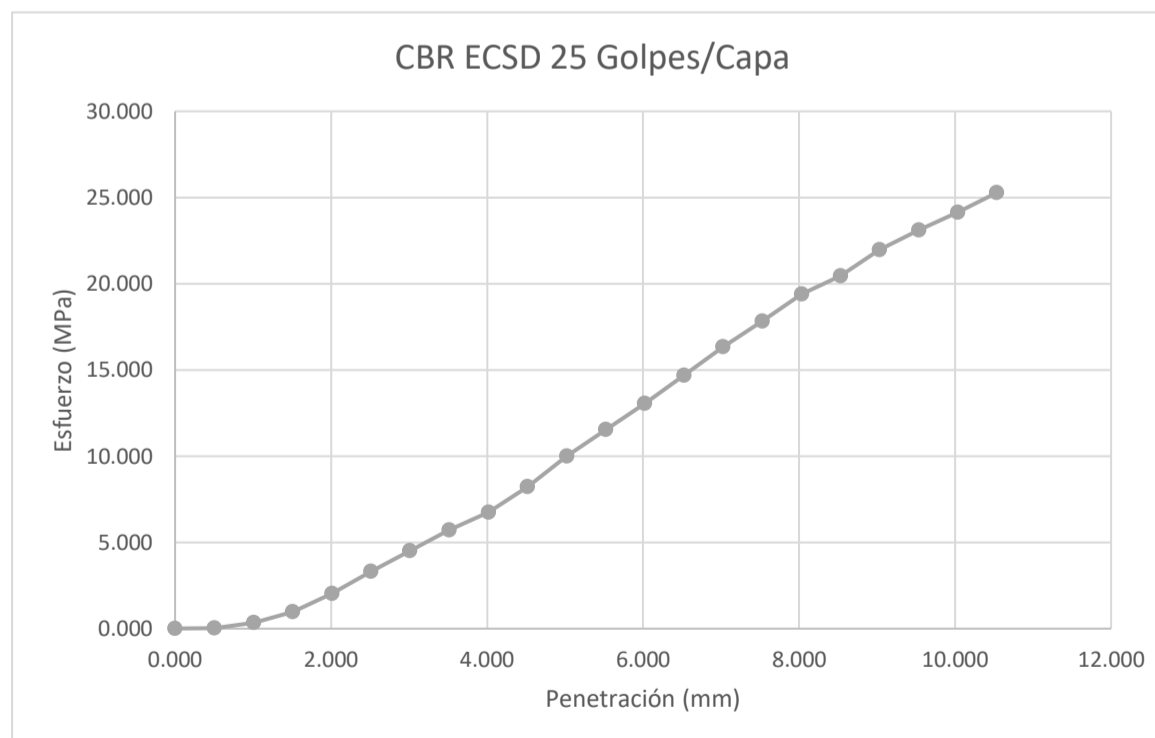
Penetración(mm)	Esfuerzo (MPa)
0.000	0.008
0.505	0.023
1.009	0.347
1.510	0.969
2.010	2.034
2.512	3.309
3.011	4.511
3.513	5.709
4.018	6.736
4.521	8.216
5.022	10.002
5.524	11.533
6.023	13.044
6.523	14.673
7.026	16.326
7.529	17.829
8.032	19.383
8.530	20.444
9.031	21.970
9.534	23.100
10.034	24.134
10.536	25.283

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD		
	INICIAL	FINAL
Peso molde (g):	8871.0	7537.0
Peso molde + suelo (g)	14302.0	13146.0
Peso suelo humedo (g)	5431.0	5609.0
Densidad húmeda (kg/m3)	2524.3	2607.0
Densidad seca (kg/m3)	2410.8	2463.7

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE EXPANSIÓN		
	INICIAL	FINAL
Fecha	12/10/2021	16/10/2021
Hora	13:30	14:00
Lectura Deformimetro (mm)	8.2042	8.2423
Tiempo total de Inmersión (h)	96.5	
Expansión por Inmersión (%)	0.0329	

Sobrecarga (kg)	5317
-----------------	------

CBR 0.1"	108.70
CBR 0.2"	148.54



Laboratorio de Geotecnia - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura ECSD 15.9
Ensayo CBR de suelos compactador en el laboratorio y sobre muestra inalterada INV-E-148

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN: 12.5mm) **Tamaño de la muestra:** Pasa tamiz 3/4",

Datos:

Golpes/capa:	<u>56</u>	No de capas:	<u>5</u>	Peso martillo (kg):	<u>4.5455</u>
Diam. Molde (m):	<u>0.16</u>	Altura molde (m):	<u>0.1</u>	Volumen molde (m ³):	<u>0.00217</u>
		Altura caída (m):	<u>0.457</u>	Energía (kN.m/m ³):	<u>2631</u>

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA		
	INICIAL	FINAL
Recipiente No	3	JG-09
P rec + P humedo (P1) g:	558.48	582.99
P rec + P seco (P2) g:	532.91	550.28
P recipiente (P3) g:	45.92	88.43
Contenido de agua (%)	5.25	7.08

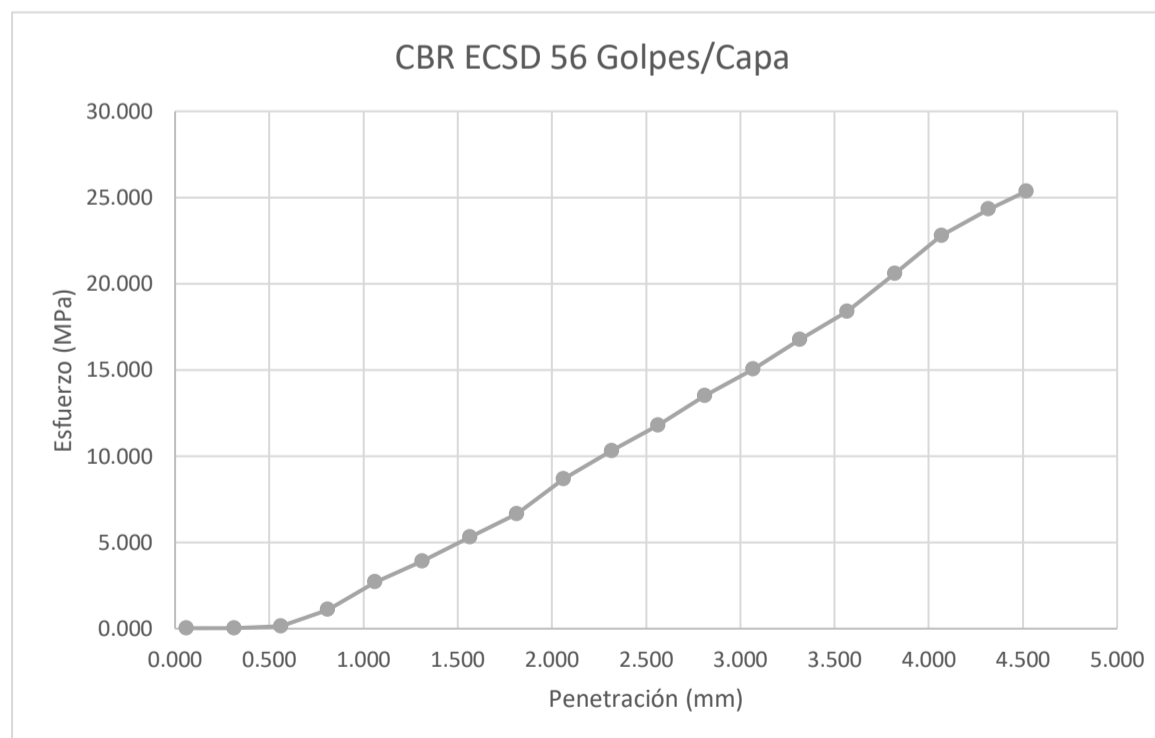
REGISTRO CURVA ESFUERZO - PENETRACIÓN	
Penetración(mm)	Esfuerzo (MPa)
0.061	0.027
0.312	0.031
0.561	0.141
0.811	1.095
1.061	2.698
1.313	3.912
1.564	5.308
1.813	6.644
2.063	8.678
2.317	10.315
2.563	11.804
2.812	13.513
3.067	15.036
3.316	16.772
3.566	18.402
3.821	20.600
4.067	22.791
4.318	24.321
4.517	25.355

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD		
	INICIAL	FINAL
Peso molde (g):	10720.0	7758.0
Peso molde + suelo (g)	16973.0	14189.0
Peso suelo humedo (g)	6253.0	6431.0
Densidad húmeda (kg/m3)	2882.4	2964.4
Densidad seca (kg/m3)	2738.6	2768.4

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE EXPANSIÓN		
	INICIAL	FINAL
Fecha	12/10/2021	16/10/2021
Hora	13:30	14:00
Lectura Deformimetro (mm)	10.287	10.3378
Tiempo total de Inmersión (h)		96.5
Expansión por Inmersión (%)		0.0443

Sobrecarga (kg)	5.344
-----------------	-------

CBR 0.1"	231.88
CBR 0.2"	330.10



Laboratorio de Geotecnia - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura ECSD 15.9
Ensayo CBR de suelos compactador en el laboratorio y sobre muestra inalterada INV-E-148

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN: 12.5mm) **Tamaño de la muestra:** Pasa tamiz 3/4",
Datos:

Golpes/capa:	<u>12</u>	No de capas:	<u>5</u>	Peso martillo (kg):	<u>4.5455</u>
Diam. Molde (m):	<u>0.15</u>	Altura molde (m):	<u>0.1</u>	Volumen molde (m ³):	<u>0.00211</u>
		Altura caída (m):	<u>0.457</u>	Energía (kN.m/m ³):	<u>579</u>

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA		
	INICIAL	FINAL
Recipiente No	P1	
P rec + P humedo (P1) g:	544.39	
P rec + P seco (P2) g:	519.07	
P recipiente (P3) g:	36.12	
Contenido de agua (%)	5.24	

REGISTRO CURVA ESFUERZO - PENETRACIÓN

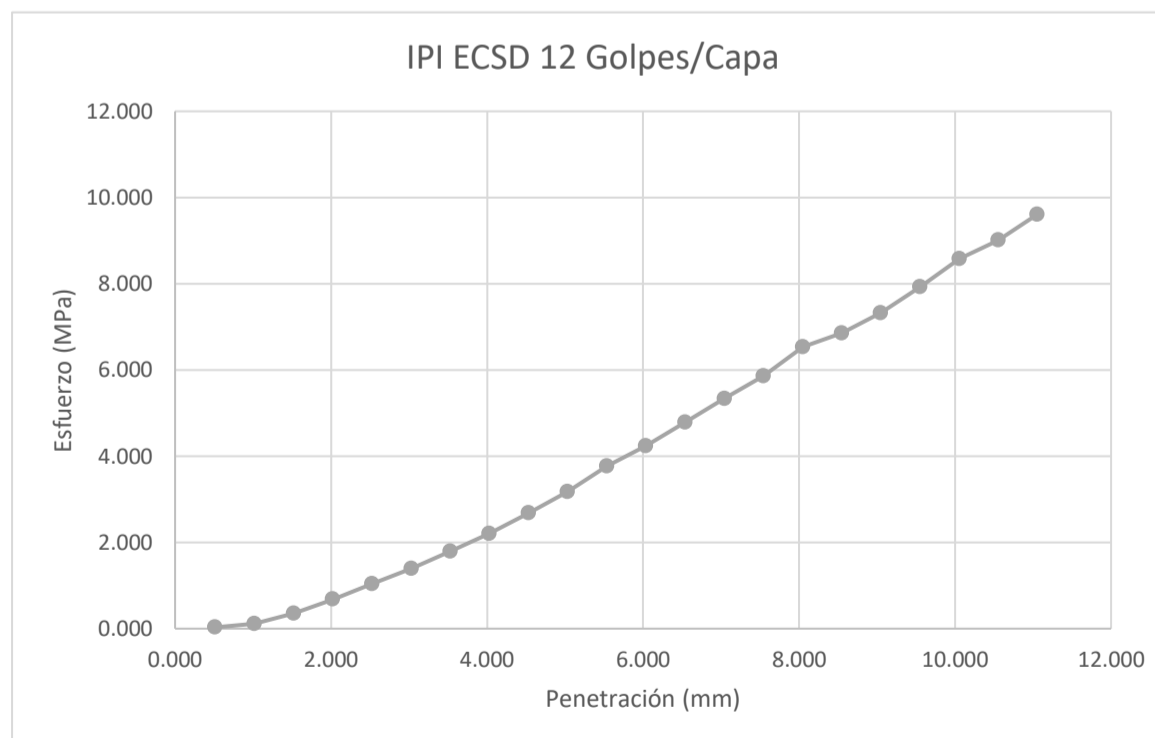
Penetración(mm)	Esfuerzo (MPa)
0.511	0.031
1.017	0.111
1.522	0.351
2.022	0.679
2.524	1.034
3.029	1.397
3.531	1.790
4.028	2.206
4.530	2.679
5.032	3.179
5.537	3.770
6.036	4.236
6.541	4.786
7.042	5.335
7.543	5.858
8.047	6.533
8.547	6.854
9.045	7.323
9.547	7.923
10.055	8.583
10.553	9.006
11.055	9.609

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD		
	INICIAL	FINAL
Peso molde (g):	9942.0	
Peso molde + suelo (g)	15105.0	
Peso suelo humedo (g)	5163.0	
Densidad húmeda (kg/m3)	2444.1	
Densidad seca (kg/m3)	2322.3	

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE EXPANSIÓN		
	INICIAL	FINAL
Fecha		
Hora		
Lectura Deformimetro (mm)		
Tiempo total de Inmersión (h)		
Expansión por Inmersión (%)		

Sobrecarga (kg)	0
-----------------	---

IPI 0.1"	40.58
IPI 0.2"	55.34



Laboratorio de Geotecnia - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura ECSD 15.9
Ensayo CBR de suelos compactador en el laboratorio y sobre muestra inalterada INV-E-148

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN: 12.5mm) **Tamaño de la muestra:** Pasa tamiz 3/4",

Datos:

Golpes/capa:	<u>25</u>	No de capas:	<u>5</u>	Peso martillo (kg):	<u>4.5455</u>
Diam. Molde (m):	<u>0.15</u>	Altura molde (m):	<u>0.1</u>	Volumen molde (m ³):	<u>0.00215</u>
		Altura caída (m):	<u>0.457</u>	Energía (kN.m/m ³):	<u>1184</u>

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA		
	INICIAL	FINAL
Recipiente No	11	
P rec + P humedo (P1) g:	529.49	
P rec + P seco (P2) g:	507.33	
P recipiente (P3) g:	36.75	
Contenido de agua (%)	4.71	

REGISTRO CURVA ESFUERZO - PENETRACIÓN

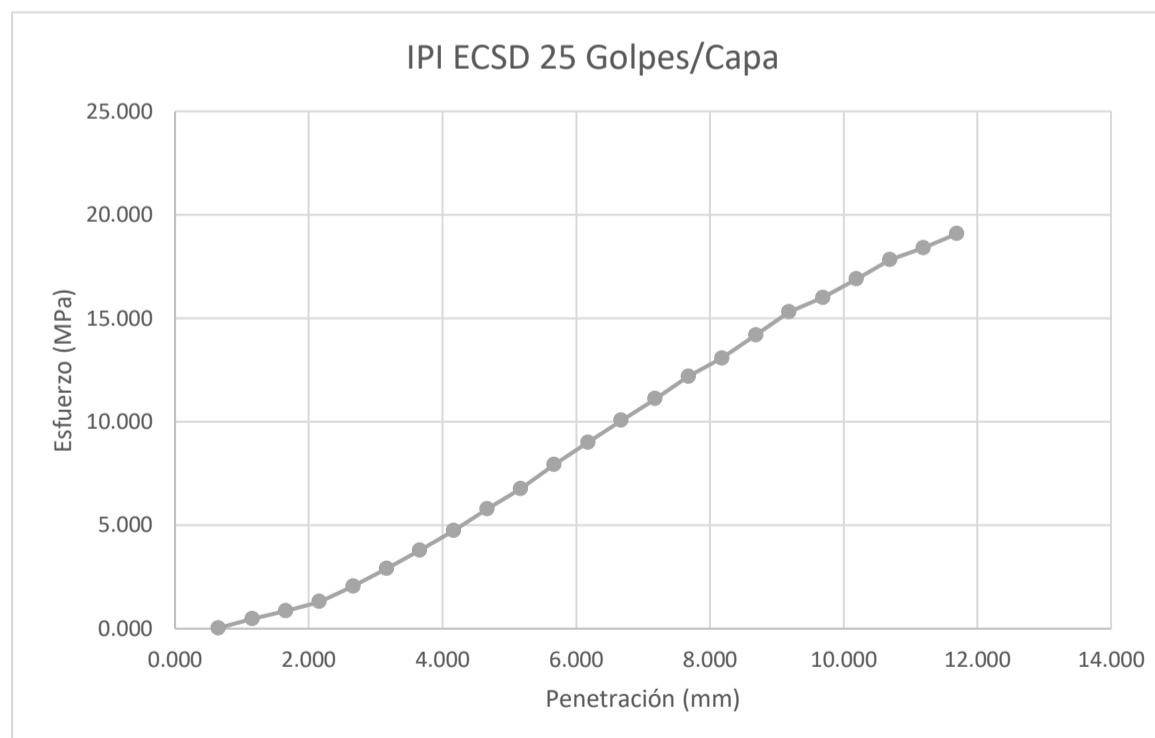
Penetración(mm)	Esfuerzo (MPa)
0.650	0.031
1.157	0.477
1.655	0.855
2.157	1.294
2.662	2.042
3.166	2.900
3.661	3.782
4.169	4.732
4.669	5.778
5.168	6.766
5.672	7.919
6.175	8.999
6.673	10.052
7.179	11.101
7.677	12.185
8.179	13.063
8.687	14.189
9.185	15.311
9.687	15.990
10.188	16.887
10.694	17.833
11.195	18.390
11.691	19.081

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD		
	INICIAL	FINAL
Peso molde (g):	8871.0	
Peso molde + suelo (g)	14302.0	
Peso suelo humedo (g)	5431.0	
Densidad húmeda (kg/m3)	2524.3	
Densidad seca (kg/m3)	2410.8	

