



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura
Engenharia Civil de Infraestrutura

**Evaluación del mejoramiento de suelo residual blando con columnas de
suelo-cemento-RCD para viabilizar el uso de cimentaciones
superficiales**

GLADYS REINA CONDE MEJIA

Foz do Iguaçu, PR
Marzo del 2022



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura
Engenharia Civil de Infraestrutura

Evaluación del mejoramiento de suelo residual blando con columnas de suelo-cemento-RCD para viabilizar el uso de cimentaciones superficiales

GLADYS REINA CONDE MEJIA

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. Ms. Julio Cesar Bizarreta Ortega.

Foz do Iguaçu, PR
Marzo del 2022

Dedico este trabajo con todo mi corazón a mi familia especialmente a mis padres Felix Conde Yujra y Teodora Mejia Mamani, quienes me motivaron constantemente a alcanzar uno más de mis propósitos.

AGRADECIMIENTOS

Constituyen los cimientos de mi desarrollo todos y cada uno de ustedes “mi familia”, en primera instancia agradezco a mis padres, por el gran apoyo incondicional, por sus palabras de ánimo, por sus buenas vibras, a mi madre Teodora por ser un gran ejemplo de perseverancia, por enseñarme a nunca bajar los brazos y alcanzar mis objetivos, a mi padre Felix, por enseñarme a creer en mí misma y mis capacidades, a mis queridas hermanas Graciela y Jhanet por estar ahí, por reír y llorar conmigo, por aconsejarme, a mis queridos hermanitos, Josue y Henry por mostrarme lo genial que es tener hermanos, a Fer por el gran apoyo, impulso, incentivo que recibí durante este proceso, por acompañarme y ser mis brazos fuertes durante algunos ensayos de laboratorio, a Karen, Dayron, Javier, a mis tíos Conde y Mejia y a la familia Cardozo por los saludos y las llamadas llenos de energías positivas, a mis hermosas sobrinas Evelin y Zamira por recordarme lo maravilloso que es la curiosidad, a mis bebes de cuatro patitas Wolverine y Logan por llenarme cada día de mucha felicidad.

A los diversos amigos que contribuyeron de alguna manera con la ejecución de este trabajo, a Javier y Fernando que estuvieron presentes en la hora de la colecta de mis materiales, a Marcos y Gabo que me ayudaron con el transporte del material beneficiado, a Rosmery y Viviana por el apoyo moral, a Rodrigo gran colega que me auxilio cuando me faltó material, a mis compatriotas y grandes amigos de carrera, Eloy, Rolando, Elber, Juan y Oscar, a Erick, Paulo, Leticia, Amanda, amigos quienes me abrieron las puertas de su país, a mis amigos latino-americanos, Paula, Jairo, Lili, Ana, Carol, Pablo, Jose, Jhonatan, Sarita, Leticia, Mario, etc. Quienes fueron grandes colegas durante el transcurso de la carrera.

A las y los profesores de la UNILA por nutrir nuestras almas y colmarnos de sabiduría, en especial al Prof. Julio Cesar Bizarreta por las orientaciones, paciencia y por ayudarme a involucrarme en el área de la geotecnia, a la Prof. Gisele que me colaboro con suelo para poder iniciar mis ensayos, al Prof, Ivan y Prof. Cesar quienes contribuyeron con su conocimiento para el desarrollo de este trabajo, al Prof. Ulises, la Prof. Edna, el Prof. Jean, el Prof. Ricardo, etc. por enseñarnos a creer en nuestras capacidades y despertar nuestras curiosidades.

Al Ing. Carlos Demoliner por permitirme coleccionar material de una de sus obras, a Engenharia Junior “ Logos” por permitirme ser parte de ese grupo y que con el pasar del tiempo se fueron convirtiendo en grandes colegas de aprendizaje.

A los técnicos del laboratorio de la Unila: Paula, Luciano, Dalila y en especial a Andrey quien me brindo informaciones y me colaboro con la realización de algunos ensayos, al técnico de edificaciones de la IFPR por las orientaciones en el momento del beneficiamiento, al Ing. Diego Galeano por realizar el ensayo de DRX, al técnico Sandy Gonzales por realizar el ensayo en el MEB para el análisis microestructural, a las directoras María da Mata y Fabiola quienes me permitieron el uso de la prensa en el laboratorio de edificaciones y mecánica de suelos del colegio Estadual Profesor Flavio Warken.

Y finalmente a Dios por ser luz en todo mi camino.

“Es difícil decir lo que es imposible, porque el sueño de ayer es la esperanza de hoy y la realidad de mañana”.

– **Robert H. Goddard.**

“Ama Sua”, “Ama Llulla”, “Ama Quella”. No robar, no mentir, ni ser flojo, principios ético-morales de la sociedad plurinacional.

– **Constitución Política del estado plurinacional de Bolivia, Capítulo segundo, Artículo 8.**

CONDE MEJIA, Gladys Reina. **Evaluación del mejoramiento de suelo residual blando con columnas de suelo-cemento-RCD para viabilizar el uso de cimentaciones superficiales**. 2022. 75 páginas. Trabajo de Conclusión de Curso (Graduación en Ingeniería Civil de Infraestructura) – Universidad Federal de Integración Latino-Americana, Foz do Iguazu, 2022.

RESUMEN

Cimentaciones profundas están siendo utilizadas en construcciones de pequeño porte, como solución a capas superficiales de suelos residuales de origen basáltico. Técnicas de estabilización están siendo investigadas para tratar estos suelos con columnas de suelo-cemento. Sin embargo, no se ha estudiado todavía la posibilidad de incorporar residuos de la construcción y demolición (RCD) a las columnas de suelo cemento. Ante esta situación, el presente trabajo pretende evaluar experimentalmente el mejoramiento de un suelo residual blando con columnas de suelo-cemento-RCD, todo esto como forma de viabilizar el uso de cimentaciones superficiales. La investigación consiste en realizar ensayos de resistencia a la compresión simple de materiales compactados con dosajes de suelo natural puro, suelo+10%RCD, suelo+20%RCD, suelo+40%RCD y 100%RCD, y los mencionados con adición de 9% de cemento. También se incluyen los ensayos de caracterización física, difracción de rayos X y microscopia electrónica de barradura. Por otra parte, se evalúa la comparación de dos metodologías de preparación de las muestras, compactado y plástico para el dosaje de mayor resistencia. Los resultados muestran que el dosaje de 9% de cemento con 91% de RCD es el más resistente, y el método compactado resultó más adecuado que el método plástico en relación a la resistencia. De esa forma se concluye que es promisorio realizar el mejoramiento de suelo con columnas del dosaje de 9% de cemento con 91% de RCD compactado, para el uso de cimentaciones superficiales.

Palabras-clave: Columnas de suelo-cemento-RCD, Mejoramiento de suelo, Suelo residual blando, fundaciones superficiales.

CONDE MEJIA, Gladys Reina. **Evaluation of the improvement of soft residual soil with soil-cement-CDW columns to make possible the use of superficial foundations**. 2022. 75 pages. Course Conclusion Work (Graduation in Infrastructure Civil Engineering) – Federal University of Latin American Integration, Foz do Iguaçu, 2022.

