



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGÍA,
INFRAESTRUCTURA Y
TERRITÓRIO (ILATIT)**

INGENIERÍA CIVIL DE INFRAESTRUCTURA

**ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA ESTABILIZACIÓN DE UNA SUBRASANTE
LIMO ARCILLOSA CON RCD-CONCRETO FINO (PARTÍCULAS < 2mm) PARA
APLICACIÓN EN PAVIMENTOS**

SARA DEL ROCIO OCHOA AVEROS

Foz do Iguaçu
2019

**ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA ESTABILIZACIÓN DE UNA SUBRASANTE
LIMO ARCILLOSA CON RCD-CONCRETO FINO (PARTÍCULAS < 2mm) PARA
APLICACIÓN EN PAVIMENTOS**

SARA DEL ROCIO OCHOA AVEROS

Trabajo de Conclusión de Curso, presentado al Instituto Latino-Americano de Tecnología, Infraestructura y Territorio de la Universidad Federal de Integración Latino-Americana, como requisito parcial para la obtención del título de Ingeniera Civil de Infraestructura.

Orientador: Prof. Msc. Julio César Bizarreta Ortega

Dedico este trabajo a mis abuelitos Luzmila,
Sarita y Angelito, por ser parte de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Quién cumple una meta, nunca lo hace solo, siempre es el resultado de un esfuerzo mutuo de un grupo de personas que arrimaron el hombro, para que las cosas salgan bien. Por eso quiero agradecer a las/ los que me apoyaron, pero se quedaron en el camino, y a los que aún continúan a mi lado.

A Dios, por la fuerza y esperanza durante el proceso de graduación.

A mi papá por siempre confiar en mí y mis capacidades; a mi mamá por enseñarme el significado de la palabra perseverancia y lo fuerte que son las oraciones; a mi hermano por llenarnos de orgullo con sus nuevas locuras; a mis abuelitos por amarme, esperarme e incentivarme el amor por los libros; a Dennis por el cariño, impulso, inspiración y aprendizaje juntos. A mis tíos y primos, por estar pendientes y acompañarme en el proceso.

A Ingrid y Lari, que me han brindado un hogar en Foz con costumbres diferentes, pero con mucho cariño. A Lety que ha sido un pilar fundamental para el desarrollo del TCC con su apoyo psicológico y mano amiga. A Darwin, Rulo, Anitta, Goleiro, Margarita que han estado siempre presentes y motivadores. A Deborah, Samantha, Bianca, Thays, Bruna, João, Gabriel's, Rodrigo, Hassan por abrirme la puerta de su país, sus hogares y sus vidas. A Sebastián, Alejandra, Jasleidy, Eloy, Cleer, Ricardo, Adriana, Nuri, Carol, Rolando, Ricardo, Shirley, Paul, María, José amigas/ amigos que hicieron más llevadero este período entre risas, frustraciones y alegrías. A mis panas de la tierrita: Pamela, Anabell, Adrián, Lizeth y Sandy, que al encontrarnos la amistad continua intacta.

A las/los profesores de la Universidad por los consejos, enseñanzas durante la vida académica. En especial al Prof. Julio, orientador del TCC, por la paciencia, humildad y predisposición para sanar dudas. A la Prof. ^a Scarlett, al Prof. Noé y Prof. Víctor por creer en mis capacidades e impulsarme a tomar nuevos retos académicos.

A los técnicos del laboratorio: Dalila, Paula, Luciano, Andrey y personal del laboratorio Ornellia y Martha, por la paciencia y disposición en la trayectoria de ejecución del TCC. A la Prof. ^a Gissele por la orientación brindada en los ensayos de caracterización del material, así como, la colaboración de sus alumnos de mecánica de suelos I: Adriana, Sergio, Gustavo y Felix. Al personal de la biblioteca, Valcir y Francielle, por la predisposición.

A la Secretaria Municipal de Medio Ambiente- división de aterro sanitario, por la recolección del material e información necesaria en esta investigación; a la Prof. ^a Marcia Helena Beck y técnico de edificaciones del IFPR por facilitarnos los equipamientos para el beneficiamiento del residuo de concreto; al Msc. Eduardo Rigo por el apoyo en la ejecución del TG/DTG en el Laboratorio de Desempeño, Estructura y Materiales; al Eng. Diego Galeano por la realización del ensayo DRX en el Laboratorio de Difracción de Rayos X; a la Prof. ^a Lygia Furtado del Colegio Estadual Profesor Flavio Warken por permitirnos el uso de la prensa de CBR en el laboratorio de edificaciones y mecánica de suelos de la institución.

A la UNILA, por el apoyo económico a través del Programa Nacional de Asistencia Estudiantil-PNAES. Este trabajo sería el producto de la inversión del gobierno brasileiro en bolsas de investigación y enseñanzas.

Nosotros somos como los granos de quinua si estamos solos, el viento lleva lejos. Pero si estamos unidos en un costal, nada hace el viento. Bamboleará, pero no nos hará caer.

Dolores Cacuango

OCHOAAVEROS, 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.

RESUMEN

Algunas regiones de Foz do Iguaçu presentan suelos limo-arcillosos con baja capacidad de soporte, que requieren una estabilización para ser utilizados como subrasante de pavimentos. Según datos de esta municipalidad, sólo en el año 2018 se registró una producción de 209287,69 toneladas de residuos inertes, en que aproximadamente el 80% provenía de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) que en la actualidad no está siendo reaprovechado. Los residuos de concreto son parte de los RCD, y pueden contener compuestos de cemento residuales capaces de contribuir a la estabilización química y mecánica del suelo. En ese contexto, en el presente trabajo se propone una solución sustentable para la destinación de los residuos de concretos, a través de su reutilización en el mejoramiento de la subrasante de pavimentos. Para tal finalidad, estos materiales fueron aprovechados para obtener un RCD-C Fino (Residuo de Construcción y Demolición de Concreto fino), con partículas menores a 2mm. Fueron realizados los ensayos de caracterización, compactación, expansión e Índice de soporte de California (CBR), variando los porcentajes en peso de RCD-C Fino, en 0, 20, 40 y 60%, con relación a la masa total de la mezcla. Con el incremento del residuo reciclado de concreto, hubo una disminución en los siguientes parámetros: límites de Atterberg, masa específica, humedad óptima y expansión; y un incremento en los valores de masa específica aparente seca y CBR, con un porcentaje óptimo de 60% RCD-C fino. Los parámetros de expansión y CBR cumplieron con los requisitos normativos para refuerzo de la subrasante. Por lo que se puede concluir que el uso de RCD-C fino como estabilizador del limo-arcilloso de la región de Foz do Iguaçu resulta promisorio y viable del punto de vista técnico, además de contribuir para la reducción de los impactos ambientales que conlleva a la aplicación en la pavimentación.

Palabras-clave: Estabilización de subrasante. RCD de concreto fino. Índice de soporte de California- CBR.

OCHOA AVEROS, Sara del Rocio. **Experimental Study on stabilization of silty clay subgrade with CDW-Concrete fine (particles <2mm) for pavement applications.**2019. 62 pages. Course Conclusion Work (Graduation in Civil Engineering Infrastructure) – Federal University of Latin American Integration, Foz do Iguaçu, 2019.

ABSTRACT

Some regions of Foz do Iguaçu have silt-clay soils with low support capacity, which require stabilization to be used as a subgrade of pavements. According to data from this municipality, only in 2018 there was a production of 209287.69 tons of inert waste, in which approximately 80% came from Construction and Demolition Waste (RCD) that is currently not being reused. Concrete waste is part of the RCDs, and may contain residual cement compounds capable of contributing to the chemical and mechanical stabilization of the soil. In this context, this work proposes a sustainable solution for the destination of concrete waste, through its reuse in the improvement of the subgrade of pavements. For this purpose, these materials were used to obtain a Fine RCD-C (Fine Concrete Construction and Demolition Waste), with particles smaller than 2mm. The characterization, compaction, expansion and California support index (CBR) tests were performed, varying the percentages by weight of RCD-C Fino, by 0, 20, 40 and 60%, in relation to the total mass of the mixture. With the increase in recycled concrete waste, there was a decrease in the following parameters: Atterberg limits, specific mass, optimum humidity and expansion; and an increase in the values of dry apparent specific mass and CBR, with an optimal percentage of 60% fine RCD-C. The expansion parameters and CBR met the regulatory requirements for subgrade reinforcement. Therefore, it can be concluded that the use of fine RCD-C as a silt-clay stabilizer in the Foz do Iguaçu region is promising and viable from the technical point of view, as well as contributing to the reduction of environmental impacts that lead to the application in paving.

Keywords: Subgrade stabilization. RCD of fine concrete. California Bearing Ratio -CBR.

OCHOAAVEROS, Sara del Rocio. **Estudo experimental sob a estabilização de um subleito silto argilosa con RCD-concreto fino (partículas < 2mm) para aplicação em pavimentos** 2019. 62 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019.

RESUMO

Algumas regiões de Foz do Iguaçu apresentam solos silte-argilosos com baixa capacidade de suporte, que requerem uma estabilização para que possam ser utilizados como subleito de pavimentos. Segundo dados fornecidos por órgãos municipais, somente no ano de 2018 se registrou uma produção de 209287,69 toneladas de resíduos inertes, sendo aproximadamente 80% são provenientes de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), que na atualidade não estão sendo reaproveitados. Os resíduos de concreto são parte dos RCD, e podem conter compostos de cimento residuais capazes de contribuir para estabilizar química e mecanicamente o solo. Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma solução sustentável para a destinação dos resíduos de concreto, através de sua reutilização no melhoramento da sub-base de pavimentos. Para tal finalidade, estes materiais foram aproveitados para obter um RCD-C Fino (Resíduo da Construção e Demolição de Concreto Fino), com partículas menores que 2mm. Foram realizados os ensaios de caracterização, compactação, expansão e índice de suporte de Califórnia (ISC), variando os percentuais em peso de RCD-C Fino em 0, 20, 40 e 60%, em relação à massa total da mistura. Com o incremento do resíduo reciclado de concreto, houve uma diminuição nos seguintes parâmetros: limites de Atterberg, massa específica, umidade ótima e expansão; e um incremento da massa específica aparente seca e CBR, com uma porcentagem ótima de 60% RCD-C fino. Os parâmetros de expansão e CBR cumpriram com os requisitos normativos para reforço da sub-base, pelo qual se pode concluir que o uso do RCD-C fino como estabilizador do silte-argiloso da região de Foz do Iguaçu com o incremento da porcentagem de RCD-C Fino, com o que se se mostrou promissório e viável do ponto de vista técnico, além de contribuir com a redução dos impactos ambientais inerentes à aplicação na pavimentação.

Palabras clave: Reforço do subleito. RCD cinza. Índice de suporte de Califórnia-CBR.

G

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Recolección de RCD por región.....	18
Figura 2- Índice per capita de RCD.	19
Figura 3- Residuos inertes Foz do Iguaçu.....	20
Figura 4- Difracción de rayos X del cemento Portland CPIII-40RS.	26
Figura 5- Análisis de TG y DTG del cemento CP V ARI	26
Figura 6- Diagrama de flujo de los procedimientos.	27
Figura 7 - Recolección del suelo.	28
Figura 8- Recolección de RCD.	29
Figura 9- Producción de RCD-C fino (partículas< 2mm).	29
Figura 10- Ensayo de pH.....	31
Figura 11- Ensayo de determinación de masa específica de los granos.....	31
Figura 12- Ensayo de granulometría por granulómetro a láser-CILAS.....	32
Figura 13- Ensayo de límite de liquidez.....	33
Figura 14- Ensayo de límite de plasticidad.....	33
Figura 15- Análisis termogravimétrico.	34
Figura 16- Análisis DRX	34
Figura 17- Dosificaciones entre suelo y RCD.	35
Figura 18- Etapas del ensayo de compactación.....	36
Figura 19- Segunda etapa del ISC.	37
Figura 20- Tercera etapa ISC.	37
Figura 21- Cuarta etapa ISC.....	38
Figura 22- Granulometría del suelo.	40
Figura 23- Granulometría de muestras con variaciones de RCD-C fino.....	41
Figura 24- Diagrama de rayos-X del RCD-C fino.	42
Figura 25- TG y DTG del cemento CP V y RCD-C fino.	43
Figura 26- Compactación de las muestras.	43
Figura 27- Presión vs penetración para el suelo y mezclas suelo con RCD-C fino.	45
Figura 28- Comparación del CBR de todas las mezclas.	46

LISTA DE TABELAS

Tabla 1- Principales compuestos del cemento.....	25
Tabla 2- Ensayos de laboratorio y normativa aplicada.....	30
Tabla 3- Peso necesario para las tres variaciones suelo y RCD-C fino.	35
Tabla 4- Caracterización física de las muestras.....	39
Tabla 5- Clasificación de las muestras SUCS, AASHTO y ABNT.....	41
Tabla 7- Valores máximos compactación.....	43
Tabla 8- Verificación de la expansión.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Gs	Peso específico relativo de sólidos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
CBR	Índice de Soporte de California
CBUQ	Concreto Betuminoso Mezclado en Caliente
CCP	Concreto de Cemento Portland
CONAMA	<i>Conselho Nacional do Meio Ambiente</i>
CP	Cuerpos de Prueba
DER	<i>Departamento de estradas de rodagem</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difracción de rayos x
DTG	Derivada del análisis Termogravimétrico
ICC	Industria de Construcción Civil
IFPR	Instituto Federal de Paraná
ISC	Índice de Soporte de California
LADEMA	Laboratorio de Desempeño, Estructura y Materiales
LAGEO	Laboratorio de Mecánica de Suelos y Geotecnia
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
PIB	Producto Interno Bruto
RCD	Residuos de Construcción de Demolición
RCD-C	Residuo de Construcción y Demolición de Concreto
SMA	<i>Stone Mastique Asphalt</i>
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
TG	Análisis Termogravimétrico

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GENERAL	14
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 PANORAMA GENERAL DEL RCD EN BRASIL Y LOCAL DE ESTUDIO	15
3.1.1 Aspectos históricos	16
3.1.2 Producción y gestión de RCD	17
3.1.3 Utilización de RCD	20
3.2 PAVIMENTO	20
3.2.1 Clasificación del pavimento	21
3.2.2 Partes del pavimento	21
3.2.3 Subrasante	22
3.2.4 Uso de RCD en la pavimentación	23
4 MATERIALES Y MÉTODOS	27
4.1 OBTENCIÓN DEL MATERIAL	28
4.1.1 Suelo.....	28
4.1.2 RCD de concreto	28
4.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MINERALÓGICA.....	29
4.2.1 Ensayos físicos	30
4.2.1 Ensayos para la caracterización mineralógica	33
4.3 DOSIFICACIÓN ENTRE SUELO Y RCD-C FINO	34
4.4 ENSAYO DE COMPACTACIÓN	35
4.5 ENSAYO DE EXPANSIÓN Y CBR.....	36
5 RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	39
5.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS	39
5.1.1. Características físicas.....	39
4.4 Características mineralógicas del RCD-C fino.....	41
5.2 COMPACTACIÓN	43
5.3 EXPANSIÓN Y CBR	44

6 CONSERACIONES FINALES 47

REFERENCIAS 49

1 INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo socio económico de las ciudades son necesarias vías de comunicación terrestre en buen estado, las cuales facilitan el intercambio de productos en la región, mejorando su competitividad en el mercado. Uno de los problemas en la construcción de pavimentos es garantizar la estabilidad y durabilidad del suelo. Existen dos opciones para asegurar el comportamiento geotécnico del mismo: sustituir la capa de suelo ocasionando grandes movimientos de tierra o mejorar las condiciones del mismo (RAMOS, 2014).

Hoy en día, se torna necesaria la búsqueda de nuevas tecnologías y materiales que engloben la reutilización de materiales con características técnicas apropiadas, con el menor impacto ambiental, más eficientes y menos agresivas con el entorno debido a las limitaciones del servicio del ecosistema (SONCIM et al., 2000).

Entre los materiales que pueden ser reaprovechados en las estructuras (base, subbase o subrasante) del pavimento de una forma amigable con el ambiente, se encuentran los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) (KERNI; KUMAR; JAN, 2015).

El uso de RCD genera resultados positivos tanto en lo ambiental, técnico y económico. Del punto de vista ambiental el reaprovechamiento de los residuos permitirá una gestión adecuada de los mismos, evitando que los agregados sean depositados de forma irregular en afluentes hídricos generando problemas en la salud y degradando el ambiente (JOHN; AGOPYAN, 2000 apud CORREIA, 2014). En el ámbito técnico, el RCD ya ha sido utilizado en varios trabajos en Brasil en pavimentación, los cuales cumplieron con el comportamiento mecánico requerido, algunas de las investigaciones realizadas son de: Motta (2005), Vedroni y Carvalho (2008), Palacio (2014) y Araujo y Sales (2018). En la parte económica y sustentable, el uso de RCD disminuiría la exploración de nuevos depósitos naturales (CORREIA, 2014).

En el local de estudio, Foz do Iguaçu -PR, algunas de sus regiones cuentan con suelos limo arcillosos con baja capacidad de soporte, los mismos requieren de estabilización para ser utilizado como subrasantes de pavimentos. Por otra parte, según datos de la municipalidad, solo en el año 2018 se registró una producción de 209287,69 t de residuos inertes, de los cuales aproximadamente el 80% son residuos de construcción y demolición (RCD); los cuales en la actualidad no están siendo reaprovechados. Los residuos de concreto son parte de los RCD, y pueden contener compuestos de cemento

residuales, que contribuyen a la estabilización química y mecánica del suelo.