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE EXPANSIÓN		
	INICIAL	FINAL
Fecha		
Hora		
Lectura Deformimetro (mm)		
Tiempo total de Inmersión (h)		
Expansión por Inmersión (%)		

Sobrecarga (kg)	0
-----------------	---

IPI 0.1"	73.91
IPI 0.2"	98.06



Laboratorio de Geotecnia - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)

Nomenclatura ECSD 15.9

Ensayo Ensayo para la determinación de CBR, IPI y Expansión - EN 13486-47

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN: 12.5mm)

Tamaño de la muestra: Pasa tamiz 3/4",

Datos:

Golpes/capa:	<u>56</u>	No de capas:	<u>5</u>	Peso martillo (kg):	<u>4.5455</u>
Diam. Molde (m):	<u>0.16</u>	Altura molde (m):	<u>0.1</u>	Volumen molde (m ³):	<u>0.00217</u>
		Altura caída (m):	<u>0.457</u>	Energía (kJ.m ³):	<u>2631</u>

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA		
	INICIAL	FINAL
Recipiente No	3	
P rec + P humedo (P1) g:	558.48	
P rec + P seco (P2) g:	532.91	
P recipiente (P3) g:	45.92	
Contenido de agua (%)	5.25	

REGISTRO CURVA ESFUERZO - PENETRACIÓN

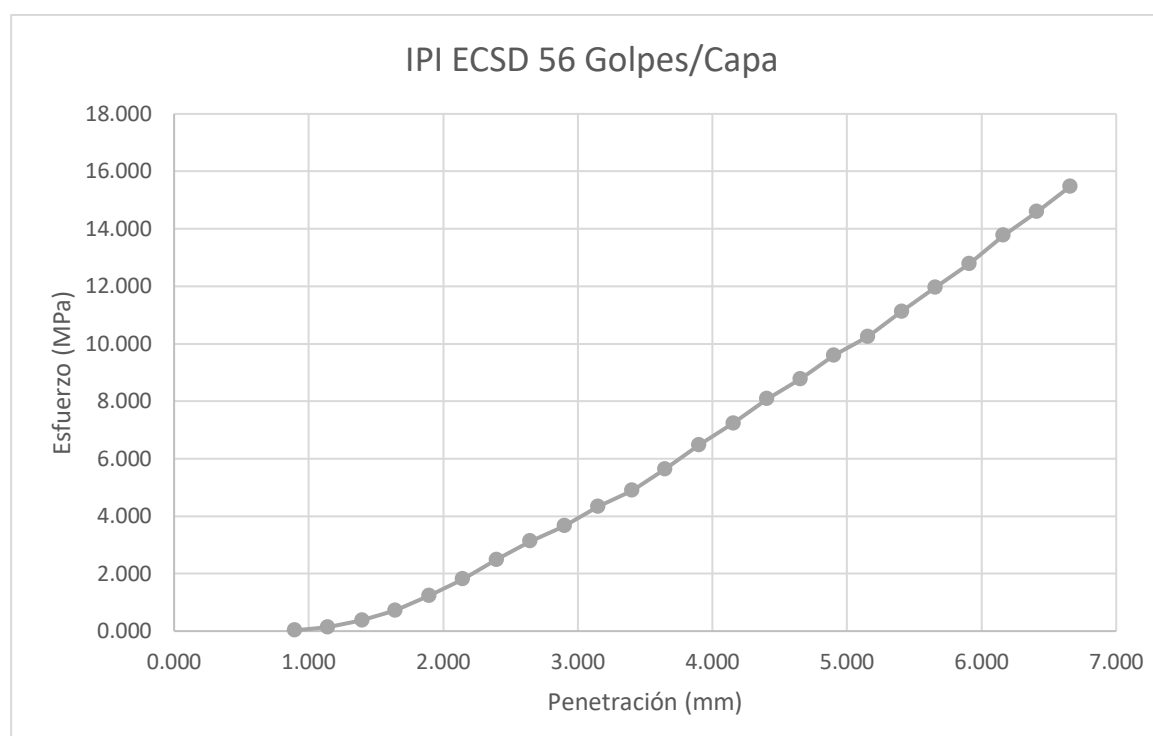
Penetración(mm)	Esfuerzo (MPa)
0.895	0.027
1.141	0.141
1.396	0.382
1.643	0.714
1.894	1.233
2.144	1.805
2.395	2.477
2.645	3.126
2.899	3.656
3.150	4.331
3.402	4.892
3.648	5.640
3.900	6.480
4.154	7.224
4.406	8.079
4.654	8.777
4.903	9.594
5.156	10.243
5.406	11.117
5.657	11.956
5.908	12.788
6.160	13.769
6.410	14.593
6.658	15.475

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD		
	INICIAL	FINAL
Peso molde (g):	10720.0	
Peso molde + suelo (g)	16973.0	
Peso suelo humedo (g)	6253.0	
Densidad húmeda (kg/m3)	2882.4	
Densidad seca (kg/m3)	2738.6	

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE EXPANSIÓN		
	INICIAL	FINAL
Fecha		
Hora		
Lectura Deformimetro (mm)		
Tiempo total de Inmersión (h)		
Expansión por Inmersión (%)		

Sobrecarga (kg)	0
-----------------	---

IPI 0.1"	118.84
IPI 0.2"	163.11



Laboratorio de Estructuras - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura LE-R0C0-CS-(3d)
Ensayo Resistencia en compresión simple INV-E-614

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) **Edad Curado:** 3 días
Datos:

ID	LE-R0C0-CS-1 (3d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	526.62
Diametro Superior (mm)	50.43
	50.40
	50.00
	50.22
Diametro Medio (mm)	50.46
	50.42
	50.56
Diametro Inferior (mm)	50.62
	50.44
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	103.41
	102.22
	102.11
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2573.83
Contenido de Agua	
P1 (g)	562.97
P2 (g)	539.7
P3 (g)	57.04
Recip	55X
w (%)	4.82

ID	LE-R0C0-CS-2 (3d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	527.82
Diametro Superior (mm)	50.56
	50.66
	50.72
	50.72
Diametro Medio (mm)	50.52
	50.50
	50.56
Diametro Inferior (mm)	50.44
	50.62
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.07
	101.98
	101.80
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2575.72
Contenido de Agua	
P1 (g)	589.54
P2 (g)	564.93
P3 (g)	63.02
Recip	8A
w (%)	4.90

ID	LE-R0C0-CS-3 (3d)
Muestra	3
Peso probeta (g)	524.96
Diametro Superior (mm)	51.16
	51.32
	50.98
	50.40
Diametro Medio (mm)	50.39
	50.55
	50.60
Diametro Inferior (mm)	50.53
	51.00
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.95
	103.67
	103.60
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2507.69
Contenido de Agua	
P1 (g)	586.07
P2 (g)	562.3
P3 (g)	64.04
Recip	10A
w (%)	4.77

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.08	17.63
0.16	41.66
0.24	61.64
0.32	87.22
0.41	115.92
0.49	147.88
0.57	180.24
0.65	213.95
0.73	249.88
0.81	289.13
0.89	330.30
0.97	368.89
1.06	411.18
1.14	451.03
1.22	488.03
1.29	513.94
1.30	516.71
1.32	522.81
1.32	526.05
1.37	540.41
1.38	542.30
1.45	557.35
1.46	561.62
1.52	573.10
1.54	574.39
1.59	577.92
1.62	577.09
1.71	572.32
1.79	548.07
1.87	521.10
1.95	478.96
2.03	431.82
2.09	393.56
2.11	377.52
2.19	317.31
2.27	263.15
2.36	211.12
2.43	161.86

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.08	28.03
0.16	58.76
0.25	87.99
0.33	118.24
0.41	149.75
0.49	181.08
0.57	213.07
0.65	245.00
0.74	279.24
0.82	314.29
0.90	348.37
0.98	384.32
1.06	414.52
1.14	437.80
1.23	453.22
1.30	463.07
1.31	463.89
1.32	464.99
1.33	465.30
1.38	463.76
1.39	461.97
1.45	450.36
1.47	446.74
1.53	430.17
1.55	422.93
1.60	404.37
1.63	391.93

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.08	14.50
0.16	24.07
0.24	34.27
0.32	42.28
0.40	54.23
0.48	67.25
0.56	76.12
0.64	90.62
0.73	101.96
0.81	114.01
0.89	125.22
0.97	131.82
1.05	144.58
1.13	156.20
1.21	167.04
1.28	178.78
1.29	180.14
1.31	183.29
1.31	184.46
1.36	191.11
1.37	192.19
1.43	202.44
1.45	205.27
1.51	212.60
1.53	215.54
1.58	220.81
1.61	225.01
1.69	237.22
1.77	246.79
1.85	252.39
1.93	252.74
2.01	253.68
2.07	254.28
2.10	253.71
2.18	240.64
2.26	221.55
2.34	201.95
2.42	182.08
2.50	163.87

Resultados:

γ_d (kg/m ³)	2455.45
P_{max} (kN)	0.99
R_c (MPa)	0.58

γ_d (kg/m ³)	2455.33
P_{max} (kN)	0.95
R_c (MPa)	0.47

γ_d (kg/m ³)	2393.50
P_{max} (kN)	0.53
R_c (MPa)	0.25

Laboratorio de Estructuras - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%)
Nomenclatura LE-R.02C2-CS-(3d)
Ensayo Resistencia en compresión simple INV-E-614

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%) **Edad Curado:** 3 días
Datos:

ID	LE-R.02C2-CS-1 (3d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	530.40
	50.48
Diametro Superior (mm)	50.40
	50.80
	50.45
Diametro Medio (mm)	50.45
	50.65
	50.61
Diametro Inferior (mm)	50.86
	50.68
Diametro Prom (m)	0.05
	102.49
Altura (mm)	102.71
	102.48
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2572.01
Contenido de Agua	
P1 (g)	590.98
P2 (g)	563.38
P3 (g)	61.14
Recip	66B
w (%)	5.50

ID	LE-R.02C2-CS-2 (3d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	530.36
	50.64
Diametro Superior (mm)	50.84
	50.62
	50.53
Diametro Medio (mm)	50.58
	50.63
	50.80
Diametro Inferior (mm)	50.18
	50.52
Diametro Prom (m)	0.05
	102.64
Altura (mm)	102.38
	108.72
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2522.58
Contenido de Agua	
P1 (g)	592.66
P2 (g)	565.88
P3 (g)	63.02
Recip	0.6
w (%)	5.33

ID	LE-R.02C2-CS-3 (3d)
Muestra	3
Peso probeta (g)	529.27
	50.49
Diametro Superior (mm)	50.47
	50.74
	50.48
Diametro Medio (mm)	50.72
	50.98
	50.57
Diametro Inferior (mm)	50.38
	50.64
Diametro Prom (m)	0.05
	102.43
Altura (mm)	102.55
	102.60
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2566.35
Contenido de Agua	
P1 (g)	591.98
P2 (g)	566.05
P3 (g)	63.15
Recip	NN
w (%)	5.16

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.08	128.80
0.16	266.42
0.24	381.83
0.33	484.57
0.41	571.52
0.49	651.32
0.57	729.17
0.65	803.64
0.73	880.41
0.81	956.17
0.89	1029.32
0.98	1099.40
1.06	1164.60
1.14	1219.90
1.22	1257.33
1.29	1280.73
1.30	1282.29
1.32	1284.91
1.32	1284.83
1.37	1287.49
1.38	1287.13

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.08	68.37
0.16	146.66
0.24	229.89
0.32	322.37
0.40	408.89
0.48	478.95
0.56	543.50
0.64	607.00
0.72	668.61
0.80	730.48
0.88	792.31
0.96	854.25
1.04	916.63
1.12	976.52
1.20	1033.92
1.27	1079.16
1.27	1083.92
1.29	1092.78
1.30	1097.10
1.35	1120.05
1.35	1124.31
1.42	1146.97
1.43	1151.86
1.49	1165.42
1.51	1167.97
1.56	1176.44
1.59	1178.30
1.67	1169.83
1.75	1136.69
1.83	1065.31
1.91	975.12

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.08	79.71
0.16	175.05
0.24	286.92
0.33	384.99
0.41	469.03
0.49	546.05
0.57	618.30
0.65	692.55
0.73	765.02
0.81	836.70
0.89	909.36
0.98	979.18
1.06	1046.16
1.14	1100.96
1.22	1145.66
1.29	1164.45
1.30	1165.22
1.32	1165.31
1.32	1164.39
1.37	1161.50
1.38	1160.75
1.45	1139.77
1.46	1131.22

Resultados:

γ_d (kg/m³)	2438.03
P_{max} (kN)	2.62
R_c (MPa)	1.29

γ_d (kg/m³)	2395.04
P_{max} (kN)	2.41
R_c (MPa)	1.18

γ_d (kg/m³)	2440.52
P_{max} (kN)	2.38
R_c (MPa)	1.17

Laboratorio de Estructuras - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (6%) + Aditivo(0.06%)
Nomenclatura LE-R.06C6-CS-(3d)
Ensayo Resistencia en compresión simple INV-E-614

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (6%) + Aditivo(0.06%) **Edad Curado:** 3 días
Datos:

ID	LE-R.06C6-CS-1 (3d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	530.49
Diametro Superior (mm)	50.68
	50.71
	50.44
Diametro Medio (mm)	50.68
	50.64
	50.40
Diametro Inferior (mm)	50.76
	50.77
	50.58
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.36
	102.56
	102.72
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2569.62
Contenido de Agua	
P1 (g)	590.12
P2 (g)	561.72
P3 (g)	60.21
Recip	45
w (%)	5.66

ID	LE-R.06C6-CS-2 (3d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	530.12
Diametro Superior (mm)	50.48
	50.56
	50.52
Diametro Medio (mm)	50.32
	50.48
	50.65
Diametro Inferior (mm)	50.43
	50.59
	50.64
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.74
	102.85
	102.90
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2571.92
Contenido de Agua	
P1 (g)	591.69
P2 (g)	566.09
P3 (g)	62.26
Recip	3011
w (%)	5.08

ID	LE-R.06C6-CS-3 (3d)
Muestra	3
Peso probeta (g)	530.27
Diametro Superior (mm)	50.30
	50.69
	50.57
Diametro Medio (mm)	50.74
	50.72
	50.56
Diametro Inferior (mm)	50.73
	50.62
	50.67
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.58
	102.82
	102.91
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2563.65
Contenido de Agua	
P1 (g)	589.34
P2 (g)	565.18
P3 (g)	60.23
Recip	0.0674
w (%)	4.78

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.08	120.34
0.16	289.02
0.24	484.44
0.33	710.62
0.41	943.56
0.49	1165.70
0.57	1391.15
0.65	1606.48
0.73	1808.15
0.81	2008.54
0.89	2179.23
0.98	2335.75
1.06	2475.94
1.14	2578.55
1.22	2642.08
1.29	2667.23
1.30	2666.56
1.32	2664.44
1.32	2663.68
1.37	2645.92
1.38	2643.41
1.45	2602.55
1.46	2590.54
1.52	2540.21
1.54	2506.67
1.59	2437.95
1.63	2391.57

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.08	103.81
0.16	228.03
0.24	380.80
0.32	572.83
0.41	758.42
0.49	932.92
0.57	1100.00
0.65	1263.11
0.73	1421.35
0.81	1578.74
0.89	1727.59
0.97	1865.09
1.05	1994.46
1.13	2108.23
1.22	2207.06
1.29	2283.61
1.30	2291.01
1.31	2302.54
1.32	2306.98
1.37	2330.77
1.38	2334.05
1.44	2352.61
1.46	2351.76
1.52	2339.08
1.54	2313.46
1.59	2255.24
1.62	2193.82

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.08	134.13
0.16	292.29
0.24	458.40
0.32	644.93
0.41	831.44
0.49	1008.67
0.57	1185.03
0.65	1357.95
0.73	1526.36
0.81	1686.30
0.89	1845.49
0.97	1996.18
1.05	2133.27
1.14	2258.92
1.22	2365.98
1.29	2443.63
1.30	2451.22
1.31	2464.99
1.32	2470.54
1.37	2512.66
1.38	2519.11
1.44	2533.18
1.46	2535.73
1.52	2546.33
1.54	2542.93
1.59	2500.06
1.62	2460.00
1.70	2309.08
1.78	2082.09

Resultados:

γ_d (kg/m³)	2431.90
P_{max} (kN)	5.44
R_c (MPa)	2.67

γ_d (kg/m³)	2447.55
P_{max} (kN)	4.78
R_c (MPa)	2.35

γ_d (kg/m³)	2446.59
P_{max} (kN)	5.20
R_c (MPa)	2.55

Laboratorio de Estructuras - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura LE-R0C0-CS-(28d)
Ensayo Resistencia en compresión simple INV-E-614

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) **Edad Curado:** 28 días
Datos:

ID	LE-R0C0-CS-1 (28d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	522.50
Diametro Superior (mm)	50.58
	50.47
	50.70
Diametro Medio (mm)	50.39
	50.30
	50.62
Diametro Inferior (mm)	50.56
	50.61
	50.78
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.92
	102.41
	102.46
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2536.92
Contenido de Agua	
P1 (g)	586.31
P2 (g)	566.32
P3 (g)	64.32
Recip	JP1
w (%)	3.98

ID	LE-R0C0-CS-2 (28d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	521.77
Diametro Superior (mm)	50.54
	50.77
	50.52
Diametro Medio (mm)	50.55
	50.44
	50.54
Diametro Inferior (mm)	50.56
	50.46
	50.82
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.91
	102.38
	102.66
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2529.94
Contenido de Agua	
P1 (g)	581.44
P2 (g)	562.69
P3 (g)	60.23
Recip	602
w (%)	3.73

ID	LE-R0C0-CS-3 (28d)
Muestra	3
Peso probeta (g)	521.71
Diametro Superior (mm)	50.39
	50.48
	50.44
Diametro Medio (mm)	50.63
	50.68
	50.48
Diametro Inferior (mm)	50.67
	50.71
	50.70
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.41
	102.28
	102.61
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2535.23
Contenido de Agua	
P1 (g)	585.6
P2 (g)	567.41
P3 (g)	64.48
Recip	10A
w (%)	3.62