ABSTRACT

Deep foundations are being used in small constructions, as a solution to superficial layers of residual soils of basaltic origin. Stabilization techniques are being investigated to treat these soils with soil-cement columns. However, the possibility of incorporating construction and demolition waste (CDW) into soil-cement columns has not yet been studied. Given this situation, the present work intends to experimentally evaluate the improvement of a soft residual soil with soil-cement-CDW columns, all this as a way to make the use of shallow foundations viable. The research consists of performing simple compressive strength tests on compacted materials with dosages of pure natural soil, soil+10%CDW, soil+20%CDW, soil+40%CDW and 100%CDW, and those mentioned with the addition of 9% cement. Physical characterization tests, X-ray diffraction and scanning electron microscopy are also included. On the other hand, the comparison of two sample preparation methodologies, compacted and plastic for the dosage of greater resistance, is evaluated. The results show that the dosage of 9% cement with 91%CDW is the most resistant, and the compacted method was more suitable than the plastic method in relation to resistance. In this way, it is concluded that it is promising to carry out the improvement of the soil with columns of the dosage of 9% of cement with 91% of compacted CDW, for the use of superficial foundations.

Keywords: soil-cement-CDW columns, Improvement of soil, Soft residual soil, Shallow foundations.

CONDE MEJIA, Gladys Reina. **Avaliação do melhoramento de solo residual mole com colunas de solo-cimento-RCD para viabilizar o uso de fundações superficiais**. 2022. 75 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

RESUMO

As fundações profundas estão sendo utilizadas em construções de pequeno porte, como solução a camadas superficiais de solos residuais de origem basáltica. Técnicas de estabilização estão sendo investigadas para tratar esses solos com colunas de solo-cimento. No entanto, a possibilidade de incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD) em colunas de solo-cimento ainda não foi estudada. Diante dessa situação, o presente trabalho pretende avaliar experimentalmente o melhoramento de um solo residual mole com colunas solo-cimento-RCD, tudo isso como forma de viabilizar o uso de fundações rasas. A pesquisa consiste em realizar ensaios simples de resistência à compressão em materiais compactados com dosagens de solo natural puro, solo+10%RCD, solo+20%RCD, solo+40%RCD e 100%RCD, e os citados com a adição de 9% cimento. Também estão incluídos ensaios de caracterização física, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura. Por outro lado, avalia-se a comparação de duas metodologias de preparo de amostras, compactadas e plásticas para a dosagem de maior resistência. Os resultados mostram que a dosagem de 9% de cimento com 91% de RCD é a mais resistente, sendo o método compactado mais adequado que o método plástico em relação à resistência. Desta forma, conclui-se que é promissor realizar o melhoramento do solo com colunas da dosagem de 9% de cimento com 91% de RCD compactado, para uso de fundações superficiais.

Palavras-chaves: Colunas de solo-cimento-RCD, Melhoramento do solo, Solo residual mole, Fundações superficiais.

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Perfil de Suelo Residual	18
Ilustración 2: Representación del perfil de suelo de Foz de Iguazú	19
Ilustración 3: Estaca, Resistencia de punta.....	22
Ilustración 4: Estaca, Resistencia de fuste	22
Ilustración 5: Principales componentes del cemento portland.....	23
Ilustración 6: Difracción de rayos- X del cemento portland CPIII-40RS	24
Ilustración 7: Composición química en porcentaje de dos arcillas brasileiras	24
Ilustración 8: Diagrama de difracción de rayos-x del suelo	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.....	27
Figura 2: Local de colecta de suelo a) Localizacion del campo experimental de geotecnia UNILA, b) Suelo.....	29
Figura 3: Adquisición del cemento	30
Figura 4: Adquisición de los RCD.....	31
Figura 5: Beneficiamiento del RCD	31
Figura 6: a) Materiales para el dosaje por separado, b) Suelo + %RCD, c) Suelo + Cemento + %RCD, d) Cemento + 91%RCD	33
Figura 7: Composición gravimétrica del RCD por separación táctil-visual	35
Figura 8: Análisis del pH	36
Figura 9: Análisis granulométrico por tamizado.....	37
Figura 10: Masa especifica de sólidos	38
Figura 11: Ensayo de compactación	39
Figura 12: Moldeo para el ensayo de compresión axial de suelo.....	40
Figura 13: Tiempo de cura	41
Figura 14: Compresión axial simple	42
Figura 15: Análisis de difracción de rayos x (DRX)	43
Figura 16: Análisis microestructural en el MEB	44

Figura 17: Moldeo del CP del material que compone C+91%RCD, método compactado	45
Figura 18: Tiempo de cura método compactado	45
Figura 19: Compresión axial del C+91%RCD	46
Figura 20: Determinación del índice de consistencia	48
Figura 21: C+91%RCD moldado por el método plástico	49
Figura 22: Tiempo de cura, método plástico	49
Figura 23: Determinación de la resistencia a compresión del material C+%RCD	50
Figura 24: Composición Gravimétrica	51
Figura 25: Curva granulométrica de materiales estudiados	52
Figura 26: Curva de compactación para materiales sin cemento.....	54
Figura 27: Curva de compactación para materiales con cemento.....	55
Figura 28: Diagrama de difracción de Rayos-X del suelo	56
Figura 29: Diagrama de difracción de Rayos-X del RCD	56
Figura 30: Diagrama de difracción de Rayos-X del S+10%RCD.....	57
Figura 31: Diagrama de difracción de Rayos-X del S+20%RCD.....	57
Figura 32: Diagrama de difracción de Rayos-X del S+40%RCD.....	58
Figura 33: Diagrama de difracción de Rayos-X del C+RCD, compactado	58
Figura 34: Diagrama de difracción de Rayo-X del C+RCD, plástico	59
Figura 35: Microestructura y mapeo de los elementos silicio (Si), calcio (Ca) - a) C+91%RCD por el método plástico, b) C+91%RCD por el método compactado.....	60
Figura 36: Microestructura de la muestra de C+91%RCD trabajado por el método plástico	60
Figura 37: Microestructura de la muestra de C+91%RCD trabajado por el método compactado.....	61
Figura 38: Curva tensión Vs Deformación de materiales sin cemento	62
Figura 39: Influencia del %RCD en el suelo	63
Figura 40: Decrecimiento de la resistencia con relación al suelo.....	63
Figura 41: Influencia del tiempo en el SC+20%RCD.....	64
Figura 42: Influencia del tiempo en el SC+40%RCD.....	64
Figura 43: Influencia del tiempo en el SC+Δ%RCD	65
Figura 44: Líneas de crecimiento de las resistencias en el tiempo	65
Figura 45: Influencia del tiempo de C+91%RCD, por el método plástico.....	66

Figura 46: Crecimiento de la resistencia, método plástico	66
Figura 47: Influencia del tiempo y comparación de metodologías para el C+91%RCD	66

LISTA DE TABELAS

Tabla 1: Dosaje de los materiales	33
Tabla 2: Ensayos realizados a los materiales de la tabla 1	34
Tabla 3. Resultados del ensayo de gravimetría	51
Tabla 4: Resultados de pH.....	52
Tabla 5. Distribución granulométrica de los materiales según la ABNT	53
Tabla 6: Resultados de la masa específica de sólidos	53
Tabla 7. Valores óptimos para materiales sin cemento.....	54
Tabla 8. Valores óptimos para material con cemento.	55
Tabla 9: Propiedades de los materiales	62
Tabla 10: Resumen de los picos alcanzados en la curva tensión deformación para SC+20%RCD	64
Tabla 11: Resumen de los picos alcanzados en la curva tensión deformación para SC+40%RCD	64

