



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUCTURA Y
TERRITORIO (ILATIT)**

**INGENIERÍA CIVIL DE
INFRAESTRUCTURA**

**APLICABILIDAD DE LA FRACCIÓN FINA DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y
DEMOLICIÓN EN LA ESTABILIZACIÓN DE UN SUELO DE LA REGIÓN DE FOZ
DE IGUAZÚ**

PAÚL SANTIAGO VIÑAN CELY

Foz do Iguaçu

2022

**APLICABILIDAD DE LA FRACCIÓN FINA DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y
DEMOLICIÓN EN LA ESTABILIZACIÓN DE UN SUELO DE LA REGIÓN DE FOZ DE
IGUAZÚ**

PAÚL SANTIAGO VIÑAN CELY

Trabajo de Conclusión de Curso presentado a la Banca examinadora del Curso de Ingeniería Civil de Infraestructura de la Universidad Federal de Integración Latinoamericana, como parte de los requisitos para la obtención del título de Ingeniero Civil de Infraestructura.

Orientador: Prof. Msc. Julio César Bizarreta Ortega

Foz do Iguaçu

2022

Dedico este trabajo:

A mis Padres Marcelo y Rosa por nunca
dejar de confiar en mí.

AGRADECIMENTOS

Primeramente, agradezco a Dios y a la virgen por darme salud y fortaleza para seguir adelante en todo este camino.

Agradezco a mi familia, especialmente a mis padres, que estuvieron presentes en cada momento, a mis hermanos Darwin, Dennis, Diego y a mi sobrina querida Lesly por todo el apoyo brindado a la distancia.

A mi enamorada Naty, por todo el cariño y paciencia que tuvo conmigo en esta etapa final académica. A mis amigos del curso de ingeniería Civil de Infraestructura, Arasy, Gloria, Dave, Henrique, Bryan, Yessica, Angel, Rodrigo, Carolina, Alejandra, Jonathan por los momentos compartidos durante esta caminata.

A mi amiga Sara, que estuvo presente en varias etapas de este trabajo de investigación, impulsándome en todo momento sin importar el horario ni la distancia. A los diversos amigos que conocí dentro de la facultad, que me ayudaron a que los días no sean tan difíciles: Meli, Yasmin, Einer, Jefferson, Daniela, Adrián y Romina. A mi querida amiga Carla que estuvo conmigo desde el primer día en Brasil y su enorme apoyo incondicional.

A la Universidad Federal de Integración Latinoamericana (UNILA), por el apoyo económico brindado mediante el programa de asistencia Estudiantil.

A los profesores de la UNILA, que fueron parte de este proceso de graduación. Y Finalmente, al Prof. Julio Cesar Bizarreta Ortega, mi eficiente orientador, por la confianza depositada en mí.

*“Se não puder se destacar pelo talento, vença pelo
esforço”*

Dave Weinbaum

VIÑAN CELY, Paúl Santiago. **Aplicabilidad de la Fracción Fina de Residuos de Construcción y Demolición en la Estabilización de un Suelo de la Región de Foz do Iguazú**. 2022. 58 páginas. Trabajo de Conclusión de Curso (Graduación) - Curso de Ingeniería Civil de Infraestructura, ILATIT, Universidad Federal de Integración Latino-Americana, Foz do Iguazú, 2022.

RESUMEN

La industria de construcción civil ha pasado por un importante desarrollo, lo cual ha traído beneficios como el incremento económico, reducción del déficit habitacional y nuevos desafíos, como la gran cantidad de residuos sólidos producidos. El depósito inadecuado de estos residuos genera un impacto ambiental, económico y en la salud de la población. En ese contexto, el presente trabajo evaluó el potencial técnico de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en partículas finas ($< 2\text{mm}$), para la estabilización de un suelo limo-arcilloso. Para tal finalidad ha sido analizado el uso de Residuo de Concreto (RR-C), Residuo Mixto (RRM) y Residuo Mixto reforzado con 2% de cemento (RRM-C), a través del ensayo de Índice de Soporte California (ISC). Teniendo como resultado un incremento en el valor de ISC del suelo, superior a cinco veces al ser estabilizado con RR-C, RRM y RRM-C. Además, al comparar el tiempo de inundación del suelo con los tres estabilizadores, se observó valores superiores a los 21 días que a los 7 días en todas las mezclas. Esto podría evidenciar la presencia de minerales cementantes activos en los RCD. Estos materiales finos mostraron ser una alternativa para la sustitución del uso del cemento portland en la estabilización de subrasantes limo-arcillosas, materiales típicos de la ciudad de Foz de Iguazú -PR.

Palabras-claves: Sustentabilidad. Estabilización de Suelo. Índice de Soporte California- (ISC). Residuos Reciclados de Concretos (RRC). Residuos Reciclados Mixtos (RRM).

VIÑAN CELY, Paúl Santiago. **Aplicabilidade da fração fina de resíduos de construção e demolição na Estabilização de um solo da região de Foz do Iguaçu.** 2022. 58 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso De Engenharia De Infraestrutura Civil, ILATIT, Universidade Federal Da Integração Latino-Americana, Foz Do Iguaçu, 2022.

RESUMO

A indústria da construção civil passou por um desenvolvimento significativo, que trouxe benefícios como crescimento econômico, redução do déficit habitacional e novos desafios, como a grande quantidade de resíduos sólidos produzidos. O depósito inadequado desses resíduos gera um impacto ambiental, econômico e de saúde na população. Neste contexto, o presente trabalho avaliou o potencial técnico dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em partículas finas (< 2mm), para a estabilização de um solo silte-argiloso. Para tanto, foi analisado o uso de Resíduo de Concreto (RR-C), Resíduo Misto (RRM) e Resíduo Misto reforçado com 2% de cimento (RRM-C), por meio do ensaio de suporte Califórnia (ISC). Resultando em um aumento no valor de ISC do solo, maior que cinco vezes quando estabilizado com RR-C, RRM e RRM-C. Além disso, ao comparar o tempo de alagamento do solo com os três estabilizadores, foram observados valores maiores aos 21 dias do que aos 7 dias em todas as misturas. Isso poderia evidenciar a presença de minerais cimentícios ativos no RCD. Esses materiais finos mostraram-se uma alternativa para a substituição do uso do cimento Portland na estabilização de subleitos silte-argilosos, materiais típicos da cidade de Foz de Iguaçu-PR.

Palavras – chaves: Sustentabilidade. Estabilização do solo. Índice de Suporte da Califórnia (ISC). Resíduos de concreto reciclado (RRC). Resíduos Reciclados Mistos (RRM).

VIÑAN CELY, Paul Santiago. Applicability of the fine fraction of recycled construction and demolition waste in the stabilization of a soil in the region of Foz do Iguacu. 2022. 58 pages. Course Conclution Work **TCC (Graduation) - Civil Engineering** Infrastructure, Ilatit, Federal University of Latin American Integration, Foz do Iguacu, 2022.

ABSTRACT

The civil construction industry has undergone significant development, bringing benefits such as economic growth, reduction of the housing deficit, and new challenges, such as the large amount of solid waste produced. The preliminary deposit of this waste generates an environmental, economic, and health impact on the population. In this context, the present work evaluated the technical potential of Construction and Demolition Waste (CDW) in fine particles (< 2mm) for the stabilization of silt-clay soil. For this purpose, the use of Concrete Residue (RR-C), Mixed Residue (RRM), and Mixed Residue reinforced with 2% cement (RRM-C) has been analyzed through the California Support Index (ISC) test. Increasing the ISC value of the soil, more significant than five times when stabilized with RR-C, RRM, and RRM-C. In addition, when comparing the soil flooding time with the three stabilizers, higher values were observed at 21 days than at seven days in all the mixtures. This could evidence the presence of active cementitious minerals in the RCD. These fine materials proved to be an alternative for substituting Portland cement in stabilizing silt-clay subgrades, typical materials of the city of Foz de Iguazú -PR.

Key words: Sustainability. Soil Stabilization. California Bearing Ratio Support (ISC). Concrete Waste (RRC). Mixed Waste (RRM).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- CANTIDAD DE RCD RECOLECTADO EN BRASIL	18
FIGURA 2- CANTIDAD DE RESIDUOS INERTES RECOLECTADOS EN EL MUNICIPIO DE FOZ DE IGUAZÚ.	19
FIGURA 3- PRINCIPALES LEGISLACIONES RELACIONADAS A LOS RCD EN BRASIL.....	20
FIGURA 4- CAMADAS GENÉRICAS DE UN PAVIMENTO.....	22
FIGURA 5- VÍA PAVIMENTADA CON EL USO DE CAL.....	26
FIGURA 6- FLUXOGRAMA DE LA METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
FIGURA 7- ETAPAS DE LA COLECTA DEL SUELO	28
FIGURA 8- MUESTRAS DE RRC Y RRM FINOS.....	29
FIGURA 9- ENSAYO DE PH.....	30
FIGURA 10- ENSAYO DE GRANULOMETRIA.....	31
FIGURA 11- DOSIFICACIÓN ENTRE SUELO + RRC.....	32
FIGURA 12- DOSIFICACIÓN ENTRE SUELO + RRM.....	33
FIGURA 13- DOSIFICACIÓN ENTRE SUELO + RRM + CIMENTO.....	34
FIGURA 14- ENSAYO DE COMPACTACIÓN.....	35
FIGURA 15- ENSAYO DE EXPANSIÓN.....	36
FIGURA 16- ETAPAS DE ENSAYO DE PENETRACIÓN.....	37
FIGURA 17- GRANULOMETRÍA DEL SUELO, RRC Y RRM.....	40
FIGURA 18- CURVAS DE COMPACTACIÓN DE SUELO, RRM Y RRM-C.....	42
FIGURA 19- CURVAS DE COMPACTACIÓN DE SUELO Y S+RRM.....	43
FIGURA 20- CURVAS DE COMPACTACIÓN DE SUELO Y S+RRC.....	44
FIGURA 21- CURVAS DE COMPACTACIÓN.....	45
FIGURA 22- VALORES DE EXPANSIÓN DEL SUELO Y LOS ESTABILIZADORES.....	46
FIGURA 23- VALORES DE ISC PARA EL SUELO Y SUELO +RRC.....	48
FIGURA 24- VALORES DE ISC PARA EL SUELO Y SUELO +RRM.....	49
FIGURA 25- VALORES DE ISC PARA EL SUELO Y SUELO +RRM-C.....	50
FIGURA 26- COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE ISC LAS ESTABILIZACIONES EN 7 Y 21 DÍAS.....	51

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 -MATERIALES MÁS COMUNES UTILIZADOS PARA PAVIMENTACIÓN.....	22
TABLA 2 -ENSAYOS DE LABORATORIO Y NORMAS APLICADAS EN LA INVESTIGACIÓN.....	29
TABLA 3 -PESO NECESARIO PARA LA VARIACIÓN DE SUELO Y RRC.....	31
TABLA 4 -PESO NECESARIO PARA LA VARIACIÓN DE SUELO Y RRM.	32
TABLA 5 - PESO NECESARIO PARA LA VARIACIÓN DE SUELO, RRM Y CEMENTO.....	33
TABLA 6 -DOSIFICACIONES PARA EL ENSAYO DE COMPACTACIÓN.....	35
TABLA 7 - CARACTERIZACIÓN FÍSICAS DE LAS MUESTRAS.....	38
TABLA 8 - PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN.	40

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CBR	Índice de Soporte California
CP	Cuerpo de Prueba
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPV	Concreto de Cemento Portland
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
ISC	Índice de Soporte California
ILATT	Instituto Latino-Americano de Tecnología, Infraestructura e Território.
LAGEO	Laboratorio de Mecánica de Suelos y Geotecnia
LL	Límite Líquido
LP	Límite Plástico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCD	Resíduos de Construcción y Demolición
RRC	Resíduo Reciclado de Concreto
RRM	Residuo Reciclado Mixto
RRM-C	Residuo Reciclado Mixto con 2% de Cemento
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	14
2.1	OBJETIVOS ESPECIFICOS	14
3	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	RESIDUOS SOLIDOS.....	15
3.2	RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN.....	16
3.3	IMPACTO AMBIENTAL DEL RCD.....	20
3.4	PAVIMENTO	21
3.5	USO DE RCD EN PAVIMENTACIÓN	23
3.6	ESTABILIZACIÓN EN SUELOS COM CEMENTO	24
3.7	ENSAYO DE INDICE DE SUPORTE CALIFORNIA (ISC).....	24
4	MATERIALES Y MÉTODOS	26
4.1	OBTENCIÓN DE MATERIALES.....	26
4.1.1	Suelo.....	26
4.1.2	Rcd- Finos.....	28
4.2	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	29
4.2.1	Ensayo de caracterización física.....	30
4.3	DOSIFICACIÓN DE LOS ESTABILIZADORES.....	31
4.3.1	Suelo natural + RRC (residuo reciclado de concreto).....	31
4.3.2	Suelo + RRM (residuo reciclado mixto).....	32
4.3.3	Suelo + RRM-C (residuo reciclado mixto + 2%cemento).....	33
4.4	ENSAYO DE COMPACTACIÓN.....	34
4.5	ENSAYO DE EXPANSIÓN	36
4.6	ENSAYO DE ISC	36
5	RESULTADOS Y DISCUSIONES	38
5.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	38
5.2	EFFECTO DE LOS ESTABILIZADORES EN LA COMPACTACIÓN	43

5.3	EFFECTO DE LOS ESTABILIZADORES EN LA EXPANSIÓN	46
5.4	EFFECTO DE LOS ESTABILIZADORES EN EL ISC	48
5.5	COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES ESTABILIZACIONES	51
6	CONSIDERACIONES FINALES	53
	REFERENCIAS	54
	ANEXOS	57

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años la industria de construcción civil ha pasado por un importante desarrollo, lo cual ha traído beneficios como el incremento económico, reducción del déficit habitacional y a su vez nuevos desafíos como la gran cantidad de residuos sólidos producidos. En gran parte de los municipios en Brasil todavía existe el descarte irregular de estos residuos (GONÇALVES, 2021), abandonados clandestinamente en las orillas de ríos, terrenos baldíos y áreas periféricas. Todavía ocasionan problemas a las administraciones municipales, debido al costo adicional que genera la coleta y descarte adecuado (OCHOA AVEROS; BIZARRETA-ORTEGA, 2021).

Según datos de la Asociación Brasileira de Empresas de limpeza pública y Resíduos Especiales (ABRELPE), en 2018 fueron generados 82,5 millones de toneladas y recolectadas 76,1 millones de toneladas de RSU. Por otra parte las investigaciones demostraron que algunos municipios también fueron responsables por los servicios de manejo y limpieza urbana de aproximadamente 47 millones de toneladas de Resíduos de Construcción y Demolición (RCD) (ABRELPE, 2021). Estos datos representan que los RCD tuvieron una participación de cerca del 61,7% en relación al total de RSU recolectados. Aún no existen datos oficiales acerca de la generación de RCD en Brasil, debido a que algunos municipios no disponen de servicios públicos de manejos de Resíduos y la existencia de empresas privadas que no colocan a disposición sus datos (ABRELPE, 2021; MATIAS, 2020). El municipio de Foz do Iguazú, genera aproximadamente 210 mil toneladas de residuos inertes anualmente, donde cerca de 80% son RCD (OCHOA AVEROS, 2019; OCHOA AVEROS; BIZARRETA-ORTEGA, 2021).