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.05	170.03
0.10	382.54
0.15	634.26
0.19	946.63
0.24	1255.03
0.29	1579.02
0.34	1900.18
0.39	2210.38
0.44	2462.47
0.49	2697.70
0.54	2913.29
0.58	3075.73
0.63	3154.64
0.68	3206.34
0.73	3208.49
0.78	3220.68
0.80	3223.81
0.83	3218.89
0.88	3164.71
0.93	3007.62
0.97	2835.20
1.01	2744.79
1.02	2704.81

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.05	92.07
0.10	195.80
0.15	308.73
0.19	440.38
0.24	597.56
0.29	771.90
0.34	965.45
0.39	1169.37
0.44	1387.83
0.49	1606.80
0.54	1812.85
0.58	1999.75
0.63	2126.70
0.68	2250.65
0.73	2381.25
0.78	2502.39
0.80	2562.46
0.83	2611.87
0.88	2714.22
0.93	2797.26
0.97	2813.14
1.01	2818.29
1.02	2825.48
1.07	2854.56
1.10	2875.46
1.12	2879.87
1.17	2880.07
1.21	2883.60
1.22	2884.67
1.27	2821.53
1.32	2720.54
1.36	2588.83
1.41	2391.57
1.46	2177.57

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.05	147.64
0.10	332.11
0.15	556.38
0.20	799.17
0.24	1060.69
0.29	1350.49
0.34	1640.76
0.39	1909.13
0.44	2160.47
0.49	2384.44
0.54	2558.64
0.59	2622.37
0.63	2721.85
0.68	2776.33
0.73	2838.16
0.78	2938.06
0.81	2992.26
0.83	3057.17
0.88	3155.18
0.93	3208.97
0.98	3207.20
1.01	3195.85
1.03	3183.56
1.07	3142.48
1.10	3107.35
1.12	3062.09
1.17	3025.87
1.21	2979.26
1.22	2967.88
1.27	2857.73
1.32	2777.34
1.37	2706.71
1.42	2630.96
1.46	2568.73
1.51	2505.31

Resultados:

γ_d (kg/m³)	2439.76
P_{max} (kN)	6.52
R_c (MPa)	3.22

γ_d (kg/m³)	2438.93
P_{max} (kN)	5.87
R_c (MPa)	2.88

γ_d (kg/m³)	2446.73
P_{max} (kN)	6.53
R_c (MPa)	3.22

Laboratorio de Estructuras - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%)
Nomenclatura LE-R.02C2-CS-(28d)
Ensayo Resistencia en compresión simple INV-E-614

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%) **Edad Curado:** 28 días
Datos:

ID	LE-R.02C2-CS-1 (28d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	529.41
Diametro Superior (mm)	50.25 50.28 50.62 50.40
Diametro Medio (mm)	50.44 50.71 50.42
Diametro Inferior (mm)	50.62 50.60
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.51 102.71 102.11
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2581.91
Contenido de Agua	
P1 (g)	586.4
P2 (g)	563.15
P3 (g)	57.37
Recip	PB
w (%)	4.60

ID	LE-R.02C2-CS-2 (28d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	529.80
Diametro Superior (mm)	50.62 50.42 50.80 50.62
Diametro Medio (mm)	50.42 50.80 50.39
Diametro Inferior (mm)	50.42 50.52
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.62 102.02 102.36
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2578.98
Contenido de Agua	
P1 (g)	589.68
P2 (g)	566.01
P3 (g)	60.23
Recip	602
w (%)	4.68

ID	LE-R.02C2-CS-3 (28d)
Muestra	3
Peso probeta (g)	529.02
Diametro Superior (mm)	50.66 50.52 50.54 50.53
Diametro Medio (mm)	50.51 50.55 50.56
Diametro Inferior (mm)	50.49 50.48
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.06 102.08 102.01
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2584.26
Contenido de Agua	
P1 (g)	588.81
P2 (g)	564.35
P3 (g)	60.21
Recip	45
w (%)	4.85

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.05	174.05
0.10	374.50
0.15	628.16
0.20	911.94
0.24	1215.75
0.29	1519.23
0.34	1793.49
0.39	2036.14
0.44	2269.64
0.49	2485.38
0.54	2682.39
0.59	2847.63
0.63	2991.94
0.68	3121.90
0.73	3234.63
0.78	3332.63
0.81	3376.06
0.83	3417.44
0.88	3487.34
0.93	3535.56
0.98	3566.78
1.01	3577.03
1.02	3574.67
1.07	3558.93
1.10	3551.19
1.12	3542.70
1.17	3497.32

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.05	164.09
0.10	371.19
0.15	616.23
0.20	895.00
0.24	1200.24
0.29	1486.21
0.34	1739.30
0.39	1987.52
0.44	2228.43
0.49	2449.15
0.54	2650.35
0.59	2827.28
0.64	2984.64
0.68	3127.48
0.73	3264.97
0.78	3394.82
0.81	3455.88
0.83	3515.00
0.88	3625.89
0.93	3718.36
0.98	3791.40
1.01	3825.15
1.03	3836.30
1.07	3863.84
1.10	3870.64
1.12	3870.06
1.17	3843.47
1.21	3792.57
1.22	3776.67
1.27	3668.44
1.32	3506.14
1.37	3283.54

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.05	210.58
0.10	449.03
0.15	731.30
0.20	1024.58
0.24	1307.09
0.29	1546.44
0.34	1754.31
0.39	1943.81
0.44	2136.20
0.49	2333.06
0.54	2528.93
0.59	2726.30
0.64	2900.44
0.69	3070.01
0.73	3232.10
0.78	3380.44
0.81	3450.43
0.83	3513.65
0.88	3625.03
0.93	3725.29
0.98	3811.39
1.01	3859.04
1.03	3881.35
1.08	3933.77
1.10	3955.65
1.13	3971.84
1.18	3992.41
1.22	3995.83
1.22	3995.57
1.27	3980.70
1.32	3934.59
1.37	3862.53

Resultados:

γ_d (kg/m ³)	2468.44
P_{max} (kN)	7.23
R_c (MPa)	3.58

γ_d (kg/m ³)	2463.68
P_{max} (kN)	7.86
R_c (MPa)	3.87

γ_d (kg/m ³)	2464.68
P_{max} (kN)	8.11
R_c (MPa)	4.00

Laboratorio de Estructuras - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura LE-R0C0-TI-(3d)
Ensayo Resistencia en tracción indirecta EN 13286-42

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Datos:

Edad Curado: 3 días

ID	LE-R0C0-TI-1 (3d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	525.92
Diametro Superior (mm)	50.55 50.58 50.49 50.20
Diametro Medio (mm)	50.56 50.46 50.50
Diametro Inferior (mm)	50.63 50.65
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.80 103.41 103.22
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2544.35
Contenido de Agua	
P1 (g)	589.98
P2 (g)	563.46
P3 (g)	65.04
Recip	Z
w (%)	5.32

ID	LE-R0C0-TI-2 (3d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	526.66
Diametro Superior (mm)	50.32 50.27 50.60 50.29
Diametro Medio (mm)	50.40 50.57 50.60
Diametro Inferior (mm)	50.32 50.64
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.25 102.33 102.15
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2577.27
Contenido de Agua	
P1 (g)	576.52
P2 (g)	553.64
P3 (g)	60.33
Recip	13A
w (%)	4.64

ID	LE-R0C0-TI-3 (3d)
Muestra	3
Peso probeta (g)	519.49
Diametro Superior (mm)	50.54 50.42 50.50 50.20
Diametro Medio (mm)	50.46 50.30 50.72
Diametro Inferior (mm)	50.66 50.67
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.20 102.37 102.40
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2535.05
Contenido de Agua	
P1 (g)	585.29
P2 (g)	561.21
P3 (g)	66.53
Recip	N-1
w (%)	4.87

Desplazamiento (mm)	Fuerza (kN)
0.00	0.00
0.02	0.05
0.05	0.08
0.10	0.16
0.15	0.23
0.18	0.27
0.20	0.30
0.25	0.39
0.27	0.43
0.33	0.52
0.35	0.57
0.40	0.65
0.45	0.71
0.47	0.74
0.50	0.76
0.52	0.78
0.58	0.82
0.59	0.82
0.60	0.83
0.62	0.83
0.63	0.83
0.65	0.83
0.70	0.82
0.72	0.81
0.75	0.79
0.77	0.78
0.80	0.75
0.83	0.73
0.85	0.71
0.87	0.69
0.90	0.67
0.95	0.65

Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.02	0.07
0.05	0.10
0.10	0.15
0.15	0.20
0.17	0.22
0.20	0.24
0.25	0.28
0.27	0.30
0.32	0.33
0.35	0.34
0.40	0.36
0.45	0.37
0.47	0.38
0.50	0.38
0.52	0.39
0.58	0.39
0.59	0.39
0.60	0.39
0.62	0.40
0.63	0.40
0.65	0.40
0.70	0.41
0.72	0.40
0.75	0.40
0.77	0.39
0.80	0.40
0.82	0.39
0.85	0.40
0.87	0.40
0.90	0.40
0.95	0.41
0.97	0.41
1.00	0.41
1.05	0.41
1.22	0.38
1.37	0.33
1.49	0.27
1.62	0.22
1.76	0.14

Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.02	0.04
0.05	0.08
0.10	0.14
0.15	0.19
0.17	0.21
0.20	0.24
0.25	0.30
0.27	0.33
0.32	0.39
0.35	0.42
0.40	0.48
0.45	0.52
0.47	0.54
0.50	0.56
0.52	0.57
0.58	0.58
0.59	0.58
0.60	0.58
0.62	0.58
0.63	0.59
0.65	0.58
0.70	0.57
0.72	0.57
0.75	0.56
0.77	0.55
0.80	0.53
0.82	0.51

Resultados:

γ_d (kg/m ³)	2415.81
P_{max} (N)	828.17
R_{TI} (MPa)	0.10

γ_d (kg/m ³)	2463.03
P_{max} (N)	413.13
R_{TI} (MPa)	0.05

γ_d (kg/m ³)	2417.38
P_{max} (N)	587.14
R_{TI} (MPa)	0.07

Laboratorio de Estructuras - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%)
Nomenclatura LE-R.02C2-TI-(3d)
Ensayo Resistencia en tracción indirecta EN 13286-42

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%) **Edad Curado:** 3 días
Datos:

ID	LE-R.02C2-TI-1 (3d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	528.53
	50.64
Diametro Superior (mm)	50.35
	50.58
	50.48
Diametro Medio (mm)	50.49
	50.61
	50.38
Diametro Inferior (mm)	50.42
	50.56
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.57
	102.62
	102.47
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2572.93
Contenido de Agua	
P1 (g)	590.46
P2 (g)	566.41
P3 (g)	62.46
Recip	2T
w (%)	4.77

ID	LE-R.02C2-TI-2 (3d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	528.51
	50.71
Diametro Superior (mm)	50.80
	50.82
	50.53
Diametro Medio (mm)	50.59
	50.56
	50.54
Diametro Inferior (mm)	50.36
	50.80
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.98
	102.98
	103.02
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2555.54
Contenido de Agua	
P1 (g)	590.46
P2 (g)	566.41
P3 (g)	62.46
Recip	V1
w (%)	4.77

ID	LE-R.02C2-TI-3 (3d)
Muestra	3
Peso probeta (g)	527.52
	50.58
Diametro Superior (mm)	50.76
	50.60
	50.46
Diametro Medio (mm)	50.56
	50.62
	50.50
Diametro Inferior (mm)	50.90
	50.62
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.86
	102.95
	103.07
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2545.65
Contenido de Agua	
P1 (g)	591.18
P2 (g)	564.85
P3 (g)	64.06
Recip	R80
w (%)	5.26

Desplazamiento (mm)	Fuerza (kN)
0.00	0.00
0.03	0.06
0.05	0.13
0.10	0.31
0.15	0.51
0.18	0.60
0.20	0.69
0.25	0.85
0.28	0.93
0.33	1.08
0.35	1.14
0.40	1.25
0.45	1.31
0.48	1.33
0.50	1.34
0.53	1.34
0.58	1.36
0.59	1.36
0.60	1.36
0.62	1.35
0.63	1.34
0.65	1.32
0.70	1.28
0.72	1.23
0.75	1.17

Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.03	0.07
0.05	0.18
0.10	0.47
0.15	0.62
0.18	0.68
0.20	0.75
0.25	0.84
0.28	0.88
0.33	0.97
0.35	1.00
0.40	1.04
0.45	1.05
0.48	1.06
0.50	1.06
0.53	1.05
0.58	1.00
0.59	0.98
0.60	0.96
0.62	0.94
0.63	0.92
0.65	0.90
0.70	0.87
0.73	0.84
0.75	0.82

Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.03	0.03
0.05	0.07
0.10	0.16
0.15	0.30
0.18	0.37
0.20	0.45
0.25	0.59
0.28	0.64
0.33	0.73
0.35	0.77
0.40	0.86
0.45	0.94
0.48	0.97
0.50	0.98
0.53	0.99
0.58	0.98
0.59	0.98
0.60	0.97
0.62	0.97
0.63	0.96
0.65	0.95
0.70	0.93
0.73	0.92
0.75	0.91
0.78	0.90
0.80	0.89
0.83	0.88

Resultados:

γ_d (kg/m ³)	2455.74
P_{max} (N)	1357.16
R_{TI} (MPa)	0.17

γ_d (kg/m ³)	2439.14
P_{max} (N)	1060.32
R_{TI} (MPa)	0.13

γ_d (kg/m ³)	2418.49
P_{max} (N)	993.88
R_{TI} (MPa)	0.12

Laboratorio de Estructuras - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (6%) + Aditivo(0.06%)
Nomenclatura LE-R.06C6-TI-(3d)
Ensayo Resistencia en tracción indirecta EN 13286-42

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (6%) + Aditivo(0.06%) **Edad Curado:** 3 días
Datos:

ID	LE-R.06C6-TI-1 (3d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	527.90
Diametro Superior (mm)	50.42 50.75 50.90 50.66
Diametro Medio (mm)	50.58 50.63 50.66
Diametro Inferior (mm)	50.69 50.49
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.66 102.71 102.58
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2553.16
Contenido de Agua	
P1 (g)	584.61
P2 (g)	559.07
P3 (g)	57.37
Recip	PB
w (%)	5.09

ID	LE-R.06C6-TI-2 (3d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	528.84
Diametro Superior (mm)	50.55 50.45 50.78 50.54
Diametro Medio (mm)	50.51 50.58 50.65
Diametro Inferior (mm)	50.65 50.64
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.78 102.95 102.97
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2556.25
Contenido de Agua	
P1 (g)	586.92
P2 (g)	564.25
P3 (g)	58.69
Recip	1209
w (%)	4.48

ID	LE-R.06C6-TI-3 (3d)
Muestra	3
Peso probeta (g)	528.00
Diametro Superior (mm)	50.65 50.35 50.37 50.46
Diametro Medio (mm)	50.42 50.66 50.64
Diametro Inferior (mm)	50.49 50.72
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.78 102.80 102.39
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2564.94
Contenido de Agua	
P1 (g)	591.98
P2 (g)	567.97
P3 (g)	64.48
Recip	0.4
w (%)	4.77

Desplazamiento (mm)	Fuerza (kN)
0.00	0.00
0.03	0.07
0.05	0.14
0.10	0.34
0.15	0.60
0.18	0.75
0.20	0.91
0.25	1.25
0.28	1.44
0.33	1.76
0.35	1.97
0.40	2.45
0.45	3.00
0.48	3.31
0.50	3.62
0.53	3.90
0.58	4.38
0.59	4.40
0.60	4.40
0.62	4.36
0.63	4.32
0.65	4.27
0.70	3.95
0.73	3.73
0.75	3.54
0.78	3.34
0.80	3.17
0.83	3.01
0.85	2.82
0.87	2.72
0.90	2.66
0.95	2.68
0.96	2.67

Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.02	0.13
0.05	0.26
0.10	0.64
0.15	1.17
0.17	1.50
0.20	1.88
0.25	2.69
0.27	2.99
0.32	3.27
0.35	3.32
0.40	3.41
0.45	3.45
0.47	3.45
0.50	3.42
0.52	3.36
0.58	3.25
0.59	3.23
0.60	3.20
0.62	3.16
0.63	3.12
0.65	3.07
0.70	2.90
0.72	2.78
0.75	2.69
0.77	2.60
0.80	2.51
0.82	2.44
0.85	2.38

Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.03	0.07
0.05	0.14
0.10	0.31
0.15	0.52
0.18	0.64
0.20	0.77
0.25	1.06
0.28	1.22
0.33	1.63
0.35	1.85
0.40	2.31
0.45	2.63
0.48	2.72
0.50	2.76
0.53	2.80
0.58	2.81
0.59	2.81
0.60	2.82
0.62	2.82
0.63	2.82
0.65	2.81
0.70	2.76
0.73	2.70
0.75	2.62
0.78	2.57
0.80	2.53
0.82	2.50
0.85	2.48
0.88	2.47
0.90	2.44
0.95	2.34
0.96	2.30

Resultados:

γ_d (kg/m ³)	2429.48
P_{max} (N)	4402.09
R_{TI} (MPa)	0.54

γ_d (kg/m ³)	2446.55
P_{max} (N)	3451.81
R_{TI} (MPa)	0.42

γ_d (kg/m ³)	2448.19
P_{max} (N)	2820.22
R_{TI} (MPa)	0.35

Laboratorio de Estructuras - Facultad de Ingenieria - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura LE-R0C0-TI-(28d)
Ensayo Resistencia en tracción indirecta EN 13286-42

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) **Edad Curado:** 28 días
Datos:

ID	LE-R0C0-TI-1 (28d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	529.94
Diametro Superior (mm)	50.46 50.39 50.52 50.56
Diametro Medio (mm)	50.22 50.59 50.67
Diametro Inferior (mm)	50.85 50.66
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.96 102.99 102.74
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2566.55
Contenido de Agua	
P1 (g)	592.52
P2 (g)	568.18
P3 (g)	62.96
Recip	42A
w (%)	4.82

ID	LE-R0C0-TI-2 (28d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	528.08
Diametro Superior (mm)	50.57 50.52 50.75 50.56
Diametro Medio (mm)	50.32 50.53 50.70
Diametro Inferior (mm)	50.55 50.76
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.79 102.91 102.85
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2554.89
Contenido de Agua	
P1 (g)	584.68
P2 (g)	560.94
P3 (g)	57.55
Recip	PB
w (%)	4.72