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARC	Agregado de Residuo de Concreto
ARM	Agregado de Residuo Mixto
ASTM	American Society for Testing and Materials
CONAMA	Consejo Nacional do Meio Ambiente
CP	Cuerpos de Prueba
CP`s	Cuerpos de Prueba
C+91%RCD	9% de Cemento + 91% de RCD
DRX	Difracción de rayos x
Fig.	Figura
IFPR	Instituto Federal de Paraná
Il.	Ilustración
LAGEO	Laboratorio de Mecanica de Suelos y Geotecnia
MEB	Microscopio Electronico de Barredura
NBR	Norma Brasileira
NSPT	Number Standard Penetration Test
RCD	Residuos de Construcción y Demolición
S	Suelo
S+10%RCD	90% de Suelo + 10% de RCD
S+20%RCD	80% de Suelo + 20% de RCD
S+40%RCD	60% de Suelo + 40% de RCD
S+Δ%RCD	Suelo + variacion del % de RCD (10%, 20% o 40%)
SC	Suelo Cemento
SC-RCD	Suelo Cemento RCD
SC+10%RCD	91% (90% de Suelo+10% de RCD) + 9% Cemento
SC+20%RCD	91% (80% de Suelo+20% de RCD) + 9% Cemento
SC+40%RCD	91% (60% de Suelo+40% de RCD) + 9% Cemento
SC+Δ%RCD	(Suelo + variacion del % de RCD (10%, 20% o 40%))+ 9% Cemento
SRM	Suelo Residual Maduro
SRJ	Suelo Residual Joven
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
UTFPR	Universidade Tecnologica Federal do Paraná
Y _{dmax}	Peso especifico seco maximo

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	16
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo general	17
2.2 Objetivos específicos.....	17
3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Suelo residual - blando.....	18
3.2 Mejoramiento de suelo blando aplicando columnas.....	19
3.3 Residuos de construcción civil (RCD).....	20
3.4 Conceptos básicos de cimentaciones.....	21
3.5 Composición química del cemento, suelo y RCD	22
3.5.1 Cemento.....	22
3.5.2 Suelo	24
3.5.3 Residuo de construcción y demolición (RCD)	25
4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
4.1 Adquisición,colecta y preparación de los materiales	29
4.1.1 Suelo	29
4.1.2 Cemento.....	29
4.1.3 Residuos de Construcción y Demolición (RCD)	30
4.1.4 Agua.....	32
4.2 Dosaje de los materiales.....	32
4.3 Ensayos de caracterización física, química y mineralógica.....	33
4.3.1 Ensayos físicos y químico	35
4.3.2 Análisis Mineralógico.....	42
4.3.3 Análisis microestructural (MEB)	43
4.4 Metodología de trabajo para la evaluación de la resistencia del material que compone C+91%RCD.....	44
4.4.1 Método compactado.....	44
4.4.2 Método Plástico.....	47
5 RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	51
5.1 Caracterización física y química.....	51
5.2 Caracterización mineralógica y microestructural	55
5.2.1 Caracterización mineralógica	55
5.2.2 Caracterización microestructural	59
5.3 Resistencia a la compresión	61
5.3.1 Resistencia a compresión de materiales por el método compactado.....	61
5.3.2 Resistencia a compresión del C+91%RCD por el método plástico.	65
5.3.2 Comparación de resultados del método compactado y plástico.....	66

6 CONSIDERACIONES FINALES.....	67
7 PROPUESTAS PARA TRABAJOS FUTUROS.....	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

1 INTRODUCCIÓN

La ciudad de Foz de Iguazú y alrededores presenta algunos lugares, suelos residuales blandos, caracterizado por $N_{spt} < 5$ (PDDIS FOZ, 2016). Debido a la baja capacidad portante de este tipo de suelos por lo general se inviabiliza el uso de cimentaciones superficiales. Por ese motivo, las cimentaciones profundas son una solución comúnmente adoptada (VENDRUSCULO, 1996), donde generalmente se profundiza hasta alcanzar capas de mayor competencia. Para el caso de edificaciones de bajo porte, o sea, cargas de pilares leves, el porcentaje de costo de la cimentación en relación con la edificación puede resultar elevada. Chellis (1971) menciona que para estos casos las fundaciones profundas no siempre es una solución técnica y económica, dado que existe también la posibilidad de ejecutar un mejoramiento del suelo.

La incorporación de RCD como material de las columnas de suelo-cemento-RCD, contribuyen con reducir el problema de disposición del residuo en Foz de Iguazú, donde en la actualidad existe un excedente de RCD. Así la utilización de estos materiales ayuda a reducir los volúmenes de disposición y mitigar los impactos ambientales generados por el residuo. De la misma forma el reúso del suelo residual excavado en la construcción de las columnas ayuda a reducir los impactos causados por el empleo de materiales convencionales y que son traído de una cantera.

Souza, Segantini y Pereira (2006), estudian la influencia de la adición del residuo de concreto, en las características físicas y mecánicas del suelo-cemento, aplicado a ladrillos prensados, obteniendo resultados favorables. En el presente trabajo se busca materiales semejantes para la creación de columnas que cumplan la función de poder reforzar un suelo residual blando, con el fin de poder viabilizar cimentaciones superficiales en este tipo de suelos, mediante ensayos experimentales.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar el mejoramiento de suelo residual blando con columnas de suelo-cemento-RCD para viabilizar el uso de cimentaciones superficiales en edificios de bajo porte, mediante ensayos de resistencia a la compresión simple.

2.2 Objetivos específicos

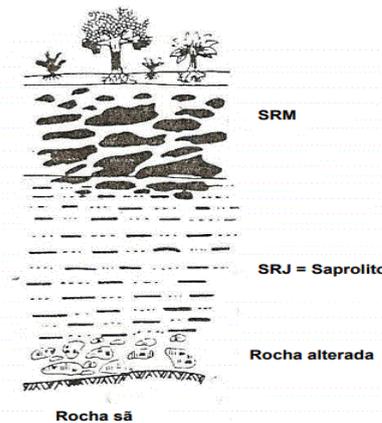
- a) Analizar la influencia del RCD en la resistencia a compresión del suelo
- b) Analizar la influencia del cemento en la resistencia a compresión de la mezcla suelo - RCD;
- c) Evaluar la influencia del tiempo de cura en la resistencia a compresión de muestras de suelo-cemento-RCD;
- d) Comparar la resistencia a la compresión de materiales de cemento-RCD compactado y plástico;
- e) Analizar la composición mineralógica del material de mayor resistencia a la compresión.
- f) Analizar la microestructura del material de mayor resistencia a compresión.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Suelo residual blando

Los paisajes terrestres son cubiertos por suelos que retratan la acción de procesos geodinámicos, la roca expuesta a condiciones climáticas extremas se fractura y sufre transformaciones debido al proceso de meteorización (intemperismo), formando así partículas de diversas composiciones y diámetros, si parte de estas partículas permanecen “in situ” dan lugar a los suelos residuales (ANTUNES, et al 2015). La (Il. 1) muestra las partes de un suelo residual de origen basáltico, por lo general está formado por suelo residual maduro (SRM), suelo residual joven (SRJ), roca alterada, y la roca madre. El suelo residual maduro, se localiza en la parte superficial del perfil del suelo, y se caracteriza por haber sido sometido a varios grados de transformación desde su inicio como SRJ (intensos procesos de intemperismo). Por otra parte, el suelo residual joven, localizado en la parte sub-superficial del mismo perfil, tiene características mineralógicas y estructurales heredadas de la roca de origen, debido a su menor nivel de meteorización (ANTUNES, et al., 2015).