En el contexto del presente trabajo, se propone una solución sustentable para la destinación de los residuos de concretos, reaprovechándolos en el mejoramiento de la subrasante de pavimentos. Para tal finalidad fue realizado el beneficiamiento de estos materiales obteniendo el RCD-C fino (residuo de la construcción y demolición de concreto fino), con partículas menores a 2mm, variando los porcentajes en peso de RCD-C fino, en 0, 20, 40 y 60% con relación a la masa total de la mezcla.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de este trabajo consiste en el estudio del uso de mezclas de suelo y RCD-C fino a través del análisis de ISC, para mejorar la capacidad de soporte en subrasantes de pavimentos en Foz do Iguaçu.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcanzar el objetivo general del presente trabajo, son presentados los siguientes objetivos específicos:

- Realizar el proceso de beneficiamiento para obtener el producto de RCD-C fino;
- Analizar la composición mineralógica de RCD-C compatible con materiales cementosos;
- Variar y caracterizar los porcentajes en peso de RCD-C fino, en 0, 20, 40 y 60% con relación a la masa total de la mezcla; y
- Determinar el porcentaje óptimo de RCD-C para alcanzar la mayor masa específica aparente seca, la menor expansión y mayor CBR.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo es presentado una visión general del Residuo de Construcción y Demolición (RCD), buscando contextualizar el reaprovechamiento del RCD en pavimentos en Brasil, foco de este trabajo, también serán revisados algunos trabajos recientes sobre el reaprovechamiento de este residuo en el área de la construcción.

3.1 PANORAMA GENERAL DEL RCD EN BRASIL Y LOCAL DE ESTUDIO

Existe discrepancia en la literatura cuanto a la definición de Residuos de Construcción Civil y Demolición (RCD) debido a su composición y variabilidad (ANGULO, 2000), por consiguiente, será adoptada la definición establecida por el Consejo Nacional de Medio Ambiente (CONAMA) en el año 2015, a través de la Resolución N.º 469, la misma que establece que los RCD (SANTOS, 2007):

[...] son provenientes de construcciones, restauraciones, reparos de obras de construcción civil, así como, los agregados resultantes de preparación y excavación de terreno como: ladrillos, bloques cerámicos, concreto en general, suelos, rocas, metales, resinas, pegamento, pinturas, madera, forro, argamasa, yeso, techo, pavimentos asfálticos, vidrios, plásticos, tubos, etc.

De la misma manera, los RCD pueden ser clasificados de acuerdo a su peligrosidad por la NBR 10004: Residuos Sólidos (ABNT, 2004e) o en lo que respecta a la disponibilidad de reciclaje por la Resolución N.º 469 (CONAMA, 2015). A continuación, serán presentadas las peculiaridades de cada clase.

La NBR 10004 (ABNT, 2004e) clasifica a los residuos en dos grupos: I- Peligrosos y II-No peligrosos. Los residuos clase I-Peligrosos, son aquellos que pueden ocasionar riesgo a la salud pública o al medio ambiente al presentar alguna de las siguientes características: inflamabilidad, corrosividad, reactividad y patogenicidad. Mientras los residuos clase II- No peligrosos, son aquellos que pueden ser reaprovechados al no ocasionar un riesgo en el ambiente y la sociedad, esta clase se divide en dos tipos: II A-No inertes y II B-Inertes. Los residuos clase II A-No inertes presentan propiedades como: solubilidad en agua, combustibilidad o biodegradabilidad. Los residuos clase II B- Inertes son aquellos que al tener contacto con agua destilada o desionizada en temperatura ambiente no presentan ninguno de sus constituyentes solubilizados a los padrones de la potabilidad del agua a excepción del color, turbidez, dureza y sabor.

Por otra parte, el CONAMA (2015) clasifica a los residuos en cuatro clases: A, B, C y D. En la clase A, se encuentran los residuos que pueden ser reutilizados o reciclados para la producción de agregados, esta categoría engloba materiales

provenientes de: construcción, fabricación, demolición, reparación o restauraciones de obras de infraestructura o pavimentos. En la clase B, se localizan los materiales que pueden ser reutilizados para otras destinaciones, de los cuales hacen parte plástico, papel, metales, vidrios, maderas, embalajes, pintura y yeso. Las clases C y D no pueden ser reaprovechados, en el caso de la clase C no fueron desarrolladas tecnologías para ser reutilizadas o son inviables económicamente, mientras, la clase D engloba residuos peligrosos, contaminados y perjudiciales para la salud (CONAMA, 2015).

Por lo anteriormente mencionado los RCD de acuerdo a la ABNT y CONAMA pertenecen a la clase II B-inertes y clase A, respectivamente.

3.1.1 Aspectos históricos

Desde el Imperio Romano y Grecia antigua fue practicado el reaprovechamiento de residuos para el uso de la construcción, por ejemplo, eran usados restos de tejas, ladrillos y utensilios de cerámica como parte gruesa del concreto (SANTOS, 1975 apud LIMA, 1999). Sin embargo, fueron las grandes catástrofes como el terremoto de 1980 en El Asnam en Argel, o la Segunda Guerra que impulsaron la investigación internacional para el reaprovechamiento en locales con grandes volúmenes de residuos (PAUW, C.; LAURITZEN, 1994). En Brasil el reciclaje de los residuos de construcción y demolición comenzó en los años 80 a través de la utilización de pequeños molinos instalados durante la construcción de edificaciones, en este sitio los residuos de albañilería eran reutilizados en la producción de argamasas (LIMA, 1999).

La primera usina recicladora del Brasil fue instalada en el municipio de Itatinga del estado de São Paulo, con el objetivo de reaprovechar los residuos en la subrasante de los pavimentos. Sin embargo, la usina estuvo desactivada por varios años volviendo a operar en el barrio Itaquera (SCHNEIDER, 2003). En la década de los 90 varias usinas fueran implementadas en municipios brasileiros, siendo gerenciadas por las prefecturas o por establecimientos particulares (MOTTA, 2005). Actualmente Brasil genera 84 millones de metros cúbicos de residuo de construcción y demolición por año. En el año 2015 había 310 usinas de reciclaje entre empresas de pequeño, mediano y grande porte. Estas empresas reciclaron cerca de 17 millones de metros cúbicos de residuo, los residuos sobrantes fueron destinados a aterros sanitarios u otra destinación (ABRECON, 2015).

De acuerdo a la Asociación de Normas Técnicas (ABNT, 2004a) existen cuatro normas relacionadas a los residuos de construcción, las mismas que abordan desde la instalación de recibimiento del material hasta su utilización en el preparo de concreto sin

función estructural o en pavimentación, a continuación, son presentadas estas normas (MOTTA, 2005)

- NBR 15113 (ABNT, 2004f)- Residuos sólidos de la construcción civil y residuos inertes- Aterros- Directrices para proyecto, implantación y operación;
- NBR 15114 (ABNT, 2004g)- Residuos sólidos de la construcción civil y residuos inertes- Área de reciclaje- Directrices para proyecto, implantación y operación;
- NBR 15115 (ABNT, 2004h)- Agregados reciclados de residuos sólidos de la construcción civil- Ejecución de capas de pavimentación- Procedimientos;
- NBR 15116 (ABNT, 2004i)- Agregados reciclados de residuos sólidos de la construcción civil- Utilización en pavimentación y preparo de concreto sin función estructural' Requisitos.

3.1.2 Producción y gestión de RCD

La industria de construcción civil (ICC) es responsable por una parte significativa del Producto Interno Bruto (PIB) de Brasil, al representar el 6.2% del PIB del mismo. Esta rama de la industria puede ser considerada como establecimiento al incluir en sus bienes empresas y filiales; bajo estos parámetros la ICC representa el 34% total de la industria nacional (FIGUERÊDO, 2017).

A pesar de su importancia en el mercado la ICC continúa realizando algunos de sus procesos de manera ineficiente: durante la concepción, construcción, manutención y demolición (SOUZA *et al.* 2004; SANTOS, 2007; SOUZA *et al.*, 1999). En la primera fase, concepción, el proyectista puede generar una obra muy acentuada con un trazo de argamasa inadecuado. En la fase de la construcción existen problemas tales como: materiales de baja resistencia que están sujetos a ser quebrados más fácilmente, el transporte inadecuado de materiales que generan desperdicio en la obra y falta de control tecnológico (SOUZA *et al.*, 1999). Por otro lado, la manutención de la construcción está asociada a inconvenientes como, por ejemplo: patologías, reformas o modernización de la construcción o en partes del mismo, componentes que acabaron su vida útil. Finalmente la etapa de demolición depende de la vida útil a la que fue proyectada la construcción, la tecnología y calidad de los materiales, así como, el método utilizado para este proceso el cual permitirá reaprovechar los componentes (JOHN; AGOPYAN, 2000).

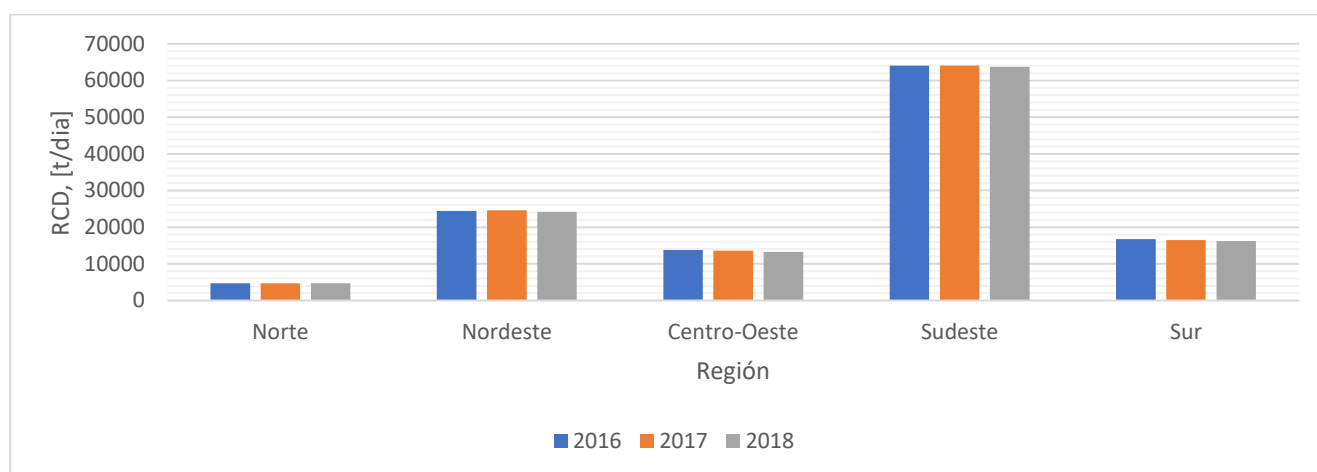
Los residuos generados por esta industria son heterogéneos debido: a la falta de disciplina en la descarga; amplia variedad de contratistas; elevado costo en la

separación de los materiales; áreas insuficientes para la descarga de desechos; materiales variados en las construcciones típicas, tales como cerámica, bloques de hormigón, hormigón armado, acero, plástico, fibrocemento, madera y yeso (ANGULO; MIRANDA; JOHN, 2002).

Con el objetivo de determinar la composición de los agregados del RCD debido a su variedad la NBR 15116 (ABNT, 2004i) sugiere separar los fragmentos en cuatro grupos: pasta de cemento, roca, cerámica y no minerales de naturaleza orgánica; los mismos que deben presentar más del 50% de su volumen en masa.

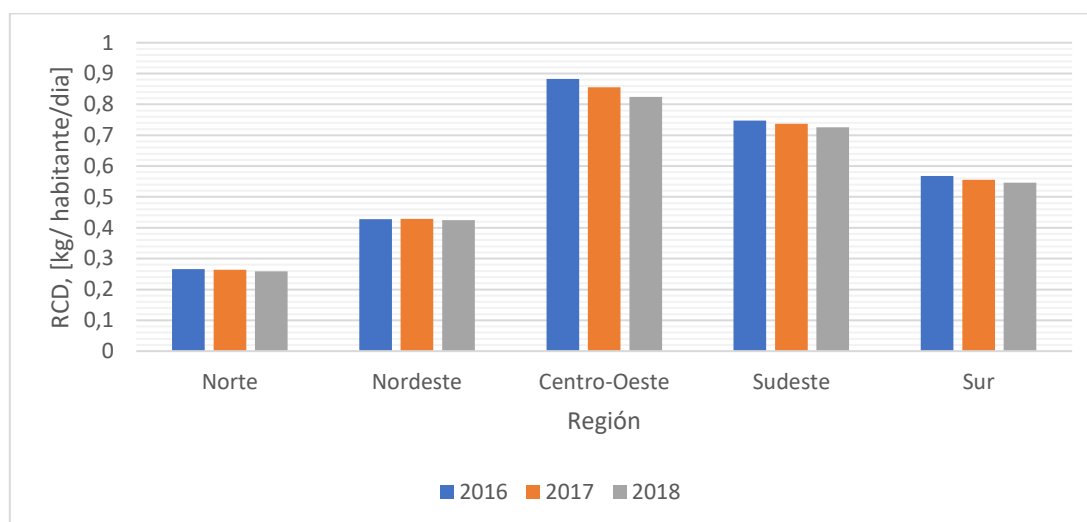
En consecuencia, la Asociación de Empresas de Limpieza Pública y Residuos Especiales (ABRELPE), realizó un levantamiento de las colectas de RCD por cada municipio en Brasil en los años 2016, 2017 y 2018, sin embargo, estos datos solo representan los residuos que fueron abandonados en vías y lugares públicos. La cantidad total de RCD recolectada por este establecimiento en los años mencionados respectivamente son: 123735 t/día, 123421 t/día y 122012 t/día (ABRELPE, 2019; ABRELPE, 2018). La cantidad recolectada en las cinco regiones del país se ilustra en la figura 1, en esta representación se diferencia la producción de RCD en el sudeste, región que engloba cuatro estados financieros de Brasil: Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais y Espírito Santo.

Figura 1- Recolección de RCD en Brasil por región.



Fuente: ABRELPE, 2017; 2018.

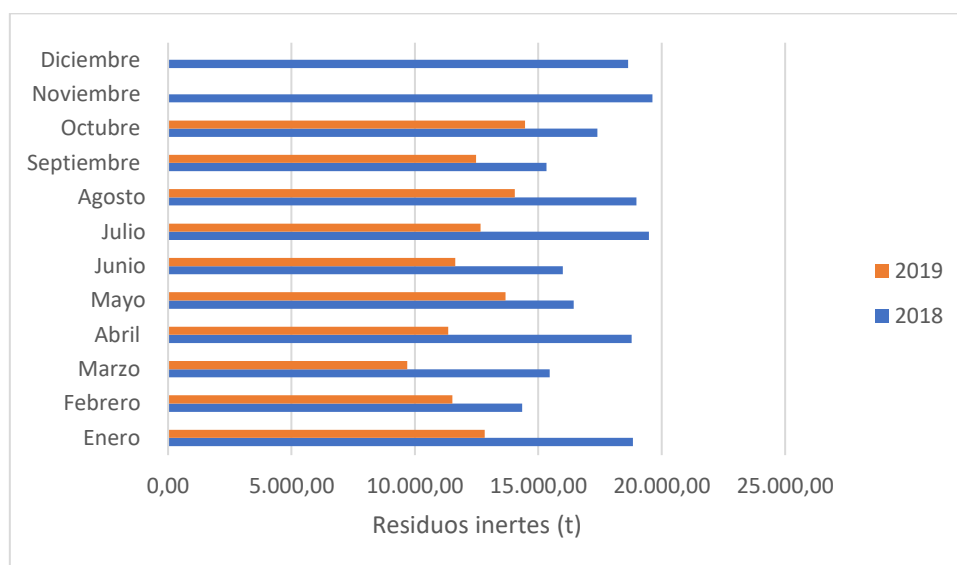
De la misma manera la ABRELPE calculó los índices *per capita* de la cantidad total de RCD colectados por los municipios en Brasil en estos tres años. En la figura 2 se ilustran los índices calculados en este intervalo de tiempo, siendo que en el centro oeste se colecta la mayor cantidad de material con respecto a sus habitantes.

Figura 2- Índice *per capita* de RCD de Brasil por regiones.

Fuente: ABRELPE, 2017; 2018.

Los residuos que no son recolectados por la ABRELPE en grande cantidad son descartados de forma ilegal al ser trasladados a lugares que generan degradación urbana como por ejemplo vías, riachuelos, terrenos baldíos, áreas de manantiales, entre otros (MOTTA, 2005). El descarte incorrecto de los mismo ocasiona impactos en la salud de la población al ser foco de proliferación de transmisores de enfermedades (SCHNEIDER, 2003), contaminación visual (ARAÚJO; SALES, 2018), así como sedimentación en los recursos hídricos obstruyendo los sistemas de drenaje ocasionando inundaciones en períodos lluviosos (SCHNEIDER, 2003).

De acuerdo a la entrevista cedida por el responsable del aterro sanitario, en la región de estudio, Foz do Iguaçu-PR, los residuos son trasladados al aterro sanitario, donde son separados en dos grupos: residuos domésticos e inertes (poda de árboles, muebles de madera, primera capa de espesura vegetal del movimiento de tierras, entre otros) (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, 2019). Los residuos inertes deben ser identificados al llegar al aterro con las siguientes informaciones: peso, tipo, empresa responsable, día de entrada y salida. Los mismos que serán separados en residuos de la industria de construcción civil y otros inertes; un porcentaje de los residuos de construcción civil es utilizado en la capa superficial de las vías y accesos del aterro, mientras, los residuos inertes restantes son enterrados en áreas de transbordo temporario. Aproximadamente el 80% de los residuos inertes del aterro pertenecen al área de la construcción civil, a continuación, en la figura 3 se presenta los residuos recolectados en el 2018 y 2019.