Con las nuevas tendencias en el ámbito de gerenciamiento de residuos, ha sido necesario desenvolver nuevas tecnologías y conceptos como el reaprovechamiento de residuos (DEL REY *et al.*, 2016; KARLA *et al.*, 2021). Sin embargo, para Quiñones (2014), en América Latina el reciclaje de RCD aún es precario, a pesar del avance de grandes obras en el ramo de construcción civil y escasos de agregados naturales próximos a las grandes metrópolis. Por otro lado, aún existen obstáculos para trabajar con el reciclaje de RCD, por falta de conocimiento a profundidad sobre el tema (SOUSA; BALDUINO, 2019).

Llevando en consideración la calidad de vías en Brasil y en busca de una solución económica a corto plazo, una de las maneras más simples de reciclaje de RCD, se encuentra en la pavimentación, donde puede ser usado como agregado grueso en forma de grava corrida o en mezclas de RCD con suelo (BARRETO; AMORIM, 2020; MARTINEZ; NOGUEIRA; CARDOSO, 2021), e también agregado fino mezclado con suelos (OCHOA AVEROS; BIZARRETA-ORTEGA, 2021). Con todo eso, se busca promover una alternativa sustentable que sustituya a los materiales normalmente utilizados, manteniendo la calidad y vida útil de los pavimentos.

El uso de RCD cuenta con varias ventajas , tales como , disminuir el volumen de residuos sólidos en rellenos sanitarios , consumo de los recursos naturales no renovables y aliviando las presiones ambientales producidos por la industria de construcción civil , además de tener menos exigencias y poder ser utilizado como relleno o refuerzo en las capas de pavimento (OCHOA AVEROS; BIZARRETA-ORTEGA; CHICAIZA, 2022). El uso de agregados reciclados ha sido ampliamente investigado, tanto para la producción de concretos, como de morteros. La utilización de agregados reciclados gruesos para la elaboración de concretos, es admitida en la industria de construcción civil, con ciertas restricciones. Por otro lado los agregados reciclados finos, son utilizados en una escala menor, especialmente los agregados reciclados mixtos (ARM), constituidos de, concretos, argamasas, materiales cerámicos, entre otros (Ferreira,2019). Debido a su alta heterogeneidad y elevado número de contaminantes. Además, las partículas finas de los ARM pueden mejorar las propiedades de los suelos por medio de efectos químicos, dado por la reacción de los materiales cerámicos y cementantes, y físicos, consecuencia del micro relleno de los vacíos mayores por partículas finas de ARM menores. En conjunto, estos efectos contribuyen a la obtención de suelos más cohesivos, y a su vez más resistentes (FERREIRA et al., 2019).

En este contexto el presente trabajo busca evaluar el potencial del uso de los residuos reciclados finos en la estabilización de un suelo limo arenoso. Los parámetros fueron establecidos mediante la clasificación de los materiales y ejecución de los ensayos de compactación, expansión y ISC.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Este trabajo tiene como objetivo principal evaluar el uso potencial de agregados finos de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), para la estabilización de un suelo limo-areno-arcilloso a través del análisis del Índice de Soporte California (ISC).

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Para que el objetivo general sea alcanzado, son desarrollados los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la influencia al estabilizar el suelo con Residuo Reciclado de Concreto (RRC), Residuo Reciclado Mixto (RRM) y Residuo Reciclado Mixto con 2% de Cemento (RRM-C), en los parámetros de compactación, expansión y penetración del ISC;
- Evaluar los resultados encontrados en diferentes tiempos de cura del suelo con los tres tipos de estabilizantes, a los 7 y 21 días; y
- Comparar los valores de ISC encontrados del suelo natural y suelo estabilizado (RRC, RRM y RRM-C).

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESIDUOS SOLIDOS

A continuación, en el Cuadro 1, se presentan las definiciones de residuos sólidos de acuerdo a la NBR 10004:2004 de la Asociación Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) y la ley N° 12.305 del 2010 que incluye la Política Nacional de Residuos sólidos (PNRS).

Cuadro 1- Definiciones de Residuos Sólidos.

Referencia	Definición
<p>NBR 10004:2004(ABNT,2004)</p>	<p>Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004a, p. 1).</p>
<p>Política Nacional de Residuos Sólidos (BRASIL,2010)</p>	<p>Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010a, art. 3º, inciso XVI).</p>

De acuerdo a esas definiciones podemos observar que el término residuo sólido es usado comúnmente como sinónimo de desperdicio o basura, haciendo referencia a algo que sobra de algún proceso de producción o consumo. Este error ocurre debido a que todo residuo puede ser clasificado como desperdicio, sin embargo, ni todo desperdicio puede ser clasificado como residuo (ROCHA, 2006).

Existen varias clasificaciones para los residuos sólidos, la NBR 10004 :2004 clasifica los residuos en función del proceso, actividad de origen o sus constituyentes en dos grupos:

I- peligrosos y II- no peligrosos.

Los residuos de Clase I- Peligrosos son aquellos que, en función de sus propiedades física, químicas e infectocontagiosas, pueden presentar algún riesgo a la salud pública o al medio ambiente.

Por otro lado, los residuos Clase II – no peligrosos se dividen en:

- Clase II A- No inertes: aquellos que presentan propiedades como la solubilidad en agua, combustibilidad o biodegradabilidad; y
- Clase II B- Inertes: aquellos que, al entrar en contacto con agua destilada o desionizada en temperatura ambiente, no presentan ninguno de sus constituyentes solubilizados a los padrones de potabilidad a excepción del color, turbidez, dureza y sabor. Por otra parte, la Resolución n° 307/2002 y sus alteraciones, clasifica los residuos de construcción civil de la siguiente manera:

- Clase A: son residuos reutilizables o reciclados para la producción de agregados, como de construcción, demolición, reformas, reparos de pavimentación, edificaciones, componentes cerámicos y otras obras de infraestructura;
- Clase B: se encuentran los residuos reciclados como plásticos, papel, metales, vidrios, maderas y yeso (este último fue incluido por la resolución CONAMA n° 431, 2011 y retirado de la clase C);
- Clase C: residuos para los cuales aún no fueron desarrolladas tecnologías o aplicaciones económicamente viables que permitan su recuperación;

Clase D: son los residuos peligrosos de origen de procesos de construcción como pinturas, disolventes o aquellos contaminados provenientes de demoliciones o reformas de clínicas de radiología, instalaciones industriales etc.

3.2 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

El sector de construcción civil es el responsable por la generación de una gran cantidad de residuos de construcción y demolición, este tipo de residuo genera un impacto ambiental significativo al medio ambiente y a la sociedad, al ser destinado incorrectamente.

Con el rápido crecimiento que han tenido las ciudades, consecuentemente el

incremento de las actividades del sector de la construcción, la generación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) alcanzó elevados índices de producción, resultado del desperdicio de las obras civiles (KIST *et al.*, 2017).

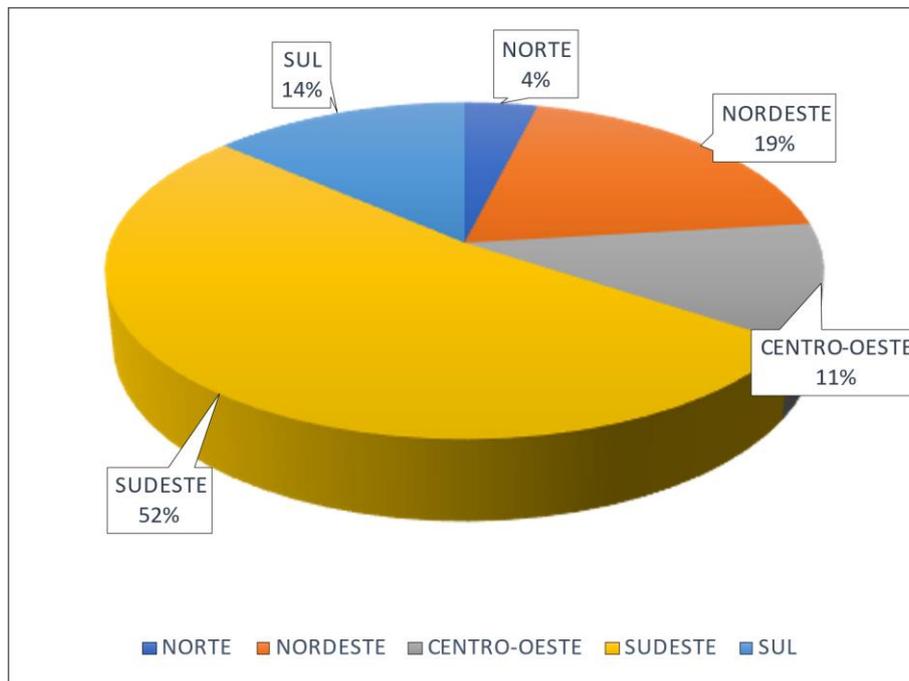
Según Shen *et al.* (2004), los RCD son una mezcla de materiales generados a partir de las actividades de obras de construcción civil, remodelaciones y demoliciones, incluyendo limpieza de locales, obras en carreteras y reformas de infraestructuras.

El Consejo Nacional de Medio Ambiente (CONAMA), en su resolución 307/2002 define a los residuos de construcción civil como aquellos:

[...] são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

En la figura 1, se presentan los datos recolectados en Brasil, por la Asociación Brasileira de Empresas de Limpeza Pública y Resíduos Especiais (ABRELPE) en 2021. La región Sudeste se destaca en la recolección de RCD, con aproximadamente el 52% del total de residuos recolectado en todo el país.

Figura 1 - Cantidad De RCD Recolectado en Brasil

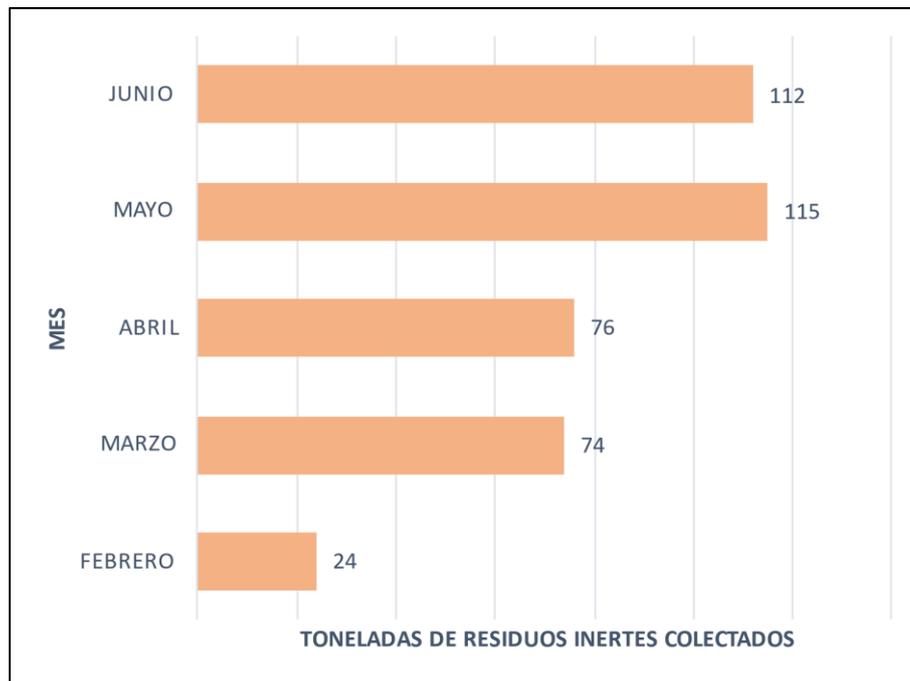


Fuente: Adaptado de Abrelpe, 2021.

Por otra parte, de acuerdo con Motta (2005), los residuos sólidos que no son recolectados por ninguna institución en su gran mayoría son descartados de forma ilegal, al trasladarse a lugares que generan degradación urbana como, terrenos baldíos, riachuelos, quebradas, etc.

En el municipio de Foz do Iguazú-PR, los residuos son trasladados a un aterro sanitario donde son separados en 2 grupos: Residuos domésticos y Residuos inertes provenientes de la poda de árboles, maderas, movimientos de tierra, construcciones, entre otros. Estos residuos son separados en residuos de industria de construcción civil y otros inertes. En los cuales aproximadamente 80% de los residuos inertes que llegan al aterro sanitario pertenecen a la industria de construcción civil (SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE, 2019).

La cantidad de residuos inertes que son recolectados en Foz do Iguazú son presentados en la figura 2, en ella se muestra los datos referentes al último semestre del año 2022.

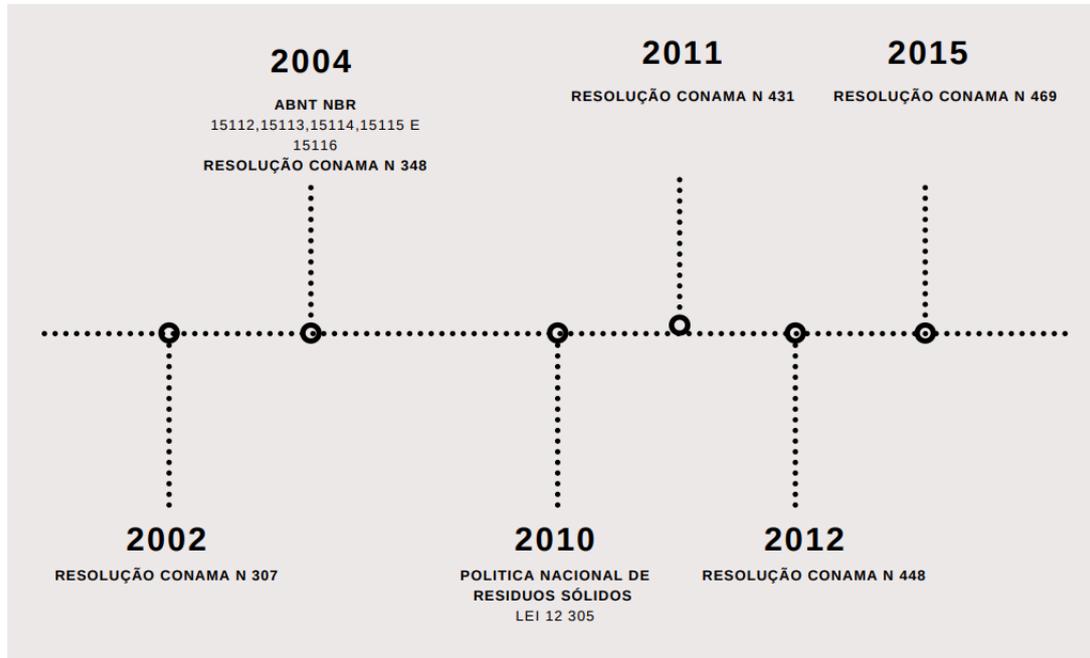
Figura 2- Cantidad de Residuos inertes recolectados en el municipio de Foz de Iguazú

Fuente: Adaptado de Secretaria Municipal de Meio Ambiente, 2022.

La resolución del CONAMA N° 307/2002 marcó el comienzo de las políticas públicas la cual fue estipulada con la finalidad de establecer los criterios y procedimientos para el gerenciamiento de los RCD, disciplinando las acciones necesarias para reducir los impactos ambientales (CONAMA., 2002).

En 2004, la ABNT lanzó cuatro especificaciones en las que trata desde el recibimiento de aquellos residuos hasta su reciclaje. Además de todas estas resoluciones, otra legislación importante en el ámbito de los residuos de construcción y demolición fue la creación de la ley federal N° 12.305, que, a pesar de referirse a todos los tipos de residuos sólidos, implementó la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS). Esta política reúne todos los principios, directrices, metas y acciones adoptadas por el gobierno federal, en cooperación con los estados, municipios o particulares, buscando el gerenciamiento ambiental adecuado de los residuos sólidos. En la figura 3 se presentan una línea de tiempo con las principales legislaciones y resoluciones relacionadas a los residuos de construcción y demolición.