Ilustración 1: Perfil de Suelo Residual

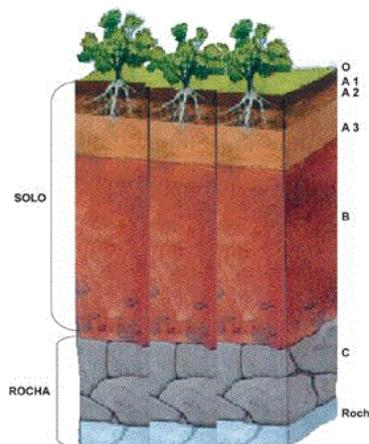


Fuente: Press/Steven 1974

Los materiales cohesivos como las arcillas por lo general son parte del SRM, clasificados por su consistencia según la NBR 6484 (ABNT, 2001), los suelos blandos son aquellos que presentan valores de NSPT menores e igual a 5. Otra forma de clasificar consiste en realizar una verificación táctil, si el suelo logra escapar de entre los dedos sería muy blando, caso contrario sería blando.

Los suelos residuales blandos existen en algunas regiones de Brasil como la región Sur. En Foz de Iguazú la mayoría son suelos de textura arcillosa, originada de la descomposición de rocas basálticas, y del tipo latossolo, específicamente desde la Presa de Itaipu hasta las proximidades del eje principal a inicios de la Avenida Juscelino Kubitschek, se tiene un suelo residual maduro con NSPT's relativamente bajos, o sea suelo residual blando (PDDIS FOZ, 2016). Otro ejemplo de suelo residual blando es informado por DSOARES (2015) en el área correspondiente a la residencia estudiantil de la UNILA. En la (Il. 2) se presenta el perfil característico del suelo residual blando de Foz de Iguazú.

Ilustración 2: Representación del perfil de suelo de Foz de Iguazú



Fuente: Itaipu binacional

3.2 Mejoramiento de suelo blando aplicando columnas

La estabilización de suelos es una técnica antigua desenvuelta principalmente para pavimentación, este conjunto de procesos no solamente es utilizado en el área de pavimentación sino también en diversas áreas, como fundaciones, contenciones de taludes y presas (VENDRUSCULO, 1996). Algunos métodos para mejorar el suelo incluyen la densificación, refuerzo, el uso de estabilizadores químicos, estabilización mecánica, y la precarga (BARENDS et al. 2011). Chellis (1971) muestra una serie de técnicas de mejoramiento como la inyección de lechada de cemento portland, otras inyecciones con silicato de sodio, cloruro de calcio, sulfato de aluminio, y otros. En esa línea de estabilizaciones químicas, la mezcla de suelo-cemento trabaja de manera similar al concreto sin embargo es menos resistente, la misma debido a la forma de unión de sus granos (VENDRUSCOLO, 1996).

Cimentaciones en suelos blandos por lo general requieren el empleo de técnicas del mejoramiento del terreno, principalmente la resistencia al corte del suelo (SAID et al. 2018). Diversos autores estudiaron la utilización de estacas o columnas para el mejoramiento de suelo blando . Por ejemplo, Rashid et al (2018) e Said et al. (2018) estudian el mejoramiento de suelos blandos utilizando columnas de suelo cemento y ensayo de prueba de carga con placa en experimentos físicos reducidos, donde efectivamente con la técnica utilizada llegaron a una reducción de la deformación del suelo. Bergado et al. (1999) realizó la estabilización de un terreno blando con columnas de suelo cemento para la cimentación de un terraplén, obteniendo resultado favorables, los presentes autores trabajaron en laboratorio y en campo, las deformaciones verticales y horizontales pronosticadas se compararon y coincidieron con los valores correspondientes observados en campo. Anágua (2019) realizó ensayos a escala completa en zapatas cimentadas sobre suelo estabilizado con columnas de suelo cemento, en relación al los recalques de suelo natural, se consiguió reducir en hasta diez veces el valor.. Estos últimos investigadores muestran que la mejora de suelos blando puede realizarse con columnas flotantes, o sea que no sería necesario alcanzar capas de consistencia media o dura.

3.3 Residuos de construcción civil (RCD)

En el área de construcción civil se genera grandes volúmenes de residuos, Pinto (1999), estimó que en Brasil el RCD generado en actividades de reforma, mantenimiento y demolición varía entre 42% y 80% del total generado en obras. La resolución 307, de julio del 2002, del consejo nacional del medio ambiente (CONAMA), indica que los residuos de construcción civil son aquellos provenientes de las construcciones en proceso, de reformas, reparos y demoliciones de obras civiles, que son: “ladrillos, bloques de cerámica, hormigón en general, suelos, roca, metales, resinas, colas, tinta, maderas, forros, mortero, tejas, pavimento asfáltico, vidrios, plásticos, tabulaciones, conexiones eléctricas, etc. La NBR 15116 (ABNT, 2004), Conforme la resolución del CONAMA 307, clasifica los residuos según los riesgos potenciales al medio ambiente y la salud pública. La clase A, residuos reutilizables como agregados, la clase B, residuos reciclables para otras destinaciones, como puede ser (plástico, papel, metal, etc.). La clase C, que son residuos de origen natural

como ser el yeso. Clase D, residuos peligrosos como puede ser tintas, solventes, otros.

En la actualidad diversos autores destinan la utilización de los residuos de construcción civil a diversas actividades, donde es posible citar a Freire (2010), que utilizó los RCD en la producción de bloques de mortero sin la función estructural. En relación al refuerzo de cimentaciones, Pitta (2017) aplica los RCD como capa de refuerzo para una cimentación por placa, Ferreira et al. (2011) utiliza los RCD como una forma de refuerzo de un suelo residual de basalto, sirviendo así como una base de fundaciones superficiales.

3.4 Conceptos básicos de cimentaciones

Según, la NBR 6122 (ABNT 2019) las cimentaciones son divididas en dos tipos: cimentaciones superficiales y cimentaciones profundas. Las cimentaciones superficiales son elementos en que la carga es transmitido únicamente al terreno por las presiones distribuidas sobre la base de la cimentación (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011), cuando se trata de cimentaciones superficiales se habla de zapatas, los bloques, los radier, las vigas de cimentaciones, (VELLOSO; LOPES, 2011).

Según Rebello (2008) las cimentaciones directas o superficiales son definidas cuando las cargas de las edificaciones son transmitidas al suelo en las primeras capas, para eso el suelo debe tener resistencia suficiente en las primeras capas para soportar las cargas provenientes de la estructura.

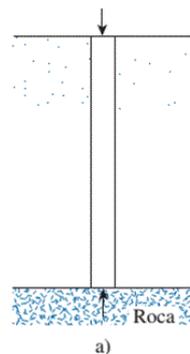
Según, Das (2015), para que las cimentaciones superficiales tengan un desempeño satisfactorio deben tener dos características principales:

1. Deben ser seguras contra la falla general por corte del suelo que las soporta;
2. No pueden experimentar un desplazamiento, o un asentamiento excesivo.