ID	LE-R0C0-TI-3 (28d)
Muestra	3
Peso probeta (g)	527.50
Diametro Superior (mm)	50.57 50.52 50.35 50.40
Diametro Medio (mm)	50.38 50.66 50.33
Diametro Inferior (mm)	50.44 50.74
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	103.01 103.11 103.07
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2556.56
Contenido de Agua	
P1 (g)	585.67
P2 (g)	563.49
P3 (g)	58.67
Recip	1209
w (%)	4.39

Desplazamiento (mm)	Fuerza (kN)
0.00	0.00
0.03	0.05
0.07	0.09
0.10	0.15
0.13	0.21
0.17	0.25
0.20	0.32
0.23	0.39
0.27	0.47
0.30	0.55
0.33	0.64
0.37	0.76
0.40	0.89
0.43	1.03
0.47	1.15
0.50	1.25
0.53	1.36
0.57	1.46
0.57	1.49
0.60	1.57
0.62	1.62
0.63	1.67
0.67	1.74
0.70	1.83
0.73	1.92
0.78	2.00
0.80	2.04
0.83	2.09
0.87	2.13
0.90	2.15
0.93	2.17
0.97	2.18
0.97	2.18
1.00	2.17
1.03	2.07
1.07	1.99
1.10	1.92
1.13	1.86
1.17	1.79

Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.03	0.08
0.07	0.15
0.10	0.25
0.13	0.35
0.17	0.42
0.20	0.41
0.23	0.45
0.27	0.55
0.30	0.67
0.33	0.77
0.37	0.86
0.40	0.97
0.43	1.07
0.47	1.15
0.50	1.22
0.53	1.29
0.57	1.35
0.57	1.36
0.60	1.40
0.62	1.43
0.63	1.46
0.67	1.50
0.70	1.54
0.73	1.56
0.77	1.57
0.80	1.50
0.83	1.42
0.87	1.38
0.90	1.36
0.93	1.35

Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.03	0.07
0.07	0.16
0.10	0.28
0.13	0.41
0.17	0.56
0.20	0.71
0.23	0.86
0.27	1.00
0.30	1.14
0.33	1.26
0.37	1.40
0.40	1.53
0.43	1.66
0.47	1.78
0.50	1.88
0.53	1.96
0.57	2.03
0.57	2.02
0.60	1.99
0.62	1.97
0.63	1.92
0.67	1.88
0.70	1.84
0.72	1.80

Resultados:

γ_d (kg/m ³)	2448.59
P_{max} (N)	2177.17
R_{TI} (MPa)	0.27

γ_d (kg/m ³)	2439.82
P_{max} (N)	1565.75
R_{TI} (MPa)	0.19

γ_d (kg/m ³)	2448.96
P_{max} (N)	2025.20
R_{TI} (MPa)	0.25

Laboratorio de Estructuras - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%)
Nomenclatura LE-R.02C2-TI-(28d)
Ensayo Resistencia en tracción indirecta EN 13286-42

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%) **Edad Curado:** 28 días
Datos:

ID	LE-R.02C2-TI-1 (28d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	526.05
Diametro Superior (mm)	50.59 50.61 50.55 50.68
Diametro Medio (mm)	50.62 50.43 50.40
Diametro Inferior (mm)	50.47 50.51
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.33 102.30 102.29
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2563.08
Contenido de Agua	
P1 (g)	587.99
P2 (g)	568.52
P3 (g)	62.26
Recip	3011
w (%)	3.85

ID	LE-R.02C2-TI-2 (28d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	525.22
Diametro Superior (mm)	50.64 50.55 50.43 50.66
Diametro Medio (mm)	50.64 50.70 50.86
Diametro Inferior (mm)	50.69 50.79
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.98 102.81 102.93
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2525.76
Contenido de Agua	
P1 (g)	583.66
P2 (g)	565.66
P3 (g)	58.69
Recip	1209
w (%)	3.55

ID	LE-R.02C2-TI-3 (28d)
Muestra	3
Peso probeta (g)	525.87
Diametro Superior (mm)	50.51 50.57 50.38 50.71
Diametro Medio (mm)	50.38 50.78 50.78
Diametro Inferior (mm)	50.66 50.54
Diametro Prom (m)	0.05
Altura (mm)	102.98 102.81 102.93
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2542.23
Contenido de Agua	
P1 (g)	590.1
P2 (g)	569.35
P3 (g)	64.5
Recip	D20
w (%)	4.11

Desplazamiento (mm)	Fuerza (kN)
0.00	0.00
0.03	0.14
0.07	0.34
0.10	0.57
0.13	0.87
0.17	1.21
0.20	1.63
0.23	2.10
0.27	2.60
0.30	3.06
0.33	3.39
0.37	3.75
0.40	4.10
0.43	4.29
0.47	4.20
0.50	4.12
0.53	3.99
0.57	3.93
0.57	3.91
0.60	3.84
0.62	3.81
0.63	3.77
0.67	3.78

Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.03	0.11
0.07	0.25
0.10	0.40
0.13	0.57
0.17	0.76
0.20	0.97
0.23	1.20
0.27	1.42
0.30	1.69
0.33	2.04
0.37	2.45
0.40	2.92
0.43	3.39
0.47	3.86
0.50	4.29
0.53	4.61
0.57	4.84
0.57	4.89
0.60	4.76
0.62	4.73
0.63	4.67
0.67	4.62
0.70	4.52

Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (kPa)
0.00	0.00
0.03	0.08
0.07	0.20
0.10	0.36
0.13	0.54
0.17	0.77
0.20	1.06
0.23	1.39
0.27	1.78
0.30	2.22
0.33	2.69
0.37	3.19
0.40	3.64
0.43	3.94
0.47	4.14
0.50	4.30
0.53	4.43
0.57	4.51
0.58	4.53
0.60	4.56
0.62	4.57
0.63	4.57
0.67	4.17

Resultados:

γ_d (kg/m ³)	2468.16
P_{max} (N)	4291.76
R_{TI} (MPa)	0.53

γ_d (kg/m ³)	2439.16
P_{max} (N)	4888.44
R_{TI} (MPa)	0.60

γ_d (kg/m ³)	2441.87
P_{max} (N)	4574.91
R_{TI} (MPa)	0.56

Laboratorio de Estructuras - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%)
Nomenclatura LE-R.02C2-F4P-(7d)
Ensayo Resistencia en flexión INV-E-616

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%) **Edad Curado:** 7 días
Datos:

ID	LE-R.02C2-F4P-1 (7d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	969.04
	46.32
Altura (mm)	46.20
	45.94
	45.86
Altura Prom (mm)	46.08
	46.80
Ancho (mm)	46.55
	47.02
	46.80
Ancho Prom (mm)	46.79
	189.35
Longitud (mm)	189.38
	189.21
	189.33
Long. promedio (mm)	189.32
Volumen (m3)	0.00041
Peso Unitario (kg/m3)	2373.90
Contenido de Agua	
P1 (g)	1073.25
P2 (g)	1033.53
P3 (g)	106.92
Recip	D2
w (%)	4.29

ID	LE-R.02C2-F4P-2 (7d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	910.21
	45.23
Altura (mm)	45.43
	45.87
	45.99
Altura Prom (mm)	45.63
	45.64
Ancho (mm)	45.31
	45.77
	44.88
Ancho Prom (mm)	45.40
	189.64
Longitud (mm)	189.67
	189.44
	189.71
Long. promedio (mm)	189.62
Volumen (m3)	0.00039
Peso Unitario (kg/m3)	2317.20
Contenido de Agua	
P1 (g)	1019.95
P2 (g)	983.09
P3 (g)	111.49
Recip	D5
w (%)	4.23

ID	LE-R.02C2-F4P-3 (7d)
Muestra	3
Peso probeta (g)	975.42
	46.30
Altura (mm)	46.22
	45.49
	45.58
Altura Prom (mm)	45.90
	46.02
Ancho (mm)	46.22
	46.11
	46.05
Ancho Prom (mm)	46.10
	189.74
Longitud (mm)	189.56
	189.79
	189.52
Long. promedio (mm)	189.65
Volumen (m3)	0.00040
Peso Unitario (kg/m3)	2430.77
Contenido de Agua	
P1 (g)	1084.34
P2 (g)	1039.74
P3 (g)	111.49
Recip	D5
w (%)	4.80

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)
0.00	0.00
0.04	-0.24
0.07	0.19
0.11	6.68
0.14	20.70
0.18	46.84
0.22	70.45
0.25	89.01
0.27	115.43
0.26	84.52
0.26	72.60
0.25	53.66
0.25	45.27
0.26	71.69
0.27	93.73
0.28	114.34
0.28	109.85
0.27	76.08
0.26	56.62
0.26	45.46
0.27	67.92
0.28	89.72
0.28	110.52
0.29	133.37
0.31	159.89
0.32	176.82
0.33	199.43
0.35	223.38
0.37	240.22
0.38	263.16
0.40	287.01
0.41	309.53
0.44	340.48
0.49	198.96
0.53	160.75
0.57	148.63
0.61	135.61
0.65	129.12
0.69	122.35
0.72	121.44

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)
0.00	0.00
0.04	1.24
0.07	3.10
0.25	4.39
0.40	34.96
0.46	52.04
0.50	72.27
0.54	94.21
0.53	71.12
0.53	59.63
0.51	41.31
0.53	45.22
0.55	82.38
0.56	90.01
0.54	69.55
0.53	47.32
0.53	47.03
0.55	78.37
0.57	97.36
0.59	112.52
0.61	141.62
0.62	165.71
0.64	186.84
0.65	208.07
0.67	235.40
0.68	254.19
0.69	275.66
0.70	297.03
0.72	315.30
0.76	156.07
0.81	96.40
0.85	77.42
0.92	63.92
0.99	58.77
1.04	41.83
1.09	33.29
1.13	27.00
1.18	22.18
1.23	22.71
1.36	20.42

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)
0.00	0.10
0.04	6.63
0.07	21.32
0.12	46.75
0.16	66.35
0.20	91.39
0.23	112.91
0.22	96.07
0.21	78.13
0.19	63.25
0.17	43.41
0.20	71.45
0.22	93.21
0.24	111.90
0.23	111.52
0.22	78.37
0.20	58.91
0.18	42.17
0.21	65.35
0.23	86.58
0.25	109.71
0.27	130.32
0.29	153.45
0.31	173.72
0.34	201.34
0.37	48.56
0.41	37.59
0.45	28.91
0.49	27.28
0.53	24.85
0.57	20.61
0.61	19.56
0.70	21.66

Resultados:

γ_d (kg/m ³)	2276.32
P_{max} (N)	340.48
R_{F4P} (MPa)	0.47

γ_d (kg/m ³)	2223.18
P_{max} (N)	201.34
R_{F4P} (MPa)	0.29

γ_d (kg/m ³)	2319.33
P_{max} (N)	315.30
R_{F4P} (MPa)	0.44

Laboratorio de Estructuras - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%)
Nomenclatura LE-R.02C2-F4P-(28d)
Ensayo Resistencia en flexión INV-E-616

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%) **Edad Curado:** 28 días
Datos:

ID	LE-R.02C2-F4P-1 (28d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	906.19
	46.54
Altura (mm)	46.19
	45.94
	46.02
Altura Prom (mm)	46.17
	44.24
Ancho (mm)	44.66
	44.20
	44.65
Ancho Prom (mm)	44.44
	189.97
Longitud (mm)	190.00
	190.02
	189.84
Long. promedio (mm)	189.96
Volumen (m3)	0.00039
Peso Unitario (kg/m3)	2325.04
Contenido de Agua	
P1 (g)	1012.4
P2 (g)	984.06
P3 (g)	106.91
Recip	D2
w (%)	3.23

ID	LE-R.02C2-F4P-2 (28d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	887.20
	46.15
Altura (mm)	46.04
	45.15
	45.38
Altura Prom (mm)	45.68
	43.91
Ancho (mm)	43.69
	43.81
	43.78
Ancho Prom (mm)	43.80
	189.83
Longitud (mm)	190.16
	191.14
	191.69
Long. promedio (mm)	190.71
Volumen (m3)	0.00038
Peso Unitario (kg/m3)	2325.33
Contenido de Agua	
P1 (g)	997.98
P2 (g)	970.11
P3 (g)	111.49
Recip	D5
w (%)	3.25

ID	LE-R.02C2-F4P-3 (28d)
Muestra	3
Peso probeta (g)	956.80
	46.51
Altura (mm)	46.71
	45.55
	45.55
Altura Prom (mm)	46.08
	45.82
Ancho (mm)	45.55
	45.53
	45.96
Ancho Prom (mm)	45.72
	189.85
Longitud (mm)	189.89
	190.11
	189.74
Long. promedio (mm)	189.90
Volumen (m3)	0.00040
Peso Unitario (kg/m3)	2391.83
Contenido de Agua	
P1 (g)	1067.35
P2 (g)	1029.6
P3 (g)	111.49
Recip	D5
w (%)	4.11

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)
0.00	0.72
0.07	23.75
0.23	85.19
0.30	164.42
0.30	132.46
0.21	53.23
0.28	100.69
0.32	191.52
0.30	147.20
0.29	107.18
0.23	59.00
0.28	85.86
0.31	131.75
0.32	176.20
0.34	223.43
0.37	268.69
0.40	316.11
0.43	358.32
0.43	361.90
0.46	409.31
0.48	456.58
0.50	502.52
0.51	549.17
0.53	596.20
0.54	644.19
0.55	691.13
0.57	729.09
0.58	629.02
0.62	347.88
0.67	233.11
0.72	195.09
0.77	109.76
0.82	90.49
0.87	37.44
0.93	27.57
0.98	11.69
0.99	5.87
1.03	0.81

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)
0.00	0.52
0.25	26.52
0.39	109.38
0.38	65.49
0.40	103.60
0.39	44.60
0.41	89.25
0.45	183.60
0.47	226.10
0.50	274.75
0.52	321.59
0.54	368.63
0.55	416.04
0.57	461.83
0.59	509.48
0.60	555.71
0.62	601.21
0.63	640.66
0.64	630.36
0.68	329.32
0.73	240.07
0.78	177.44
0.83	143.15
0.88	113.10
0.93	92.35
0.97	67.07
1.02	44.55
1.04	39.07
1.07	31.53
1.12	25.33
1.17	19.65
1.22	8.82
1.26	3.53
1.31	0.81

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)
0.00	0.81
0.06	59.82
0.12	150.49
0.14	190.85
0.10	95.26
0.11	99.74
0.12	147.25
0.12	151.54
0.11	107.33
0.08	62.49
0.11	92.87
0.12	138.57
0.14	184.03
0.16	228.96
0.22	276.18
0.38	208.83
0.56	72.22
0.72	24.57
0.74	14.02

Resultados:

γ_d (kg/m ³)	2252.27
P_{max} (N)	729.09
R_{F4P} (MPa)	1.05

γ_d (kg/m ³)	2252.22
P_{max} (N)	276.18
R_{F4P} (MPa)	0.41

γ_d (kg/m ³)	2297.37
P_{max} (N)	640.66
R_{F4P} (MPa)	0.90

Laboratorio de Estructuras - Facultad de Ingeniería - Sede Bogotá

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (6%) + Aditivo(0.06%)
Nomenclatura LE-R.06C6-F4P-(28d)
Ensayo Resistencia en flexión INV-E-616

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (6%) + Aditivo(0.06%) **Edad Curado:** 28 días
Datos:

ID	LE-R.06C6-F4P-1 (28d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	959.18
	45.68
Altura (mm)	45.66
	46.23
	46.18
Altura Prom (mm)	45.94
	46.16
Ancho (mm)	46.33
	46.38
	46.23
Ancho Prom (mm)	46.28
	188.82
Longitud (mm)	188.56
	188.46
	188.68
Long. promedio (mm)	188.63
Volumen (m3)	0.00040
Peso Unitario (kg/m3)	2392.08
Contenido de Agua	
P1 (g)	1063.33
P2 (g)	1024.73
P3 (g)	106.92
Recip	D2
w (%)	4.21

ID	LE-R.06C6-F4P-2 (28d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	924.73
	46.74
Altura (mm)	45.68
	46.46
	45.92
Altura Prom (mm)	46.20
	46.15
Ancho (mm)	46.30
	46.38
	46.50
Ancho Prom (mm)	46.33
	189.51
Longitud (mm)	189.02
	188.92
	189.31
Long. promedio (mm)	189.19
Volumen (m3)	0.00040
Peso Unitario (kg/m3)	2283.44
Contenido de Agua	
P1 (g)	1034.28
P2 (g)	996.92
P3 (g)	111.49
Recip	D5
w (%)	4.22

ID	LE-R.06C6-F4P-3 (28d)
Muestra	3
Peso probeta (g)	963.72
	45.88
Altura (mm)	45.44
	45.75
	46.20
Altura Prom (mm)	45.82
	46.12
Ancho (mm)	46.06
	46.46
	46.50
Ancho Prom (mm)	46.29
	188.95
Longitud (mm)	188.75
	188.70
	188.97
Long. promedio (mm)	188.84
Volumen (m3)	0.00040
Peso Unitario (kg/m3)	2406.46
Contenido de Agua	
P1 (g)	1069.9
P2 (g)	1025.75
P3 (g)	106.91
Recip	D5
w (%)	4.80

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)
0.00	-2.53
0.08	1.34
0.28	66.83
0.38	113.72
0.41	71.60
0.43	119.15
0.43	130.55
0.42	57.43
0.44	119.15
0.45	169.53
0.47	215.32
0.49	264.02
0.51	308.67
0.53	353.55
0.54	402.49
0.56	445.14
0.57	493.79
0.58	530.95
0.58	539.87
0.59	589.81
0.60	636.08
0.62	675.19
0.63	728.76
0.64	775.27
0.64	822.44
0.65	865.18
0.66	911.26
0.66	927.38
0.67	963.44
0.68	1004.56
0.69	1056.41
0.70	1100.92
0.70	1149.62
0.71	1190.78
0.72	1241.34
0.74	1268.15
0.75	1298.06
0.83	662.46
0.94	403.69
1.05	210.07