Figura 3 - Principales legislaciones relacionadas a los RCD en Brasil



Fuente: Adaptado de MATIAS, 2020.

3.3 IMPACTO AMBIENTAL DEL RCD

De acuerdo al CONAMA (1986), el impacto ambiental se refiere a cualquier tipo de alteración de las propiedades físicas, químicas y biológicas con el medio ambiente, ocasionada por el ser humano y que pueda afectar a la salud de la población, actividades sociales y económicas, la calidad del medio ambiente y características de los recursos ambientales.

En los últimos años, Brasil ha tenido un desenvolvimiento económico y social, principalmente en el área de construcción civil. Ante esto el consumo de recursos no renovables de origen mineral han aumentado de manera significativa, al igual que la producción de RCD (LIMA; ALVARADO, 2015).

Todas las etapas del proceso constructivo tales como: extracción de materia prima, producción de materiales, construcción y demolición. Las mismas que generan impactos ambientales que afectan directa o indirectamente aspectos como: salud, bien estar de la

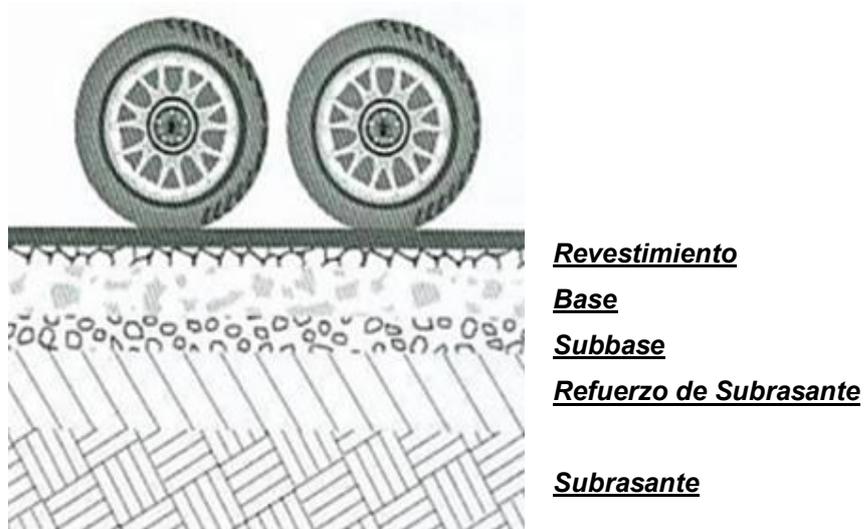
población, calidad de los recursos ambientales, actividades sociales y económicas, (PIOVEZAN JUNIOR, 2007).

3.4 PAVIMENTO

Pavimento es una estructura no perene, que está compuesta por camadas sobrepuestas de diferentes materiales compactados, cuyo objetivo principal es recibir y transmitir las cargas de manera de aliviar presiones sobre las camadas inferiores. (BALBO,2007).

La estructura de un pavimento es compuesto por un conjunto de camadas, con finalidades específicas denominadas como: subrasante (terreno de fundación); refuerzo de subrasante (camada complementaria de espesura constante); subbase(camada correctiva encima del terraplén); base (camada destinada a soportar y distribuir los esfuerzos verticales provenientes de los vehículos); y revestimiento (camada normalmente impermeable que recibe directamente la acción de rodamiento de los vehículos) (SILVA,2008). En la Figura 4 se muestra la representación de una estructura de un pavimento con sus respectivas camadas.

Figura 4- Camadas Genéricas de um Pavimento



Fuente: Adaptado de Balbo, (2007).

TABLA 1- Materiales más comunes utilizados para Pavimentación

Tipo de Material ou mistura	Nomenclatura	Abreviatura
Granulares e Solos	Brita Corrida	BC
	Brita graduada simples	BGS
	Escoria	ESC
	Paralelepípedo	PAR
	Solo-Brita ou Solo Agregado	SB
	Solo Argiloso laterítico	SAL
	Agregado Reciclado de entulho de Construção e demolição	RCD
	Camada final de Terraplenagem	CFT
	Macadame Hidráulico	MH
	Macadame seco	MS
	Solo Arenoso fino laterítico	SAFL
	Solo laterítico concrecionado	SLC
	Solo Saprolítico	SS

Fuente: Balbo, 2007.

3.5 USO DE RCD EN PAVIMENTACIÓN

De acuerdo con Motta (2005), las primeras experiencias en pavimentación utilizando el agregado de RCD en Brasil fue registrado en 1980. Desde entonces, las investigaciones acerca del tema se han ido incrementando dada la importancia de destinar un fin a los materiales reciclados, provenientes de escorias de edificaciones y estructuras de concreto, siendo que estos residuos son utilizados de forma errónea o simplemente descartados inadecuadamente (BALBO,2007).

Los suelos que poseen baja capacidad de soporte o contracción por hinchamiento cuando entran en contacto con el agua, generan un elevado costo en construcción de pavimentos. Por esta razón, existe una búsqueda constante de nuevos métodos y técnicas, que permitan disminuir el uso de los recursos naturales, costos e incrementar su capacidad resistencia.

En pavimentación los agregados de RCD pueden ser utilizados como agregados en camadas de Base, subbase y como refuerzo de subrasante, remplazando a los agregados convencionales (SOUSA; BALDUINO, 2019). Existen varias investigaciones en las cuales se utilizaron partículas finas provenientes de residuos de construcción y demolición:

- Kerni, Sonthwal y Jan (2015) utilizaron residuos de RCD menores a 1,18mm para estabilizar un suelo limo- arcilloso de una subrasante;
- Lovedeep, Shahbaz y Gill (2017), utilizaron partículas finas de hormigón menores a 1,76mm, con porcentajes de 10,20,30 y 40%, teniendo como resultado con 40% de residuo para el mayor valor de ISC; y
- Ochoa Averos y Bizarreta-Ortega (2021) analizaron la estabilización para un suelo limo-arcilloso con RCD-fino menores a 2mm, con porcentajes de 20,40 y 60%. Siendo que la mezcla con 20% de RCD-fino resultó el porcentaje óptimo para la estabilización, al pasar de 1,8% de ISC del suelo en estado natural a 11,6% del suelo reforzado con residuos de RCD.

3.6 ESTABILIZACIÓN EN SUELOS COM CEMENTO

Días (2012) afirma que, la estabilización de un suelo se caracteriza por cualquier procesos físico, químicos o mecánico, cuya finalidad sea mejorar las propiedades del suelo existente en relación a su comportamiento como material de ingeniería, para lo cual debe tornarse apto a responder satisfactoriamente a las sollicitaciones previstas.

El cemento es el agente de ligación más antiguo utilizado en la estabilización de suelos. Este puede ser considerado como el agente de estabilización primario, debido a que puede ser utilizado de manera individual para provocar la acción de estabilizante necesaria (DRANKA, 2016). La estabilización suelo-cemento ocurre por la hidratación de cemento dentro de los vacíos del suelo, mediante la adición del cemento es desarrollada una estructura capaz de atenuar las mudanzas de humedad, capaces de generar esfuerzos de tracción y comprensión en el interior de las masas porosas del suelo (SOLIZ,2007).

El residuo de concreto contiene partículas de cemento y arena en cantidades suficientes para alterar las condiciones del suelo, mejorando la densidad de compactación de la masa del suelo.

3.7 ENSAYO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFORNIA (ISC)

El índice de Soporte California (ISC), también llamado de CBR (California Bearing Ratio), es uno de los métodos más difundidos en el medio rodoviario brasileiro, utilizado para evaluar la resistencia o el valor de soporte de los materiales granulares usados en pavimentación.

De acuerdo con la Dnit, el ensayo consiste en determinar la relación entre la presión necesaria para producir una penetración de un pistón en un cuerpo de prueba, y la presión necesaria para producir la misma penetración en una grava padronizada.

El procedimiento para obtener el valor de ISC es el resultado de la combinación de los ensayos de expansión y compactación, los cuales son comparados a los valores de un

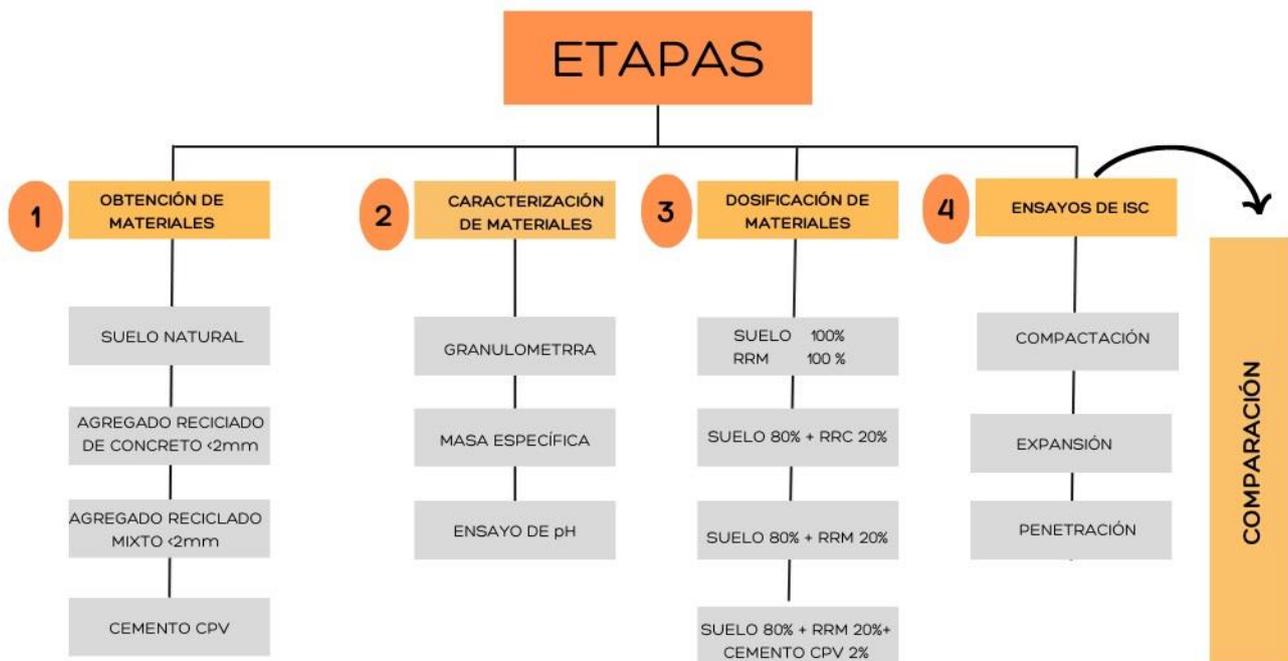
suelo padrón de California, denominado como solo óptimo (ISC igual a 100%).

De manera general, el ensayo consiste en la aplicación de una carga estática sobre un cuerpo de prueba en condición saturada. Las cuales son representadas en tres etapas, siendo ellas: compactación de los cuerpos de prueba; colocación de los cuerpos de prueba en agua; y penetración en los cuerpos de prueba mediante un pistón de diámetro padronizado y velocidad constante.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo de investigación experimental fue estructurado en 4 etapas: (1) Obtención de los materiales que serán utilizados en la investigación; (2) Ensayos de caracterización de los parámetros físicos y mineralógicos; (3) Dosificación de los materiales estabilizantes ;(4) Ensayos de ISC. Todas estas etapas están representadas en la figura 5.

Figura 5- Flujograma de la Metodología de la Investigación



Fuente: Autor,2022.

4.1 OBTENCIÓN DE MATERIALES

4.1.1 Suelo

El suelo empleado en las mezclas de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), fue colectado del campo experimental del grupo de geotecnia de la UNILA, ubicado en el alojamiento estudiantil, barrio Porto Belo, municipio de Foz do Iguazú /PR , como se muestra en la Figura 6.

Figura 6 - Ubicación del área de colecta del suelo



Fuente: Autor,2022.

La extracción de la muestra de suelo fue obtenida de forma manual en una calicata de aproximadamente 90 cm de profundidad (Figura 7a y 7b), posteriormente el material fue almacenado en sacos de tela para el traslado a la cámara húmeda del laboratorio de geotecnia y suelos (LAGEO) (Figura 7c), ubicado en el sector sur de la UNILA-PTI. Posteriormente, parte de las muestras fueron secadas al aire para la ejecución de los posteriores ensayos (Figura 7d).

La preparación de la muestra de suelo consistió en el proceso de disgregación de los terrones mayores, con la ayuda de un mortero y posteriormente tamizado por la malla de 2 mm.

Figura 7- Etapas de la Colecta del Suelo



Fuente: Autor,2022.

4.1.2 RCD- Finos

Los residuos de construcción y demolición finos (RRC y RRM), utilizados en este trabajo fueron proporcionados por el laboratorio de geotecnia y suelos (LAGEO) de la UNILA, provenientes de investigaciones anteriores (OCHOA AVEROS, 2019; OLIVEIRA, 2019), las cuales fueron previamente tamizadas por la malla de 2 mm para obtener un material homogéneo (Figura 8a y 8b).

Figura 8- Muestras de RRC y RRM Finos



Fuente: Autor,2022.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

La caracterización de los materiales, fue realizado de acuerdo a los procedimientos normatizados por la Asociación Brasileira de normas Técnicas (ABNT), Departamento Nacional de Estradas de Rodagen (DNER), así como las recomendaciones encontradas en la literatura. En la tabla 2 se presenta un resumen de los ensayos realizados en este trabajo de investigación.

TABLA 2-Ensayos de Laboratorio y Normas Aplicadas en la Investigación

Ensayos	Norma	Tipo de material		
		Suelo	RRC	RRM
Preparación para ensayos de compactación	ABNT NBR7182:2016	X	X	x
Granulometría	NBR 7181:2016	X	X	x
pH	Bowles (1980)	X	X	X
Límite de líquido	NBR 6459 (ABNT, 2016b)	X	X	x
Límite de plasticidad	NBR 6459 (ABNT, 2016c)	X	X	X

Fuente: Autor,2022.

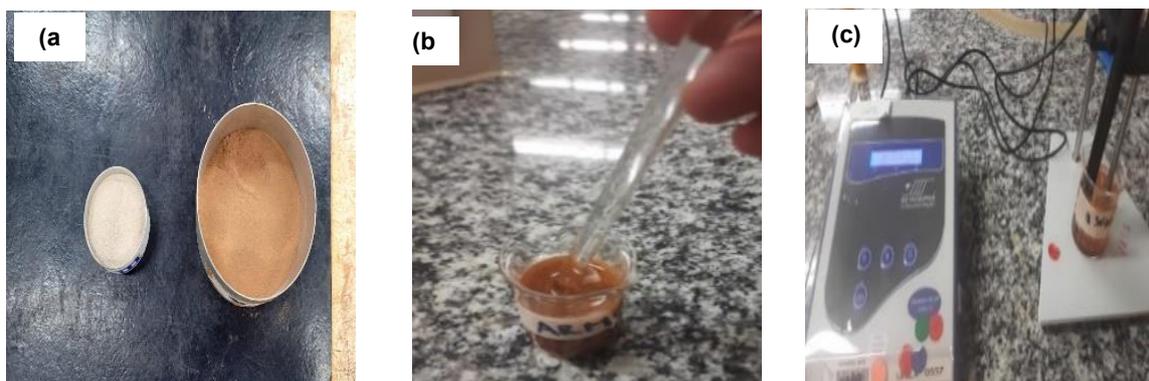
A seguir será presentada la metodología utilizada para los ensayos de análisis

granulométrico, ensayo de pH, ensayo de compactación e índice de soporte California (ISC).