Por otra parte las cimentaciones profundas, son más costosas que las cimentaciones superficiales, a pesar de ello, el uso de ese tipo de cimentaciones profundas, es necesario para afirmar la seguridad estructural, de ese modo Das, (2015) establece que cuando uno o más fragmentos de suelo son sutilmente compresibles y demasiado débiles para soportar la carga transmitida por la superestructura, cuando la carga al terreno es transmitida por la base es denominada

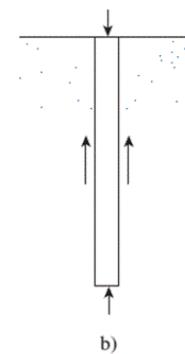
resistencia de punta, esta es apoyada sobre un estracto de suelo mas fuerte, como se muestra en la il. 3a. y cuando es transmitida por su superficie lateral es denominada resistencia de fuste, estos transmiten la carga estructural de manera gradual al suelo, que proviene principalmente de la resistencia por fricción que se genera en la interfaz suelo-cimentación. il. 3b, estas pueden ser denominadas como estacas flotantes.

Ilustración 3: Estaca, Resistencia de punta



Fuente: Braja Das, 2012

Ilustración 4: Estaca, Resistencia de fuste



Fuente: Braja Das, 2012

Antes de construir cualquier obra de ingeniería, existe la necesidad de investigar las condiciones del subsuelo del sitio propuesto para determinar si es adecuado, y establecer su capacidad para soportar la estructura propuesta evitando esfuerzos y deformaciones indeseables, también es importante verificar el material de relleno en la cual estará apoyada, en caso de encontrar condiciones de terreno adecuado, sería posible mejorar en el campo algunas propiedades mediante el uso de algunas técnicas propias de la geotecnia, (BERRY e REID, 1996).

3.5 Composición química del cemento, suelo y RCD

3.5.1 Cemento

Con el descubrimiento de aquel material, una mezcla calcinada de calcario y arcilla, la cual endurece con la presencia del agua, que más tarde fue bautizada como cemento portland, se da un gran paso en la construcción civil (SANTOS, 2004).

El cemento común es un polvo compuesto de 96% de clínquer y 4% yeso, donde la composición química del clínquer es aproximadamente de 80% de carbonato de calcio (CaCO_3) o llamado también de "calcita", 15% de dióxido de silicio (SiO_2) llamado también "silica libre" o "cuarzo", 3% de óxido de aluminio (Al_2O_3), llamado

también “alúmina”, y otros como oxido de ferro (Fe_2O_3), oxido de magnesio (MgO) (SANTOS, 2004).

En el proceso de fabricación del cemento portland son utilizados como materias primas, materiales calcario como ser, yeso, alúmina y silica, en la fabricación van en proporciones definidas de estos materiales a una temperatura de aproximadamente de 1450°C en un horno rotativo, donde es obtenido el clínquer en forma de esferas, después de enfriarlo son molidos resultando en un polvo de partículas con diámetros menores a 0.075 mm y con la adición de yeso resulta en cemento portland (NEVILLA, 1997). En seguida se presenta una ilustración con los principales componentes del cemento portland.

Ilustración 5: Principales componentes del cemento portland

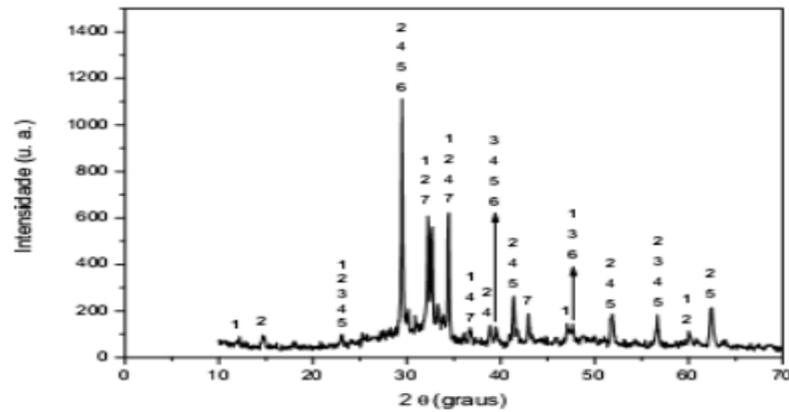
Nome	Composto	Abreviação	Teor (%)
Silicato tricálcio	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	42 – 60
Silicato dicálcio	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	14 – 35
Aluminato tricálcio	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 – 13
Ferroaluminato tetracálcio	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5 – 10
Gesso	$\text{CaSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$	CSH_2	1 – 4

Notação: CaO - C; SiO_2 - S; Al_2O_3 - A; Fe_2O_3 - F; SO_3 - S; H_2O - H.

Fuente: (NEVILLA,1997)

Existe una técnica que analiza la incidencia de radiación de una muestra y la detección de fotones difractómetros, esta técnica es llamada “difracción de rayos – x (DRX)”, la cual determina la estructura molecular de un cristal (GOBBO, 2009). En la (Il. 6), se muestra el diagrama de rayos-x del cemento portland CPIII-40RS, donde los componentes del cemento son: 1- Celita (C_4AF); 2- Alita (C_3S); 3- Carbonato de calcio; 4- Belita (C_2S); 5- Alumina tricálcico (C_3A); 6- Oxido de calcio; 7- Gipsita (Ca SO_4) (AMARAL, 2016).

Ilustración 6: Difracción de rayos- X del cemento portland CPIII-40RS



Fuente: AMARAL, 2016.

3.5.2 Suelo

La composición química de una arcilla varía según el lugar de donde es retirada, de la formación geológica del terreno, de la era de formación, de la influencia hidrotermal ejercida sobre el material (BITENCOURT, 2004).

Caldas (2012) realiza un análisis químico de 2 arcillas brasileras (A y B), proveniente de “Campos dos Goytacazes -RJ” y “Vale do Itajai -SC”, respectivamente, que pueden ser observados en la (Il. 7).

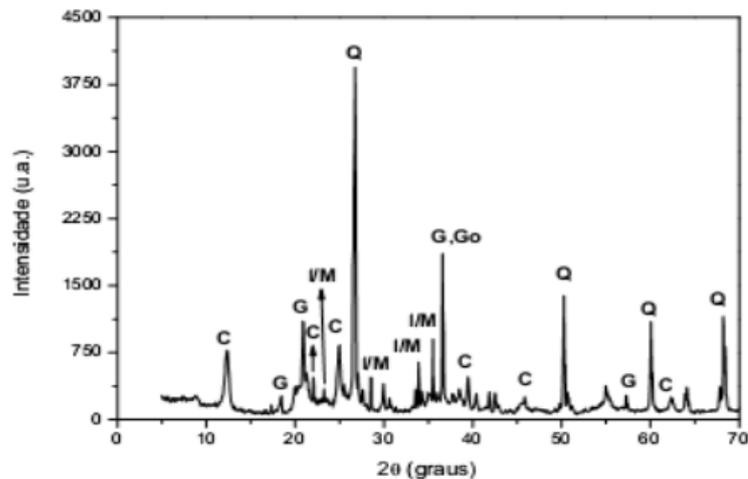
Ilustración 7: Composición química en porcentaje de dos arcillas brasileras

Argila	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
A	44.70	29.03	9.15	1.34	0.28	1.09	1.55	0.4
B	72.4	11.82	3.75	0,84	0.34	0.52	0.23	0.1

Fuente: CALDAS, 2012

Para conocer los minerales de cualquier material existe la técnica de difracción de rayo-x mencionada anteriormente, en la (Il. 8) se presenta el diagrama de difracción de rayo-x de un suelo arenoso colectado en la empresa Artecerámica Sardinha localizada en la región de Campos dos Goytacazes – RJ. Donde son encontrados picos característicos de: C - caulinita, G - gibsita, I/M - ilita/mica, Q - cuarzo y Go - goetita. (AMARAL, 2016).