Figura 3- Resíduos inertes en Foz do Iguaçu.

Fuente: SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE, 2019.

3.1.3 Utilización de RCD

Como fue mencionado anteriormente, desde el final de la década de los 80 en Brasil existen experiencias de uso de agregados reciclados en la producción de pavimentación y argamasas, sin embargo, la documentación técnica de los procesos de reaprovechamiento realizado en los 80 no está disponible públicamente. De acuerdo a John; Agopyan (2000) los residuos han sido utilizados en pavimentación como agregados mixtos tales como suelo, concreto, argamasas, cerámica blanca y roja; mientras que los residuos de argamasas en obra han sido utilizados para la producción de nueva argamasa. Con el avance de las investigaciones el RCD ha podido ser reaprovechado como agregado: como ladrillos, bloques prefabricados (bordillos, veredas) y capas de pavimentos (base, subbase y subrasante) (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

En Foz do Iguaçu se han iniciado las investigaciones de reaprovechamiento de RCD, con los siguientes trabajos: Evaluación experimental de la barrera capilar con RCD como capa de bloqueo para coberturas finales de ARSU (OLIVEIRA, 2019) y Evaluación del potencial de captura de CO₂ de concretos con residuos de construcción de demolición debido a la carbonatación (RIGO, 2019).

3.2 PAVIMENTO

El pavimento puede ser definido como el conjunto de varias capas de espesura finita, cuyas capas son superpuestas y construidas con materiales seleccionados (DNIT, 2006; MONTEJO FONSECA, 2002). El pavimento resiste a los esfuerzos provenientes del tráfico de vehículos y factores medio ambientales, con la finalidad de

generar comodidad al usuario durante su vida útil (BERNUCCI et al., 2006; MONTEJO FONSECA, 2002; RICO; DEL CASTILLO, 1977).

El pavimento debe cumplir las siguientes funciones: generar superficie de rodamiento uniforme de color y textura apropiada, resistencia a las cargas dinámicas impuestas y agentes ambientales, presentar condiciones de drenaje adecuado, el ruido de rodadura debe ser adecuadamente moderado (BERNUCCI et al., 2006; MONTEJO FONSECA, 2002; RICO; DEL CASTILLO, 1977).

3.2.1 Clasificación del pavimento

Los pavimentos pueden ser clasificados en: flexibles, rígidos y semirrígidos (DNIT, 2006). El primer tipo de pavimento, flexible, es compuesto desde la superficie hasta el suelo por las siguientes capas: revestimiento asfáltico, base, subbase, refuerzo de la subrasante y subrasante (BERNUCCI et al., 2006); todas las capas mencionadas anteriormente soportan las cargas aplicadas de manera equivalente (DNIT, 2006). El segundo tipo, rígido, es compuesto por un revestimiento de concreto de cemento Portland, descargada sobre la capa de subbase, apoyada sobre un refuerzo de la subrasante cuando fuera necesario (BERNUCCI et al., 2006); el revestimiento absorbe la mayoría de tensiones generadas por el cargamento aplicado al tener mayor rigidez que las capas inferiores (DNIT, 2006). Finalmente, los pavimentos semirrígidos se caracteriza por las siguientes capas desde la superficie hasta el suelo: revestimiento asfáltico, base cimentada, subbase granular, refuerzo de la subrasante y subrasante (PAIXÃO; CORDEIRO; CORREIA, 2017 apud DER-PR 2008); la diferencia con los pavimentos flexibles es la presencia de ligantes hidráulicos en la capa de base con el objetivo de tener una base más rígida (PAIXÃO; CORDEIRO; CORREIA, 2017).

3.2.2 Partes del pavimento

La subrasante es definida como una capa de material natural, compactada y regularizada del pavimento (BALBO, 2011). El parámetro principal de la subrasante es la capacidad de soporte o la resistencia a la deformación por esfuerzo cortante a través de las cargas. De la capacidad de soporte depende el tipo de refuerzo de la subrasante y el espesor de las capas superiores. Las características de resistencia y variaciones de volumen (hinchamiento o retracción) del suelo pueden generar daños en las estructuras (MONTEJO FONSECA, 2002).

La capa de subbase es construida cuando por condiciones técnicas e/o económicas no fuera posible la construcción de la base sobre la subrasante, con la

característica de mejor calidad drenante que la subrasante (SENÇO, 2001; SILVA, 2008). Los materiales que pueden ser utilizados para estabilizar esta capa son: suelo-cal, suelo-cemento, suelo-betún o gravas (DNIT, 2006; SILVA et al., 2018).

La base tiene la función de soporte estructural, generando rigidez y resistencia a la estructura. Esta capa es constituida normalmente por una espesura de 20cm britado de granulometría extensa (SILVA et al., 2018).

La carpeta asfáltica tiene como finalidad resistir las fuerzas abrasivas del tráfico. En esta capa se deben realizar un adecuado control tecnológico al ser la capa más noble del pavimento (SENÇO, 2001; BERNUCCI et al., 2008). El tipo de revestimiento asfáltico depende del tipo de tráfico: pesado o leve. Para tráfico pesado son usados materiales como Concreto Betuminoso mezclado en caliente (CBUQ), *Stone Mastique Asphalt* (SMA) y para tráfico leve los premezcladas en caliente que no atienden los parámetros de granulometría de capa intermediaria o de nivelación (PMQ) (BERNUCCI et al., 2006; MARQUES, 2014; SILVA et al., 2018).

3.2.3 Subrasante

Para el diseño del pavimento se consideran cuatro características importantes: el tránsito, la subrasante, el clima y los materiales disponibles. En el primer parámetro, tránsito, es necesario conocer la carga más pesada por eje que va a trasladarse en el carril solicitado, así como, la repetición de las cargas para el análisis de las deformaciones y las velocidades de operación de los vehículos. En el análisis del segundo parámetro, subrasante, es necesario determinar la sensibilidad del suelo a la humedad para analizar el parámetro de expansibilidad al ser un parámetro que puede ocasionar graves daños en las estructuras que se encuentren encima del mismo. Mientras en la tercera característica, clima, es importante conocer las alteraciones climáticas de la zona de proyecto, para evitar que los cambios en el clima ocasionen esfuerzos elevados que pueden ocasionar deformaciones o agrietamientos que afectaran a la calidad del pavimento. Finalmente, en la cuarta característica, materiales, es necesario analizar la disponibilidad de los agregados en el agrados que satisfagan los parámetros técnicos (MONTEJO FONSECA, 2002).

De los factores anteriores en esta investigación será analizada la problemática planteada en la subrasante, al tener suelos limo-arcillosos o arcillosos en la zona de estudio de la ciudad de Foz do Iguaçu, que conlleva a problemas, al tener baja capacidad de soporte (RAMOS, 2014).

Cuando las características del material a analizarse no cumplen con los parámetros establecidos el ingeniero tiene las siguientes opciones: aceptar el material considerando las restricciones de diseño debido a su calidad, sustituir el material por otro con características adecuadas o reforzar las propiedades del material existente para cumplir con los requisitos establecidos por la institución responsable (MONTEJO FONSECA, 2002).

De acuerdo a la DNIT (2006) los parámetros analizados para la subrasante son: expansión y CBR, para aceptar el suelo del proyecto como subrasante la expansión tiene que ser inferior o igual a 2% y un CBR superior o igual a 2%. En caso de no verificar, se debe realizar un refuerzo de la subrasante, el suelo reforzado debe presentar CBR mayor que el de la subrasante, así como, una expansión menor o igual a 1%. En el caso de refuerzo con agregados reciclados para la subrasante, la expansión tiene que ser menor o igual a 1% y un CBR mayor o igual a 12% (ABNT, 2004h).

3.2.4 Uso de RCD en la pavimentación

La construcción de pavimentos en suelos con baja capacidad de soporte o contracción por hinchamiento cuando está en contacto con el agua, ha resultado en un elevado costo de construcción y fracturas en la capa superficial del mismo (KERNI; SONTHWAL; JAN, 2015). Por el motivo mencionado, los ingenieros en carreteras están en la procura constante de métodos y técnicas de ingeniería nuevas e innovadoras que permitan disminuir el uso de recurso naturales y estabilizar el suelo, es decir técnicas que permitan proteger el medio ambiente e incrementar la capacidad de soporte del suelo y su durabilidad (LOVEDEEP, E.; SHAHBAZ, E.; GILL, 2017).

La estabilización de suelos puede ser definida como el mejoramiento de las propiedades físicas del mismo, a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Las estabilizaciones típicas para un suelo pobre son: suelo-cemento, suelo-cal, suelo-asfalto, entre otros (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2013 apud RAMOS, 2014). La tendencia de usar materiales alternativos, está siendo utilizada al tener una cantidad excesiva de residuos como: caucho, cenizas volantes, cenizas de madera, cáscara de arroz, residuos de la construcción, entre otros (KERNI; SONTHWAL; JAN, 2015).

En Brasil, se han desarrollado investigaciones con residuos de construcción y demolición, presentados a continuación:

- Motta (2005) realizó un estudio laboratorio de los aspectos físicos y del comportamiento mecánico del agregado de RCD para aplicación en

pavimentación de bajo volumen de tráfico en São Paulo. La particularidad más importante en esta investigación, es la demostración de actividad puzolánica de 130mg de CaO, que a pesar de estar abajo del límite (330mg) permitido por el Método de Chapelle Modificado, se cree que contribuyó a la resistencia del pavimento;

- Vedroni y Carvalho (2008) analizaron la utilización de RCD para cerramiento de zanjas en Piracicaba, así como, emplear RCD con cemento como materia prima para la reparación de calles y vías en la misma ciudad;
- Palacio (2014) analizó el comportamiento mecánico del suelo al agregar 15% de RCD, en las tres energías de compactación: normal, intermedia y modificada. La mezcla entre suelo y RCD, incrementó la capacidad de soporte del suelo en las tres energías de compactación, a continuación, serán presentados los valores de CBR para el suelo y suelo con RCD para la energía normal, intermedia y modificada: 3,97 a 36,57%, 7,04 a 47,81% y 14,52 a 54,00%; y
- Araujo y Sales (2018) realizaron ensayos laborales para encontrar el porcentaje de RCD, que proporcione una mejor capacidad de soporte en la capa de base, las proporciones analizadas son: 20, 30 y 40% de RCD. La proporción más adecuada fue de 30% de RCD al obtener un CBR 33,5%, sin embargo, el valor encontrado no cumple con las especificaciones de la DNIT (CBR > 80% siendo aceptado 60%), por lo que la mezcla analizada puede ser utilizada como subbase.

De la misma manera, existen investigaciones sobre el reaprovechamiento de residuos de concreto provenientes de demoliciones, utilizando las partículas finas del material. A continuación, son citados tres análisis:

- Kerni, Sonthwal y Jan (2015) utilizaron residuos menores a 1,18mm para estabilizar el suelo arcilloso de la subrasante. El tamaño de las partículas seleccionado tuvo la cantidad suficiente de cemento y arena, para alterar la gradación del suelo, mejorar la densidad de empaque de la masa del suelo y la capacidad de soporte del mismo, sin embargo, la última alteración pudo ser ocasionada al existir químicos que reaccionaron al mezclar con el suelo en las partículas de residuo de hormigón (cemento);
- Paul y Cyrus (2016) analizaron la estabilización del suelo con residuos de concreto menores a 20 mm, en diferentes proporciones de materiales

cementosos: 0, 10, 20, 30, 40, 50 y 60%. Con base en los resultados, que el 40% de residuo es el porcentaje óptimo para la estabilización, al pasar de 3,5% de CBR del suelo a 11,2% del suelo con residuos de concreto; y

- Lovedeep, Shahbaz y Gill (2017) compararon el efecto de residuos de hormigón menores a 1,76mm en el valor del CBR con los siguientes porcentajes de residuo: 10, 20, 30 y 40%, de los cuales se consiguió mayor incremento en el CBR con el 40% de residuo, al incrementar este parámetro de 6,56% (suelo) a 29,19% (suelo con residuos de concreto).

De acuerdo al análisis realizado por Kerni, Sonthwal y Jan (2015) el residuo de concreto contiene cemento y arena en cantidad suficiente para alterar la graduación del suelo, mejorando la densidad de compactación de la masa del suelo, además de reacciones químicas por la presencia de granos de cemento remanecientes.

El cemento tiene influencia en la resistencia del concreto, el mismo que está compuesto por materias primas, tales como, calcáreos, sílice, alúmina y óxido de hierro, los mismos que al contacto con el agua tienen la propiedad de reaccionar y endurecerse, de los cuales cuatro compuestos son considerados como los principales constituyentes mostrado en la tabla 1.

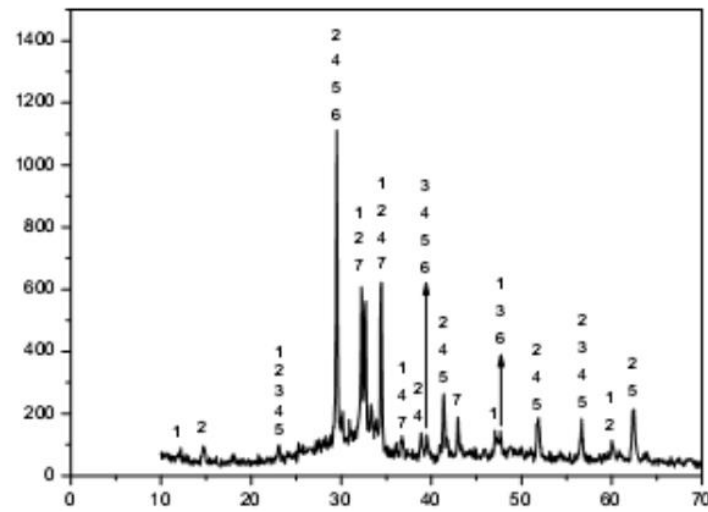
Tabla 1- Principales compuestos del cemento.

Nombre del compuesto	Fórmula química	Formulación cementera o abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferrito aluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fuente: Adaptado de NEVILLE, 2016.

Una técnica para determinar la estructura atómica y molecular de un cristal de cemento es la difracción de rayos x (DRX), cuya técnica analiza la incidencia de radiación de una muestra y la detección de los fotones difractados (GOBBO, 2009). En la figura 4, se representa el diagrama de rayos X del cemento Portland CPIII-40RS, en el mismo que se representan los compuestos del cemento como indicados a continuación: 1- Celita (C_4AF); 2- Alita (C_3S); 3- Carbonato de calcio; 4- Belita (C_2S); 5- Aluminato tricálcico (C_3A); 6- Óxido de calcio; y 7- Gipsita (CaSO_4) (AMARAL, 2016).

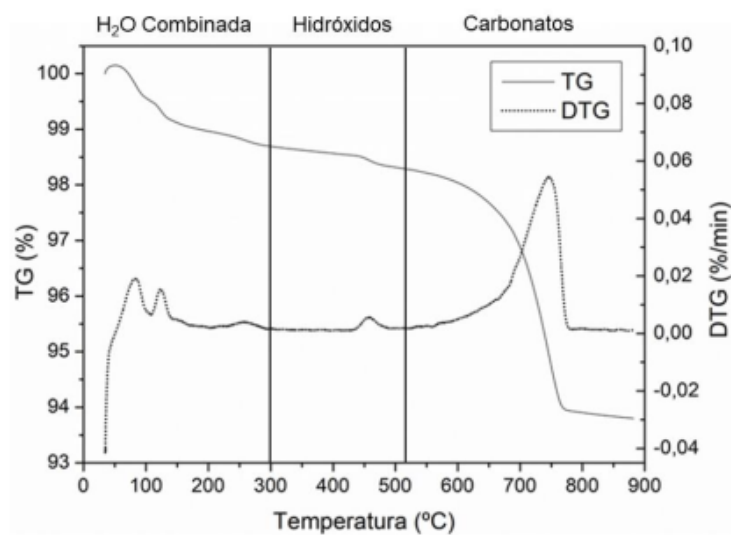
Figura 4- Difracción de rayos X del cemento Portland CPIII-40RS.



Fuente: AMARAL, 2016.

Del mismo modo, el análisis termogravimétrico (TG) y la termogravimetría derivada (DTG), analizan la estabilidad térmica del material y su fracción de compuestos volátiles, es decir la pérdida de masa con el aumento de la temperatura (RIGO, 2019). En la figura 5, se presenta un ejemplo de la curva de análisis de TG y DTG, para cemento CP VARI.