4.2.1 Ensayo de caracterización física

Para verificar el comportamiento del suelo, RRC y RRM, se realizó el ensayo de pH para el suelo y RCD- finos, utilizando una muestra de 10 g de cada material y 50 ml de agua desionizada, utilizando el pH metro para realizar las respectivas lecturas (Figura 9).

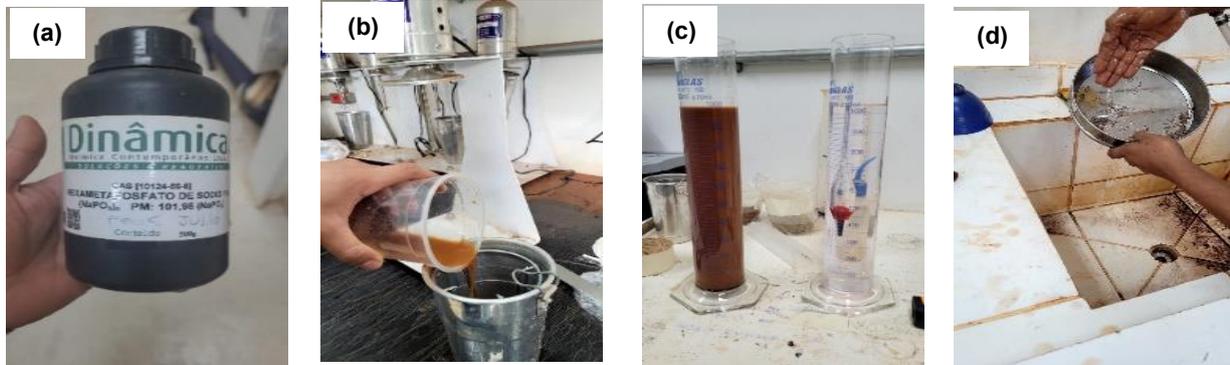
Figura 9 - Etapas del Ensayo de pH. a) Muestras de suelo. b) Decantación. c) lectura del pH mediante el pH metro.



Fuente: Autor,2022.

El ensayo de granulometría para la muestra de suelo, fue realizado mediante el proceso de sedimentación de acuerdo la normativa NBR 7181 (ABNT,2016) (Figura 10). El tipo de dispersante a utilizarse depende del valor de pH de cada muestra, para este trabajo de investigación se utilizó el Hexametáfosfato de sodio ($\text{NaPO}_3)_6$, a una concentración de 45,7g/L, debido a que el pH del suelo fue superior a 7.

Figura 5- Ensayo de Granulometría. a) Hexametáfosfato de Sodio. b) Vaso de Dispersión c) lectura de medidas d) Peneiramento de finos.



Fuente: Autor,2022.

4.3 DOSIFICACIÓN DE LOS ESTABILIZADORES

Para esta investigación, fueron realizadas 3 variaciones de mezclas de suelo natural con RCD finos y cemento CPV que son presentadas a continuación:

- La primera muestra se utilizó 80% de suelo natural y 20% de RRC.
- La segunda muestra se utilizó 80% de suelo natural y 20% de RRM.
- La tercera muestra se utilizó 80% de suelo, 18% de RRM y 2% de Cemento CPV.

4.3.1 Suelo Natural + RRC (Residuo Reciclado de Concreto)

La primera estabilización del suelo consiste en la adición de la muestra de residuo reciclado de concreto, conforme se detalla en la Tabla 3. Esta muestra es denominada (S+RRC).

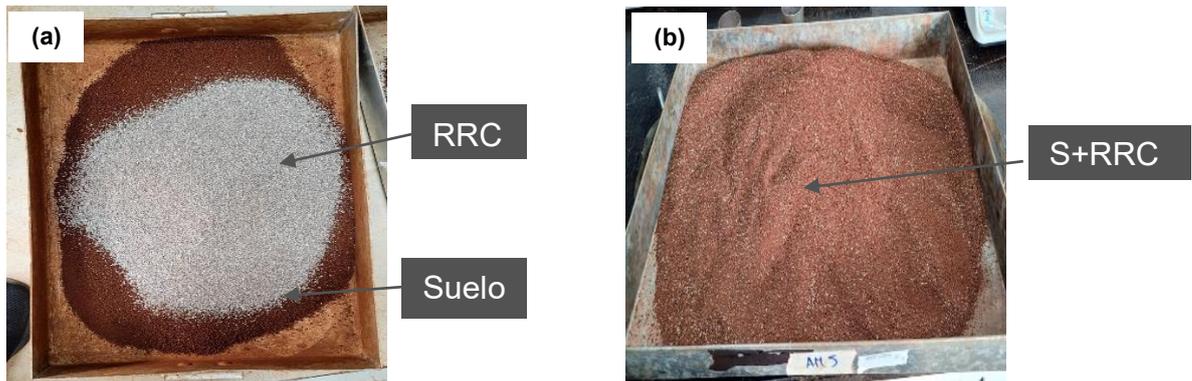
TABLA 3 - Peso necesario para la variación de suelo y RRC.

Peso Necesario: 15kg		Peso Seco		Peso Húmedo	
Suelo (%)	RRC (%)	Suelo (%)	RRC (%)	Suelo (%)	RRC (%)
80	20	4,0	1,0	4,64	1,16

Fuente: Autor,2022.

En la figura 11a, se presenta las dosificaciones separadas de cada material (Suelo y RRC), mientras que en la figura 11b, se encuentra al término de su proceso de mistura.

Figura 11- Dosificación entre Suelo y RRC.



Fuente: Autor,2022.

4.3.2 Suelo + RRM (Residuo Reciclado Mixto)

La segunda estabilización del suelo consiste en la adición de residuo reciclado mixto (RRM), conforme se detalla en la Tabla 4. Esta muestra es denominada de S+RRM.

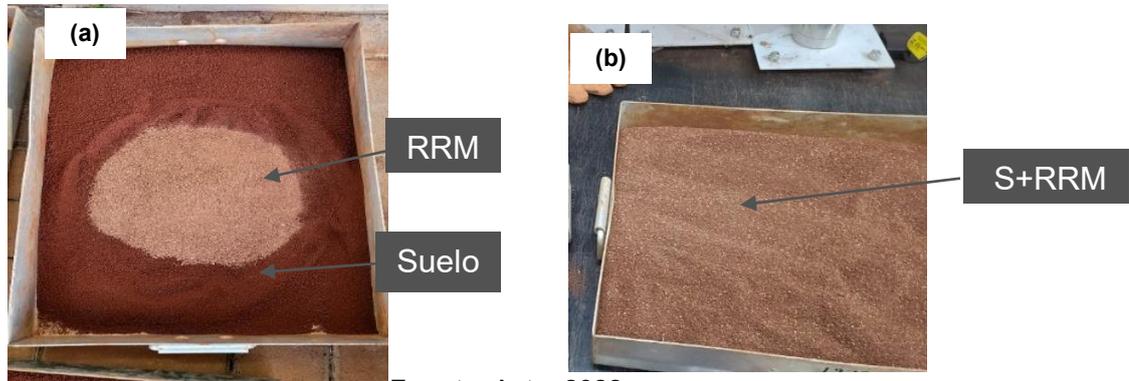
TABLA 4 - Peso necesario para la variación de suelo y RRM

Peso Necesario: 12kg		Peso Seco		Peso Húmedo	
Suelo (%)	ARM (%)	Suelo (%)	RRM (%)	Suelo (%)	RRM (%)
80	20	3,2	0,8	3,71	0,92

Fuente: Autor,2022.

En la figura 12a, se presenta las dosificaciones individuales de cada material (Suelo y RRM), mientras que en la figura 12b, se muestra al término de su proceso de mistura.

Figura 12 - Dosificación entre Suelo y RRM



Fuente: Autor,2022.

4.3.3 Suelo + (RRM-C) Residuo Reciclado Mixto + 2% de Cemento

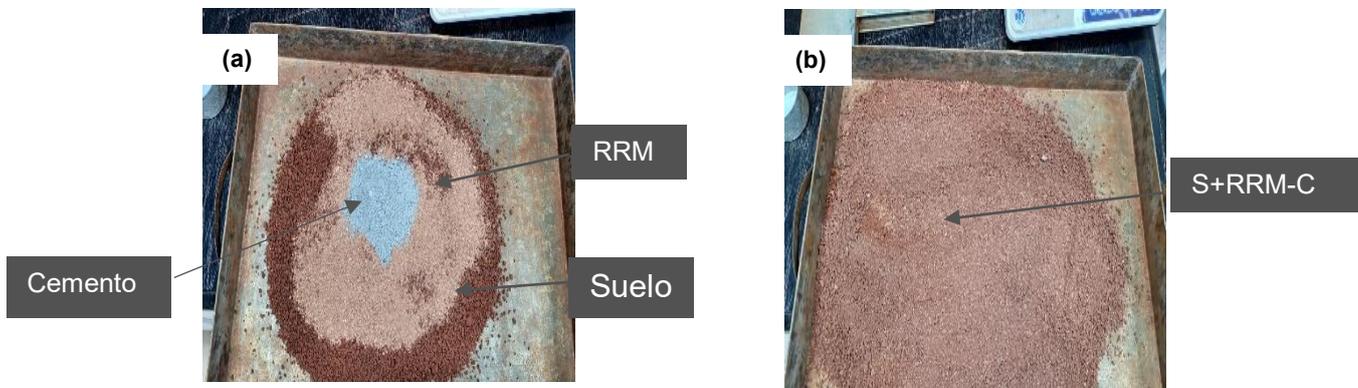
La última estabilización del suelo consiste en la adición de residuo reciclado mixto y cemento Portland, conforme se detalla en la Tabla 5. Esta muestra es denominada Suelo+RRM-C.

TABLA 5- Peso necesario para la variación de suelo, RRM y Cemento

Peso Necesario: 12kg			Peso Seco			Peso Húmedo		
Suelo (%)	RRM (%)	CPV (%)	Suelo (%)	RRM (%)	CPV (%)	Suelo (%)	RRM (%)	CPV (%)
80	18	2%	3,2	0,72	0,08	3,70	0,83	0,092

Fuente: Autor,2022.

En la figura 13a, se presenta las dosificaciones individuales de cada material (Suelo,RRM y cemento), mientras que en la figura 13b, se muestra al término de su proceso de mistura.

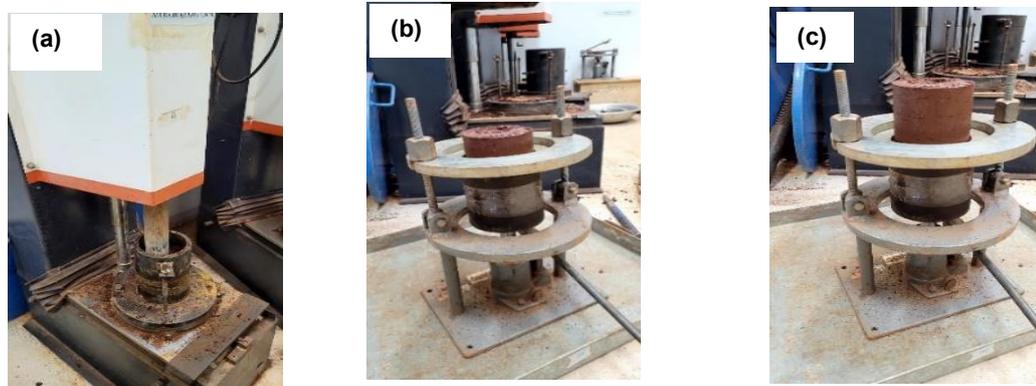
Figura 13- Dosificación entre Suelo,RRM y Cimento CPV.

Fuente: Autor,2022.

4.4 ENSAYO DE COMPACTACIÓN

Para evaluar la estabilización obtenida para el suelo y sus diferentes dosificaciones de Suelo-RCD-Finos, en función del teor de humedad y de la energía de compactación aplicadas, se realizó el ensayo de compactación siguiendo la normativa ABNT NBR7182:2016- Ensayo de compactación de suelos, con el uso de un soquete Proctor automático de la AMC, conforme se detalla en la Figura 14, con la energía de compactación normal, cilindro pequeño y con reutilización de material. El procedimiento seguido consiste en tamizar los materiales (Suelo y RCD-finos), por la malla de abertura de 2mm; humedecimiento y homogenización de las muestras; compactación en 3 capas de 26 golpes (Figura 14a); verificación del borde del cuerpo de prueba; nivelación de la superficie de cuerpo de prueba; pesaje del suelo y del cilindro y finalmente extracción de una pequeña muestra del centro del cuerpo de prueba para la humedad con la ayuda de un dispositivo que incluye un gato hidráulico, conforme se muestra en la Figura 14b e 14c.

Figura 14- Ensayo de Compactación.



Fuente: Autor,2022.

Por otra parte, para la compactación de las muestras del ensayo de ISC, fueron realizadas en un molde cilíndrico grande con 5 capas iguales y 12 golpes distribuidos uniformemente en cada camada. De esa forma, fueron realizados 3 cuerpos de prueba con suelo natural, 3 cuerpos de prueba con Residuo Reciclado Mixto, 3 cuerpos de prueba de (suelo + RRC), 3 cuerpos de prueba con (Suelo+RRM) y 3 Cuerpos de Prueba con (Suelo +RRM +Cemento CPV), los detalles de los trazos realizados se pueden observar en la Tabla 6.

TABLA 6- Dosificaciones para el Ensayo de Compactación.

Trazo	Suelo	RCD		
		RRC	RRM	RRM-C
A	100%	0%	0%	0%
B	0%	0%	100%	0%
C	80%	20%	0%	0%
D	80%	0%	20%	0%
E	80%	0%	18%	2%

Fuente: Autor,2022.

4.5 ENSAYO DE EXPANSIÓN

El ensayo de expansión fue realizado conforme los siguientes procedimientos; Invertir los moldes y fijarlos en sus respectivas bases una vez terminado el ensayo de compactación; en el espacio dejado por el disco espaciador, se procede a colocar el plato perforado con el hazte de expansión y sobre él es colocada los discos anelares cuya masa total debe ser de (4540 ± 20) (Figura 15a); Enseguida son colocados los extensómetros en los haztes de expansión y se ajustado a la lectura inicial (Figura 15b). Posteriormente fueron colocados en un tanque con agua para el ensayo de expansión para su lectura de expansión por 4 días (Figura 15c). Detalles del procedimiento pueden ser encontrados en (BIZARRETA-ORTEGA; OCHOA AVEROS, 2022).

Figura 15- Etapas de Ensayo de Expansión.



Fuente: Autor,2022.