Ilustración 8: Diagrama de difracción de rayos-x del suelo



Fuente: AMARAL, 2016

El cuarzo (SiO_2), es un material encontrado en las arcillas y suelos, contribuye con la reducción de la plasticidad (AMARA, 2016), la caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) es constituido básicamente de silicio (SiO_2) y alumina (Al_2O_3) que es el principal arcillomineral característico de la arcilla roja, (VIEIRA et al., 2001). La Illita/mica presenta minerales ricos en oxido fundentes, que son responsables por generar la fase liquida. La gipsita ($\text{Al}_2(\text{OH})_6$ ou $\text{Al}(\text{OH})_3$) contribuye con el aumento de la pérdida de masa durante la quema. (SIQUIERA, 2013) y los picos de goetita (FeOOH) revelan el contenido de hierro presente en el suelo (SANDOVAL et al.,2004).

3.5.3 Residuo de construcción y demolición (RCD)

Hasta el día de hoy el alto consumo de recursos naturales hace que la industria de la construcción civil necesite alcanzar el equilibrio entre productividad y sustentabilidad (MEDEIROS, et al., 2018).

La composición química del RCD puede ser uno de los parámetros decisivos en la evaluación de la posibilidad de utilización de material reciclado, pueden variar sus características físicas, teniendo dimensiones y geometrías semejantes a los materiales de construcción convencional (arena y brita) o hasta tener granos con formatos irregulares (MORAND, 2016).

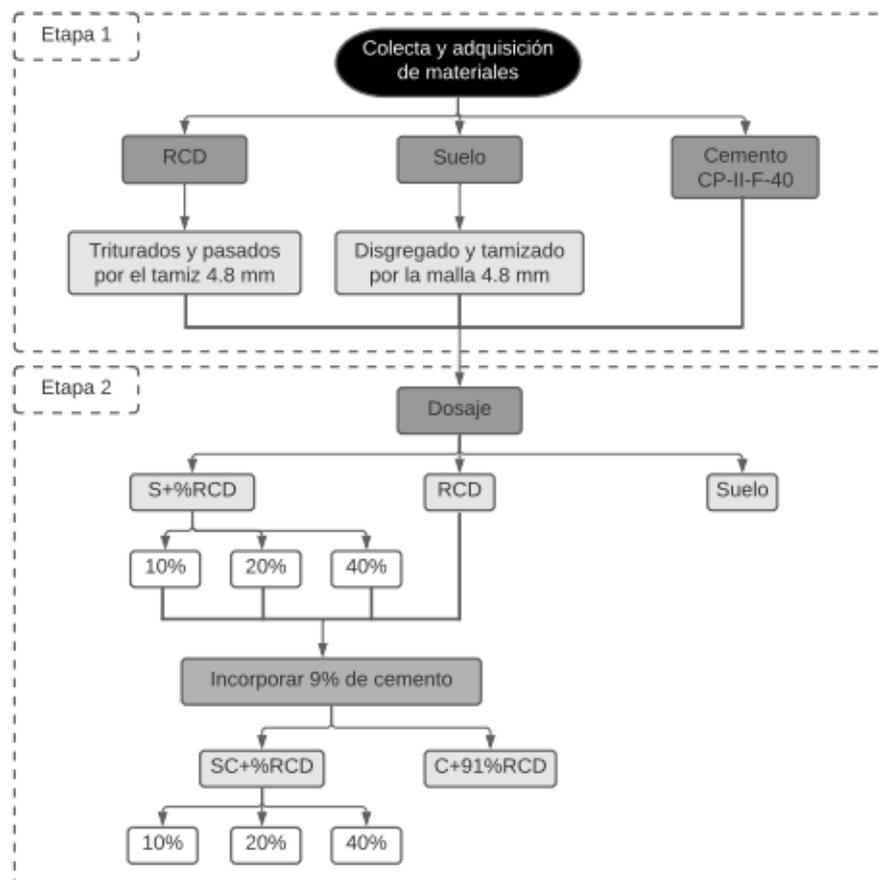
En la composición química de RCD se tiene a la "sílica" (SiO_2) que es el principal oxido constituyente del RCD, con cantidades entre 48% y 84%, su origen está asociada a los agregados naturales de concreto y del mortero presentes en el RCD, la "alúmina" (Al_2O_3) y el oxido de calcio (CaO) son otros óxidos representativos,

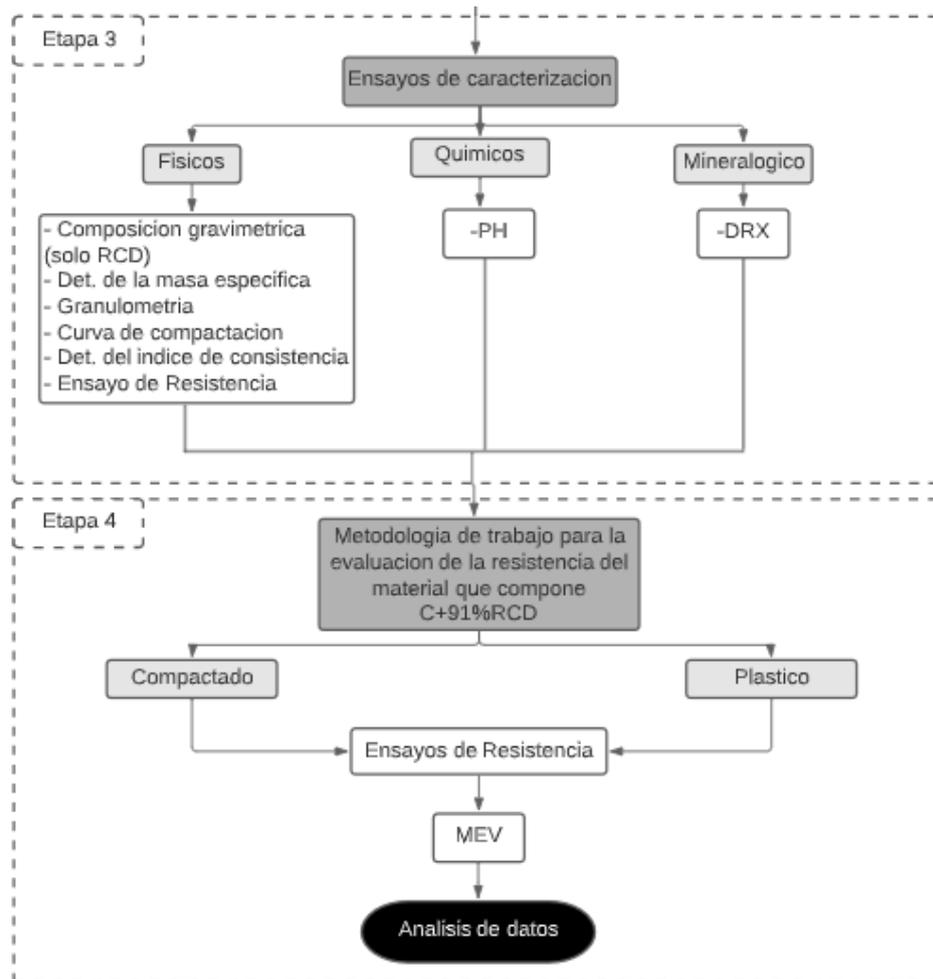
con cantidades de entre 4.7 y 11% y entre 2.4 y 14%, respectivamente. La Alúmina está relacionado a la presencia de la cerámica roja, el óxido de calcio está asociado a los aglomerantes (pasta de cemento endurecido, cal, yeso, etc.) (ULSEN, 2010), también se puede encontrar carbonato de calcio (CaCO_3) la cual es el principal constituyente del clínquer y la escoria del alto horno utilizada en la fabricación del cemento (AMARAL, 2016).