Figura 5- Análisis de TG y DTG del cemento CP VARI

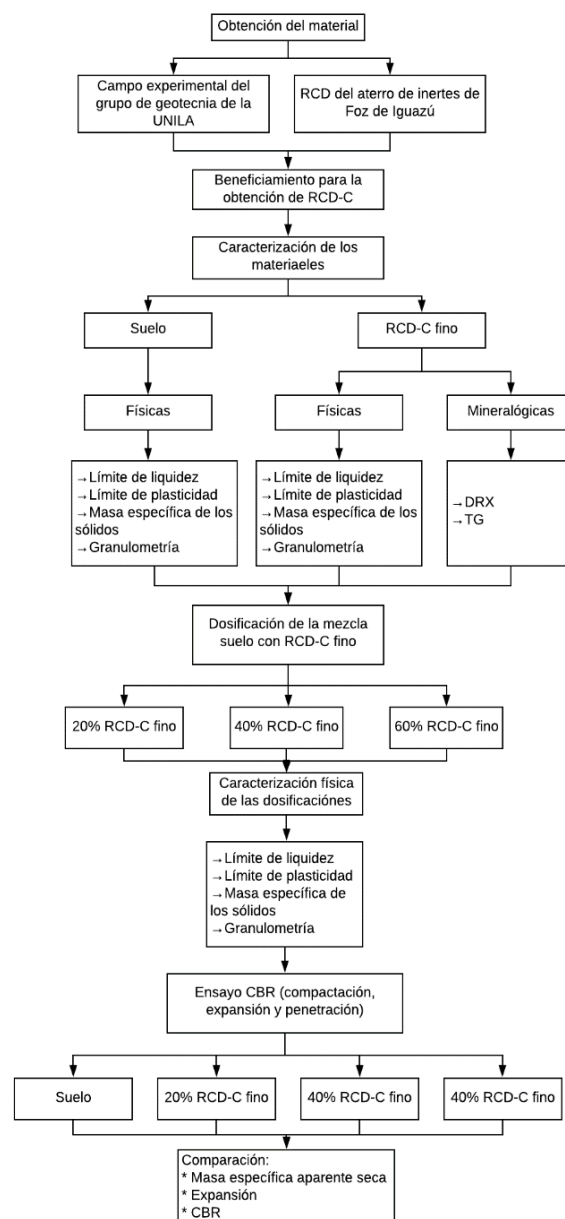


Fuente: RIGO, 2019.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología tiene carácter experimental y ha sido dividida en siete etapas: i) Obtención del material; ii) Beneficiamiento para la obtención de RCD-C fino; iii) Caracterización de los materiales; iv) Dosificación entre suelo con RCD-C fino; v) Caracterización física de las mezclas; vi) Ejecución del ensayo CBR (compactación, expansión y penetración); vii) Comparación de los parámetros ejecutados en el ítem (v). El diagrama de flujo se muestra en la figura 6.

Figura 6- Diagrama de flujo de los procedimientos.



Fuente: Autora, 2019.

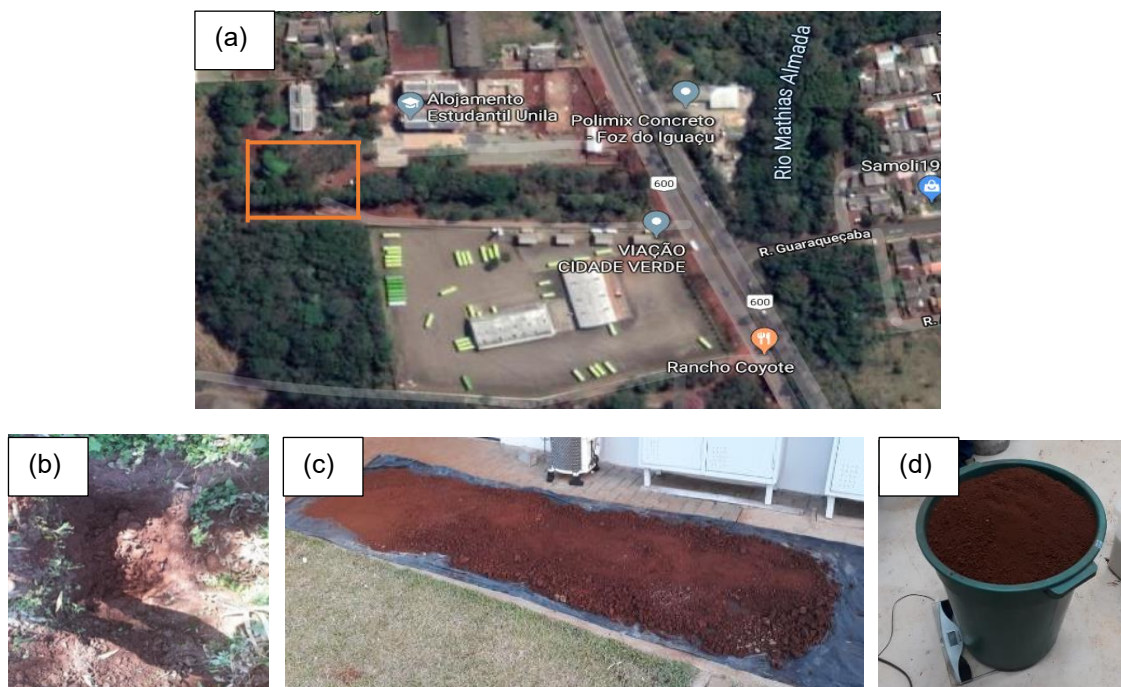
4.1 OBTENCIÓN DEL MATERIAL

4.1.1 Suelo

El suelo ha sido colectado del campo experimental del grupo de geotecnia de la UNILA, localizado en la Avenida Tancredo Neves – Región Norte (Fig. 7a), Foz do Iguaçu. La extracción del material fue realizada en una calicata de 80cm de profundidad (Fig. 7b), la retirada de las muestras fue únicamente deformada y de forma manual. Fueron usados sacos de tela para el transporte, y para el almacenamiento de las muestras fueron ubicadas en la cámara húmeda del Laboratorio de Geotecnia y Suelos (LAGEO) de la UNILA a una temperatura de 20 a 24°C.

La preparación de las muestras consistió en el proceso de disgregación de los terrones con ayuda de mazo de goma, la homogenización extendiéndolo en una manta plástica (Fig. 7c) y el tamizado por la malla #4 (4,76mm). La muestra preparada fue estocada en un cilindro plástico con tapa, con capacidad de 100 litros y almacenada en la cámara húmeda para su utilización en el transcurso de los ensayos (Fig. 7d). Estos procesos están ilustrados en la figura 7.

Figura 7 -Recolección del suelo.



Fuente: Autora, 2019.

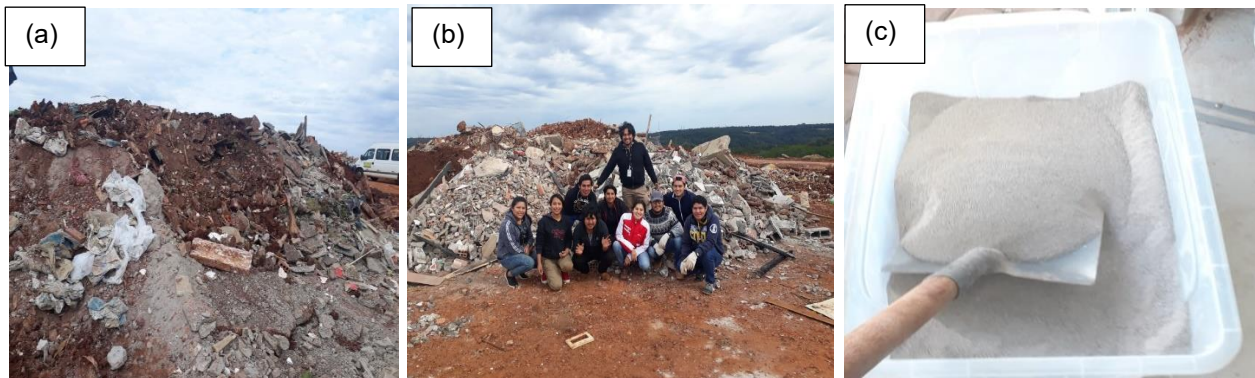
Nota: La imagen (a) ha sido retirada del Google Maps.

4.1.2 RCD de concreto

En este trabajo fueron recolectados residuos de construcción civil de clase A, de acuerdo con los criterios de la NBR 15113 (ABNT, 2004f), los mismos que fueron

obtenidos manualmente del aterro de inertes de Foz do Iguaçu (ARSU) (Fig. 8a), localizado en el barrio Porto Belo- Región Norte. En el ARSU el RCD se encuentra mezclado entre parte fina y gruesa, y en algunos locales está en contacto con el suelo; por ese motivo se recolectó material de puntos estratégicos que no tuvieran contacto con el suelo (Fig. 8b). En la colecta se dio preferencia a residuos de concreto con mayor porcentaje de parte gruesa y menor porcentaje de yeso. Todos estos materiales, fueron almacenados en sacos de tela y transportados al LAGEO para su almacenamiento y posterior beneficiamiento.

Figura 8- Recolección de RCD.



Fuente: Autora, 2019.

El proceso de beneficiamiento de RCD-C fue realizado en el Instituto Federal de Paraná (IFPR), en la Máquina de Abrasión los Ángeles por un período de 6 horas y tamizado por la malla # 10 correspondiente a una abertura de 2mm, el residuo fue almacenado en cilindros plásticos con tapa en la cámara húmeda, con temperatura de 20 a 24°C. En la figura 9 se presenta la maquinaria utilizada (Fig. 9a), el material triturado (Fig. 9b) y el almacenamiento del mismo (Fig. 9c).

Figura 9- Producción de RCD-C fino (partículas < 2mm).



Fuente: Autora, 2019.

4.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MINERALÓGICA

Los ensayos de caracterización física y mineralógica fueron realizados de acuerdo a la ABNT, ASTM y DNER, así como las recomendaciones sugeridas en la literatura. Los

ensayos del suelo permitieron clasificarlo de acuerdo a la NBR 6502 (ABNT, 1995), Asociación Norte-Americana de especialistas rodoviaros y de transporte (AASHTO) y por el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS). Mientras los ensayos de caracterización mineralógica del RCD-C fino y cemento, tales como: DRX y TG, nos permitieron analizar los minerales de cemento presente en el RCD-C fino, para entender la interacción entre suelo y el estabilizador RCD-C fino. En la tabla 2 se presenta un resumen de los ensayos realizados para el suelo, RCD-C fino, y mezclas, así como sus normativas.

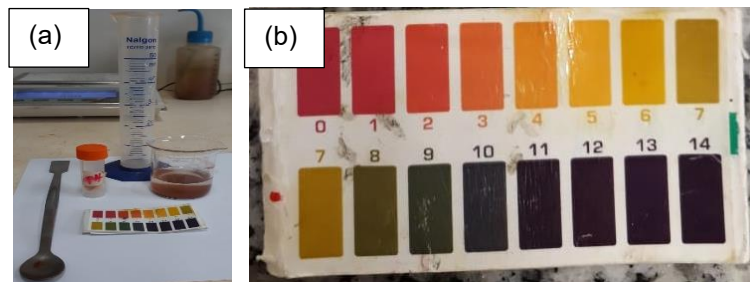
Tabla 2- Ensayos de laboratorio y normativa aplicada.

Ensayos	Norma/ Referencia	Material	
		Suelo	RCD-C fino
pH	Bowles, (1980)	x	x
Preparación para ensayos de compactación y ensayos de caracterización	NBR 6457 (ABNT, 2016a)	x	
Masa específica de los granos	NBR 6508 (ABNT, 1984)	x	x
Granulometría a láser	NBR 7181 (ABNT, 2018)	x	x
	ISO 13220 (ISO, 2009)	x	x
Límite líquido	NBR 6459 (ABNT, 2016b)	x	X
Límite de plasticidad	NBR 7180 (ABNT, 2016c)	x	x
Análisis termogravimétrico	ASTM E 2550 (ASTM, 2017)		x
Análisis de difracción de rayos-x (DRX)	Amaral, (2016)		x

Los ensayos mencionados fueron realizados de agosto a diciembre del 2019, en cuatro laboratorios, de los cuales los tres primeros son en el Parque Tecnológico ITAIPU (PTI) y el último en el Colegio Estadual Paulo Freire: Laboratorio de Mecánica de Suelos y Geotecnia (LAGEO); Laboratorio de Desempeño, Estructura y Materiales (LADEMA); Laboratorio de Difracción de Rayos X (LAB DRX); y Laboratorio de Suelo y Edificaciones (Colegio Estadual Paulo Freire).

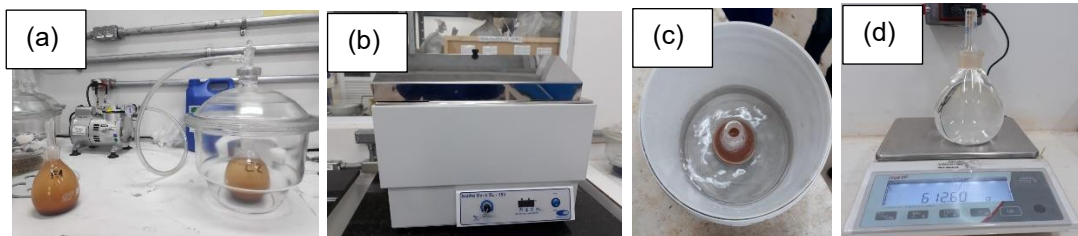
4.2.1 Ensayos físicos

Para los análisis del pH del suelo y RCD-C fino, fueron colocados 3 gramos de material y 30ml de agua desionizada, agitándose por 5 minutos, para posteriormente sumergir el papel de pH en la solución (sin que el mismo entre en contacto con la base del vaso de precipitación) por 15 segundos, retirando el papel y esperando por 5 minutos el color respectivo a su nivel de pH. En la figura 10a se presentan los materiales utilizados y en la Fig. 10b la tabla de tonalidades de colores y su respectivo pH.

Figura 10- Ensayo de pH.

Fuente: Autora, 2019.

Se preparó el material de acuerdo con la NBR 6457 (ABNT, 2016a) para realizar el ensayo de masa específica de los granos por el método del picnómetro con bomba de vacío como recomendado por la NBR 6508 (ABNT, 1984), sin embargo, fueron realizadas adecuaciones por la limitación de la bomba al tener una intensidad de 65 a 70kPa cuando la norma establece como mínimo 88kPa, tal como la adecuación de la bomba al desecador. En la figura 11, se presentan algunas etapas de este ensayo: extracción de los espacios vacíos por 15 minutos a través de la bomba de vacíos (Fig.11a), colocación en baño maría por 30 minutos a temperatura ambiente del laboratorio de 20 a 24°C (Fig.11b), reposo hasta que la temperatura del mismo se equilibre en el ambiente del laboratorio y peso del picnómetro con agua destilada y suelo en la misma temperatura (Fig.11c)gg.

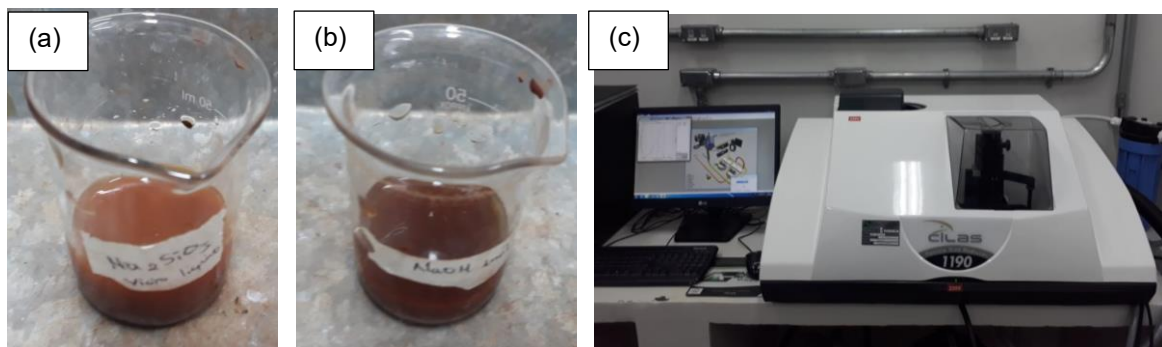
Figura 11- Ensayo de determinación de masa específica de los granos.

Fuente: Autora, 2019.

El ensayo de granulometría para las partículas finas menores a 2mm, fue realizado por el granulómetro a láser de marca CILAS, modelo 1190, bajo la normativa ISO 13220 (ISO, 2009), y para la preparación de la muestra fue sugerido las recomendaciones de la NBR 7181 (ABNT, 2018). La lectura de los granos por el granulómetro comprende de 0,04 a 2500 μm ; fueron analizados en líquido (agua desionizada); con la presencia de dispersante para suelo y suelo con RCD-C fino y sin dispersante para RCD-C fino; con índice de oscurecimiento de aproximadamente 25%. Fueron analizadas tres muestras, con el objetivo de tener mayor proximidad de los datos entre las repeticiones, según recomendaciones de RIGO (2019).

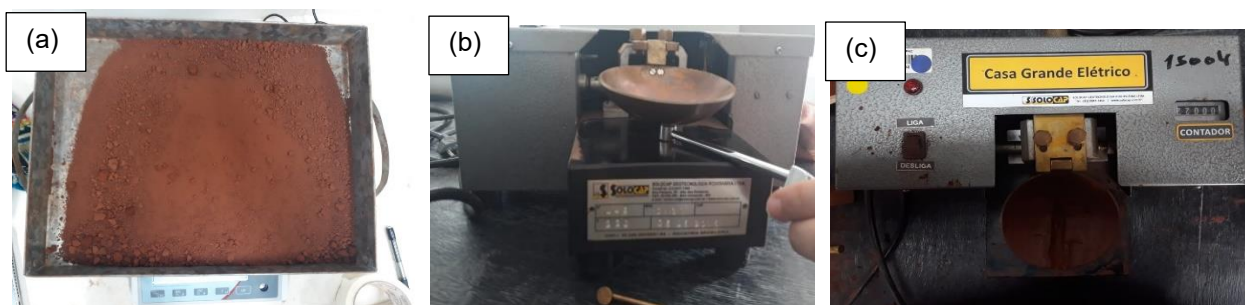
El tipo de dispersante a utilizarse dependerá del pH de la muestra, los cuales pueden ser: hexametáfosfato de sodio, vidrio líquido o hidróxido de sodio. El hexametáfosfato de sodio ($Na_6P_6O_{35}$) a una concentración de 45.7g/L tiene una mayor eficacia en suelos alcalinos (BOWLES, 1980). Para suelos ácidos Bowles (1980) recomienda el uso de silicato de sodio o vidrio líquido (Na_2SiO_3) con 1ml/L como agente dispersante, además se puede utilizar hidróxido de sodio ($NaOH$) con una concentración de 1mol/L (MAURI et al., 2011). La ASTM recomienda el uso de agua destilada o desmineralizada para la elaboración de la solución. El proceso de disolución del material con vidrio líquido (12a), con hidróxido de sodio (12b) y el equipamiento utilizado para el análisis (12c) se presenta en la figura 12.