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)
0.03	10.78
0.14	56.24
0.22	80.09
0.21	40.02
0.23	108.14
0.23	78.08
0.24	121.54
0.31	215.75
0.33	263.11
0.35	309.24
0.36	352.22
0.38	402.25
0.40	445.57
0.41	497.99
0.42	543.68
0.44	588.24
0.45	635.65
0.46	678.29
0.46	677.48
0.47	726.90
0.48	775.32
0.50	823.21
0.51	868.52
0.52	909.64
0.53	955.96
0.54	1009.14
0.55	1048.49
0.55	1067.43
0.56	1103.06
0.57	1144.23
0.61	653.20
0.64	401.35
0.68	311.48
0.72	271.65
0.75	236.07
0.79	206.78
0.80	197.72
0.83	160.56
0.86	119.63
0.90	101.46

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)
0.00	-0.48
0.08	18.22
0.29	114.72
0.32	141.43
0.21	53.90
0.35	141.38
0.28	91.92
0.30	99.79
0.37	144.58
0.44	195.09
0.49	241.89
0.53	286.87
0.58	333.90
0.61	381.79
0.64	426.87
0.66	473.71
0.68	519.64
0.70	561.43
0.70	568.58
0.72	611.85
0.73	662.46
0.75	703.58
0.76	750.03
0.77	799.45
0.78	844.91
0.80	895.57
0.81	932.92
0.82	950.18
0.84	28.52
0.88	21.75
0.92	16.03
0.96	13.07

Resultados:

γ_d (kg/m ³)	2295.54
P_{max} (N)	1298.06
R_{F4P} (MPa)	1.82

γ_d (kg/m ³)	2190.99
P_{max} (N)	950.18
R_{F4P} (MPa)	1.31

γ_d (kg/m ³)	2296.14
P_{max} (N)	1144.23
R_{F4P} (MPa)	1.61

Laboratorio de Mezclas asfálticas - Universidad de Los Andes

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (6%) + Aditivo(0.06%)
Nomenclatura LE-R0C0-MC-(137d)
Ensayo Módulo en compresión INV-E-614

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (6%) + Aditivo(0.06%) **Edad Curado:** 137 días
Datos:

ID	LE-R0C0-MC-1 (137d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	540.17
	50.45
Diametro Superior (mm)	50.45
	50.45
	50.45
Diametro Medio (mm)	50.45
	50.45
	50.45
Diametro Inferior (mm)	50.45
	50.45
	50.45
Diametro Prom (m)	0.0505
	102.13
Altura (mm)	102.13
	102.13
Altura promedio (m)	0.1021
Área (m ²)	0.0020
Volumen (m ³)	0.0002
Peso Unitario (kg/m³)	2645.85
Longitud Referencia (m)	0.05
Contenido de Agua	
P1	591.51
P2	563.76
P3	52.36
Recip	4
w (%)	5.43

ID	LE-R0C0-MC-2 (137d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	542.51
	50.62
Diametro Superior (mm)	50.62
	50.62
	50.62
Diametro Medio (mm)	50.62
	50.62
	50.62
Diametro Inferior (mm)	50.62
	50.62
	50.62
Diametro Prom (m)	0.0506
	102.82
Altura (mm)	102.82
	102.82
Altura promedio (m)	0.1028
Área (m ²)	0.0020
Volumen (m ³)	0.0002
Peso Unitario (kg/m³)	2621.78
Longitud Referencia (m)	0.05
Contenido de Agua	
P1	589.6
P2	556.44
P3	48.7
Recip	1
w (%)	6.53

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (MPa)
0.00	0.00
0.00	0.06
0.00	0.14
0.00	0.23
0.00	0.33
0.00	0.45
0.00	0.54
0.01	0.64
0.01	0.76
0.01	0.89
0.01	1.04
0.01	1.23
0.02	1.45
0.02	1.68
0.03	1.95
0.04	2.20
0.05	2.50
0.06	2.78
0.07	3.10
0.08	3.40
0.10	3.71
0.11	4.00
0.13	4.26
0.15	4.58
0.18	4.89
0.20	4.98
0.23	5.09
0.27	5.14
0.30	5.18
0.35	5.16
0.40	5.16
0.44	5.14
0.48	5.13
0.53	5.08
0.57	5.03
0.64	4.83
0.70	4.60
0.77	4.36
0.85	4.10
0.89	3.92

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (MPa)
0.00	0.00
0.00	0.05
0.00	0.13
0.01	0.21
0.01	0.34
0.02	0.50
0.02	0.63
0.03	0.78
0.03	0.98
0.03	1.29
0.04	1.67
0.04	2.04
0.05	2.41
0.05	2.69
0.06	2.96
0.08	3.19
0.09	3.38
0.10	3.55
0.11	3.69
0.13	3.77
0.15	3.82
0.17	3.86
0.18	3.88
0.20	3.86
0.22	3.85
0.23	3.83
0.25	3.81
0.26	3.73
0.27	3.62
0.29	3.45
0.30	3.34
0.30	3.16
0.30	2.95
0.30	2.78
0.30	2.65
0.31	2.45
0.32	2.30
0.33	2.07
0.34	1.86
0.34	1.74

Resultados:

γ_d (kg/m³)	2509.67
σ_{max} (Mpa)	5.18
E_c (MPa)	9867.31

γ_d (kg/m³)	2461.05
σ_{max} (Mpa)	3.88
E_c (MPa)	2538.39

Laboratorio de Mezclas asfálticas - Universidad de Los Andes

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%)
Nomenclatura LE-R.02C2-MC-(137d)
Ensayo Módulo en compresión INV-E-614

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%) **Edad Curado:** 137 días
Datos:

ID	LE-R.02C2-MC-1 (137d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	540.19
	50.85
Diametro Superior (mm)	50.85
	50.85
	50.85
Diametro Medio (mm)	50.85
	50.85
	50.85
Diametro Inferior (mm)	50.85
	50.85
	50.85
Diametro Prom (m)	0.05
	102.39
Altura (mm)	102.39
	102.39
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2597.87
Longitud Referencia (m)	0.05
Contenido de Agua	
P1	593.74
P2	563.76
P3	54.54
Recip	94
w (%)	5.89

ID	LE-R.02C2-MC-2 (137d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	539.86
	50.95
Diametro Superior (mm)	50.95
	50.95
	50.95
Diametro Medio (mm)	50.95
	50.95
	50.95
Diametro Inferior (mm)	50.95
	50.95
	50.95
Diametro Prom (m)	0.05
	102.82
Altura (mm)	102.82
	102.82
Altura promedio (m)	0.10
Área (m2)	0.0020
Volumen (m3)	0.0002
Peso Unitario (kg/m3)	2575.28
Longitud Referencia (m)	0.05
Contenido de Agua	
P1	592.46
P2	561.64
P3	54.43
Recip	98
w (%)	6.08

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (MPa)
0.00	0.00
0.00	0.06
0.00	0.14
0.00	0.19
0.00	0.28
0.00	0.36
0.00	0.44
0.01	0.55
0.01	0.72
0.01	0.91
0.01	1.10
0.01	1.28
0.01	1.46
0.01	1.65
0.01	1.86
0.01	2.14
0.01	2.34
0.02	2.59
0.02	2.84
0.02	3.13
0.03	3.42
0.03	3.74
0.03	4.02
0.04	4.39
0.06	4.80
0.06	4.98
0.07	5.28
0.08	5.57
0.09	5.80
0.10	6.15
0.12	6.39
0.13	6.63
0.15	6.85
0.17	7.04
0.19	7.10
0.22	7.14
0.25	7.12
0.28	7.08
0.33	7.02
0.35	6.93

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (MPa)
0.00	0.00
0.00	0.21
0.00	0.47
0.00	0.63
0.01	0.75
0.01	0.88
0.01	1.00
0.01	1.12
0.01	1.23
0.01	1.35
0.02	1.50
0.02	1.67
0.02	1.86
0.03	2.05
0.03	2.28
0.04	2.52
0.05	2.76
0.06	3.03
0.07	3.30
0.08	3.57
0.09	3.88
0.11	4.17
0.12	4.39
0.14	4.72
0.17	5.04
0.19	5.19
0.21	5.38
0.23	5.57
0.25	5.68
0.29	5.76
0.32	5.77
0.35	5.80
0.39	5.83
0.43	5.87
0.46	5.86
0.51	5.84
0.57	5.81
0.63	5.74
0.70	5.57
0.75	5.46

Resultados:

γ_d (kg/m ³)	2453.42
σ_{max} (Mpa)	7.14
E_c (MPa)	15601.45

γ_d (kg/m ³)	2427.76
σ_{max} (Mpa)	5.87
E_c (MPa)	9921.44

Laboratorio de Mezclas asfálticas - Universidad de Los Andes

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (6%) + Aditivo(0.06%)
Nomenclatura LE-R.06C6-MC-(137d)
Ensayo Módulo en compresión INV-E-614

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (6%) + Aditivo(0.06%) **Edad Curado:** 137 días
Datos:

ID	LE-R.06C6-Mc-1 (137d)
Muestra	1
Peso probeta (g)	542.83
	50.39
Diametro Superior (mm)	50.39
	50.39
	50.39
Diametro Medio (mm)	50.39
	50.39
	50.39
Diametro Inferior (mm)	50.39
	50.39
Diametro Prom (m)	0.05
	102.18
Altura (mm)	102.18
	102.18
Altura promedio (m)	0.10
Área (m ²)	0.0020
Volumen (m ³)	0.0002
Peso Unitario (kg/m³)	2663.91
Longitud Referencia (m)	0.05
Contenido de Agua	
P1	599.4
P2	566.08
P3	57.76
Recip	93
w (%)	6.55

ID	LE-R.06C6-Mc-2 (137d)
Muestra	2
Peso probeta (g)	548.32
	50.59
Diametro Superior (mm)	50.59
	50.59
	50.59
Diametro Medio (mm)	50.59
	50.59
	50.59
Diametro Inferior (mm)	50.59
	50.59
Diametro Prom (m)	0.05
	102.12
Altura (mm)	102.12
	102.12
Altura promedio (m)	0.10
Área (m ²)	0.0020
Volumen (m ³)	0.0002
Peso Unitario (kg/m³)	2671.19
Longitud Referencia (m)	0.05
Contenido de Agua	
P1	575.51
P2	539.12
P3	38.69
Recip	60
w (%)	7.27

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (MPa)
0.00	0.00
0.01	0.29
0.02	0.54
0.03	0.84
0.04	1.14
0.05	1.47
0.06	1.79
0.07	2.12
0.08	2.48
0.09	2.81
0.10	3.20
0.11	3.60
0.13	4.00
0.14	4.41
0.16	4.79
0.18	5.17
0.20	5.54
0.22	5.89
0.24	6.23
0.27	6.56
0.29	6.87
0.32	7.17
0.34	7.36
0.38	7.64
0.43	7.82
0.46	7.79
0.50	7.74
0.55	7.59
0.58	7.37
0.65	6.68
0.71	5.71
0.77	4.76
0.81	4.21
0.85	3.60
0.89	3.23

Def. Unit. (%)	Esfuerzo (MPa)
0.00	0.00
0.00	0.09
0.00	0.18
0.00	0.26
0.00	0.33
0.00	0.45
0.00	0.56
0.00	0.67
0.00	0.78
0.00	0.92
0.00	1.03
0.01	1.21
0.00	1.28
0.01	1.50
0.01	1.79
0.01	2.10
0.01	2.43
0.01	2.76
0.02	3.09
0.02	3.47
0.02	3.85
0.02	4.21
0.03	4.48
0.04	4.89
0.05	5.32
0.06	5.45
0.07	5.73
0.09	5.96
0.10	6.18
0.12	6.44
0.14	6.68
0.16	6.90
0.18	7.12
0.21	7.36
0.23	7.49
0.27	7.84
0.30	8.18
0.35	8.41
0.42	7.96
0.45	7.81

Resultados:

γ_d (kg/m³)	2500.03
σ_{max} (Mpa)	7.82
E_c (MPa)	2682.71

γ_d (kg/m³)	2490.11
σ_{max} (Mpa)	8.41
E_c (MPa)	19638.51

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura LE-ROCO-MR-(106d)
Ensayo Módulo Resiliente INV-E-156

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)

Edad Curado: 106 días

Datos:

ID	Diam. prom (m)	Altura prom. (m)	Área (m ²)	Volumen (m ³)	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	w (%)	Y _r (kg/m ³)	Y _d (kg/m ³)
LE-ROCO-MR-(106d)	0.10037	0.20489	0.00791	0.00162	4420.80	4141.40	164.20	7.03	2630.13	2457.49

Secuencia 1:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
Unidad	1	0.103	0.089	0.014	13.026	11.268	1.758	1.706E-04	1.706E-06	6603
	2	0.109	0.087	0.022	13.732	10.954	2.779	8.630E-05	8.630E-07	12693
	3	0.090	0.075	0.015	11.319	9.418	1.901	1.212E-04	1.212E-06	7771
	4	0.126	0.108	0.018	15.911	13.683	2.227	1.630E-04	1.630E-06	8397
	5	0.130	0.111	0.019	16.414	13.980	2.434	1.520E-04	1.520E-06	9195
Promedio		0.111	0.094	0.018	14.080	11.861	2.220	1.386E-04	1.386E-06	8932
Desv. Est		0.017	0.015	0.003	2.101	1.933	0.410	3.478E-05	3.478E-07	2306

Secuencia 2:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
Unidad	1	0.323	0.288	0.035	40.767	36.366	4.402	3.581E-04	3.581E-06	10155
	2	0.309	0.274	0.036	39.110	34.586	4.524	3.848E-04	3.848E-06	8988
	3	0.316	0.288	0.028	39.940	36.411	3.529	2.673E-04	2.673E-06	13622
	4	0.286	0.252	0.033	36.107	31.884	4.223	4.811E-04	4.811E-06	6627
	5	0.295	0.262	0.033	37.340	33.110	4.230	3.653E-04	3.653E-06	9064
Promedio		0.306	0.273	0.033	38.653	34.471	4.181	3.713E-04	3.713E-06	9691
Desv. Est		0.015	0.016	0.003	1.906	1.995	0.386	7.628E-05	7.628E-07	2547

Secuencia 3:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
Unidad	1	0.466	0.418	0.047	58.830	52.840	5.989	5.654E-04	5.654E-06	9346
	2	0.466	0.424	0.042	58.923	53.643	5.280	7.226E-04	7.226E-06	7423
	3	0.468	0.414	0.055	59.188	52.288	6.900	4.875E-04	4.875E-06	10726
	4	0.457	0.404	0.053	57.754	51.047	6.706	5.361E-04	5.361E-06	9521
	5	0.484	0.436	0.047	61.132	55.132	6.000	5.505E-04	5.505E-06	10015
Promedio		0.468	0.419	0.049	59.165	52.990	6.175	5.724E-04	5.724E-06	9406
Desv. Est		0.010	0.012	0.005	1.228	1.525	0.647	8.892E-05	8.892E-07	1231

Secuencia 4:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
Unidad	1	0.272	0.250	0.022	34.355	31.604	2.751	2.734E-04	2.734E-06	11561
	2	0.265	0.240	0.025	33.497	30.316	3.181	3.180E-04	3.180E-06	9533
	3	0.266	0.241	0.025	33.661	30.442	3.219	4.515E-04	4.515E-06	6743
	4	0.282	0.258	0.024	35.645	32.572	3.073	4.819E-04	4.819E-06	6759
	5	0.278	0.253	0.025	35.191	32.024	3.167	3.037E-04	3.037E-06	10546
Promedio		0.273	0.248	0.024	34.470	31.391	3.078	3.657E-04	3.657E-06	9028
Desv. Est		0.007	0.008	0.002	0.937	0.987	0.191	9.422E-05	9.422E-07	2199

Secuencia 5:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
Unidad	1	0.542	0.489	0.053	68.533	61.832	6.701	6.580E-04	6.580E-06	9397
	2	0.548	0.489	0.059	69.233	61.749	7.485	6.488E-04	6.488E-06	9517
	3	0.540	0.484	0.056	68.218	61.111	7.107	6.838E-04	6.838E-06	8936
	4	0.522	0.473	0.048	65.920	59.828	6.092	5.794E-04	5.794E-06	10326
	5	0.549	0.492	0.057	69.355	62.210	7.145	6.303E-04	6.303E-06	9869
Promedio		0.540	0.485	0.055	68.252	61.346	6.906	6.401E-04	6.401E-06	9609
Desv. Est		0.011	0.007	0.004	1.387	0.936	0.533	3.901E-05	3.901E-07	521

Secuencia 6:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
Unidad	1	0.793	0.707	0.086	100.265	89.357	10.908	1.000E-03	1.000E-05	8933
	2	0.805	0.725	0.080	101.687	91.577	10.110	8.990E-04	8.990E-06	10186
	3	0.792	0.706	0.086	100.101	89.177	10.924	1.080E-03	1.080E-05	8255
	4	0.796	0.715	0.081	100.600	90.339	10.262	1.056E-03	1.056E-05	8553
	5	0.797	0.717	0.080	100.732	90.609	10.123	9.999E-04	9.999E-06	9061
Promedio		0.797	0.714	0.083	100.677	90.212	10.465	1.007E-03	1.007E-05	8998
Desv. Est		0.005	0.008	0.003	0.619	0.979	0.416	6.990E-05	6.990E-07	737

Secuencia 7:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
Unidad	1	0.535	0.483	0.051	67.595	61.093	6.502	5.964E-04	5.964E-06	10244
	2	0.525	0.467	0.059	66.368	58.956	7.412	5.320E-04	5.320E-06	11081
	3	0.515	0.455	0.061	65.142	57.469	7.673	6.212E-04	6.212E-06	9252
	4	0.502	0.442	0.059	63.427	55.915	7.512	7.314E-04	7.314E-06	7645
	5	0.511	0.457	0.054	64.636	57.787	6.849	6.345E-04	6.345E-06	9108
Promedio		0.518	0.461	0.057	65.434	58.244	7.190	6.231E-04	6.231E-06	9466
Desv. Est		0.013	0.015	0.004	1.604	1.927	0.494	7.223E-05	7.223E-07	1295