4.6 ENSAYO DE ISC (INDICE DE SOPORTE CALIFORNIA)

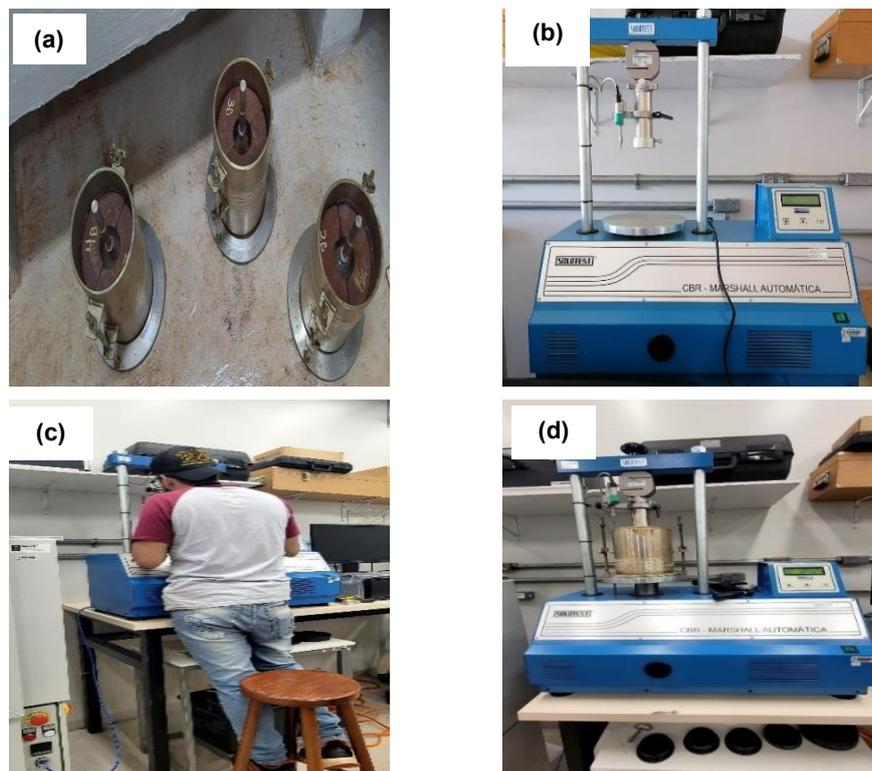
Para la obtención de una medida de resistencia de los cuerpos de prueba compactados, fue realizado el ensayo de índice de soporte California (ISC), siguiendo las recomendaciones de la norma NBR 9895 (ABNT,2016). Para lo cual fueron realizados 24 ensayos de ISC en conjuntos con los de compactación y expansión.

Concluido el ensayo de expansión, fueron retirados los cuerpos de prueba del tanque de agua, dejándose reposar por un periodo de 15 minutos para que el agua drene (Fig.16 a), se retiró los trípodes, contrapesos y el plato perforado. Se colocó nuevamente los pesos

en los cuerpos de prueba, fueron trasladados hasta la prensa Marshall del laboratorio de pavimentos (LPAV) para realizar el ensayo de penetración (Fig. 16b); se realizó el ajuste de los CP en la prensa (Fig. 16c) y finalmente se procedió al ensayo de penetración donde se aplicó una velocidad de penetración de 1.27mm/min como es establecido en la NBR 9895 (Fig. 16d).

El índice de soporte california fue calculado para cada cuerpo de prueba en función a la presión aplicada y de la penetración del pistón. Detalles de los procedimientos pueden ser encontrados en (BIZARRETA-ORTEGA; OCHOA AVEROS, 2022).

Figura 16- Etapas de Ensayo de ISC



Fuente: Autor,2022.

5 RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 .CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

En la Tabla 7 se presentan los resultados de caracterización de los materiales, ensayos de pH, límites Atterberg, granulometría por sedimentación, peso específico de sólidos y parámetros compactación (humedad óptima y densidad máxima), de las muestras del suelo y los estabilizadores RRM, RRC y RRM-C. Los valores de densidad específica de los sólidos y límites de Atterberg para el RRM y RRC, fueron utilizados de investigaciones anteriores de (AVEROS, 2019; OLIVEIRA, 2019). Tanto el límite líquido como el límite de plasticidad del suelo presentan valores similares a otras investigaciones realizadas en la misma región (OCHOA AVEROS; BIZARRETA ORTEGA; ORTIZ, 2022; COILA, 2019; OLIVEIRA, 2019).

El Residuo Reciclado Mixto (RRM) está constituido principalmente de materiales de origen cerámicos con 64% y 36% de concreto (OLIVEIRA, 2019), de acuerdo con el SUCS puede ser clasificado como una arena limosa con arcilla (SM). Por otra parte, el Residuo Reciclado de Concreto (RRC) está constituido por 100% de residuos de concreto, clasificado como arena pobremente graduada con limo (SW-SM) de acuerdo con el SUCS.

TABLA 7- Caracterización físicas de las muestras de suelo.

Material	Gs	LL	LP	pH	Arena (%)	limo (%)	Arcilla (%)	Finos (%)	SUCS	HO (%)	DSM (g/cm ³)
Suelo	2,71	46,22	27,40	10,19	21,00	54,0	25,00	87%	ML	24	1,69
RRM	2,70	N. P	N. P	8,45	61,9	22,1	4,8	24,6%	SM	21,28	1,68
RRC	2,69	N. P	N. P	11,16	94,00	4,93	1,07	9,4%	SW-SM	-	-
RRM-C	-	N. P	N. P	básico	-	-	-	-	-	20,22	1,48

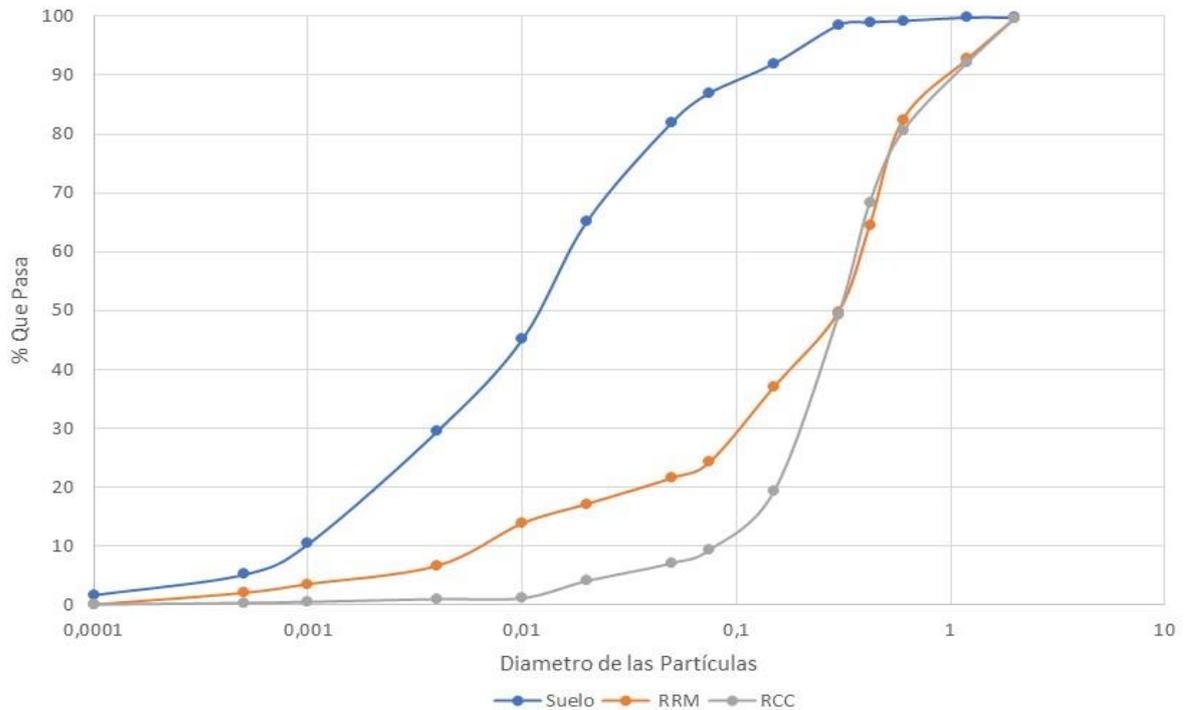
HO: Humedad óptima, DSM: Densidad seca máxima, SUCS: Sistema unificado de clasificación de suelos, NP: No Posee resultados.

A partir del ensayo de granulometría por sedimentación y los límites de consistencia, fue posible clasificar el suelo mediante el sistema de clasificación unificada de suelos (SUCS), el cual clasifica el suelo como limo arenoso, ya el sistema de ABNT, clasifica al suelo como un limo areno arcilloso.

Los suelos clasificados como limo arenosos, posee un comportamiento general para subrasante de débil a pobre (A-4), según la clasificación rodoviario (AASTHO).

El resultado de granulometría por sedimentación se muestra en la Figura 17, el tipo de disolvente depende del valor de pH de la muestra, para el suelo utilizado, el valor de pH es igual a 10.19, siendo clasificado como base, de esa forma el disolvente utilizado fue el hexametáfosfato de Sodio. En la figura 17, se muestra una notoria la diferencia entre las partículas de suelo y los estabilizadores RRC y RRM, el suelo presenta una mayor cantidad de partículas finas que los estabilizadores. El RRM presenta mayores tamaños de partículas que el RRC.

Figura 17- Granulometría del Suelo, RRC y RRM



Fuente: Autor,2022.

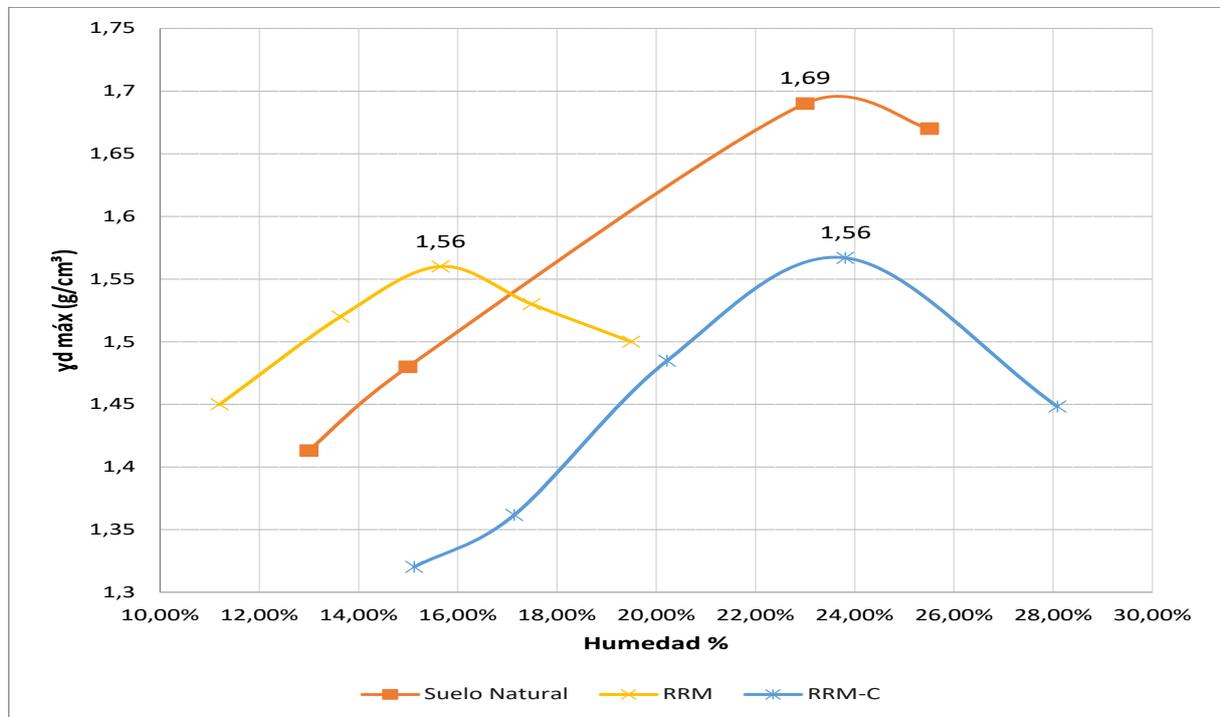
En la tabla 8, se muestran los parámetros de compactación (humedad óptima y densidad específica seca), encontrados en esta investigación y en la literatura, para el suelo del alojamiento estudiantil de la UNILA, en años anteriores (OCHOA AVEROS, 2019; ANAGUA COILA, 2019; CONDE MEJIA, 2022). La densidad seca máxima encontrada es mayor a la media de los demás autores, posiblemente por presentar una mayor cantidad de arena. La humedad óptima resultó con valores menores a la media de los mismos autores mencionados, también por motivo del mayor contenido de arena.

TABLA 8- Parámetros de Compactación.

Autores	Tipo de suelo	Máxima densidad seca (g/cm³)	Humedad óptima (%)
Suelo utilizado en esta investigación	Limo areno-arcilloso	1,69	23
Ochoa Averos (2019)	Limo arcilloso	1,58	28,41
Anagua Coila (2019)	Limo-arcilloso	1,63	21
Conde Mejia (2022)	Limo arcilloso	1,515	27

Fuente: Autor,2022

En la figura 18 se muestran las curvas de compactación para la energía de Proctor normal de las muestras de suelo, y los estabilizadores RRM y el RRM con refuerzo de 2% de cemento (RRM-C). Se muestra una notoria superioridad de densidad seca máxima en relación a los agentes estabilizadores. La humedad óptima del suelo presenta valores similares al RRM-C y superiores al RRM. La diferencia entre las humedades óptimas entre el RRM-C y el RRM, se debe a la influencia del 2% de cemento adicionado.

Figura 18- Curvas de Compactación de Suelo, RRM y RRM-C

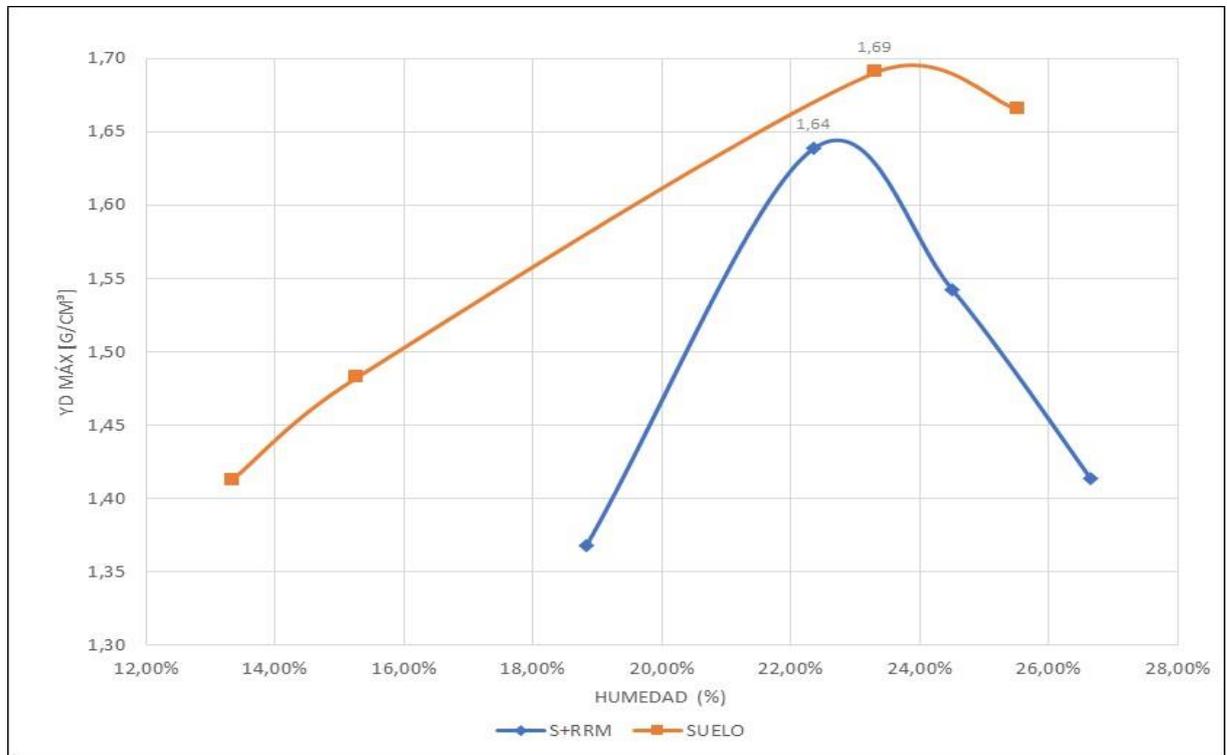
Fuente: Autor, 2022.