Figura 12- Ensayo de granulometría por granulómetro a láser-CILAS.



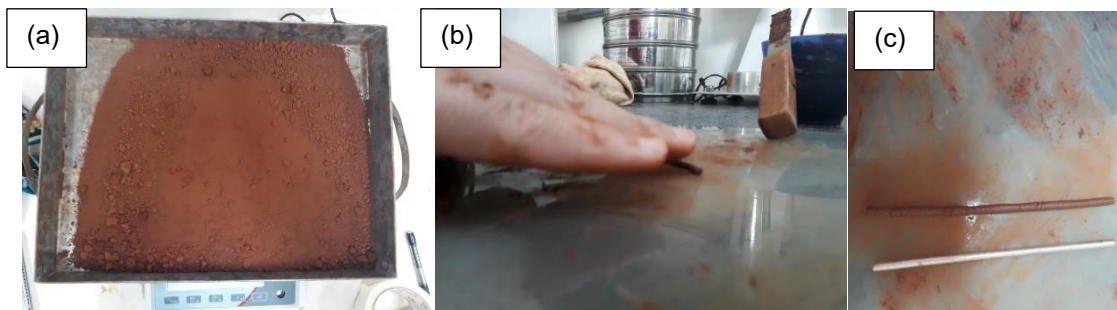
Fuente: Autora, 2019.

En relación al ensayo de límite líquido se adoptó el procedimiento establecido por la NBR 6459 (ABNT, 2016b), en el cual se preparó la muestra de acuerdo a la NBR 6457 (ABNT, 2016a) (Fig. 13a), tamizando la misma por una abertura de 0,42mm, colocando el material en una cápsula y adicionando agua gradualmente hasta homogenizar la pasta con la espátula y transferir la misma a la copa de Casagrande (Fig. 13b), contándose el número de golpes necesarios para cerrar el mismo, los golpes válidos fueron de 15 a 35, la humedad del material es medida en cada ensayo. El límite líquido se determinó interpolando los valores hasta encontrar una humedad correspondiente a 25 golpe. Algunas de las etapas de este proceso son mostradas en la figura 13.

Figura 13- Ensayo de límite líquido.

Fuente: Autora, 2019.

Por otro lado, el ensayo de límite de plasticidad fue desarrollado de acuerdo a la NBR 7180 (ABNT, 2016c), en el que la muestra fue preparada por las especificaciones de la NBR 6457 (ABNT, 2016a), cernida por el tamiz #40 (Fig. 14a), colocada en una cápsula de porcelana agregando agua destilada en pequeñas cantidades hasta obtener una pasta homogénea de consistencia plástica, y después se dio forma al material (circular), el mismo que fue rodado sobre la placa (Fig. 14b), hasta alcanzar una tira con 3mm de diámetro y 10 cm de longitud (Fig. 14c), se calculó el promedio de la humedad de los materiales que cumplen con los parámetros mencionados para sacar la humedad media de los mismos. Tales etapas son mostradas en la figura 14.

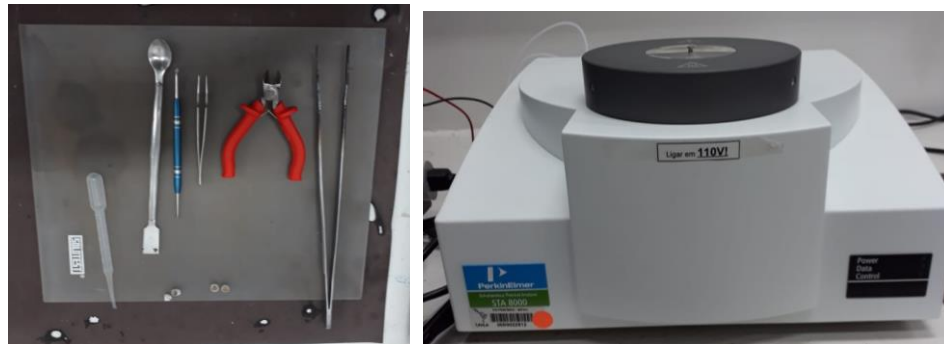
Figura 14- Ensayo de límite de plasticidad.

Fuente: Autora, 2019.

4.2.1 Ensayos para la caracterización mineralógica

El análisis termogravimétrico (TG) y la termogravimetría derivada (DTG) tienen cuantifica la pérdida de masa en diferentes temperaturas. El equipamiento utilizado para analizar las muestras es de marca Percking Elmer, modelo STA 8000, cuya temperatura varia de 15 a 1600 °C, el mismo se encuentra disponible en el LADEMA. Para la realización del ensayo el material fue triturado hasta ser inferior a 0,15mm, después fue dejado por 1 hora dentro del equipamiento a 35°C, con el objetivo de separar el agua libre de las muestras como sugerido por Scrivener, Snellings, Lothenbach (2016) apud Rigo (2019). En la figura 15, se muestra el equipamiento utilizado para realizar el ensayo de análisis termogravimétrico.

Figura 15- Análisis termogravimétrico.



Fuente: Autora, 2019.

El análisis de difracción de rayos x (DRX), fue realizado en el difractómetro Empryrean de propósito múltiple de la PANalytical (Fig. 16a). Para la realización de este ensayo el material fue triturado hasta ser inferior a 0,15mm, el mismo que fue colocado en la cápsula (Fig. 16b) y compactado (Fig. 16c), y finalmente fue colocado en el difractómetro por 45 minutos.

Figura 16- Análisis DRX



Fuente: Autora, 2019.

Las fases de los compuestos encontrados en el RCD-C fino serán comparadas con resultados en la bibliografía para el cemento, como el caso de los minerales del cemento con los resultados encontrados por Amaral (2016), y los otros minerales fueron comparados con datos espectrales del proyecto RRUFF (2019).

4.3 DOSIFICACIÓN ENTRE SUELO Y RCD-C FINO

Han sido realizadas tres variaciones de mezcla suelo con RCD-C fino, las mismas que fueron comparadas con una muestra de 100% suelo:

- En la primera muestra fue utilizado 20% RCD-C fino y 80% de suelo;
- En la segunda muestra fue utilizado 40% RCD-C fino y 60% de suelo; y
- En la tercera muestra fue utilizado 60% RCD-C fino y 40% de suelo.

Para la caracterización de cada variación entre suelo y RCD-C fino ha sido necesario 30 kilos de material seco compuesto, por lo que se calculó la proporción del peso

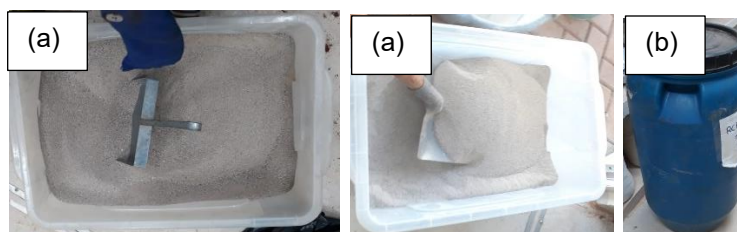
seco necesario. Para poder determinar la proporción del material seco, fue medida la humedad higroscópica del suelo y RCD-C fino, correspondiendo a una humedad de 8,5% y 2,2%, respectivamente. A partir de estos valores se calculó el peso húmedo de los materiales, los resultados encontrados se muestran en la tabla 3. Las mezclas fueron homogenizadas (Fig. 17a) y almacenadas en la cámara húmeda durante el transcurso de ejecución de los ensayos (Fig. 17b).

Tabla 3- Peso necesario para las tres variaciones suelo y RCD-C fino.

Peso necesario: 30kg		Peso seco		Peso húmedo	
RCD (%)	Suelo (%)	RCD (kg)	Suelo (kg)	RCD (kg)	Suelo (kg)
20	80	6,0	24,0	6,13	26,04
40	60	12,0	18,0	12,27	19,53
60	40	18,0	12,0	18,40	13,02

Fuente: Autora, 2019.

Figura 17- Dosificaciones entre suelo y RCD.

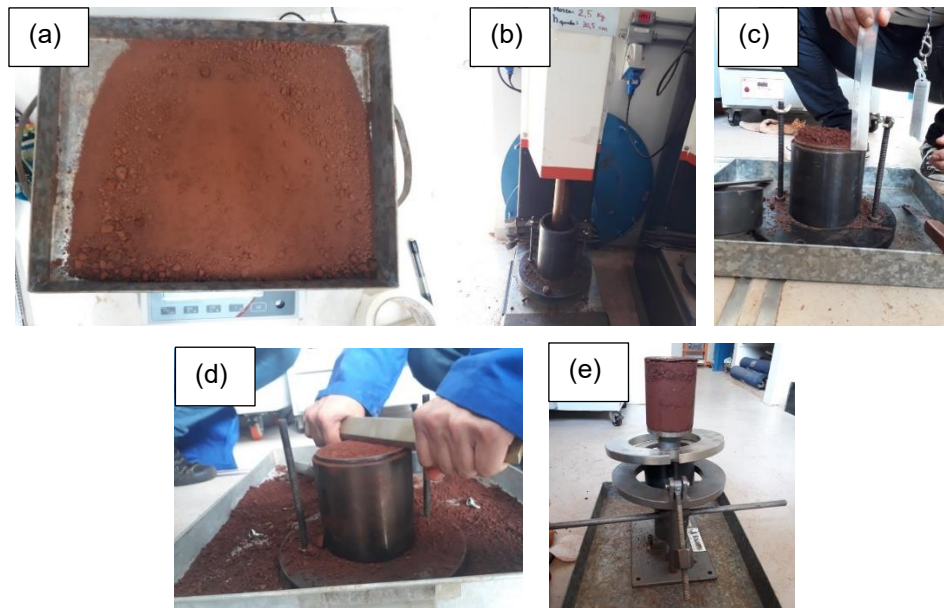


Fuente: Autora, 2019.

4.4 ENSAYO DE COMPACTACIÓN

Para el ensayo de compactación se adoptó la normativa NBR 7182 (ABNT, 2016), con el uso del soquete Proctor automático de la AMC, energía normal, con cilindro pequeño y reutilización del material; el tipo de energía utilizada es una recomendación de la DNER para capas de subrasante. Las etapas realizadas son: tamizado del suelo con una abertura de 4.8mm (Fig. 18a); humedecimiento y homogenización de la muestra; compactación en 3 capas con 26 golpes consecutivos para cada una (Fig. 18b); verificación de 1cm encima del borde del cuerpo del cilindro (Fig. 18c); nivelación de la superficie del cuerpo de prueba (Fig. 18d); pesaje del suelo y cilindro; extracción de la muestra (Fig. 18e); y obtención de la humedad.

Figura 18- Etapas del ensayo de compactación.

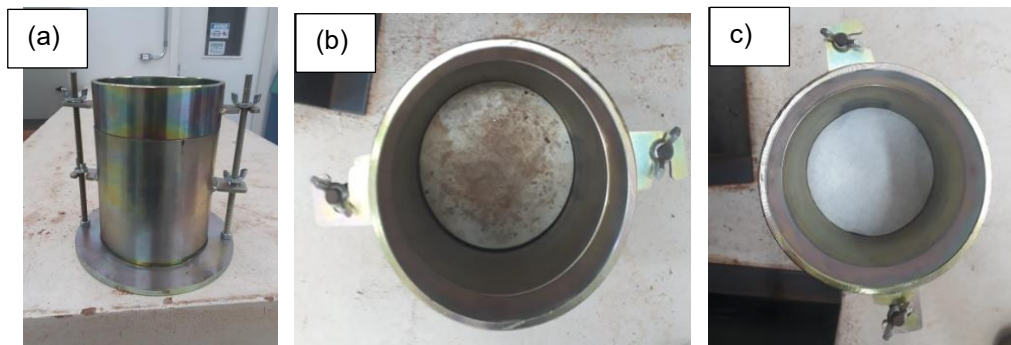


Fuente: Autora, 2019.

4.5 ENSAYO DE EXPANSIÓN Y CBR

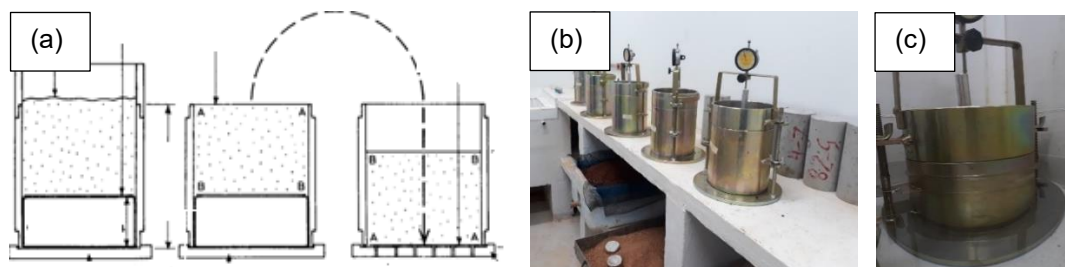
Para la determinación de la capacidad de soporte, se realizó el ensayo Índice de Soporte de California (ISC) o más conocido como CBR, conforme a la normativa NBR 9895 (ABNT, 2016). Este ensayo fue dividido en 4 etapas: preparación de la muestra de acuerdo a la NBR 6457 (ABNT, 2016a); el moldaje de los cuerpos de prueba (CP) y energía de compactación y sobrecargas corresponden al análisis de una subrasante de pavimento, siguiendo las recomendaciones de la DNER. El control del hinchamiento (o expansión) de la muestra durante el proceso de inmersión por 7 días fue realizado por extensómetros con lecturas realizadas cada 24 horas. El ensayo de penetración, se realizó empujando un pistón estándar en el suelo a una velocidad constante de 1,27mm/min (BAÑON BLÁZQUES; BEVIÁ GARCÍA, 2002; HEAD, 1994).

Detalles del procedimiento del ensayo de CBR es mostrado a continuación. En la primera etapa se determinó la humedad del suelo, se incrementó agua para alcanzar la humedad necesaria para el punto a ser analizado, considerando que se realizaron ensayos antes y después de la humedad óptima como recomendado por la NBR 9895 (ABNT, 2016). En la segunda etapa se pesó el molde del cilindro grande, se colocó el collar (Fig. 19a) y el disco espaciador (Fig. 19b), y sobre este un disco de papel filtro del mismo diámetro (Fig. 19c); a partir de esta etapa se realizó los pasos establecidos en la figura 19, con la particularidad, de realizar la compactación con 5 capas y 12 golpes para cada capa.

Figura 19- Segunda etapa del CBR.

Fuente: Autora, 2019.

En la tercera etapa se invirtió el molde (Fig. 20a), y se colocó encima una placa perforada con vástago, y sobre esta, los anillos cuya masa debe ser de (4540 ± 20) g; se colocó el trípode sobre los bordes del molde, hasta que coincida el vástago del comparador con el de la placa perforada (Fig. 20b). Se sumergió el molde hasta la línea de referencia, aproximadamente 17,8cm, como sugerido por Head (1994) (Fig. 20c), las lecturas deben ser realizadas cada 24 horas por 7 días, al terminar el tiempo de saturación, retirar el CP y dejar fluir el agua por 15 min. Algunos detalles importantes se encuentran ilustrados en la figura 20.

Figura 20- Tercera etapa del CBR.

Fuente: (a) Head, 1994 (b y c) autora, 2019.

La cuarta etapa se inició con la retirada de los trípodes, los contrapesos, el plato perforado y el vástago comparador; se volvió a colocar los pesos encima del CP y fue trasladada a la prensa, donde se colocó en el orificio central de la sobrecarga el pistón de penetración. Fueron reajustados a cero los dos comparadores: para medir la carga y el control de penetración. Se aplicó la carga sobre el pistón de forma manual, a una velocidad de 1,27mm/min como establecido en la NBR 9895. Para controlar este requisito se controlaba el comparador de penetración y un cronómetro. En la figura 21 se ilustra el procedimiento de esta etapa.

Figura 21- Cuarta etapa ISC



Fuente: Autora, 2019.

5 RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo son presentados los resultados encontrados en la caracterización física, análisis de la capacidad de soporte CBR e identificación mineralógica del RCD-C fino.

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

5.1.1. Características físicas

Los valores encontrados de masa específica de los sólidos, límites de Atterberg y composición granulométrica por la ABNT 6502 (1995) para las diferentes concentraciones de RCD-C fino, son presentados en la tabla 4. Mientras, los gráficos del límite líquido con su respectivo coeficiente de determinación (R^2), así como la verificación del desvío padrón menor a 5% del límite de plasticidad se encuentran en el apéndice A y B, respectivamente.

Tabla 4- Caracterización física de las muestras

Concentración RCD-C fino (%)	δ (g/cm ³)	Límites de Atterberg			Composición granulométrica			
		LL (%)	LP (%)	IP (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Finos (%)
0	2,80	46,22	27,40	18,82	20,00	55,07	24,93	80,00
20	2,76	35,82	22,94	12,88	36,00	48,97	15,03	64,00
40	2,72	24,67	19,43	5,24	52,00	37,30	10,70	48,00
60	2,69	-	-	NP	70,00	23,44	6,56	30,00
100	2,62	-	-	NP	94,00	4,93	1,07	6,00

Fuente: Autora, 2019.