Secuencia 8:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
Unidad	1	1.028	0.921	0.107	129.919	116.335	13.584	1.276E-03	1.276E-05	9115
	2	1.024	0.913	0.111	129.423	115.394	14.029	1.269E-03	1.269E-05	9091
	3	1.031	0.922	0.108	130.259	116.565	13.694	1.214E-03	1.214E-05	9603
	4	1.032	0.925	0.106	130.389	116.944	13.445	1.369E-03	1.369E-05	8540
	5	1.056	0.947	0.109	133.427	119.643	13.784	1.311E-03	1.311E-05	9129
Promedio		1.034	0.926	0.108	130.683	116.976	13.707	1.288E-03	1.288E-05	9096
Desv. Est		0.012	0.013	0.002	1.578	1.596	0.220	5.724E-05	5.724E-07	377

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)
Nomenclatura LE-ROCO-MR-(106d)
Ensayo Módulo Resiliente INV-E-156

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm)

Edad Curado: 106 días

Datos:

ID	Diam. prom (m)	Altura prom. (m)	Área (m2)	Volumen (m3)	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	w (%)	Y _r (kg/m ³)	Y _d (kg/m ³)
LE-ROCO-MR-(106d)	0.10037	0.20489	0.00791	0.00162	4420.80	4141.40	164.20	7.03	2630.13	2457.49

Secuencia 9:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	1.557	1.394	0.163	196.780	176.215	20.564	1.995E-03	1.995E-05	8835
	2	1.551	1.386	0.165	195.977	175.131	20.846	1.940E-03	1.940E-05	9026
	3	1.549	1.386	0.163	195.708	175.103	20.605	2.013E-03	2.013E-05	8697
	4	1.543	1.377	0.166	195.007	173.993	21.014	2.006E-03	2.006E-05	8675
	5	1.498	1.335	0.163	189.365	168.777	20.588	1.874E-03	1.874E-05	9005
Promedio		1.540	1.376	0.164	194.567	173.844	20.724	1.966E-03	1.966E-05	8848
Desv. Est		0.024	0.023	0.002	2.976	2.939	0.198	5.862E-05	5.862E-07	166

Secuencia 10:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	0.518	0.469	0.050	65.521	59.252	6.269	6.218E-04	6.218E-06	9530
	2	0.545	0.494	0.051	68.849	62.447	6.402	7.181E-04	7.181E-06	8697
	3	0.531	0.461	0.071	67.143	58.200	8.943	7.029E-04	7.029E-06	8280
	4	0.518	0.473	0.045	65.500	59.817	5.683	6.446E-04	6.446E-06	9280
	5	0.546	0.487	0.059	69.065	61.605	7.460	6.913E-04	6.913E-06	8911
Promedio		0.532	0.477	0.055	67.216	60.264	6.951	6.757E-04	6.757E-06	8939
Desv. Est		0.014	0.014	0.010	1.725	1.736	1.285	4.079E-05	4.079E-07	490

Secuencia 11:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	0.797	0.715	0.082	100.670	90.314	10.356	1.036E-03	1.036E-05	8714
	2	0.779	0.701	0.079	98.477	88.531	9.946	1.036E-03	1.036E-05	8547
	3	0.784	0.704	0.080	99.049	88.957	10.092	1.042E-03	1.042E-05	8536
	4	0.776	0.691	0.086	98.080	87.270	10.810	9.396E-04	9.396E-06	9288
	5	0.765	0.684	0.081	96.720	86.483	10.238	1.126E-03	1.126E-05	7683
Promedio		0.780	0.699	0.081	98.599	88.311	10.288	1.036E-03	1.036E-05	8554
Desv. Est		0.011	0.012	0.003	1.441	1.492	0.330	6.589E-05	6.589E-07	575

Secuencia 12:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	1.528	1.360	0.168	193.062	171.848	21.213	1.914E-03	1.914E-05	8979
	2	1.542	1.378	0.164	194.929	174.184	20.745	1.830E-03	1.830E-05	9519
	3	1.561	1.395	0.166	197.252	176.269	20.983	2.057E-03	2.057E-05	8568
	4	1.583	1.421	0.162	200.043	179.536	20.507	1.903E-03	1.903E-05	9433
	5	1.613	1.447	0.166	203.862	182.862	21.000	1.849E-03	1.849E-05	9887
Promedio		1.565	1.400	0.165	197.830	176.940	20.890	1.911E-03	1.911E-05	9277
Desv. Est		0.034	0.034	0.002	4.265	4.353	0.271	8.922E-05	8.922E-07	512

Secuencia 13:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	0.778	0.700	0.077	98.286	88.527	9.758	1.050E-03	1.050E-05	8431
	2	0.794	0.711	0.083	100.345	89.881	10.463	9.829E-04	9.829E-06	9145
	3	0.800	0.715	0.085	101.068	90.358	10.710	1.002E-03	1.002E-05	9014
	4	0.784	0.707	0.077	99.083	89.350	9.733	8.777E-04	8.777E-06	10180
	5	0.796	0.714	0.082	100.599	90.287	10.312	1.005E-03	1.005E-05	8987
Promedio		0.790	0.710	0.081	99.876	89.681	10.195	9.835E-04	9.835E-06	9152
Desv. Est		0.009	0.006	0.003	1.153	0.759	0.434	6.408E-05	6.408E-07	637

Secuencia 14:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	1.038	0.930	0.107	131.132	117.590	13.542	1.197E-03	1.197E-05	9827
	2	1.050	0.942	0.109	132.744	119.015	13.730	1.349E-03	1.349E-05	8825
	3	1.050	0.939	0.111	132.740	118.676	14.064	1.587E-03	1.587E-05	7477
	4	1.050	0.943	0.107	132.688	119.145	13.542	1.365E-03	1.365E-05	8728
	5	1.066	0.955	0.112	134.761	120.638	14.123	1.285E-03	1.285E-05	9386
Promedio		1.051	0.942	0.109	132.813	119.013	13.800	1.357E-03	1.357E-05	8849
Desv. Est		0.010	0.009	0.002	1.289	1.095	0.279	1.449E-04	1.449E-06	886

Secuencia 15:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	2.179	1.968	0.212	275.427	248.672	26.754	3.422E-03	3.422E-05	7267
	2	2.138	1.911	0.227	270.142	241.503	28.639	2.850E-03	2.850E-05	8473
	3	2.104	1.889	0.215	265.917	238.714	27.203	2.660E-03	2.660E-05	8973
	4	2.174	1.953	0.220	274.684	246.824	27.860	2.277E-03	2.277E-05	10838
	5	2.186	1.969	0.217	276.207	248.846	27.362	2.794E-03	2.794E-05	8907
Promedio		2.156	1.938	0.218	272.475	244.912	27.564	2.801E-03	2.801E-05	8892
Desv. Est		0.034	0.036	0.006	4.358	4.564	0.719	4.129E-04	4.129E-06	1286

Laboratorio de Mezclas asfálticas - Universidad de Los Andes

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%)
Nomenclatura LE-R.02C2-MR-(106d)
Ensayo Módulo Resiliente INV-E-156

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%)

Edad Curado: 106 días

Datos:

ID	Diam. prom (m)	Altura prom. (m)	Área (m2)	Volumen (m3)	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	w (%)	Y _r (kg/m ³)	Y _d (kg/m ³)
LE-R.02C2-MR-(106d)	0.10033	0.19982	0.00791	0.00158	4337.00	4126.20	165.80	5.32	2644.49	2510.85

Secuencia 1:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente mm	Def. Unit. Res. mm/mm	Módulo Resiliente MPa
5 Ciclos	1	0.131	0.118	0.013	16.585	14.958	1.627	8.641E-05	8.641E-07	17310
	2	0.132	0.117	0.015	16.714	14.766	1.948	1.443E-04	1.443E-06	10233
	3	0.122	0.105	0.016	15.373	13.297	2.076	1.391E-04	1.391E-06	9562
	4	0.137	0.119	0.018	17.321	15.057	2.263	1.141E-04	1.141E-06	13196
	5	0.128	0.113	0.016	16.252	14.271	1.981	1.934E-04	1.934E-06	7379
Promedio		0.130	0.114	0.016	16.449	14.470	1.979	1.355E-04	1.355E-06	11536
Desv. Est		0.006	0.006	0.002	0.715	0.722	0.232	3.972E-05	3.972E-07	3840

Secuencia 2:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente mm	Def. Unit. Res. mm/mm	Módulo Resiliente MPa
5 Ciclos	1	0.284	0.255	0.030	35.971	32.199	3.772	2.492E-04	2.492E-06	12922
	2	0.280	0.248	0.032	35.363	31.312	4.051	2.250E-04	2.250E-06	13914
	3	0.287	0.257	0.030	36.349	32.566	3.783	2.915E-04	2.915E-06	11173
	4	0.288	0.259	0.029	36.444	32.738	3.707	3.938E-04	3.938E-06	8314
	5	0.295	0.264	0.031	37.318	33.338	3.979	2.265E-04	2.265E-06	14718
Promedio		0.287	0.256	0.031	36.289	32.430	3.858	2.772E-04	2.772E-06	12208
Desv. Est		0.006	0.006	0.001	0.715	0.749	0.148	7.048E-05	7.048E-07	2547

Secuencia 3:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente mm	Def. Unit. Res. mm/mm	Módulo Resiliente MPa
5 Ciclos	1	0.430	0.383	0.047	54.383	48.497	5.886	5.058E-04	5.058E-06	9588
	2	0.433	0.389	0.044	54.827	49.263	5.564	3.918E-04	3.918E-06	12575
	3	0.441	0.389	0.051	55.733	49.247	6.486	5.221E-04	5.221E-06	9432
	4	0.411	0.369	0.042	52.010	46.714	5.296	3.667E-04	3.667E-06	12738
	5	0.428	0.378	0.050	54.149	47.871	6.278	3.474E-04	3.474E-06	13782
Promedio		0.429	0.382	0.047	54.220	48.318	5.902	4.268E-04	4.268E-06	11623
Desv. Est		0.011	0.008	0.004	1.376	1.068	0.491	8.137E-05	8.137E-07	1984

Secuencia 4:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente mm	Def. Unit. Res. mm/mm	Módulo Resiliente MPa
5 Ciclos	1	0.235	0.204	0.031	29.669	25.756	3.914	1.386E-04	1.386E-06	18577
	2	0.229	0.200	0.029	28.982	25.284	3.698	2.052E-04	2.052E-06	12321
	3	0.233	0.207	0.026	29.457	26.228	3.229	3.426E-04	3.426E-06	7656
	4	0.222	0.194	0.028	28.117	24.542	3.575	2.226E-04	2.226E-06	11026
	5	0.248	0.221	0.028	31.405	27.898	3.507	2.619E-04	2.619E-06	10654
Promedio		0.233	0.205	0.028	29.526	25.942	3.584	2.342E-04	2.342E-06	12047
Desv. Est		0.010	0.010	0.002	1.208	1.259	0.252	7.520E-05	7.520E-07	4031

Secuencia 5:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente mm	Def. Unit. Res. mm/mm	Módulo Resiliente MPa
5 Ciclos	1	0.476	0.428	0.048	60.206	54.181	6.025	4.575E-04	4.575E-06	11843
	2	0.500	0.448	0.052	63.217	56.644	6.573	4.958E-04	4.958E-06	11424
	3	0.490	0.439	0.050	61.933	55.550	6.382	4.377E-04	4.377E-06	12691
	4	0.504	0.450	0.055	63.753	56.859	6.893	4.540E-04	4.540E-06	12525
	5	0.505	0.452	0.053	63.848	57.178	6.670	4.912E-04	4.912E-06	11641
Promedio		0.495	0.443	0.051	62.591	56.082	6.509	4.672E-04	4.672E-06	12025
Desv. Est		0.012	0.010	0.003	1.537	1.227	0.327	2.517E-05	2.517E-07	556

Secuencia 6:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente mm	Def. Unit. Res. mm/mm	Módulo Resiliente MPa
5 Ciclos	1	0.753	0.657	0.096	95.232	83.125	12.107	7.229E-04	7.229E-06	11499
	2	0.763	0.675	0.088	96.489	85.396	11.093	6.434E-04	6.434E-06	13273
	3	0.744	0.663	0.082	94.154	83.841	10.313	8.342E-04	8.342E-06	10050
	4	0.746	0.656	0.089	94.317	83.016	11.301	6.875E-04	6.875E-06	12075
	5	0.749	0.670	0.079	94.762	84.773	9.989	6.648E-04	6.648E-06	12752
Promedio		0.751	0.664	0.087	94.991	84.030	10.961	7.106E-04	7.106E-06	11930
Desv. Est		0.007	0.008	0.007	0.937	1.037	0.838	7.514E-05	7.514E-07	1247

Secuencia 7:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente mm	Def. Unit. Res. mm/mm	Módulo Resiliente MPa
5 Ciclos	1	0.495	0.442	0.053	62.648	55.929	6.719	4.160E-04	4.160E-06	13445
	2	0.498	0.441	0.057	62.980	55.819	7.161	5.787E-04	5.787E-06	9645
	3	0.486	0.429	0.057	61.408	54.238	7.170	4.883E-04	4.883E-06	11108
	4	0.496	0.440	0.056	62.721	55.649	7.072	4.897E-04	4.897E-06	11363
	5	0.498	0.441	0.057	62.982	55.831	7.150	4.736E-04	4.736E-06	11789
Promedio		0.495	0.439	0.056	62.548	55.493	7.055	4.893E-04	4.893E-06	11470
Desv. Est		0.005	0.006	0.002	0.655	0.709	0.192	5.834E-05	5.834E-07	1367

Secuencia 8:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente mm	Def. Unit. Res. mm/mm	Módulo Resiliente MPa
5 Ciclos	1	0.959	0.856	0.103	121.255	108.260	12.996	8.748E-04	8.748E-06	12376
	2	0.980	0.859	0.121	123.895	108.619	15.276	1.010E-03	1.010E-05	10756
	3	0.994	0.885	0.109	125.752	111.984	13.769	8.585E-04	8.585E-06	13043
	4	1.011	0.906	0.105	127.872	114.594	13.278	1.054E-03	1.054E-05	10873
	5	1.017	0.905	0.112	128.663	114.456	14.207	9.690E-04	9.690E-06	11811
Promedio		0.992	0.882	0.110	125.488	111.583	13.905	9.532E-04	9.532E-06	11772
Desv. Est		0.024	0.024	0.007	3.012	3.054	0.896	8.472E-05	8.472E-07	978

Laboratorio de Mezclas asfálticas - Universidad de Los Andes

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%)
Nomenclatura LE-R.02C2-MR-(106d)
Ensayo Módulo Resiliente INV-E-156

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (2%) + Aditivo(0.02%)

Edad Curado: 106 días

Datos:

ID	Diam. prom (m)	Altura prom. (m)	Área (m2)	Volumen (m3)	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	w (%)	Y _r (kg/m ³)	Y _d (kg/m ³)
LE-R.02C2-MR-(106d)	0.10033	0.19982	0.00791	0.00158	4337.00	4126.20	165.80	5.32	2644.49	2510.85

Secuencia 9:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total	Carga Ciclica	Carga de Contacto	Esf. Axial Total	Esf. Ciclico	Esf. De Contacto	Def. Resiliente	Def. Unit. Res.	Módulo Resiliente
Unidad		(kN)	(kN)	(kN)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	mm	mm/mm	MPa
5 Ciclos	1	1.539	1.377	0.161	194.603	174.207	20.396	1.434E-03	1.434E-05	12145
	2	1.535	1.369	0.166	194.141	173.147	20.994	1.434E-03	1.434E-05	12071
	3	1.550	1.391	0.159	196.027	175.888	20.139	1.699E-03	1.699E-05	10353
	4	1.581	1.420	0.161	199.969	179.559	20.410	1.308E-03	1.308E-05	13729
	5	1.567	1.398	0.170	198.254	176.782	21.472	1.456E-03	1.456E-05	12140
Promedio		1.554	1.391	0.164	196.599	175.917	20.682	1.466E-03	1.466E-05	12088
Desv. Est		0.020	0.020	0.004	2.472	2.481	0.541	1.426E-04	1.426E-06	1195

Secuencia 10:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total	Carga Ciclica	Carga de Contacto	Esf. Axial Total	Esf. Ciclico	Esf. De Contacto	Def. Resiliente	Def. Unit. Res.	Módulo Resiliente
Unidad		(kN)	(kN)	(kN)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	mm	mm/mm	MPa
5 Ciclos	1	0.511	0.455	0.056	64.595	57.554	7.041	3.750E-04	3.750E-06	15348
	2	0.495	0.441	0.054	62.640	55.765	6.874	4.249E-04	4.249E-06	13125
	3	0.483	0.436	0.047	61.041	55.097	5.944	6.243E-04	6.243E-06	8825
	4	0.482	0.426	0.057	61.008	53.859	7.149	4.842E-04	4.842E-06	11123
	5	0.489	0.432	0.058	61.893	54.601	7.292	5.112E-04	5.112E-06	10681
Promedio		0.492	0.438	0.054	62.235	55.375	6.860	4.839E-04	4.839E-06	11820
Desv. Est		0.012	0.011	0.004	1.482	1.403	0.535	9.462E-05	9.462E-07	2495

Secuencia 11:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total	Carga Ciclica	Carga de Contacto	Esf. Axial Total	Esf. Ciclico	Esf. De Contacto	Def. Resiliente	Def. Unit. Res.	Módulo Resiliente
Unidad		(kN)	(kN)	(kN)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	mm	mm/mm	MPa
5 Ciclos	1	0.722	0.636	0.086	91.330	80.441	10.890	6.780E-04	6.780E-06	11865
	2	0.721	0.636	0.084	91.173	80.502	10.671	8.160E-04	8.160E-06	9865
	3	0.751	0.672	0.078	94.935	85.022	9.912	7.629E-04	7.629E-06	11144
	4	0.766	0.688	0.078	96.897	87.014	9.883	6.547E-04	6.547E-06	13291
	5	0.752	0.665	0.086	95.051	84.137	10.914	7.597E-04	7.597E-06	11075
Promedio		0.742	0.660	0.083	93.877	83.423	10.454	7.343E-04	7.343E-06	11448
Desv. Est		0.020	0.023	0.004	2.520	2.889	0.517	6.642E-05	6.642E-07	1256