5.2 EFECTO DE LOS ESTABILIZADORES EN LA COMPACTACIÓN

A continuación, son comparadas las curvas de compactación del suelo natural y el suelo mezclado con los distintos agentes estabilizadores, con la finalidad de analizar el efecto de estos en los parámetros de compactación.

El primer caso corresponde a la adición de 20% de RRM al suelo. El efecto de la adición del estabilizador en la curva de compactación del suelo es mostrado en la Figura 19. Observase que la humedad óptima no fue alterada, sin embargo, el peso específico máximo disminuyó considerablemente. Por lo mencionado, los valores de peso específico máximo y la humedad óptima no tuvieron efectos favorables con la estabilización del RRM.

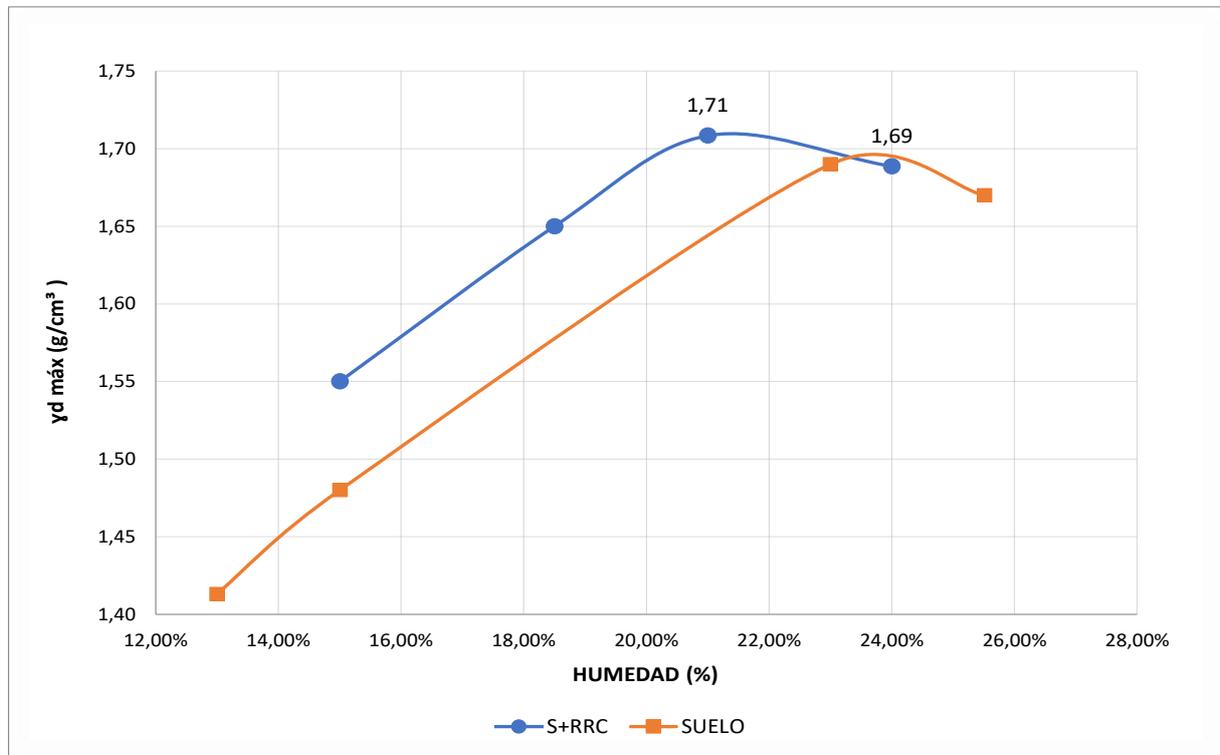
Figura 19- Curvas de Compactación de Suelo y S+RRM.



Fuente: Autor, 2022.

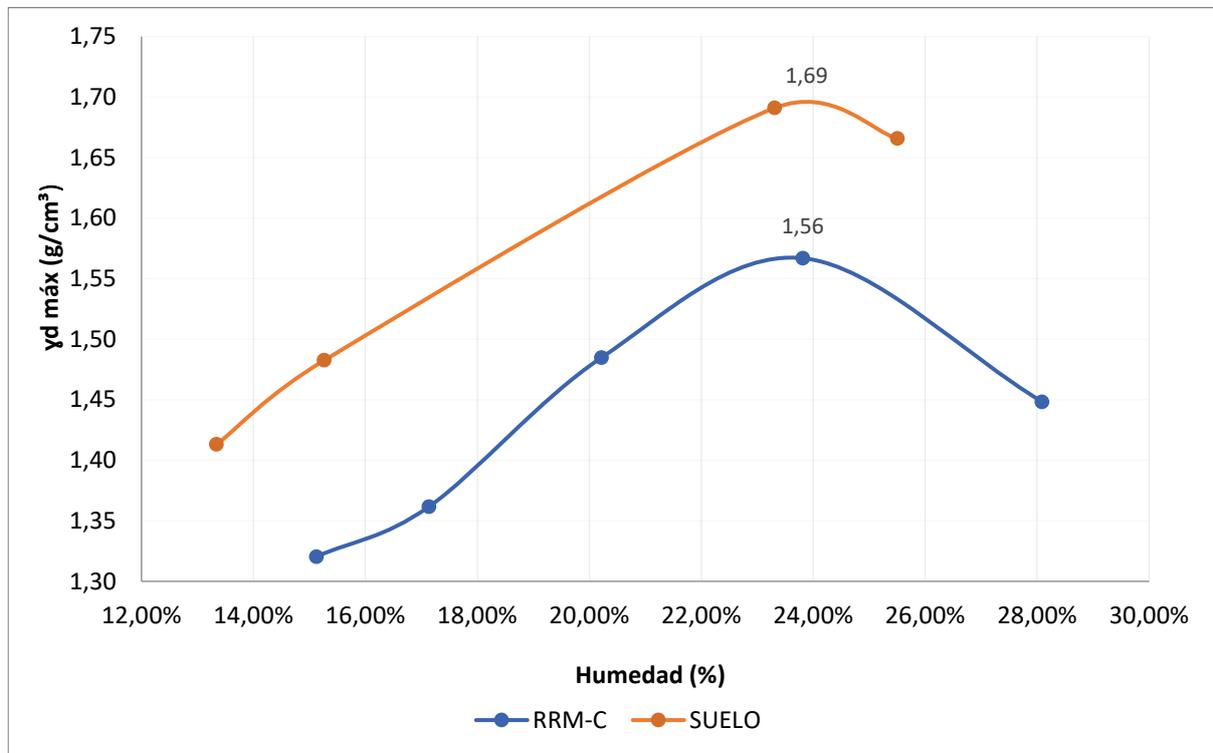
En la figura 20, se representa el segundo caso, con la adición de 20% de RRC en el suelo. Se observa que la humedad óptima disminuye y la máxima densidad seca tiene un ligero aumento. Así podemos concluir que el efecto de la adición del estabilizador RCC es favorable en términos de los parámetros de compactación. Resultados similares fueron encontrados por otros autores al utilizar materiales semejantes (OCHOA AVEROS 2019).

Figura 20- Curvas de Compactación de Suelo y S+RRC.



Fuente: Autor,2022.

En la figura 21, es presentado el último caso, en el que se adiciona 20% del agente estabilizador RRM-C en el suelo. Cabe recordar que el agente estabilizador está compuesto por 18% de RMM y 2% de Cemento Portland CPV. Los resultados muestran que existe una disminución considerable de la densidad aparente seca máxima, mientras que en la humedad óptima permanece prácticamente un valor constante, este comportamiento es similar al efecto encontrado en el estabilizador RMM.

Figura 21- Curvas de Compactación.

Fuente: Autor, 2022.

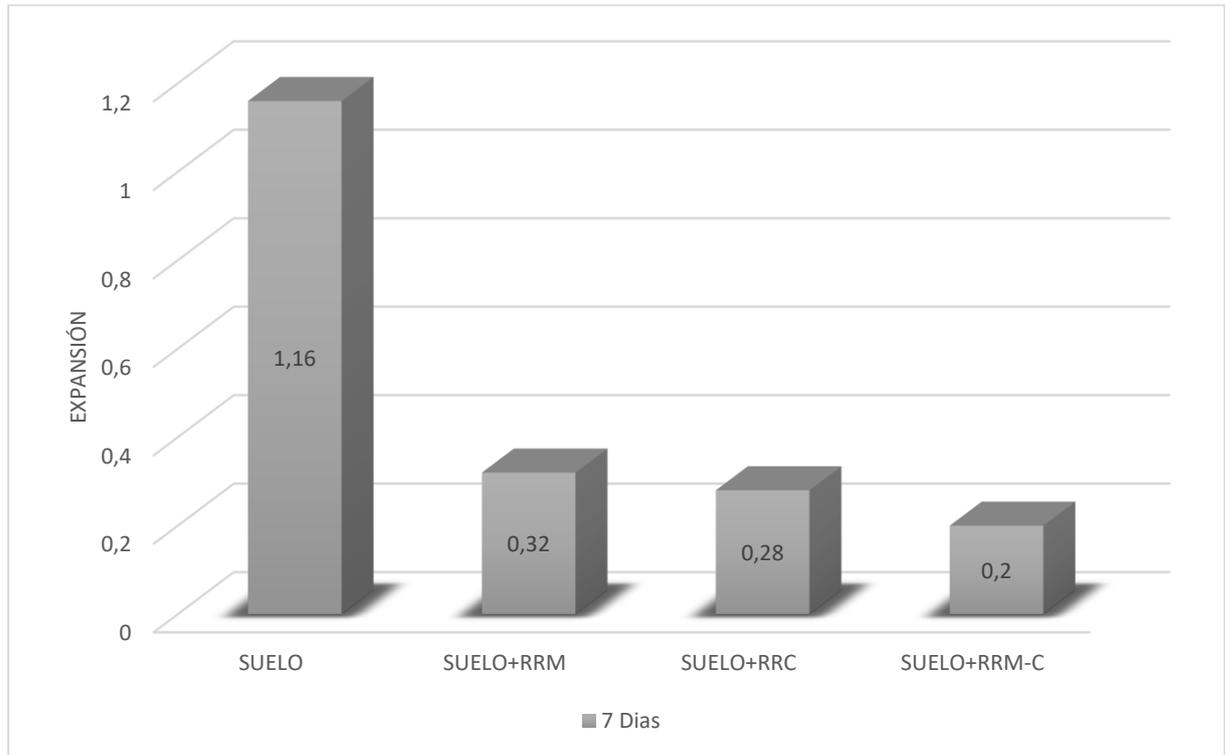
En resumen, los estabilizadores RRM y RRM-C no proporcionan resultados favorables desde el punto de vista de la densidad aparente seca máxima y humedad óptima. Sin embargo, al adicionar 20% de RRC existe una mejora en los parámetros mencionados, al requerir menor cantidad de agua para adicionar en el suelo y conseguir un aumento en la densidad aparente seca máxima.

5.3 EFECTO DE LOS ESTABILIZADORES EN LA EXPANSIÓN

El suelo en su estado natural obtuvo una expansión de 1,16%, este valor es considerado por la DNIT(2006), perjudicial para su uso como material de refuerzo en la subrasante. Sin embargo, se puede observar en los resultados que los estabilizadores estudiados en este trabajo, consiguen rápidamente revertir la expansión a valores estables (expansión menor que 1%). En el gráfico 22 se muestra los resultados de la estabilización de la expansión del suelo, por los agentes estabilizadores estudiados (20% RRM, 20% RRC

y 20% RRM-C).

Figura 22- Valores de Expansión del Suelo y los Estabilizadores.



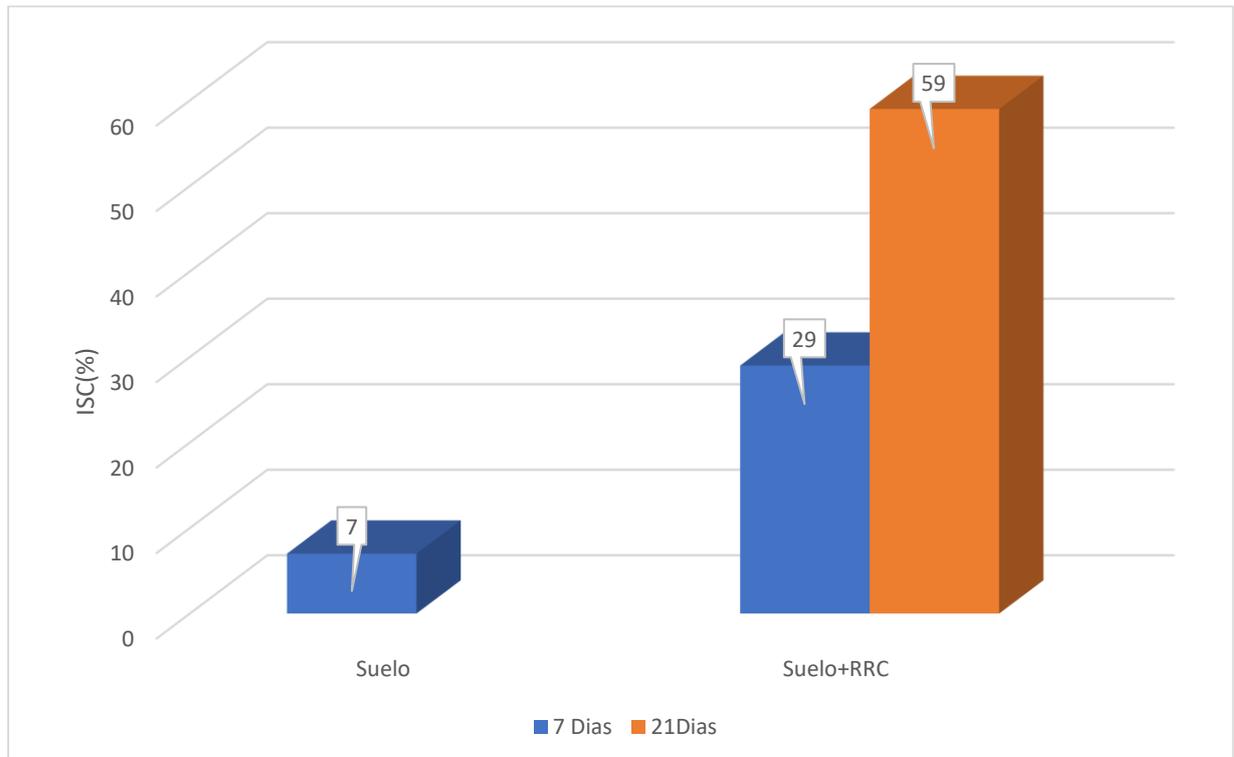
Fuente: Autor,2022.

La disminución de la expansión, puede relacionarse con una estabilización química del suelo por efecto de la adición de los estabilizadores. Los agentes estabilizadores al ser constituidos por partículas finas del RCD, es posible que tengan partículas de cemento activa, las cuales se hidratan y reaccionan con las partículas finas de suelo (OCHOA AVEROS; BIZARRETA-ORTEGA, 2020). Resultados de análisis de difracción de rayos X, realizados por (OCHOA AVEROS, 2019) mostraron la presencia de estos minerales de cemento activo en las muestras de RRC. Por ese mismo motivo, (OCHA AVEROS; BIZARRETA ORTEGA, 2021) obtuvieron resultados similares usando materiales semejantes (suelo y RRC Fino). Otros investigadores obtuvieron resultados similares con el uso de agregados de RCD menores a 2mm (MARTINEZ; NOGUEIRA; CARDOSO, 2021).