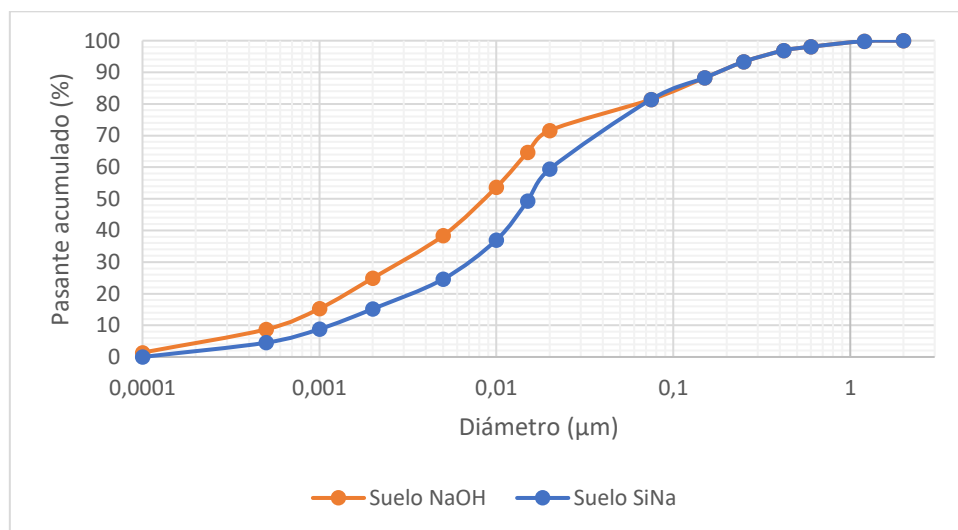
Observación: δ -masa específica de los granos del suelo; LL-límite líquido; LP-límite de plasticidad; IP-índice de plasticidad.

La masa específica del suelo disminuye al incrementar el RCD-C fino, hasta alcanzar niveles próximos de los residuos reciclados. El suelo es plástico, mientras el agregado reciclado de concreto no tiene plasticidad, por lo tanto, al incrementar RCD-C fino, las muestras reducen su plasticidad hasta perderla completamente como es el caso de la muestra con 60% de RCD-C fino. Un comportamiento relativo a la reducción de los valores de masa específica y límites de Atterberg al adicionar residuos, se observó en la investigación realizada por SILVA; FUCALÉ SUKAR; FERREIRA (2019), los mismos que utilizaron RCD fino en un suelo areno-arcilloso con tres porcentajes de sustitución: 10, 20 y 30%.

El tipo de dispersante a ser utilizado para el ensayo de granulometría

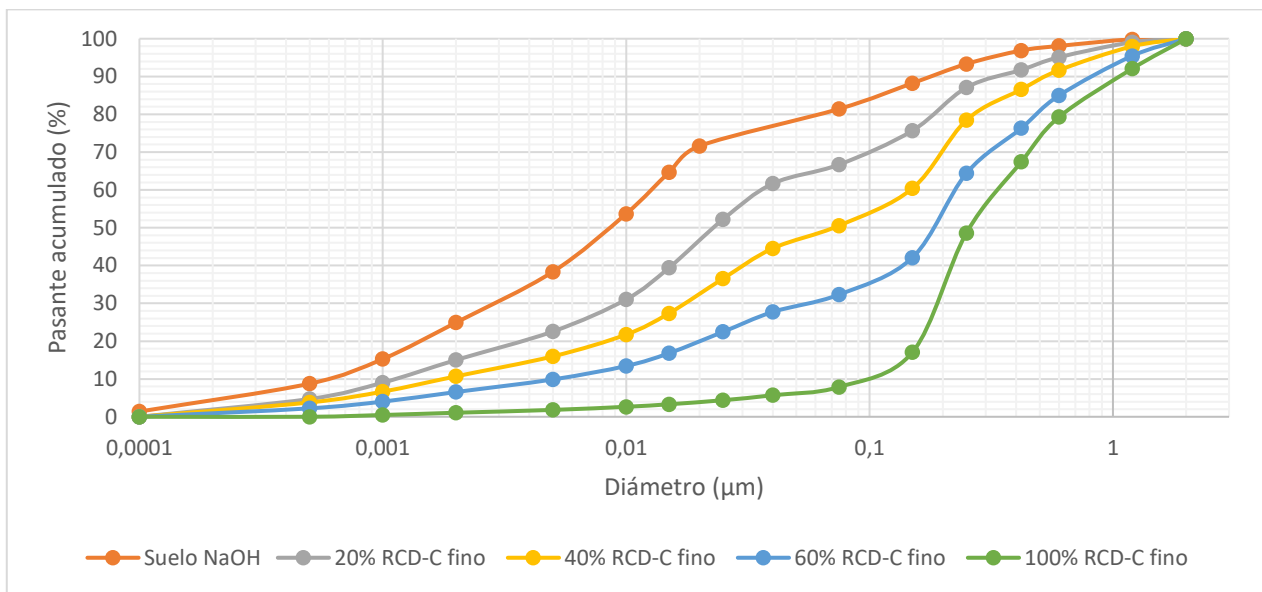
depende del nivel de pH de la muestra (BOWLES, 1980), en el caso del suelo, su nivel es de 5,55, siendo clasificado como un material ácido, para este tipo de suelo se utilizaron dos tipos de dispersantes: silicato de sodio o vidrio líquido recomendado por Bowles (1980) o hidróxido de sodio sugerido por Mauri (2011). Las curvas de distribución granulométricas realizadas en el granulómetro a láser del suelo con los dispersantes mencionados son representadas en la figura 22, donde se muestra que para las concentraciones utilizadas existe una mayor efectividad del hidróxido de Sodio para dispersar las arcillas, el mismo que presenta un porcentaje de arcillas (<2 μ m) de 24,93% a 15,20% con respecto al silicato de sodio.

Figura 22- Granulometría del suelo.



Fuente: Autora, 2019.

Para las muestras que tenían un porcentaje parcial o total de RCD-C fino, han sido clasificadas como materiales básicos, al tener un pH mayor a 7, por lo cual el dispersante utilizado es hexametáfosfato de sodio conforme sugerido por Bowles (1980), para la ejecución de las curvas granulométricas por láser representadas en la figura 23. Los detalles de los gráficos con las tres repeticiones realizadas para cada muestra, se encuentran en el apéndice c. Como se puede observar en el gráfico al incrementar RCD-C fino, las curvas se dislocan a la derecha debido al incremento de tamaño de las partículas incorporadas por los residuos reciclados en la mezcla.

Figura 23- Granulometría de muestras con variaciones de RCD-C fino.

Fuente: Autora, 2019.

La clasificación de las muestras ha sido realizada por dos sistemas: SUCS, AASHTO, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5, a continuación. La clasificación AASHTO es utilizada para pavimentos, en este sistema se define al suelo como regular a pobre para ser utilizado como material de subrasante, además el índice de grupo del material es inversamente proporcional a la calidad del suelo, por lo cual se puede concluir que con el incremento de RCD-C fino, la calidad del material aumenta (BRAJA, 2014).

Tabla 5- Clasificación de las muestras SUCS y AASHTO.

Concentración RCD-C fino (%)	SUCS	AASHTO
	Siglas	Siglas
0	CL	A-7-6 (13)
20	CL	A-6 (7)
40	SC-SM	A-4 (3)
60	SM	A-2-4(0)
100	SP	A-3(0)

Fuente: Autora, 2019.

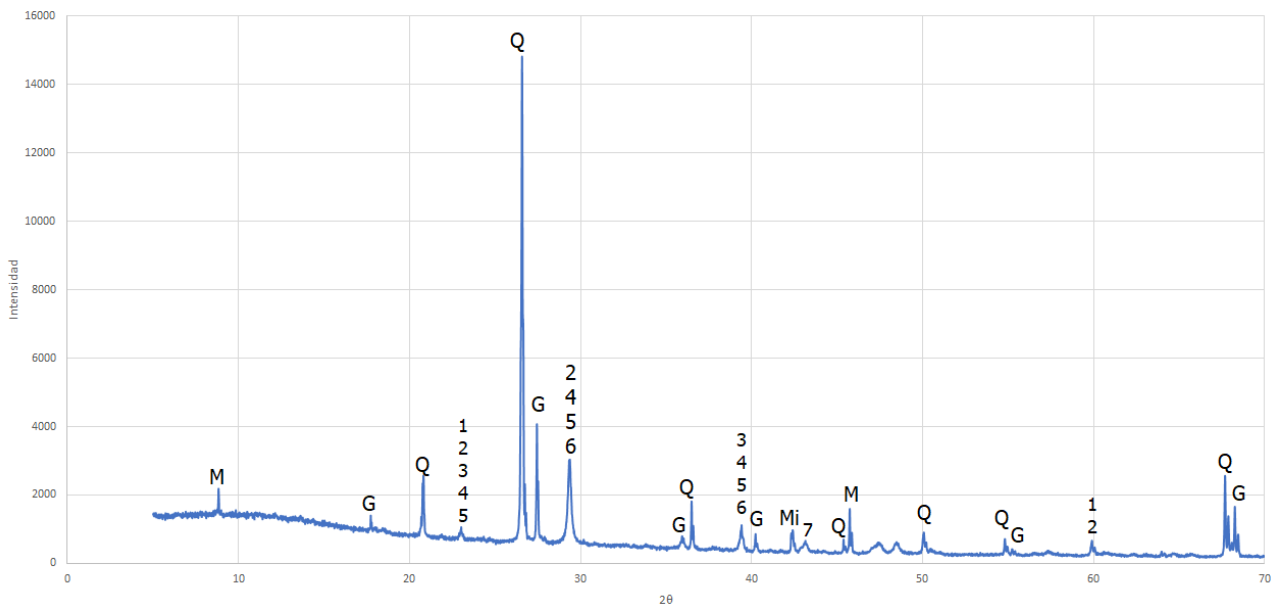
4.4 Características mineralógicas del RCD-C fino

En la figura 24, se presenta el diagrama de DRX para el RCD-C fino, en el cual se identifican las fases mineralógicas del cemento Portland CPIII-40RS analizado por Amaral (2016) que están presentes en el residuo de concreto. Las fases mineralógicas del cemento analizadas y presentes en el RCD-C fino son: 1- Celita (C_4AF); 2- Alita (C_3S); 3- Carbonato de calcio; 4- Belita (C_2S); 5- Aluminato tricálcico (C_3A); 6- Óxido de calcio; y 7-

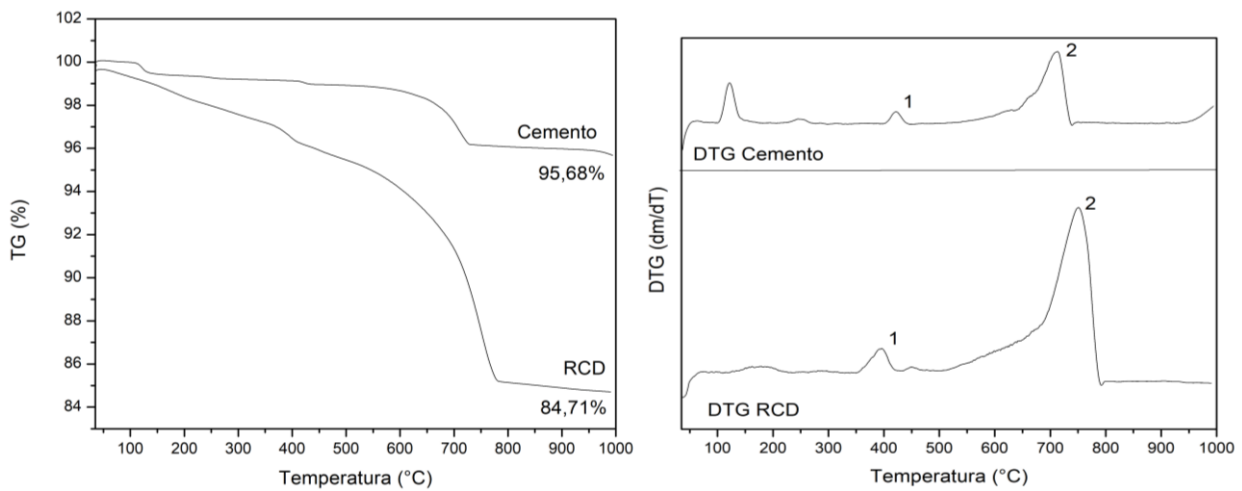
Gipsita (CaSO_4). La presencia de los compuestos químicos del cemento Portland en los residuos de concreto, sugiere la utilización del mismo como estabilizador químico para los suelos ya que estaría sustituyendo en parte al cemento, y su aplicación seguiría a las técnicas de estabilización de suelo cemento, como, por ejemplo, estabilización de subrasante para pavimentos.

Otros compuestos del DRX del RCD-C fino son: M- moscovita $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, Q- cuarzo (SiO_2), G- goetita (HFeO_2), Mi-microclina $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$. Estos corresponden a los agregados finos del concreto, y están relacionados con la procedencia de los mismos.

Figura 24- Diagrama de rayos-X del RCD-C fino.



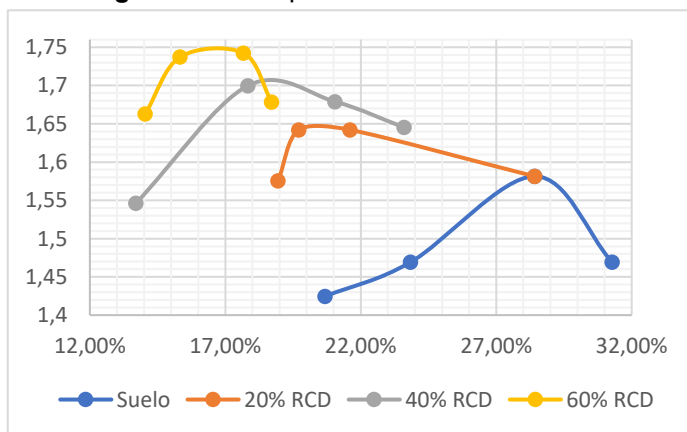
En los análisis de TG y DTG, del cemento y RCD-C fino, se observa diferentes porcentajes de masa residual de 95,68% (cemento) y 84,71% (RCD-C fino), a 1000°C (Figura 25). Ambos materiales muestran coincidencia en relación a la mayor pérdida de masa en el rango de 450 a 750°C . Otras coincidencias son los puntos (1) y (2), que de acuerdo con Rigo (2019) corresponde a los hidróxidos de calcio y carbonatos de calcio, respectivamente. Los resultados de TG y DTG muestran algunas similitudes entre el cemento y el RCD-C fino, lo que coincide con la presencia de los minerales de cemento remanentes encontrados en el RCD-C fino en el análisis de DRX.

Figura 25- TG y DTG del cemento CP V y RCD-C fino.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el DRX y TG-DTG, el residuo de concreto posee un remanente de cemento en su composición. Como mencionado por Possan (2019) algunas de las partículas del cemento todavía no han sido hidratadas, las mismas que pueden realizar hidratación al estar en contacto con el agua, teniendo un potencial de hidratación residual.

5.2 COMPACTACIÓN

En la figura 26 son presentadas las curvas de compactación con energía normal de las mezclas analizadas, considerando condiciones sin reutilización del material. Mientras, en la tabla 6, son presentados los valores de humedad y masa específica máxima.

Figura 26- Compactación de las muestras.**Tabla 6-** Valores máximos compactación.

% RCD-C fino	Humedad óptima, (%)	Masa específica aparente seca, (g/cm³)
0	28,41%	1,58
20	20,60%	1,65
40	18,60%	1,71
60	16,70%	1,75

Fuente: Autora, 2019.

Fuente: Autora, 2019.

Con el aumento del RCD-C fino se observó el incremento de las masas específicas aparentes secas y la disminución de la humedad óptima. De acuerdo con Silva, Fucale y Ferreira (2019) las curvas de las mezclas son dislocadas para la izquierda, al tener una mayor distribución de las partículas, es decir, un material más graduado, ocasionando

una mejor acomodación de los granos en el proceso de compactación, disminuyendo el índice de vacíos de los granos, por lo tanto, sería una estabilización mecánica. De tal manera el mayor incremento de la masa específica aparente seca, ha sido con 60% del RCD-C fino, incrementando de 1,58 a 1,75 g/cm³ referente al suelo limo-arcilloso.

5.3 EXPANSIÓN Y CBR

Los valores obtenidos en la expansión máxima después de 7 días inmersos en agua son mostrados en la tabla 8, los mismos que verifican el parámetro de expansión ($\leq 1\%$) establecido por la NBR 15115 (2014h), a excepción del suelo natural con una expansión de 1,23% a 20,68% de humedad, como mostrado en la tabla 7.

Tabla 7- Verificación de la expansión.