Secuencia 12:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total	Carga Ciclica	Carga de Contacto	Esf. Axial Total	Esf. Ciclico	Esf. De Contacto	Def. Resiliente	Def. Unit. Res.	Módulo Resiliente
Unidad		(kN)	(kN)	(kN)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	mm	mm/mm	MPa
5 Ciclos	1	1.541	1.380	0.161	194.871	174.518	20.353	1.233E-03	1.233E-05	14149
	2	1.567	1.404	0.162	198.134	177.619	20.515	1.578E-03	1.578E-05	11256
	3	1.578	1.413	0.165	199.586	178.672	20.913	1.466E-03	1.466E-05	12186
	4	1.564	1.406	0.159	197.828	177.780	20.048	1.768E-03	1.768E-05	10053
	5	1.565	1.399	0.166	197.983	176.981	21.002	1.535E-03	1.535E-05	11527
Promedio		1.563	1.400	0.163	197.680	177.114	20.566	1.516E-03	1.516E-05	11834
Desv. Est		0.014	0.012	0.003	1.721	1.572	0.396	1.938E-04	1.938E-06	1507

Secuencia 13:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total	Carga Ciclica	Carga de Contacto	Esf. Axial Total	Esf. Ciclico	Esf. De Contacto	Def. Resiliente	Def. Unit. Res.	Módulo Resiliente
Unidad		(kN)	(kN)	(kN)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	mm	mm/mm	MPa
5 Ciclos	1	0.749	0.659	0.090	94.748	83.349	11.399	7.548E-04	7.548E-06	11042
	2	0.751	0.668	0.084	95.045	84.468	10.577	7.282E-04	7.282E-06	11599
	3	0.768	0.683	0.085	97.149	86.425	10.724	7.109E-04	7.109E-06	12158
	4	0.738	0.662	0.077	93.400	83.706	9.694	6.658E-04	6.658E-06	12572
	5	0.750	0.664	0.086	94.864	83.931	10.933	7.494E-04	7.494E-06	11199
Promedio		0.751	0.667	0.084	95.041	84.376	10.665	7.218E-04	7.218E-06	11714
Desv. Est		0.011	0.010	0.005	1.347	1.216	0.625	3.587E-05	3.587E-07	645

Secuencia 14:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total	Carga Ciclica	Carga de Contacto	Esf. Axial Total	Esf. Ciclico	Esf. De Contacto	Def. Resiliente	Def. Unit. Res.	Módulo Resiliente
Unidad		(kN)	(kN)	(kN)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	mm	mm/mm	MPa
5 Ciclos	1	0.979	0.871	0.108	123.797	110.175	13.622	9.195E-04	9.195E-06	11983
	2	1.022	0.902	0.120	129.295	114.141	15.154	9.423E-04	9.423E-06	12113
	3	1.007	0.898	0.108	127.326	113.638	13.688	9.060E-04	9.060E-06	12543
	4	1.000	0.893	0.107	126.467	112.958	13.509	1.064E-03	1.064E-05	10617
	5	1.016	0.905	0.112	128.528	114.401	14.127	1.158E-03	1.158E-05	9883
Promedio		1.005	0.894	0.111	127.083	113.062	14.020	9.978E-04	9.978E-06	11428
Desv. Est		0.017	0.013	0.005	2.134	1.705	0.676	1.090E-04	1.090E-06	1125

Secuencia 15:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total	Carga Ciclica	Carga de Contacto	Esf. Axial Total	Esf. Ciclico	Esf. De Contacto	Def. Resiliente	Def. Unit. Res.	Módulo Resiliente
Unidad		(kN)	(kN)	(kN)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	mm	mm/mm	MPa
5 Ciclos	1	2.123	1.906	0.217	268.506	241.055	27.452	1.903E-03	1.903E-05	12668
	2	2.128	1.911	0.216	269.101	241.741	27.360	2.030E-03	2.030E-05	11906
	3	2.050	1.834	0.216	259.341	231.972	27.369	1.828E-03	1.828E-05	12693
	4	2.168	1.948	0.220	274.197	246.367	27.830	2.203E-03	2.203E-05	11184
	5	2.172	1.947	0.226	274.761	246.231	28.530	2.509E-03	2.509E-05	9812
Promedio		2.128	1.909	0.219	269.181	241.473	27.708	2.095E-03	2.095E-05	11653
Desv. Est		0.049	0.046	0.004	6.196	5.854	0.498	2.721E-04	2.721E-06	1203

Laboratorio de Mezclas asfálticas - Universidad de Los Andes

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (6%) + Aditivo(0.06%)
Nomenclatura LE-R.06C6-MR-(106d)
Ensayo Módulo Resiliente INV-E-156

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (6%) + Aditivo(0.06%) **Edad Curado:** 106 días
Datos:

ID	Diam. prom (m)	Altura prom. (m)	Área (m2)	Volumen (m3)	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	w (%)	Y _r (kg/m ³)	Y _d (kg/m ³)
LE-R.06C6-MR-(106d)	0.10026	0.20014	0.00789	0.00158	4325.40	4121.00	111.40	5.10	2672.30	2542.68

Secuencia 1:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	0.161	0.149	0.012	20.401	18.852	1.549	3.565E-05	3.565E-07	52879
	2	0.165	0.148	0.017	20.847	18.758	2.088	5.942E-05	5.942E-07	31571
	3	0.139	0.120	0.019	17.626	15.185	2.441	2.613E-05	2.613E-07	58121
	4	0.157	0.140	0.017	19.863	17.657	2.206	5.005E-05	5.005E-07	35276
	5	0.168	0.151	0.018	21.253	19.038	2.215	1.107E-04	1.107E-06	17203
Promedio		0.158	0.142	0.017	19.998	17.898	2.100	5.638E-05	5.638E-07	39010
Desv. Est		0.011	0.013	0.003	1.423	1.610	0.334	3.294E-05	3.294E-07	16601

Secuencia 2:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	0.339	0.307	0.032	42.839	38.842	3.997	8.891E-05	8.891E-07	43686
	2	0.344	0.315	0.029	43.533	39.893	3.640	1.492E-04	1.492E-06	26743
	3	0.334	0.305	0.029	42.238	38.615	3.623	1.236E-04	1.236E-06	31255
	4	0.306	0.274	0.032	38.688	34.659	4.029	1.412E-04	1.412E-06	24540
	5	0.314	0.284	0.030	39.750	35.969	3.780	9.677E-05	9.677E-07	37171
Promedio		0.327	0.297	0.030	41.410	37.596	3.814	1.199E-04	1.199E-06	32679
Desv. Est		0.016	0.017	0.002	2.086	2.188	0.192	2.655E-05	2.655E-07	7823

Secuencia 3:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	0.468	0.419	0.049	59.151	52.971	6.180	1.035E-04	1.035E-06	51190
	2	0.471	0.425	0.046	59.629	53.779	5.850	1.140E-04	1.140E-06	47188
	3	0.450	0.402	0.048	56.949	50.864	6.084	1.110E-04	1.110E-06	45840
	4	0.502	0.453	0.048	63.432	57.326	6.106	2.545E-04	2.545E-06	22528
	5	0.514	0.455	0.059	64.953	57.545	7.409	1.936E-04	1.936E-06	29720
Promedio		0.481	0.431	0.050	60.823	54.497	6.326	1.553E-04	1.553E-06	39293
Desv. Est		0.026	0.023	0.005	3.282	2.887	0.618	6.645E-05	6.645E-07	12444

Secuencia 4:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	0.277	0.253	0.025	35.074	31.965	3.109	8.880E-05	8.880E-07	35998
	2	0.271	0.246	0.025	34.272	31.091	3.181	1.052E-04	1.052E-06	29553
	3	0.279	0.253	0.026	35.232	31.980	3.252	2.232E-04	2.232E-06	14330
	4	0.288	0.265	0.023	36.436	33.488	2.947	1.667E-04	1.667E-06	20084
	5	0.270	0.242	0.027	34.125	30.655	3.470	1.788E-04	1.788E-06	17143
Promedio		0.277	0.252	0.025	35.028	31.836	3.192	1.525E-04	1.525E-06	23422
Desv. Est		0.007	0.009	0.002	0.924	1.086	0.192	5.519E-05	5.519E-07	9069

Secuencia 5:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	0.575	0.521	0.053	72.680	65.941	6.739	1.535E-04	1.535E-06	42963
	2	0.565	0.512	0.054	71.498	64.727	6.771	2.354E-04	2.354E-06	27491
	3	0.558	0.510	0.048	70.562	64.466	6.096	2.560E-04	2.560E-06	25178
	4	0.559	0.510	0.050	70.752	64.472	6.280	2.771E-04	2.771E-06	23269
	5	0.558	0.508	0.050	70.546	64.197	6.349	1.443E-04	1.443E-06	44490
Promedio		0.563	0.512	0.051	71.208	64.761	6.447	2.133E-04	2.133E-06	32678
Desv. Est		0.007	0.005	0.002	0.910	0.686	0.296	6.067E-05	6.067E-07	10210

Secuencia 6:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	0.811	0.738	0.073	102.569	93.320	9.249	3.169E-04	3.169E-06	29447
	2	0.828	0.750	0.079	104.775	94.836	9.939	2.846E-04	2.846E-06	33321
	3	0.839	0.760	0.079	106.141	96.166	9.975	2.295E-04	2.295E-06	41902
	4	0.850	0.772	0.077	107.466	97.702	9.764	3.767E-04	3.767E-06	25938
	5	0.863	0.765	0.098	109.141	96.731	12.411	1.781E-04	1.781E-06	54321
Promedio		0.838	0.757	0.081	106.018	95.751	10.268	2.772E-04	2.772E-06	36986
Desv. Est		0.020	0.014	0.010	2.515	1.709	1.233	7.686E-05	7.686E-07	11369

Secuencia 7:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	0.547	0.500	0.047	69.239	63.235	6.004	1.090E-04	1.090E-06	58012
	2	0.565	0.516	0.050	71.474	65.203	6.271	1.695E-04	1.695E-06	38476
	3	0.583	0.524	0.059	73.730	66.224	7.506	2.979E-04	2.979E-06	22232
	4	0.553	0.501	0.052	69.941	63.340	6.601	1.215E-04	1.215E-06	52123
	5	0.561	0.506	0.054	70.904	64.054	6.850	1.885E-04	1.885E-06	33982
Promedio		0.562	0.509	0.053	71.058	64.411	6.646	1.773E-04	1.773E-06	40965
Desv. Est		0.014	0.010	0.005	1.724	1.282	0.578	7.501E-05	7.501E-07	14326

Secuencia 8:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	1.126	1.000	0.126	142.425	126.430	15.994	2.986E-04	2.986E-06	42345
	2	1.129	1.024	0.104	142.756	129.560	13.196	3.514E-04	3.514E-06	36865
	3	1.132	1.026	0.106	143.140	129.789	13.351	4.187E-04	4.187E-06	30997
	4	1.139	1.033	0.106	144.100	130.703	13.397	5.699E-04	5.699E-06	22935
	5	1.118	1.012	0.106	141.445	128.006	13.439	3.457E-04	3.457E-06	37032
Promedio		1.129	1.019	0.110	142.773	128.898	13.876	3.969E-04	3.969E-06	34035
Desv. Est		0.008	0.013	0.009	0.972	1.686	1.188	1.058E-04	1.058E-06	7391

Laboratorio de Mezclas asfálticas - Universidad de Los Andes

Material Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (6%) + Aditivo(0.06%)
Nomenclatura LE-R.06C6-MR-(106d)
Ensayo Módulo Resiliente INV-E-156

Muestra: Escoria Conformada de Siderúrgica Diaco (TMN:15.9mm) + Cemento (6%) + Aditivo(0.06%) **Edad Curado:** 106 días
Datos:

ID	Diam. prom (m)	Altura prom. (m)	Área (m2)	Volumen (m3)	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	w (%)	Y _r (kg/m ³)	Y _d (kg/m ³)
LE-R.06C6-MR-(106d)	0.10026	0.20014	0.00789	0.00158	4325.40	4121.00	111.40	5.10	2672.30	2542.68

Secuencia 9:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	1.679	1.518	0.160	212.315	192.050	20.265	4.778E-04	4.778E-06	40199
	2	1.692	1.533	0.159	214.033	193.921	20.112	5.608E-04	5.608E-06	34582
	3	1.681	1.512	0.169	212.578	191.206	21.372	6.034E-04	6.034E-06	31691
	4	1.666	1.504	0.162	210.667	190.205	20.463	4.852E-04	4.852E-06	39201
	5	1.661	1.499	0.162	210.110	189.628	20.482	5.272E-04	5.272E-06	35969
Promedio		1.676	1.513	0.162	211.941	191.402	20.539	5.309E-04	5.309E-06	36328
Desv. Est		0.012	0.013	0.004	1.573	1.687	0.490	5.260E-05	5.260E-07	3461

Secuencia 10:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	0.528	0.478	0.050	66.805	60.482	6.323	1.966E-04	1.966E-06	30771
	2	0.555	0.505	0.050	70.180	63.833	6.347	2.138E-04	2.138E-06	29854
	3	0.576	0.516	0.060	72.913	65.272	7.641	1.376E-04	1.376E-06	47438
	4	0.554	0.501	0.052	70.051	63.424	6.627	1.928E-04	1.928E-06	32892
	5	0.580	0.514	0.066	73.340	65.034	8.306	1.476E-04	1.476E-06	44064
Promedio		0.559	0.503	0.056	70.658	63.609	7.049	1.777E-04	1.777E-06	37004
Desv. Est		0.021	0.015	0.007	2.633	1.914	0.884	3.318E-05	3.318E-07	8148

Secuencia 11:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	0.843	0.765	0.078	106.618	96.740	9.879	1.941E-04	1.941E-06	49831
	2	0.864	0.782	0.082	109.325	98.926	10.399	2.404E-04	2.404E-06	41147
	3	0.850	0.759	0.090	107.462	96.021	11.441	2.365E-04	2.365E-06	40599
	4	0.835	0.761	0.074	105.624	96.305	9.319	2.626E-04	2.626E-06	36668
	5	0.845	0.766	0.079	106.825	96.827	9.997	3.268E-04	3.268E-06	29632
Promedio		0.847	0.767	0.081	107.171	96.964	10.207	2.521E-04	2.521E-06	39575
Desv. Est		0.011	0.009	0.006	1.373	1.145	0.791	4.854E-05	4.854E-07	7349

Secuencia 12:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	1.659	1.501	0.159	209.867	189.817	20.050	4.827E-04	4.827E-06	39321
	2	1.651	1.487	0.164	208.767	188.038	20.730	6.181E-04	6.181E-06	30423
	3	1.672	1.511	0.161	211.431	191.110	20.322	6.322E-04	6.322E-06	30228
	4	1.692	1.528	0.163	213.969	193.300	20.669	5.468E-04	5.468E-06	35348
	5	1.684	1.513	0.171	212.954	191.324	21.630	8.061E-04	8.061E-06	23736
Promedio		1.671	1.508	0.164	211.398	190.718	20.680	6.172E-04	6.172E-06	31811
Desv. Est		0.017	0.015	0.005	2.139	1.948	0.598	1.214E-04	1.214E-06	5885

Secuencia 13:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	0.850	0.770	0.080	107.478	97.333	10.145	2.690E-04	2.690E-06	36180
	2	0.857	0.777	0.080	108.394	98.327	10.066	2.766E-04	2.766E-06	35552
	3	0.862	0.780	0.082	109.014	98.694	10.320	2.574E-04	2.574E-06	38345
	4	0.846	0.763	0.083	106.958	96.466	10.492	2.992E-04	2.992E-06	32239
	5	0.841	0.760	0.081	106.309	96.071	10.238	2.978E-04	2.978E-06	32263
Promedio		0.851	0.770	0.081	107.631	97.378	10.252	2.800E-04	2.800E-06	34916
Desv. Est		0.009	0.009	0.001	1.086	1.137	0.164	1.823E-05	1.823E-07	2644

Secuencia 14:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	1.105	1.000	0.106	139.813	126.444	13.368	3.552E-04	3.552E-06	35598
	2	1.109	1.005	0.104	140.280	127.067	13.212	2.594E-04	2.594E-06	48990
	3	1.119	1.014	0.105	141.481	128.246	13.235	4.745E-04	4.745E-06	27025
	4	0.672	0.567	0.105	85.057	129.930	13.311	4.396E-04	4.396E-06	29559
	5	1.148	1.040	0.108	145.236	131.524	13.712	5.107E-04	5.107E-06	25756
Promedio		1.031	0.925	0.106	130.373	128.642	13.368	4.079E-04	4.079E-06	33386
Desv. Est		0.201	0.201	0.002	25.422	2.088	0.202	1.010E-04	1.010E-06	9509

Secuencia 15:

Parámetro	Ciclo	Carga Axial Total (kN)	Carga Ciclica (kN)	Carga de Contacto (kN)	Esf. Axial Total (kPa)	Esf. Ciclico (kPa)	Esf. De Contacto (kPa)	Def. Resiliente (mm)	Def. Unit. Res. (mm/mm)	Módulo Resiliente (MPa)
5 Ciclos	1	2.217	1.997	0.219	280.359	252.627	27.732	7.365E-04	7.365E-06	34301
	2	2.213	1.999	0.214	279.874	252.862	27.012	7.085E-04	7.085E-06	35690
	3	2.242	2.027	0.215	283.611	256.360	27.251	7.287E-04	7.287E-06	35178
	4	2.246	2.030	0.216	284.096	256.766	27.329	7.474E-04	7.474E-06	34353
	5	2.227	2.007	0.220	281.660	253.860	27.800	7.204E-04	7.204E-06	35241
Promedio		2.229	2.012	0.217	281.920	254.495	27.425	7.283E-04	7.283E-06	34953
Desv. Est		0.015	0.015	0.003	1.889	1.949	0.333	1.491E-05	1.491E-07	605

B. Anexo: Ficha técnica de los aditivos utilizados (Fabricante)

FICHA TÉCNICA / VERSIÓN 8

CEMENTO ESTRUCTURAL **MAX**



Imagina todo lo que podemos
CONSTRUIR JUNTOS



CEMENTO ESTRUCTURAL MAX

Es un cemento especialmente diseñado para la producción industrializada de concreto, que ofrece una mayor eficiencia y un alto desarrollo de resistencias a edades iniciales y finales.

Las especificaciones del Cemento Estructural Max cumplen con los valores de la Norma Técnica Colombiana NTC 121 (Tipo ART).

USOS:



Elaboración de concretos y morteros en plantas concreteras y centrales de mezclas.