5.4 EFECTO DE LOS ESTABILIZADORES EN EL ISC

En esta sección se compara el valor del ISC del suelo en su estado natural con cada uno de los estabilizadores estudiados, con la finalidad de analizar el efecto de los mismos. En la Figura 23 podemos verificar que al incorporar 20% de RRC, los valores de ISC se incrementan grandemente, aumentó más de 8 veces, lo que confirma el funcionamiento del estabilizador RRC en la mejora de las condiciones del suelo. Conforme a la literatura, este comportamiento posiblemente sea el resultado de una estabilización química y mecánica, la acción mecánica ocurre debido a la proximidad de las partículas de suelo y de RRC, generando un rozamiento entre sus partículas sólidas, y la acción química se da por los minerales de cemento que aún se encuentran presentes en los Residuos Reciclados de Concreto (OCHOA AVEROS; BIZARRETA ORTEGA, 2021) .

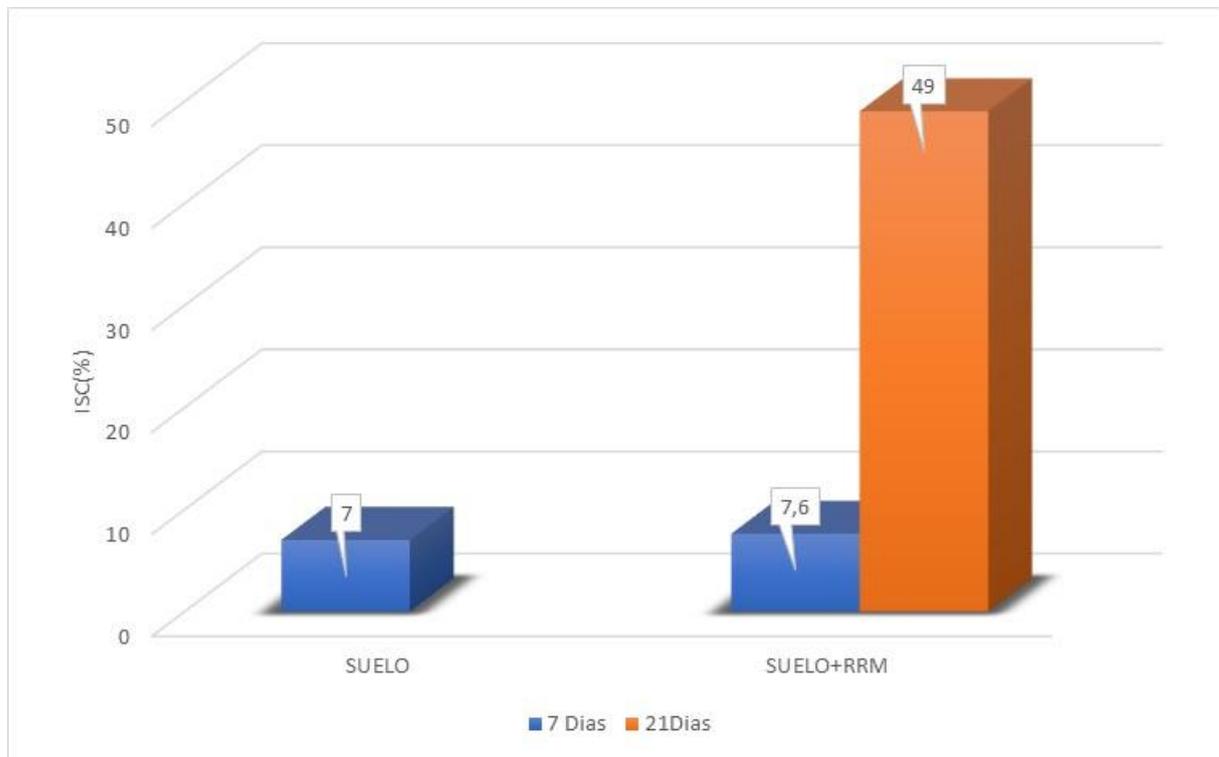
En relación al aumento del tiempo de cura, los valores de ISC se incrementan considerablemente, siendo el resultando más significativo a los 21 días. Es posible también que ensayos con un tiempo de cura de 28 días tengan un valor de ISC todavía mayor a 59, pues es la tendencia común del efecto del cemento.

Figura 23-Valores de ISC para el Suelo y Suelo +RRC.

Fuente: Autor,2022.

En la Figura 24, se muestra el efecto de incorporar 20% de RRM al suelo. Los resultados muestran valores bien superiores al suelo, es decir el ISC del suelo aumento 7 veces, lo cual confirma el funcionamiento del estabilizador en la mejora de las condiciones del suelo estudiado. De forma similar al RRC, este efecto se debe a la estabilización química y mecánica que el suelo recibe del RRM.

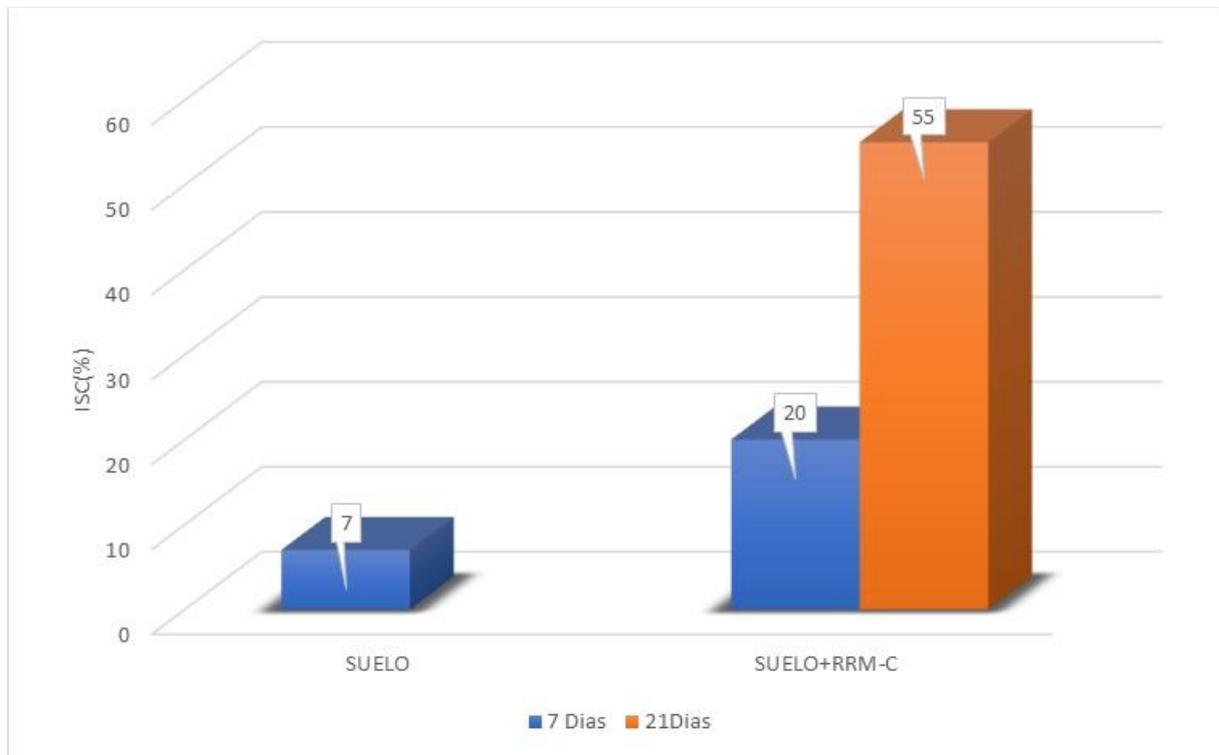
En relación al tiempo de cura para los cuerpos de prueba los valores de ISC aumentan considerablemente con el tiempo, resultando más significativa a los 21 días de permanecer en reposo, con cerca de 6 veces en relación a los 7 días.

Figura 24- Valores de ISC para el Suelo y Suelo +RRM.

Fuente: Autor,2022

En la Figura 25, podemos verificar que al incorporar la parcela de RRM-C (18% RRM y 2% Cemento CPV), también presenta valores elevados en comparación al del suelo, se observa que el valor máximo de ISC encontrado es de 55% después de 21 días. Es decir que el ISC aumentó en 8 veces, afirmando que existe una mejora de las condiciones del suelo natural estudiado. Este comportamiento posiblemente sea el resultado de la estabilización mecánica que ocurre debido a la proximidad de las partículas de suelo y las cantidades de productos que se encuentran en el RRM en su mayoría cerámicos, por otra parte, la acción química se da por los minerales presentes en el 2% de cemento y en las partículas finas de concreto presentes en el RRM.

Figura 25-Valores de ISC para el Suelo y Suelo +RRM-C.



Fuente: Autor,2022

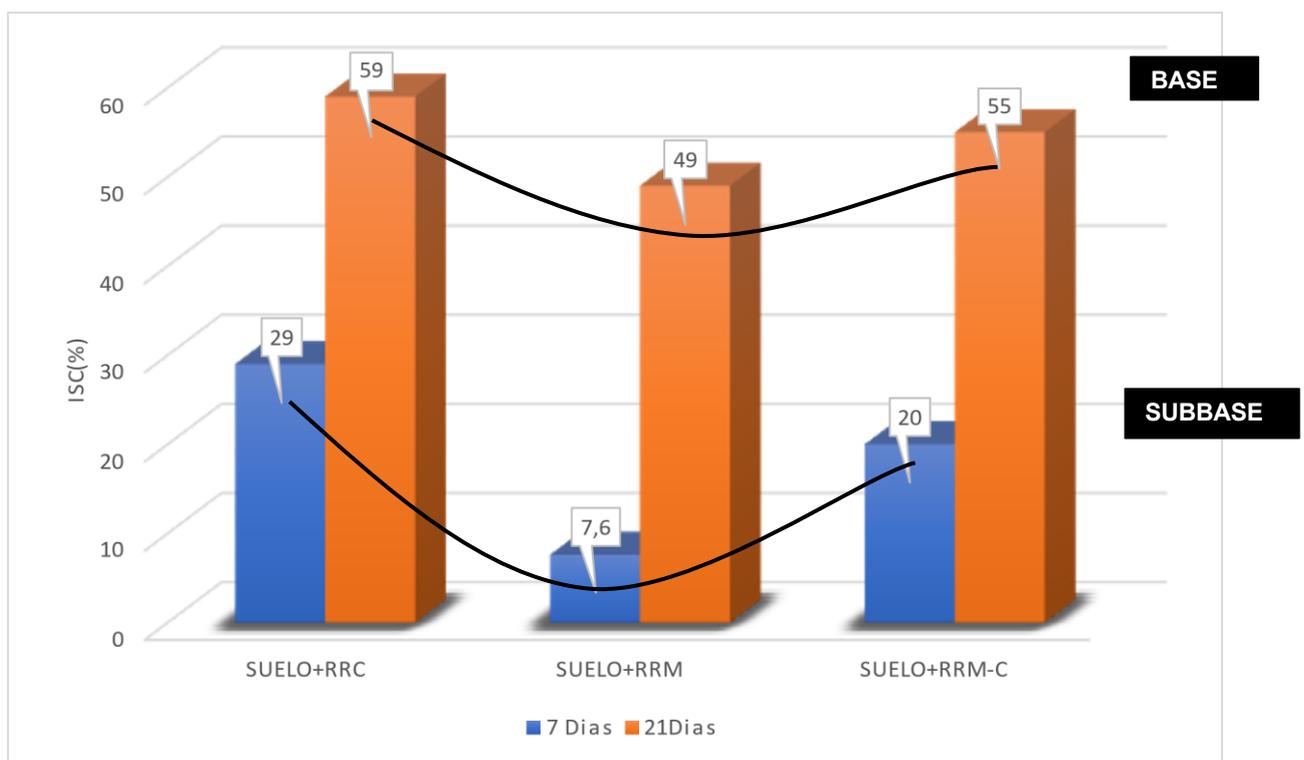
En relación al tiempo de cura para los cuerpos de prueba de suelo+RRM-C los valores de ISC presentan tendencia de aumento, a los 21 días el ISC aumento casi 3 veces el valor obtenido a los 7 días. La tendencia de aumento es similar a la acción de los minerales cementicos, y puede seguir aumentando en el tiempo hasta los 28 días como mínimo.

5.5 COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES ESTABILIZACIONES

A continuación, se presenta la comparación entre los valores de ISC de las estabilizaciones del suelo con los estabilizadores estudiados (RRC, RRM, y RRM-C). Analizando la Figura 26, se observa que a los 7 días el valor de ISC del Suelo+RRC (29%) es mayor al Suelo+RRM-C (20%), y ambas superan grandemente al RRM (ISC de 7,6), mostrando así en esta fase inicial una deficiencia inicial del estabilizador RRM. En la misma Figura 26, se analizan las mezclas a los 21 días, mostrándose que para ese tiempo de cura las diferencias entre el ISC de las mezclas son menores, alcanzando una media de

55%, la tendencia de valores sigue siendo la misma, primero el Suelo+RRC, segundo el Suelo+RRM-C y tercero el RRM. Dado que los materiales con presencias de materiales cementicios todavía pueden seguir actuando en el tiempo, es probable que el valor final del ISC de la mezcla entre Suelo+RRC pase de 59% (a los 21 días) para un valor superior a 60% a los 28 días, tornándose como un posible material potencial para su aplicación en bases de pavimentos de bajo nivel de tránsito. En relación a lo afirmado, Fuji (2012) mostró que en mezclas de Suelo+RCD los valores de ISC aumentan con el tiempo hasta los 28 días donde se estabiliza, una vez que el comportamiento a los 56 días es similar.

Figura 26- Comparación de los valores de ISC las estabilizaciones en 7 y 21 días.



Fuente: Autor, 2022.

La mezcla de Suelo y Residuo Reciclado Mixto (RRM), tiene un elevado potencial de utilización como material para subbase, debido a que los valores de ISC superan el 20%. Finalmente se puede afirmar que todos los estabilizadores estudiados pueden ser aplicados

como materiales estabilizadores para subrasantes, ya que todas las mezclas superan el 2%, estudios similares sobre este asunto fueron vistos por (OCHOA AVEROS, 2019).

6 CONSIDERACIONES FINALES

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar el uso potencial de los agregados finos de Residuos de Construcción y Demolición, para la estabilización de un suelo limo areno-arcilloso, a través del análisis de los ensayos de Índice de Soporte California (ISC). En relación a los resultados obtenidos en el trabajo se destacan algunos puntos:

Podemos concluir que los residuos reciclados de concreto y mixtos – finos son una alternativa sustentable para que sean utilizados como materiales para refuerzo de subrasante y subbase, de acuerdo con el manual de Pavimentación -DNIT 2006. También el residuo de concreto mostro tener potencial para su uso como base en pavimentos de bajo nivel de tránsito. Si aumentamos el tiempo de cura de 21 para 28 días, los resultados de ISC serán mayores conforme la literatura, por eso el potencial de los agentes estabilizadores estudiados todavía se puede incrementar.

Los agentes estabilizadores estudiados mostraron un elevado potencial para sustituir al cemento como estabilizador de suelos aplicados la pavimentación, solo que deben utilizarse en un porcentaje mayor, del orden de 20%. Otra alternativa sustentable, pues el cemento para su producción causa un gran impacto ambiental desde la degradación del medio físico por la extracción de la roca caliza hasta la generación de contaminantes en su proceso industrial.