4 MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología cuenta con carácter experimental, la misma que es resumida en la Figura 1: Diagrama de flujo de la metodología de trabajo, la cual es dividida en 4 etapas, inicialmente se realiza la adquisición y colecta de los materiales para los ensayos de laboratorio, los cuales son, suelo residual basáltico de la región, cemento CP II-F-40 y residuos de construcción civil (RCD) pasados por el tamiz 4.8mm en cantidades necesarias para poder ejecutar el proyecto, estos residuos deben pertenecer a la clase A, según la clasificación de la NBR 15116 (ABNT, 2004). En la segunda etapa se realizan los respectivos dosajes, donde al suelo se le incluye una variación de porcentajes de residuo de construcción civil (RCD) y más adelante se le incorpora 9% de cemento a los materiales iniciales, resultando un total de 9 materiales. En la tercera etapa se realizan los ensayos de caracterización de los materiales en estudio. En una cuarta etapa se realiza la comparación de los dos métodos de preparación de la muestra que compone C+91%RCD, estos métodos son el compactado y plástico respectivamente. Finalmente, con una pequeña muestra de los CP's de cada método, se realiza el análisis microestructural.

Figura 1: Diagrama de flujo de la metodología de trabajo





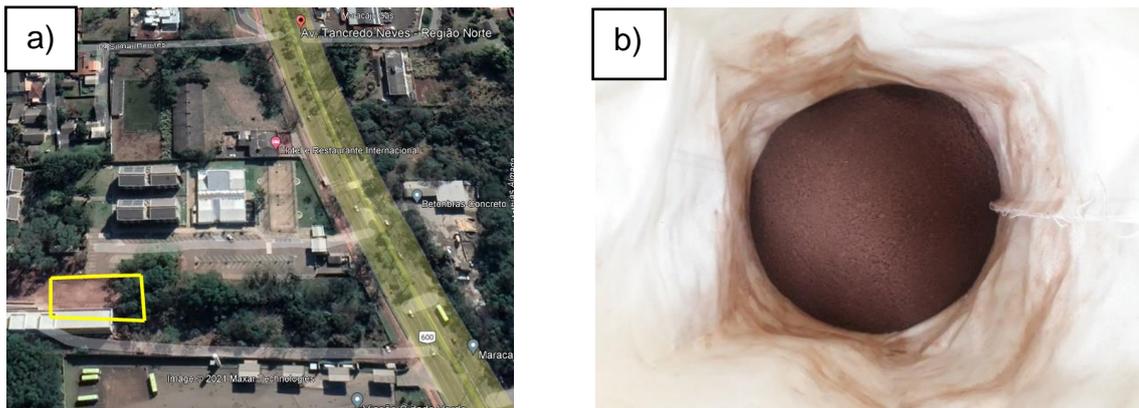
4.1 Adquisición,colecta y preparación de los materiales

4.1.1 Suelo

El suelo residual es colectado del campo experimental de geotecnia de la UNILA, localizada al lado de la residencia estudiantil UNILA, Av. Tancredo Neves, Foz de Iguazú (Fig. 2a). Es importante mencionar que el suelo fue colectado a 1 m de profundidad, y posteriormente transportado en sacos de tela hacia la cámara húmeda del laboratorio de geotecnia y suelos (LAGEO) de la UNILA, almacenado a una temperatura de aproximadamente 20 a 25°C.

La preparación del material consistió en el proceso de disgregación de los terrones, con ayuda de un mortero y tamizado por la malla de 4.8 mm de abertura. Finalmente el material fue estocado en los mismos sacos quedando almacenada en la cámara humedad para su posterior uso(Fig. 2b).

Figura 2: Local de colecta de suelo a) Localizacion del campo experimental de geotecnia UNILA, b) Suelo.