Concretos y morteros para sistemas especiales de colocación, concretos lanzados, morteros proyectados, inyecciones estructurales, etc.



Producción de concreto para altas solicitudes estructurales.



Estructuras de concreto con requisitos de rápida puesta en servicio.



Construcciones con producción industrializada de concretos.



Concretos y morteros para reparaciones de tipo estructural.



Concretos para pavimentos y pisos industriales.



Elementos de concreto pretensado y postensado.



Diversos formatos de prefabricados con altas prestaciones estructurales.



Producción de concretos que requieren una mayor resistencia inicial.



Lechadas de inyección.

BENEFICIOS:

VENTAJAS CONSTRUCTIVAS

- En la producción de concretos y morteros ofrece un alto desarrollo de resistencias en todas las edades.
- Permite optimizar consumos de cemento a través de diseños eficientes, para lograr concretos y morteros más económicos con adecuados niveles de resistencia.
- En plantas, centrales de mezclas y obras con producción industrializada, se aumenta la productividad gracias a su manejo a granel.
- Su rápido desarrollo de resistencia permite agilizar el avance de los proyectos.
- La versatilidad de su presentación en sacos, permite la producción de concreto de forma eficiente en obras medianas y pequeñas y en plantas de prefabricados.

VENTAJAS EN SOSTENIBILIDAD

Al utilizar el “Cemento Estructural Max” de Argos, se garantiza el uso de un producto suministrado por una empresa responsable en materia ambiental, social y económica, y transparente con sus grupos de interés, tal y como se evidencia en el reporte de sostenibilidad corporativo “Reporte Integrado” que Argos realiza anualmente con base en el Global Reporting Initiative (GRI), en el cual presenta los resultados de su desempeño y sus planes de acción, en relación a cada uno de los aspectos más relevantes para la sostenibilidad del negocio y sus grupos de interés. Este reporte se puede encontrar en la página web de la compañía (<https://argos.co/>), en la sección “Sostenibilidad”.

Dentro de las características de sostenibilidad generales del “Cemento Estructural Max”, se destacan:



Material con contenido reciclado, disminuyendo de esta manera el consumo de recursos naturales no renovables en su fabricación.

Nota: Los porcentajes de contenido reciclado pre-consumo pueden variar de acuerdo al tipo de producto y la disponibilidad del material. Algunos productos o plantas pueden no tener dicha adición.



Producto fabricado en la región: a 160 km o menos de distancia del punto de venta o de la obra.

Nota: Esta distancia puede variar dependiendo de la ubicación geográfica de la obra.



Se cuenta con diferentes alternativas amigables con el ambiente para el transporte de este producto, incluyendo vehículos eléctricos y vehículos a gas.



Producto de bajas emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles, lo que contribuye a una mejor calidad ambiental de los interiores.



El empaque de este producto podrá ser devuelto a la compañía para aprovechamiento del material, de acuerdo a las condiciones específicas del programa Sacos Verdes y la ubicación de la obra.



Material con Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés) y Auto-Declaración Ambiental de Producto (EPD, por sus siglas en inglés).

Nota: Aplica para “Cemento Estructural Max” producido en Planta Rioclaro.

Teniendo en cuenta lo anterior, este producto, combinado con las estrategias de diseño y construcción de la edificación, puede contribuir a obtener puntos en las siguientes certificaciones de construcción sostenible:

CERTIFICACIÓN	LEED® V4.1	CASA COLOMBIA V2.1
CRITERIO	<p>Materiales y recursos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Transparencia y optimización de productos de construcción - Fuentes de materias primas. • Transparencia y optimización de productos de construcción - EPD. • Reducción del impacto en el ciclo de vida de la edificación - LCA de la Edificación. <p>Calidad ambiental interiores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Materiales de baja emisión <p>(Hasta 7 puntos)</p>	<p>Sostenibilidad en obra:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Manejo de residuos de construcción <p>Eficiencia en materiales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Origen de los materiales y productos. • Productos y materiales de bajo impacto ambiental. • Productos con atributos múltiples de sostenibilidad. • Productos y materiales con LCA. <p>(Hasta 7 puntos)</p>

Para conocer las características de sostenibilidad específicas del cemento suministrado a su proyecto y los detalles de la contribución a la obtención de las certificaciones mencionadas anteriormente, puedes solicitar el certificado correspondiente a través de nuestros canales de atención.

PRESENTACIÓN:

- Sacos de 42,5 kg
- Granel.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS:

PARÁMETROS FÍSICOS		NORMA DE ENSAYO	NTC 121 TIPO ART	ASTM C-1157 TIPO HE	ESPECIFICACIÓN ARGOS
Finura	Blaine, mín. (cm ² /gr)	NTC 33	A	A	A
	Retenido Tamiz 45 µm (%)	NTC 294	A	A	A
Cambio de longitud por autoclave expansión, máx. (%)		NTC 107	0.8	0.8	0.8
Tiempo de fraguado, Ensayo de Vicat*	No menos de, minutos	NTC 118	45	45	90
	No más de, minutos	NTC 118	420	420	360
Expansión de barras de mortero a 14 días, máx. (%)		NTC 4927	0.020	0.020	0.020
RESISTENCIA MÍNIMA A LA COMPRESIÓN, (MPa)					
1 día		NTC 220	11.0	12.0	12.0
3 días		NTC 220	22.0	24.0	24.0
28 días		NTC 220	-----	----	43.4

A: Los resultados de estos ensayos deben ser informados en todos los certificados que sean solicitados.

B: El tiempo de fraguado se refiere al tiempo de fraguado inicial en la NTC 118.

RECOMENDACIONES:

- El uso y aplicación de nuestros cementos se deben hacer bajo los lineamientos de la normativa técnica de construcción vigente.
- En la elaboración de concretos se recomienda la revisión y aplicación de la NTC 3318 y Norma Sismo Resistente Colombiana vigente; requisitos de producción, calidad y durabilidad.
- Almacene el cemento en un lugar seco, cubierto y alejado de zonas húmedas.

ESTAMOS PARA AYUDAR

En ARGOS estamos comprometidos a ayudarte a construir grandes obras y sacar el mejor provecho de nuestros productos. Si tienes preguntas o reclamos sobre este producto comunícate con nuestros canales de atención:



DESDE TELÉFONO FIJO:

018000527467



DESDE CELULAR:

#250

Asesoría técnica:

ASESORVIRTUAL@ARGOS.COM.CO

Para aprender sobre la tecnología y aplicaciones de este producto, ingresa a:

WWW.360ENCONCRETO.COM

Para mayor información acerca de nuestros productos y servicios, consulta nuestra página web: **COLOMBIA.ARGOS.CO**



ARGOS

Empresa de cemento del  **GRUPO ARGOS**

FICHA TÉCNICA

Versión 1.0.

November 1, 2010



I. NOMBRE DE LA SUBSTANCIA:

RoadCem-PowerCem®™

II. DESCRIPCIÓN:

RoadCem es un aditivo en grano muy fino basado en metales alcalinos, alcalinotérreos y zeolitas sintéticas enriquecidos con un material proactivo complejo que le aporta características únicas al producto final.

Esta mezcla especial de substancias con características químicas específicas contribuyen unas con otras para que se realicen reacciones químicas proactivas/reactivas al añadirse a las mezclas de cemento, formando agujas cristalinas en todas las direcciones; estabilizando los lados y la parte inferior de la superficie, con lo que se incrementa la flexibilidad y la fuerza de las capas de los caminos y mejora el desempeño de la adherencia entre dichas capas.

RoadCem modifica la dinámica y química dentro del proceso de hidratación del cemento, por lo que se puede acelerar o demorar el proceso de hidratación del cemento en caso de necesidad. Gracias a esto, existe la posibilidad de realizar un diseño único para cada situación. RoadCem permite la unión de casi todos los tipos de materiales en la construcción de caminos mediante el uso de materiales in situ, haciendo innecesario, en principio, el acarreo y retiro de materiales.

III. VENTAJAS:

A. ESTRUCTURALES Y CONSTRUCTIVAS:

Logra que los suelos se estabilicen e inmovilicen.

Posibilita la construcción de losas grandes con menos o hasta sin juntas de expansión.

Reduce las etapas y el tiempo de realización del procedimiento constructivo.



Puede ser colocado con lluvia y con suelos saturados de humedad.

Posibilita el uso de casi todos los materiales del sitio (inclusive aquellos que son considerados como desecho o inapropiados) con independencia de su calidad.

Reduce el espesor del pavimento estructural con el mismo desempeño que el tradicional.

Reduce el manejo de los materiales de desperdicio.

Mejora la adherencia de los materiales, aumenta la resistencia a la flexión y a la compresión.

B. AMBIENTALES:

Reduce la energía que se requiere para la construcción de caminos lo cual está asociado a la reducción y/o eliminación de los daños al medio ambiente y a la ecología.

Se utilizan materiales de construcción que cumplen con las normas holandesas de productos amigables con el medio ambiente.

FICHA TÉCNICA

Versión 1.0.

November 1, 2010



Reduce la emisión de CO² en el proceso constructivo, mediante el ahorro de materiales aglutinantes como el cemento, por el uso de menos transporte y por la reducción del espesor de las capas asfálticas.

C. MANTENIMIENTO:

Reduce totalmente los mantenimientos preventivos de las capas que conforman los caminos.

Reduce significativamente los mantenimientos exhaustivos de las capas que conforman los caminos.

D. COSTOS:

Reduce la necesidad de aditivos adicionales a un mínimo absoluto.

Alarga la vida de los caminos.

Reduce las etapas y el tiempo de realización del procedimiento constructivo.

Posibilita el uso de los materiales del sitio (inclusive aquellos que se consideran de desecho o inapropiados).

Evita que se importe material mejorado.

Reduce el costo por el manejo de los materiales de desperdicio.

Reduce el consumo de combustibles.

Reduce el costo total de la construcción de caminos hasta un 40% y en tiempos hasta un 70% en comparación con los métodos tradicionales.

IV. INSTRUCCIONES DE USO:

1. Medición de alturas y configuración de perfiles.
2. Trabajos de movimiento de tierras y primer allanado (quitando las piedras grandes).
3. Configuración de perfiles (quitando piedras) y allanado por niveladora (si es posible por control remoto láser).

4. Movimiento de tierras más precisos con niveladora y allanado con agua, si es necesario.
5. Compactado previo con apisonadora(s) adecuadas por OMC (contenido óptimo de humedad) a MPD (densidad máxima Proctor).
6. Esparcimiento de RoadCem y mezcla homogénea de 2/3 del grosor de la capa diseñado.
7. Esparcimiento de cemento (aglomerante) y mezclado en el grosor de capa según diseño total.
8. Si se requiere más agua, se podrá añadir y mezclar a fondo con el equipo de mezclado adecuado conforme al diseño de capa de RoadCem.
9. Compactación con compactadores adecuados empezando con peso muerto, seguido de una serie de movimientos dinámicos (vibración) y terminando con estáticos.
10. Se podrá realizar un ajuste preciso del allanado con una niveladora, eliminando partes sueltas. Unas tres horas después de terminar las obras de construcción se podrá realizar un curado con suficiente agua, o mucho antes si las condiciones climáticas lo requieren, para impedir la desecación
11. Después de 24 horas se podrá aplicar en general un aglomerante bituminoso y una capa de rodadura asfáltica.

* Las instrucciones son generales, sin embargo en todos los casos deberá consultarse con PowerCem de México para la aplicación del producto.

V. USOS:

1. **CONSTRUCCIÓN Y/O ESTABILIZACIÓN DE:**
Caminos de terracería, carreteras, toda clase de vialidades. Pistas de aterrizaje, plataformas de pernocta, terraplenes de ferrocarril, estacionamientos, terminales

FICHA TÉCNICA

Versión 1.0.

November 1, 2010



marítimas, presas, diques, banquetas, taludes, túneles. Socavones de minas y toda clase de elementos de concreto.

2. **REPAVIMENTACIÓN:** en pavimentos existentes puede utilizarse para repavimentación obteniendo una extraordinaria adherencia con otro tipo de materiales.

3. **CONSTRUCCIÓN EN ZONAS HÚMEDAD, OBRAS MARINAS Y/O CON AGENTES CONTAMINANTES:** En la fabricación de elementos de concreto que estén en contacto directo con la humedad, agua y/o agentes contaminantes logra una extraordinaria resistencia y aislamiento.

VI. PRESENTACIÓN:

Bolsas de 25 kilos.

VII. DOSIFICACIÓN:

En todos los casos deberá consultarse a PowerCem de México para que proporcione la dosificación según el tipo de suelo, destino de la obra y otras características constructivas.

VIII. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS:

Densidad en masa: Aprox. 1,100kg/m³ neto.

Forma: Sólido, polvo

Color: Gris

Olor: Inodoro

IX. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN DE INGREDIENTES:

Nombre	Número - CAS	Número-EU	Contenido % (wt/wt)	Información reguladora
Metales alcalinos	7647-14-5	231-598-3	60-80	-
	7791-18-6	232-094-6		-
Zeolitos	7447-40-7	231-211-8	5-10	R36/37/38, S22/
Silicatos de metales alcalinos	-	-	5-10	R36/37/38, S22/
Carbonato de calcio	471-34-1	207-439-9	10-20	-

X. DATOS RELEVANTES:

Parámetro	Valor	Método	Observaciones
Valor-Ph (20 °C)	10-12		Mezcla en agua 1/1
Punto de fusión (°C)	> 800°C		
Punto de ebullición (°C)	1,461		
Temperatura de ignición (°C)	No aplica		El producto no combustible
Punto de inflamación (°C)	No aplica		
Presión de vapor, 86°C (hPa)	1,3		
Densidad, 20°C (g/cm ³)	2,200-2,500		
Densidad en masa (kg/m ³)	900-1500	kg/m ³	
Solubilidad en agua (20°C in g/l)	250 - 310		Disolución muy lenta.

RoadCem-PowerCem[®]™ cumple con todas las normas nacionales e internacionales de control de calidad y está garantizado contra defectos de fabricación, sin embargo, la aplicación correcta, el diseño de las mezclas y pruebas están fuera de nuestro alcance, por lo que PowerCem Technologies y PowerCem de México, no asumen ningún tipo de responsabilidad por el uso final de nuestro producto.

XI. DATOS DE CONTACTO:



REPRESENTANTE AUTORIZADO.
IC INGENIERIA Y CONSULTORIA SAS.
TELEFONO: 4-67-45-08.
DIRECCION: AVENIDA CALLE 80 No 69Q-47.
BOGOTA COLOMBIA.



**C. Anexo: Protocolo de fabricación
de muestras evaluadas
mecánicamente**

C.1 Protocolo de mezclado

El procedimiento de mezclado se llevó a cabo mediante el uso de una mezcladora automática de laboratorio marca *Controls*[®] como se muestra en la **Figura 1**. El protocolo para la obtención de la mezcla se plantea a continuación:

1. De acuerdo con la densidad seleccionada y el volumen de la probeta a fabricar, establecer la cantidad en masa de agregado siderúrgico a incorporar.
2. De acuerdo con la masa de sólidos de cada probeta, determinar la cantidad en masa de aditivo y de cemento a incorporar para cada dosificación.
3. De acuerdo con la masa de sólidos de cada probeta, fijar la cantidad en masa de agua a agregar para llegar al contenido de agua óptimo previamente obtenido.
4. Teniendo en cuenta la gradación prestablecida para el agregado siderúrgico (ECSD), agregar la cantidad propia de cada tamaño de partícula en el recipiente de mezclado y permitir el libre mezclado del material en seco durante 5 minutos.



Figura 1. Equipo de laboratorio para proceso de mezclado (Laboratorio de Geotecnia – UNAL)

5. Agregar la cantidad fijada de cemento en el mismo recipiente y se permite el mezclado continuo durante 5 minutos en seco.

6. Distribuido el cemento en toda la mezcla, incorporar la cantidad designada de aditivo y mezclar en seco durante 5 minutos.
7. Adicionar la cantidad total de agua en 3 partes iguales, progresivamente, de manera que se permita la homogenización de los componentes en el mezclador hasta que la textura y el color sea uniforme (entre 5 y 10 minutos).

C.2 Protocolo de compactación

La conformación de muestras a ensayar, en la geometría definida, se lleva a cabo mediante un proceso de compactación estática en laboratorio haciendo uso de una prensa de carga de manera que se garantiza la acomodación y densidad del material en un molde con dimensiones conocidas.

De acuerdo con lo anterior, la fabricación de las probetas se desarrolló en moldes metálicos como se muestra en la **Figura 2**. Sin embargo, la capacidad de carga de la prensa utilizada, así como la resistencia de los moldes únicamente permitió compactar el material hasta llegar a una densidad seca máxima de $2.5\text{g}/\text{cm}^3$.



Figura 2. Equipos y moldes para proceso de compactación de muestras (Laboratorio de Estructuras – UNAL)

El protocolo general de compactación del material en los moldes para la obtención de briquetas se describe a continuación:

1. Incorporar dentro del molde, previamente lubricado en cada una de las paredes interiores, el material debidamente mezclado y en condiciones óptimas de humedad.
2. Asegurar el molde en la zona de carga de la prensa y compactar el material a una velocidad de 1.00 mm/min.
3. Detener el desplazamiento del motor al llegar a la altura de la probeta (100 mm o 200 mm) y se mantiene la carga alcanzada durante 10 minutos.
4. Finalizados los 10 minutos, retirar el molde y se disponer de la muestra con la geometría alcanzada.

C.3 Protocolo de curado

Cada una de las muestras ensayadas, con o sin aditivo y cemento, fueron curadas hasta la edad ajustada para falla de la misma de acuerdo con el siguiente protocolo.

1. Llevar la muestra compactada al cuarto de curado cuyas condiciones de temperatura de 25°C y humedad relativa de 95%.
2. Almacenar las muestras en un único lugar durante todo el desarrollo del tiempo de curado. Además, no debe permitirse la recepción directa de fuentes de agua o calor.
3. Etiquetar las muestras con la nomenclatura asignada.
4. Supervisar periódicamente las muestras con el fin de garantizar su integridad y las condiciones apropiadas para curado de las mismas.

La **Figura 3** muestra el proceso de curado de las muestras fabricadas durante la campaña experimental del presente trabajo de investigación.



Figura 3. Muestras en curado en cuarto húmedo. (Laboratorio de Geotecnia – UNAL).