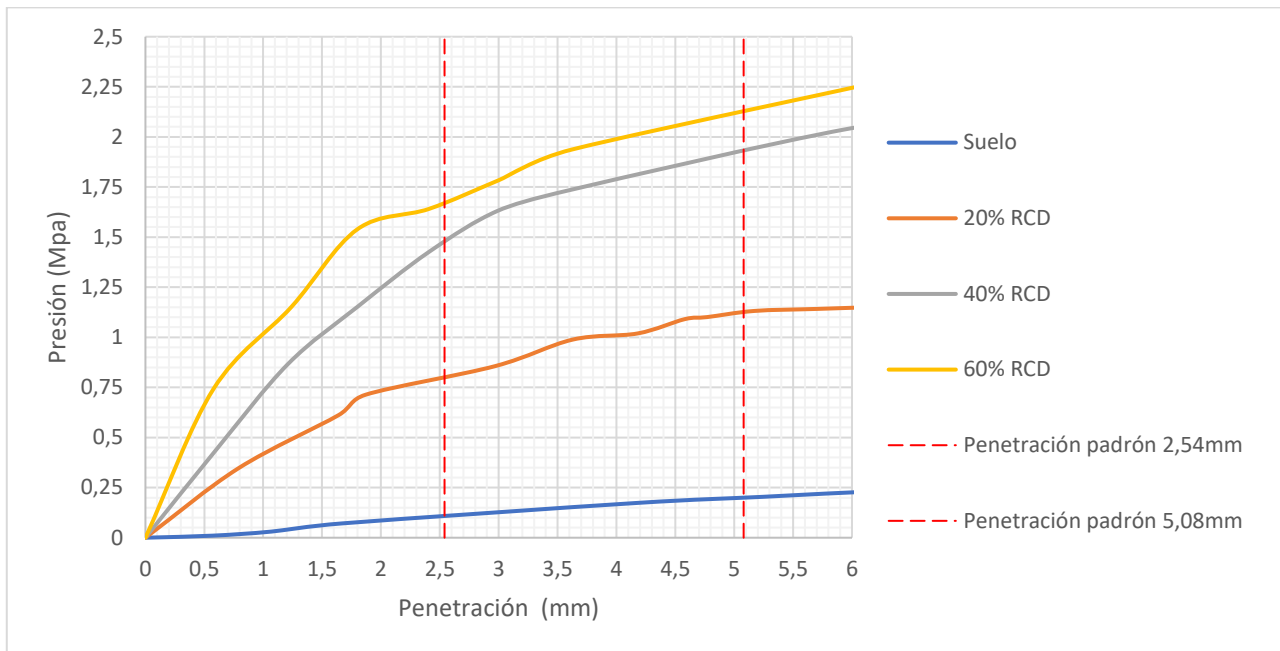
% RCD- C fino	Contenido de humedad, (%)	Mayor expansión, (%)
0	20,68%	1,23%
20	18,95%	0,34%
40	21,58%	0,13%
60	14,04%	0,01%

Fuente: Autora, 2019.

La disminución de la expansión puede indicar una estabilización química de RCD-C fino, ya que el remanente del cemento presente en el residuo de concreto se hidrata y reacciona con las partículas limo-arcillosas, endureciéndolas, y al endurecer la expansión de la muestra disminuye, por ejemplo, si en el RCD-C fino sólo hubiese partículas de cuarzo los mismos no van a reaccionar por lo tanto no se conseguiría reducir la expansión.

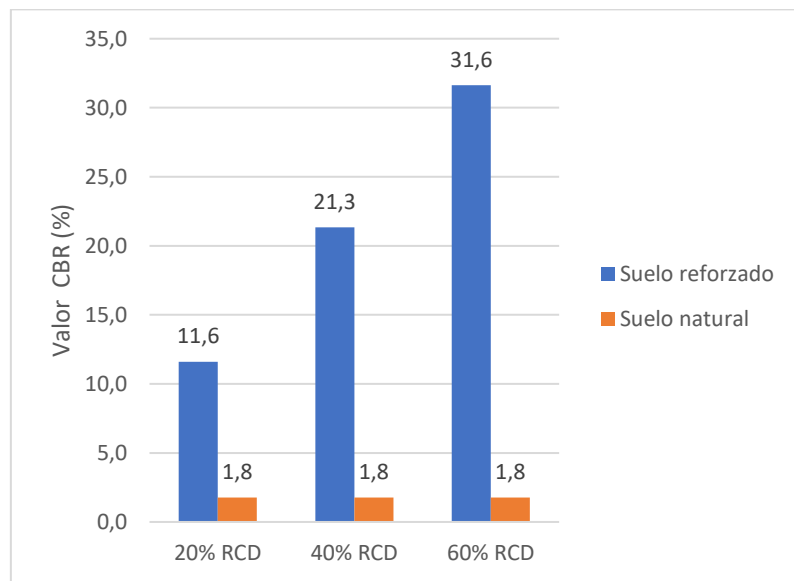
En la figura 27 se muestra el comparativo de presión vs penetración obtenidos en la etapa de penetración de CBR tanto para el suelo natural como para la mezcla suelo con adición de RCD-C fino. Puede constatar que la capacidad de soporte – CBR presentó incremento con la adición del residuo reciclado. En el apéndice D se presenta el gráfico de humedad/expansión y presión vs penetración con las humedades de cada mezcla.

Figura 27- Presión vs penetración para el suelo y mezclas suelo con RCD-C fino.



Fuente: Autora, 2019.

El incremento del CBR es producto de la acción mecánica y química, posiblemente las partículas limo-arcillosas con RCD-C fino van a generar un rozamiento entre las partículas sólidas, debido al elevado estado de la compactación estando muy próximas entre sí. Del mismo modo, las fuerzas cohesivas se pueden incrementar por la acción de los minerales de cemento remanentes en la mezcla durante los siete días de cura. La figura 28 muestra la comparación entre CBR de suelo con RCD-C fino, con diferentes porcentajes de material reciclado, mostrando que el mayor incremento de la capacidad de soporte fue notoriamente con 60% del RCD-C fino, incrementando 17,56 veces el valor de CBR referente al suelo limo-arcilloso. Es importante resaltar que los valores encontrados de CBR para 40 y 60% de RCD-C fino, cumplen con el parámetro establecido ($\text{CBR} \geq 12\%$) por la NBR 15115 (2004) para ser utilizados como refuerzo de subrasante.

Figura 28- Comparación del CBR de todas las mezclas.

Fuente: Autora, 2019.

6 CONSERACIONES FINALES

En este trabajo se analizó la estabilización de un limo arcilloso con RCD-C fino para aplicación como subrasante de pavimentos, variando los porcentajes en peso de RCD-C fino en 20,40 y 60% en relación al total de la mezcla. El análisis ha sido realizado a través de ensayos experimentales: caracterización física y análisis de la capacidad de soporte de las muestras, así como, así como la identificación mineralógica del RCD-C fino. En relación a los resultados encontrados en el trabajo se resaltan los siguientes puntos:

- El suelo analizado es limo-arcilloso, de acuerdo con la AASHTO es un material A-7-6 (13), siendo un suelo regular a pobre para ser utilizado en la subrasante, del mismo modo, el índice de grupo (13) representa una calidad mala del material. Además, el CBR del mencionado suelo (1,78%) es inferior a lo exigido (2%) por la DNIT para ser utilizado como subrasante, por lo que es necesario reforzar el material;
- Los límites de Atterberg muestran que el suelo es plástico y el RCD-C fino no tiene plasticidad, por lo que, al agregar el residuo reciclado (RCD-C fino) en el suelo, la mezcla reduce su plasticidad hasta perderla completamente como es el caso de la muestra con 60% de RCD-C fino. De la misma manera, la masa específica de sólidos disminuye al incrementar los agregados del residuo de concreto (RCD-C fino), hasta alcanzar un coeficiente de correlación lineal mayor a 0,8;
- En el ensayo de compactación la masa específica aparente seca se incrementa con la estabilización mecánica posiblemente por mayor distribución de las partículas de RCD-C fino, produciendo una mejor acomodación de los granos. Por otro lado, la humedad óptima disminuye al incrementar RCD-C fino. Con un 60% de RCD-C fino se generó el mayor incremento de la masa específica aparente seca de 1,58 a 1,75 g/cm³;
- Al adicionar RCD-C fino, la expansión después de 7 días sumergidos disminuye con relación al suelo (1,23% expansión) con un porcentaje óptimo de residuo agregado con 60% de RCD-C fino (0% expansión). La disminución de la expansión puede ser ocasionada por una acción química del residuo de concreto, por la existencia de minerales remanentes en el mismo, que al ser hidratados endurecieron la muestra reduciendo su expansión;

- En el ensayo de CBR se observó un incremento en la capacidad de soporte del material al ingresar residuo de concreto, posiblemente por procesos conjuntos de estabilización mecánica (compactación) y química (minerales de cemento). Las adiciones de 40 y 60% cumplieron con los requisitos normativos para camadas de subrasante ($\text{CBR} \geq 12$). La capacidad de soporte se amplió 17,56 veces referente al suelo, con un porcentaje de 60% de RCD-C fino;
- Los análisis mineralógicos del RCD-C fino mostraron la presencia de minerales propios del cemento en su composición como: celita (C_4AF), aita (C_3S), carbonato de calcio, belita (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A), óxido de calcio; y gipsita (CaSO_4). Esto significa que en los RCD-C existen cantidades remanentes de cemento que no fueron hidratadas y están activos, estos minerales serían los responsables por la estabilización química de la mezcla de suelo con RCD-C fino.

Se recomienda para trabajos futuros realizar:

- Un análisis de la viabilidad económica de la disponibilidad y productividad en obra del uso de RCD-C fino en Foz do Iguaçu;
- El ensayo de resistencia a compresión simple de la mezcla entre suelo con RCD-C fino después de los 7, 14, 28 y 90 días de cura;
- El ensayo de actividad puzolánica de acuerdo a la NBR 12653 (2015);
- Comparar la espesura de la camada de la subrasante para suelo natural y suelo con RCD-C fino.

REFERENCIAS

AMARAL, Mateus Carvalho. **Avaliação dos efeitos da incorporação de resíduo de lama de cal nas propriedades e microestrutura de uma mistura solo-cimento**. 2016. 100 f. Tese (Doutorado) - Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E 2550**: Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry. West Conshohocken (EUA): ASTM, 2017.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 172 f. Dissertação (Mestrado) -Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANGULO, S. C.; MIRANDA, L. R.; JOHN, V. M. Construction and demolition waste, its variability and recycling in Brazil. *In*: PROCEEDINGS OF SUSTAINABLE BUILDING, 2002, Oslo. **Anuales** [...]. Oslo: [s.n], 2002.

ARAÚJO, C.; SALES, N. Análise da mistura do agregado reciclado de RCD associado ao solo laterítico para utilização na camada de base de pavimentos. *In*: FORUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Anais** [...]. Porto Alegre: Instituto Venturi, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**: 2018/2019. p. 0–74. São Paulo, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**: 2017. p. 73. São Paulo, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON). **Pesquisa setorial da reciclagem de Resíduos da Construção 2014/2015**, São Paulo, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6457**: Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6459**: Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7180:** Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7181:** Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7182:** Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 9895:** Índice de Suporte de California: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 10004:** Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15113:** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes: Aterros Diretrizes para projeto, implementação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004g.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15114:** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes: Área de reciclagem: Diretrizes para projeto, implementação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004g.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004h.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **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: ABNT, 2004i.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 560 p.

BAÑON BLÁZQUES, L.; BEVIÁ GARCÍA, J. **Manual de Carreteras:** Construcción, mantenimiento. 2. ed. [s.l.]: Ortiz e Hijos, Contratistas de Obras, S.A, 2002. v. 53.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica:** Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras; ABEDA, 2006.

BOWLES, J. **Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil**. México: McGraw-hill de México, 1980. 249 p. ISBN 968-451-046-2.

BRAJA, M. das. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 632 p. ISBN: 9788522111121.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, [s.l.], v. 61, n. 358, p.178-189, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366->

69132015613581860.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 467, de 16 de julho de 2015**. 17 jul. 2015. Brasília: Diário Oficial da União, 2015.

CORREIA, R. S. **Estudo de viabilidade econômica para o uso de resíduos de construção e demolição para o uso de resíduos de construção e demolição em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2014. 53 pág. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) -Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de pavimentação**. 3.ed. Rio de Janeiro, 2006.

FIGUERÊDO, P. **Construção civil representa 6,2% do PIB Brasil**. 14 feb. 2017. Disponível em: <https://www.sistemafibra.org.br/fibra/sala-de-imprensa/noticias/1315-construcao-civil-representa-6-2-do-pib-brasil>. Acesso em: 9 nov. 2019.

GOBBO, Luciano de Andrade. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de Cimento Portland**. 2009. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. doi:10.11606/T.44.2009.tde-23072009-144653. Acesso em: 12 dic. 2019.

HEAD, K.H. **Manual of Soil Laboratory Testing: Permeability, shear strength and compressibility tests**. 2. ed. New York: Wiley, 1994. 440p. ISBN: 9780470233627.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13220: particle size analysis: laser diffraction methods**. GINEBRA: 2009.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. *In*: SEMINÁRIO RECICLAVEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES, 2000. **Anuales** [...]. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente / Cetesb, 2000.

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.

LIMA, J. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 240 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

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.

MARQUES, G. B. **Análise de pavimento flexível: estudo de um trecho crítico na rodovia ERS -421**. 2014. 83 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil)- Centro Universitário Univates, Lajeado, 2014.

MAURI, J. *et al.* Dispersantes químicos na análise granulométrica de latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 35, n. 4, p.1277-1284, agosto 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832011000400021>.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. **Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito**. Lima, 2008.

MONTEJO FONSECA, A. **Ingeniería de Pavimentos para Carreteras**. 2. ed. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2002. 734p. ISBN: 958-96036-2-9.

MOTTA, R. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. doi:10.11606/D.3.2005.tde-19072006-114729. Acesso en: 12 dic. 2019.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Rio de Janeiro: Bookman, 2016. Disponível en: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=dYOPCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=composição+do+concreto&ots=lakJWzNzNF&sig=nftZNtH6GVeFnXUzdqw0ZkrKAZ0#v=onepage&q=composição+do+concreto&f=false>. Acesso en: 3 dez. 2019.

OLIVEIRA, T. C. **Avaliação experimental de barreira capilar com rcd como camada de bloqueio para coberturas finais de arsu**. 2019. 77 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) -Universidade Federal da Integração Latino Americana, Foz do Iguaçu, 2019.

SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE: Divisão de Aterro Sanitário. **Quantidade de RCD em Foz do Iguaçu**. Entrevista cedida a Sara Ochoa Averos. Foz do Iguaçu, nov. 2019.

PAUW, C.; LAURITZEN, E. K. **Disaster Planning, Structural Assessment, Demolition and Recycling**. Londres: Crc Press, 1994. 176 p. ISBN-10: 0419191909.

PAIXÃO, M. P.; CORDEIRO, C.; CORREIA, M. Pavimentos semirrígidos: prevenção e tratamento da reflexão de trincas. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 16, n. 9, p. 1689–1699, 2017.

PALACIO, C. H. **Estabilização de solos com resíduo de construção e demolição reciclado (rcd-r) para fins rodoviários**. 2014. 30 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) -Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2014.

PAUL, H.; CYRUS, S. Stabilization of weak subgrade soil using demolished concrete aggregate. **Indian Geotech Conference IGC**, v. 2, n. 1, p. 93-105, dic. 2016.

POSSAN, E. **Agentes minerais de RCD-C (resíduo cinza) e reatividade**. Entrevista cedida a Sara Ochoa Averos. Foz do Iguaçu, nov. 2019.

RAMOS, G. P. **Mejoramiento de subrasantes de baja capacidad portante mediante el**

uso de polímeros reciclados en carreteras, paucará huancavelica 2014. 2014. 211 f. Monografía (Graduación en Ingeniería Civil, Geotecnia Vial)- Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2014.

RAMONO, C. **Apostila de Tecnologia do Concreto.** Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. p. 102. 2004.

RICO, A.; DEL CASTILLO, H. **La ingeniería de suelos en las vías terrestres:** Carreteras, Ferrocarriles y aeropistas. México: Limusa, v. 2, p. 653, 1977.

Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes:Aterros: Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT,2004f.

RIGO, E. **Avaliação do potencial de captura de co2 de concretos com resíduos de construção de demolição devido à carbonatação.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019. No prelo.

RRUFF. **RRUFF Project website containing an integrated database of Raman spectra, X-ray diffraction and chemistry data for minerals.** Disponível em: <http://rruff.info/> . Acesso em: 13 dic. 2019.

SANTOS, P.S. **Tecnologia das argilas aplicada as argilas brasileiras.** 1975. São Paulo, Edgard Blucher, ed. Universidade de São Paulo.

SANTOS, E. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado.** 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. doi:10.11606/D.18.2007.tde-10042007-110106. Acesso em: 2019-12-12.

SCHNEIDER, D. **Deposições Irregulares de Resíduos da Construção Civil na Cidade de São Paulo.** 2003. 131 f. Dissertação (Mestrado Saúde Pública) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** 1. ed., v.2, São Paulo: Pini, 2001. 688 p.

SILVA, A. C.; FUCALÉ, S.; FERREIRA, S. R. Efeito da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso. **Matéria (rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 24, n. 2, p.1-12, 10 jun. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0670>.

SILVA, L. S. *et al.* Análise comparativa entre as técnicas construtivas de pavimentação empregadas no sistema Bus Rapid Transit (BRT) - Belém - PA versus Fortaleza - CE. **RCT: Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 4, n. 6, 2018.

SILVA, P. F. **Manual de Patologia e Manutenção de Pavimentos.** 2. ed., v1, São Paulo: Pini, 2008. 128 p.

SONCIM, S. P. *et al.* O emprego do resíduo da reciclagem de garrafas pet (polietileno tereftalato) como agregado em reforço de subleitos de rodovias. 2019. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/267233088_O_EMPREGO_DO_RESIDUO_DA_RECICLAGEM_DE_GARRAFAS_PET_POLIETILENO_TEREFTALATO_COMO_AGREGADO_EM_REFORCO_DE_SUBLEITOS_DE_RODOVIAS Acesso em: 08 oct. 2019.

SOUZA, U. E. *et al.* Perdas De Materiais Nos Canteiros De Obras: a Quebra Do Mito. **Simpósio Nacional - Desperdício de materias nos canteiros de obras**, 1999.