Con el fin de contribuir con el avance de nuevas investigaciones relacionadas con materiales de RCD, son recomendados los siguientes puntos para trabajos futuros:

- Incrementar las proporciones de los agentes estabilizadores de RCD en remplazo del suelo;
- Evaluar el desempeño de los residuos reciclados de concreto con suelo de otra región y de características diferentes;
- Evaluar la viabilidad económica mediante la construcción de un trecho de vía pavimentada, utilizando residuos de construcción y demolición en sus camadas de base, subbase y refuerzo de subrasante.

REFERENCIAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. [S. l.: s. n.], 2021.

ABNT. NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ANAGUA COILA, Rolando. **Evaluación del comportamiento carga-asentamiento em escala completa de zapatas sobre limo arcillo blando y limo arcilloso**. 2019, 76p. Trabajo de Conclusión de Curso (Graduación en Ingeniería Civil de Infraestructura) – Universidad Federal de Integración Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019.
URI: <http://dspace.unila.edu.br/123456789/6074>

BARRETO, ALISSON CABRAL; AMORIM, ENIO FERNANDES. Avaliação Do Desempenho Técnico De Diferentes Misturas De Solo Com Resíduos De Construção (Rcd) Para Uso Em Obras Viárias. **Holos**, [s. l.], v. 7, p. 1–20, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2020.9696>.

BIZARRETA-ORTEGA, Julio; OCHOA AVEROS, Sara. **Manual Didático para a Execução do Ensaio Índice de Suporte Califórnia (ISC)**. EDUNILA – Editora Universitária. 2022.
URI: <http://dspace.unila.edu.br/123456789/6697>

CONAMA., Conselho Nacional do Meio Ambiente –. **Resolução nº 307 de 5 de Julho de 2002**. Concessão: 2002.

DEL REY, Isaac *et al.* Feasibility of using unbound mixed recycled aggregates from CDW over expansive clay subgrade in unpaved rural roads. **Materials**, [s. l.], v. 9, n. 11, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma9110931>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. Manual de pavimentação. [s. l.], p. 277, 2006.

DIAS, João José da Fonseca Marques Simões. Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas. [s. l.], 2012.

DRANKA, RICARDO BAZZANI. MELHORAMENTO DE SOLO COM USO DE TELHA CERÂMICA MOÍDA ORIUNDA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD). [s. l.], 2016.

FERREIRA, R. L.S. *et al.* Evaluation of the physical, chemical and mineralogical properties of the fine fraction (<150 µm) of the recycled CDW aggregate. **Cerâmica**, [s. l.], v. 65, n. 373, p. 139–146, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653732453>

GONÇALVES, LUCCA GRZECZECZEN. PREDITORES DO RESÍDUO NA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA O MAPEAMENTO DO DESCARTE IRREGULAR EM FOZ DO IGUAÇU – PR LUCCA. [s. l.], 2021.

KARLA, Amanda *et al.* Estudo dos aspectos do reaproveitamento dos resíduos sólidos de construção civil reciclados pelo SLU nas camadas de pavimentação asfáltica como reforço de sub-base e base . Study of aspects of the reuse of solid civil construction waste recycled by SLU in. [s. l.], 2021.

KERNI, V.; SONTWAL, V. K.; JAN, U. Review on Stabilization of Clayey Soil Using Fines Obtained From Demolished Concrete Structures. International Journal Of Innovative Research In Science, Engineering And Technology, India, v. 4, n. 5, p.3204-3209, mayo 2015.

KIST, Katcher Jeanine *et al.* O Uso De Resíduos De Construção E Demolição (Rcd) Sub-Base E Subleito De Pavimentações. **XXVIII CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA**, [s. l.], v. XXVIII, p. 4, 2017.

LIMA, Francisco Mariano da Rocha de Souza; ALVARADO, Ligia Marcela Tarazona. ANÁLISE DO IMPACTO AMBIENTAL DO GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA DEMOLIÇÃO SELETIVA ATRAVÉS DE SISTEMAS DINÂMICOS Mariana de Mendonça Molles Mazzini Perpétuo Aluno de Graduação da Engenharia de Produção , 5º período , UFRJ P. [s. l.], n. 2013, 2015.

LOVEDEEP, S.; SHAHBAZ, S.; GILL, K. S. Improvement in CBR Value of Soil using Waste Concrete Fines. - International Journal Of Science Technology & Engineering, India, v. 3, n. 9, p.1-5, marzo 2017.

MARTINEZ, Rodrigo; NOGUEIRA, Luccas; CARDOSO, Jorgue. Estudo da aplicação de agregados reciclados em camadas de subleito rodoviário protegidas com geotêxtil. [s. l.], p. 13, 2021.

MATIAS, ALESSANDRA NATIELE. Resíduos De Construção E Demolição À Luz Da Política Nacional De Resíduos Sólidos. [s. l.], p. 205, 2020.

MOTTA, ROSÂNGELA DOS SANTOS. ESTUDO LABORATORIAL DE AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO SÓLIDO DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO. [s. l.], v. D, 2005.

OCHOA AVEROS, Sara del Rocio; BIZARRETA-ORTEGA, Julio César. Avaliação do RCD-C na estabilização de solos de subleito. In: Anais do Congresso Brasileiro Digital de Geotecnia e Meio Ambiente, São Carlos/ SP, 2020.

OCHOA AVEROS, Sara del Rocio. **Estudio experimental sobre la estabilización de una subrasante limo arcillosa con RCD-concreto fino (partículas < 2mm) para aplicación en pavimentos.** 2019. 62 páginas. Trabajo de Conclusión de Curso (Graduación en Ingeniería Civil de Infraestructura) – Universidad Federal de Integración Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019.

URI: <http://dSPACE.unila.edu.br/123456789/5903>

OCHOA AVEROS, S., BIZARRETA-ORTEGA, J. Experimental Study on Stabilization Subgrade Soil Soft with Fine Concrete Residue. **ESPOCH Congresses: The Ecuador in**

Journal of S.T.E.A.M., 1(1), p. 1044-1052, 2021.

DOI: <https://doi.org/10.18502/epoch.v1i2.9530>

OCHOA AVEROS, S., BIZARRETA ORTEGA, J., & CHICAIZA ORTIZ, A. Reciclaje y reaprovechamiento de los residuos de concreto en pavimentos. **Green World Journal**, 5(1), 015, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.53313/gwj51015>

OLIVEIRA, Thays Car Feliciano de. **Avaliação experimental de barreira capilar com RCD como camada de bloqueio para coberturas finais de ARSU**. 2019. 77p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana (Unila), Foz do Iguaçu, 2019

URI: <http://dspace.unila.edu.br/123456789/5158>

PIOVEZAN JUNIOR, Gilson tadeu Amaral. AVALIAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) GERADOS NO AVALIAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) GERADOS NO. [s. l.], 2007.

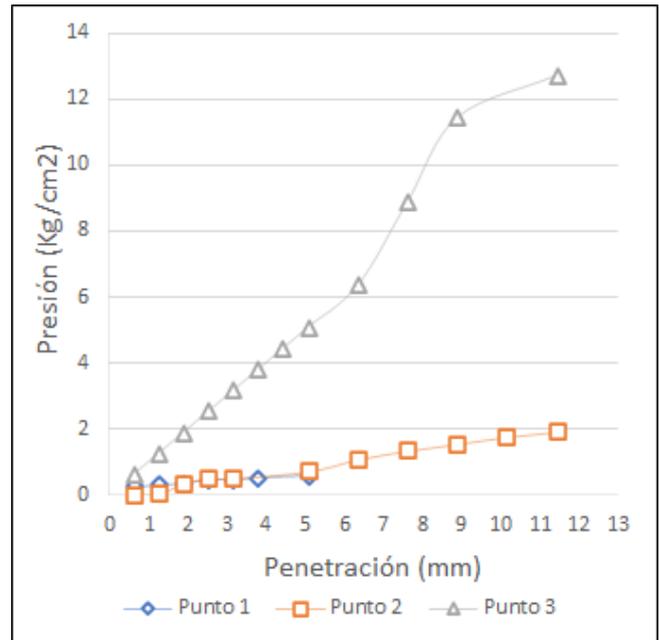
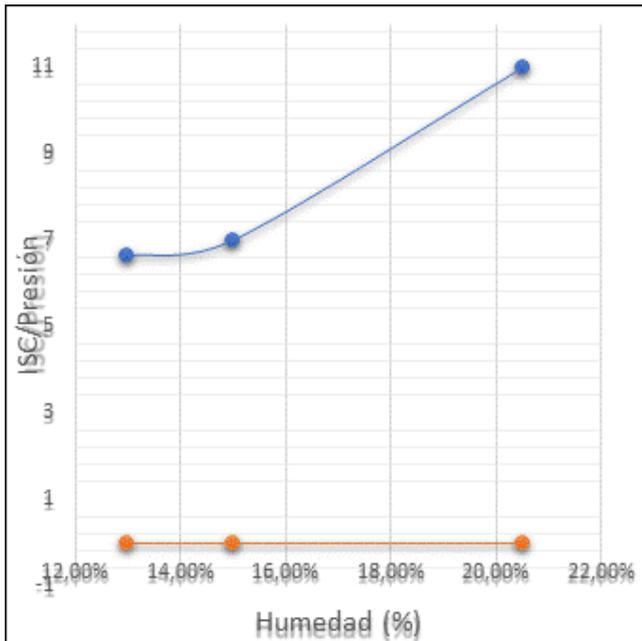
ROCHA, EIDER GOMES DE AZEVEDO. **Os Resíduos Sólidos De Construção E Demolição: Gerenciamento, Quantificação E Caracterização. Um Estudo De Caso No Distrito Federal**. 174 f. 2006. [s. l.], 2006.

SOUSA, Matheus Kennedy de Oliveira e; BALDUINO, Ângelo Ricardo. Aproveitamento do RCD como base e sub-base em pavimentações com baixo volume de tráfego no município de Porto Nacional. **Inventionis**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 19–29, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/cbpc2674-6395.2019.002.0003>

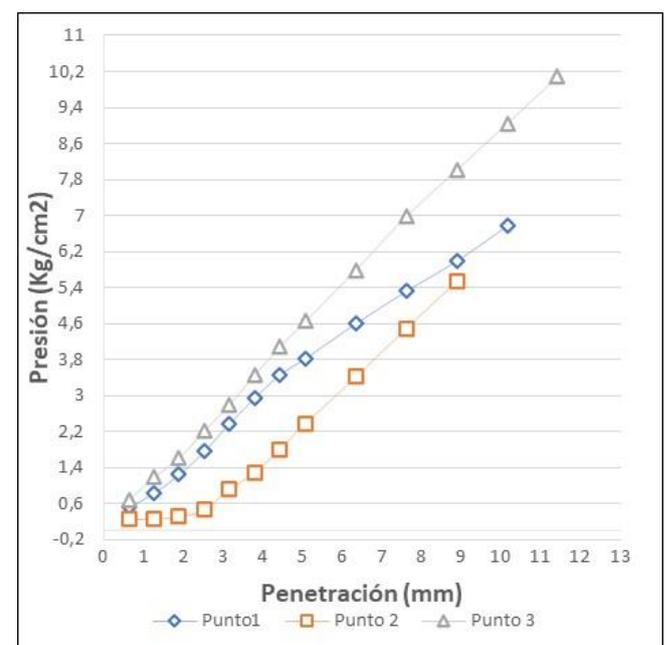
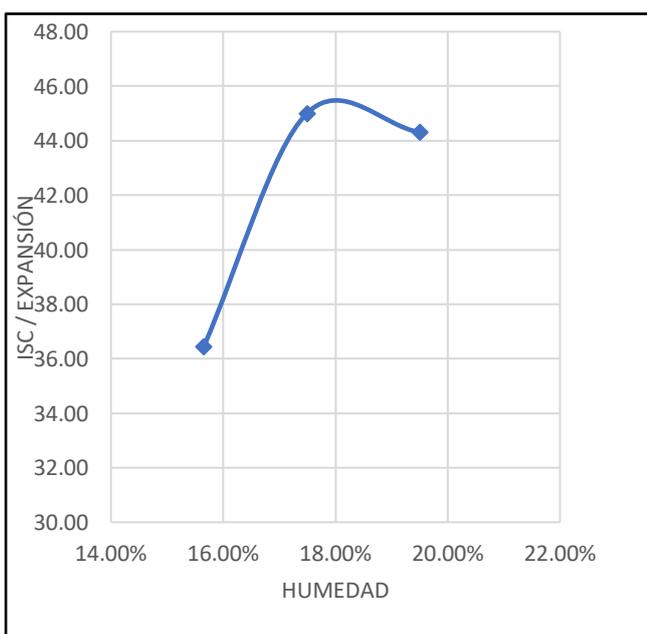
7 ANEXOS

ENSAYO DE ISC Y PRESIÓN VS PENETRACIÓN

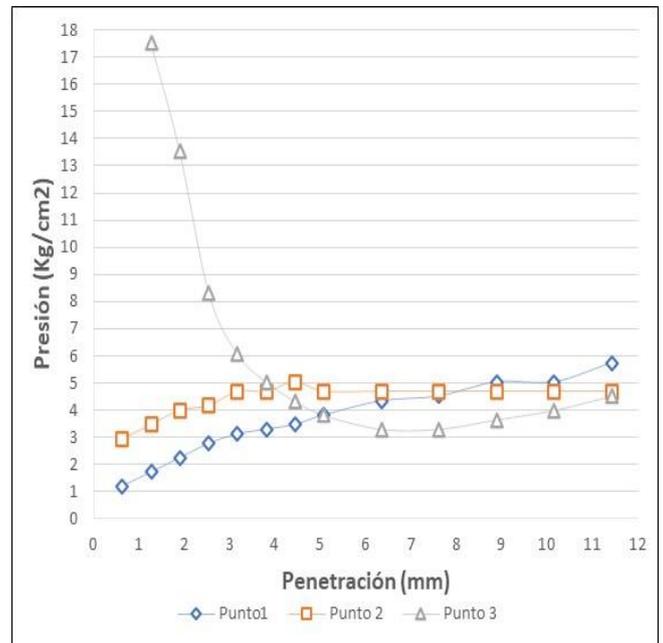
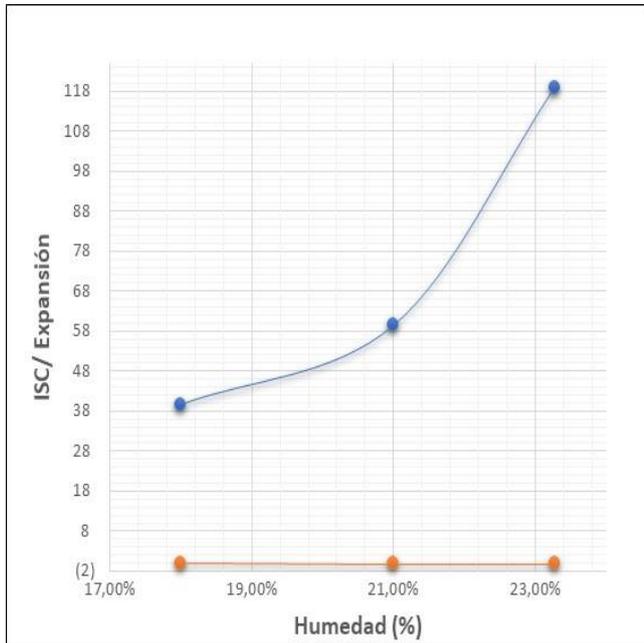
Suelo Natural 100%



RRM 100%



Suelo 80% +RRC20%



Suelo 80% +RRM 20%