SOUZA, U. E. *et al.* Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p.33-46, 2004.

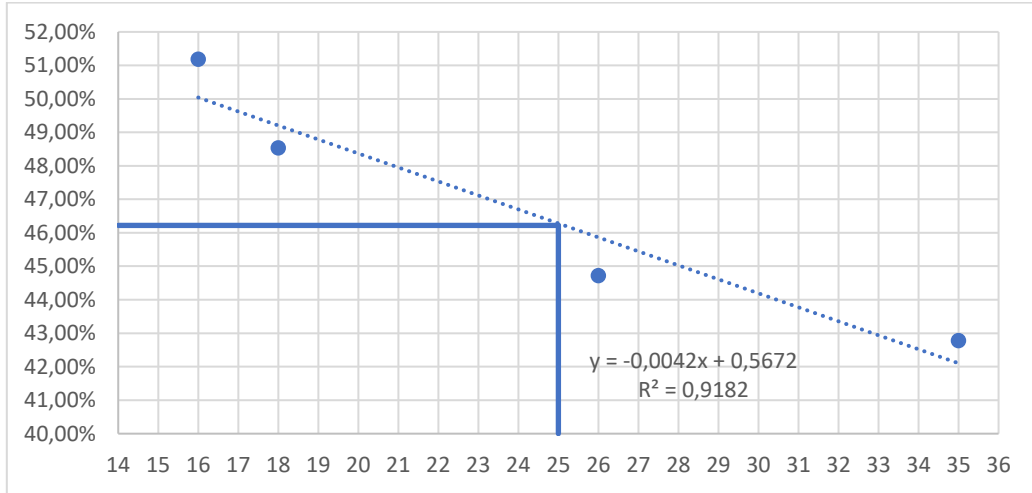
SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. Parkway NW: CRC Press, 2016. 508 p.

VEDRONI, W. J.; CARVALHO, D. Estudo de caso da utilização do RCD (Resíduos de Construção e Demolição) na reparação de ruas e avenidas de Piracicaba SP. **HOLOS Environment**, v. 8, n.2, p. 149-165, 2008.

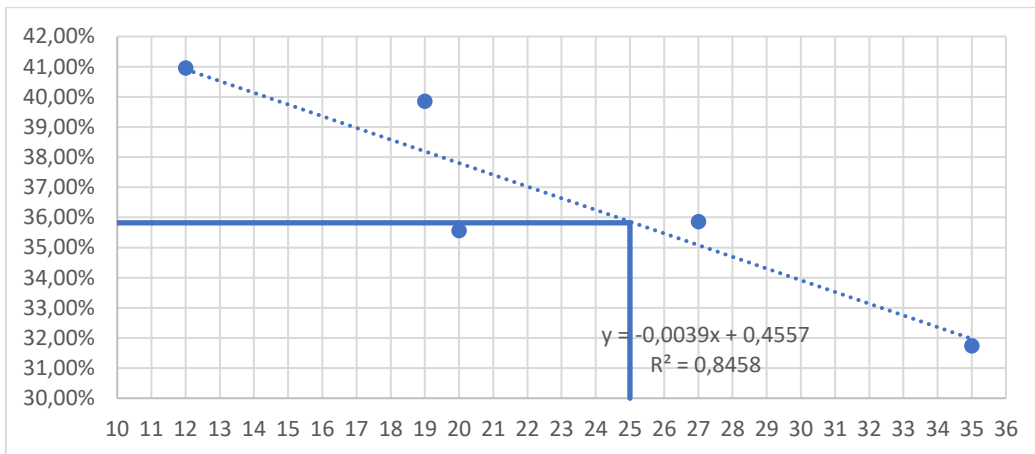
APÉNDICES

APÉNDICE A- LÍMITE LÍQUIDO

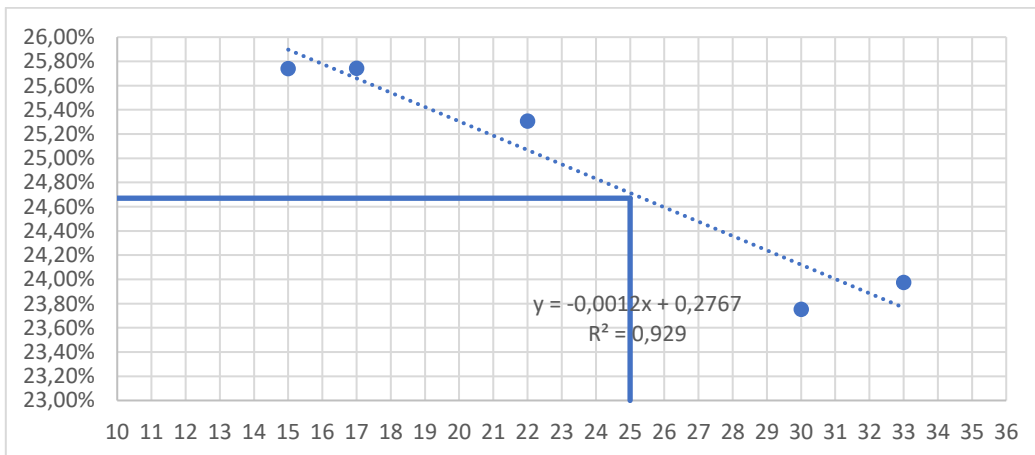
Suelo



20% RCD-C fino



40% RCD-C fino



APÉNDICE B- LÍMITE DE PLASTICIDAD

Suelo

Masa del suelo húmedo + cápsula, M1 [g]	9,42	9,7	9,35
Masa del suelo seco + cápsula, M2 [g]	9,02	9,37	8,94
Masa de la cápsula, M3 [g]	7,62	8,14	7,41
Contenido de humedad, [%]	28,57%	26,83%	26,80%
Media, [%]	27,40%		
Varianza, [%]	0,01%		
Desvío padrón, [%]	0,83%		
Condición (±5%)	Ok		

20% RCD-C fino

Masa del suelo húmedo + cápsula, M1 [g]	6,74	8,87	8,72
Masa del suelo seco + cápsula, M2 [g]	6,44	8,57	8,47
Masa de la cápsula, M3 [g]	5,2	7,27	7,31
Contenido de humedad, [%]	24,19%	23,08%	21,55%
Media, [%]	22,94%		
Varianza, [%]	0,01%		
Desvío padrón, [%]	1,08%		
Condición (±5%)	Ok		

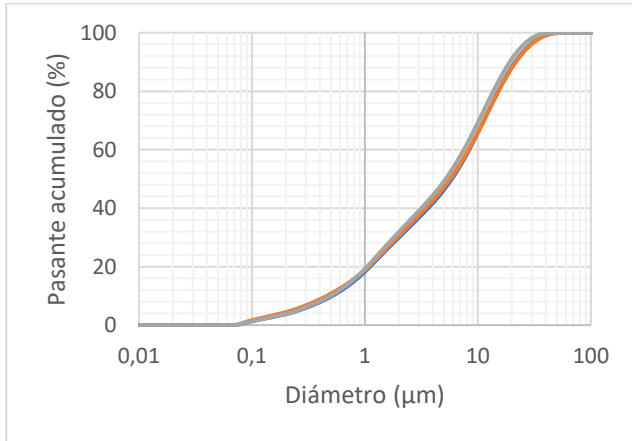
40% RCD-C fino

Masa del suelo húmedo + cápsula, M1 [g]	9,21	9,37	6,85
Masa del suelo seco + cápsula, M2 [g]	8,96	9,02	6,67
Masa de la cápsula, M3 [g]	7,69	7,24	5,72
Contenido de humedad, [%]	19,69%	19,66%	18,95%
Media, [%]	19,43%		
Varianza, [%]	0,00%		
Desvío padrón, [%]	0,34%		
Condición (±5%)	Ok		

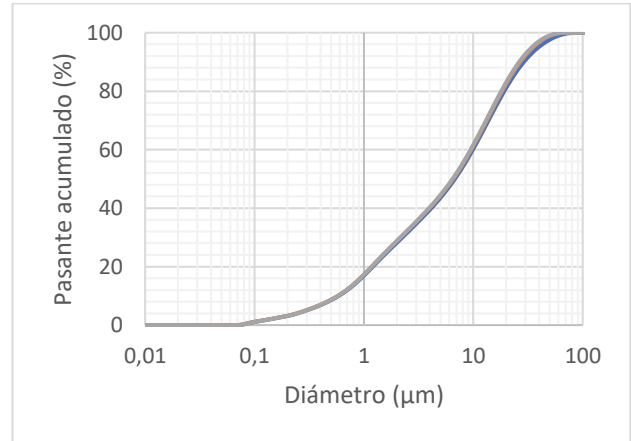
APÉNDICE C- GRANULOMETRÍA

— Test 1 — Test 2 — Test 3

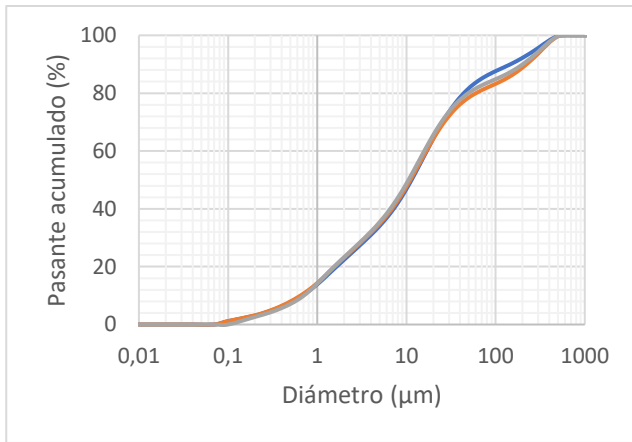
Suelo



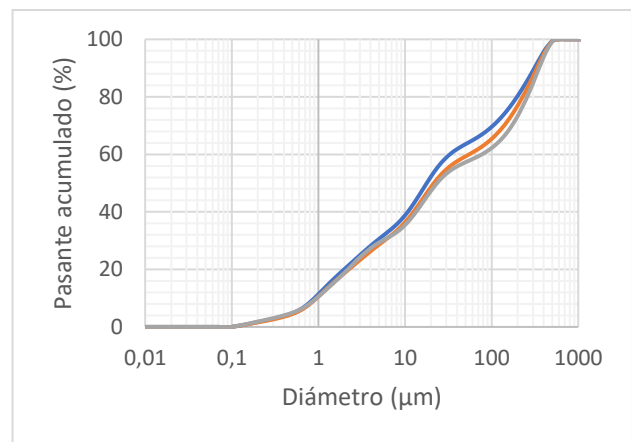
20% RCD-C fino



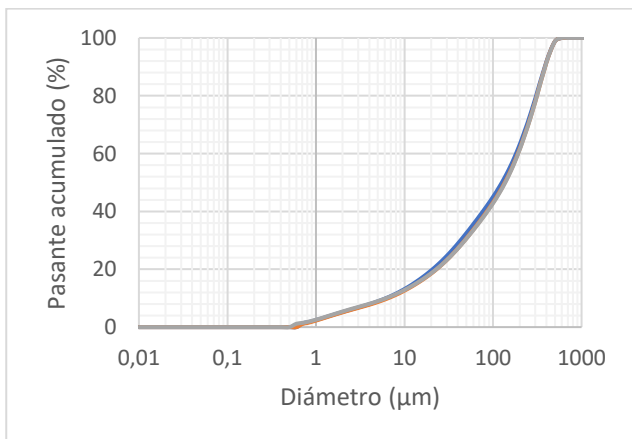
40% RCD-C fino



60% RCD-C fino

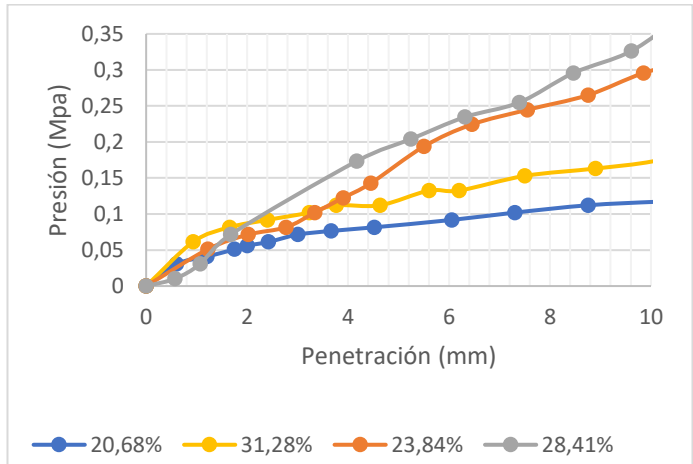
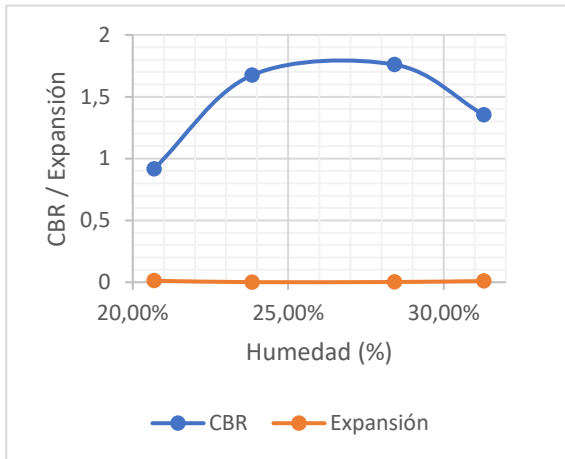


100% RCD-C fino

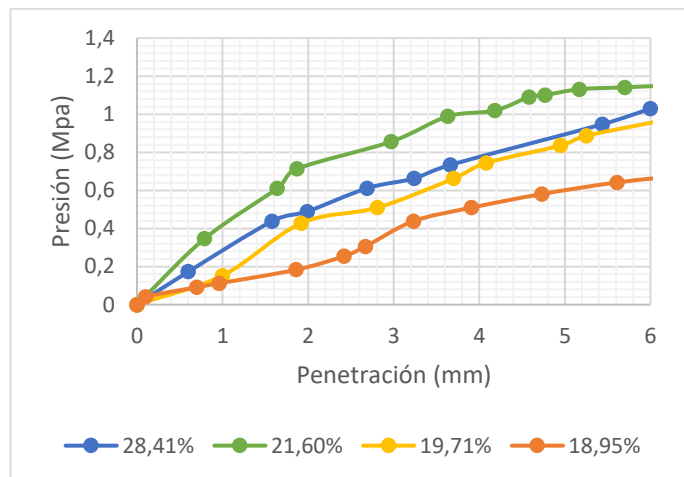
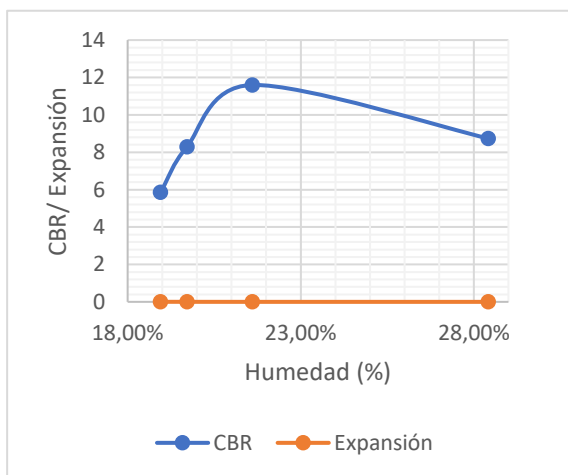


APÉNDICE D- ENSAYO DE CBR Y PENETRACIÓN VS PRESIÓN

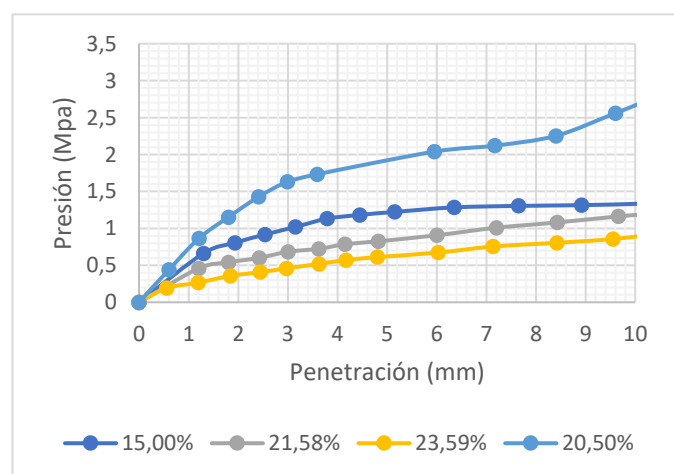
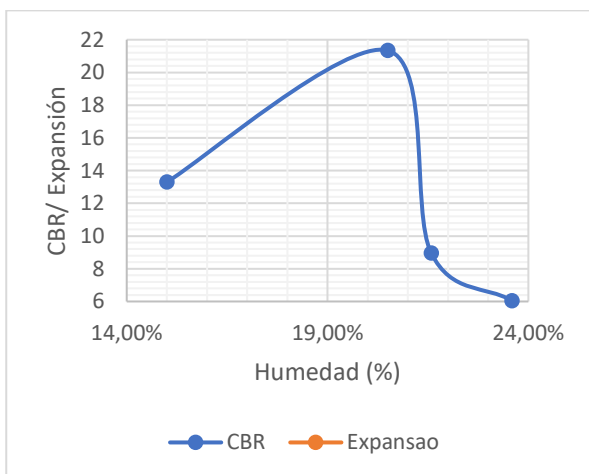
Suelo



20% RCD-C fino



40% RCD-C fino



60% RCD-C fino