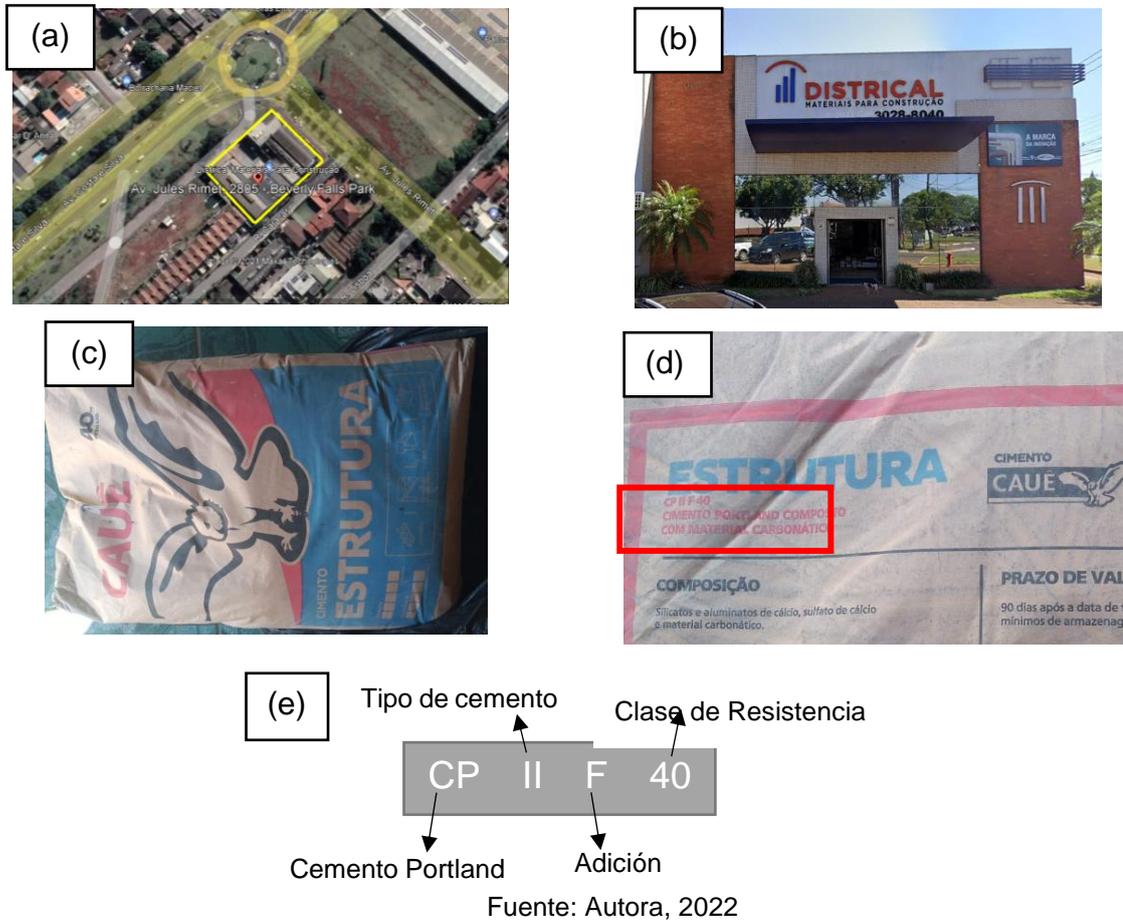
Fuente: Autora, 2022

Nota: la imagen (a) fue obtenida del Google Hearth Pro

4.1.2 Cemento

El cemento fue adquirido en la tienda de materiales “Districial materiais para construção” ubicado en la Av. Jules Rimet, 2805 - Beverly Falls Park, Foz do Iguazu (Fig. 3a y Fig. 3b). El tipo de cemento utilizado para los ensayos fue el CP-II-F-40 (Fig. 3c y Fig. 3d), de la marca caué, la nomenclatura del cemento es definida conforme (Fig. 3e), y fue escogido debido a que gana una mayor resistencia en las primeras edades.

Figura 3: Adquisición del cemento

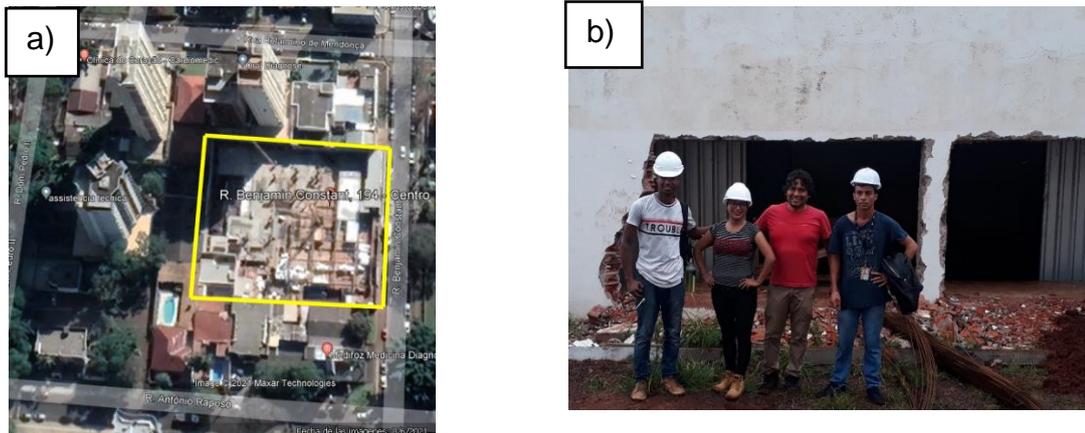


Nota: la imagen (a) y (b) fue obtenida del Google Hearth Pro

4.1.3 Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

Para este punto fue recolectado residuos de construcción civil de clase A, respetando los criterios de la NBR 15116 (ABNT, 2004), la colecta fue procedente de una reforma, dicha obra se encuentra localizada en la Rua Benjamin Constant 194, obra do edificio day saude en el centro de Foz de Iguazú (Fig. 4a), el RCD adquirido para el uso de los ensayos correspondía a una pared demolida, (Fig. 4b). Para realizar la respectiva colecta fue necesario verificar que dicho material no contenga yeso y que no hubiese estado en contacto con el suelo. Adicionalmente se clasifica de forma visual que el ladrillo y el cemento tengan proporciones similares. Consiguiendo transportar cinco sacos de tela al LAGEO para su respectivo almacenamiento y posterior uso.

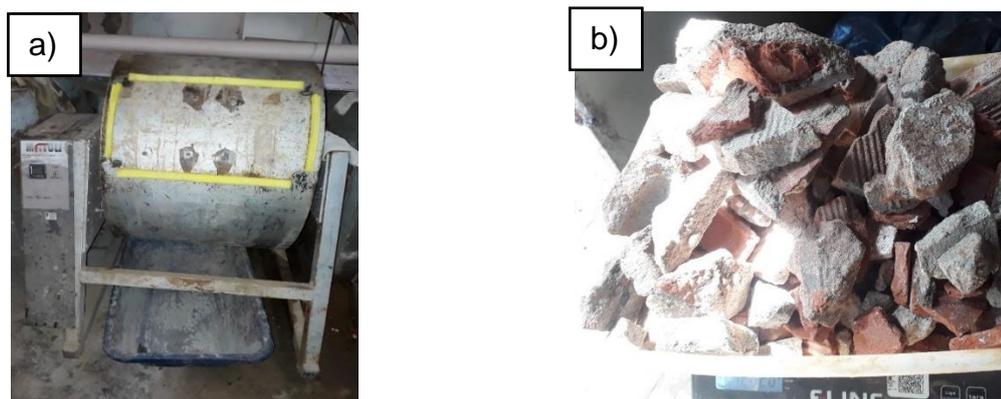
Figura 4: Adquisición de los RCD

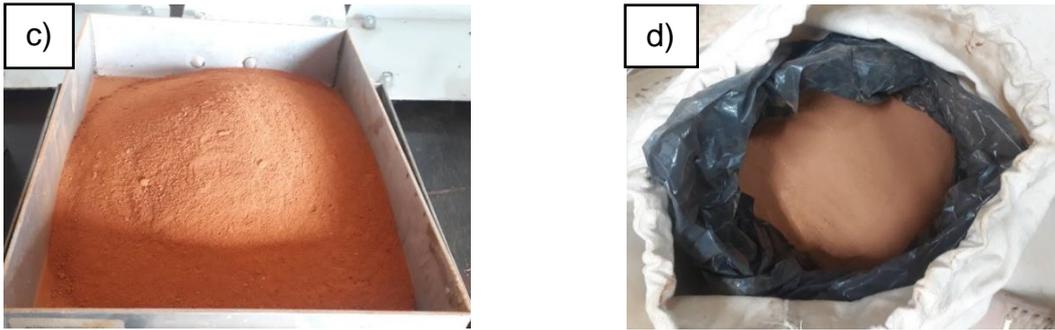


Fuente: Autora, 2022

Los residuos de construcción fueron triturados en las instalaciones de la UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Parana), con la máquina de abrasión “Los Ángeles” (Fig. 5a). El período de beneficiamiento fue de 4 horas para 12 kilos, lo que significaría aproximadamente 24 kilos de RCD producidos por día trabajado; así para obtener cerca de 180 kilos, fueron necesarios 8 días. Para introducir los materiales en la maquina se tuvo presente las cantidades entrantes, referentes a un 50% de cemento y un 50% de ladrillo (Fig. 5b), posteriormente para los ensayos fue pasado por la malla #4 (4.8mm) (Fig. 5c) y almacenado en sacos de nylon con base externa en la cámara húmeda a temperatura ambiente (Fig. 5d), el saco de nylon fue utilizado para evitar pérdidas de humedad.

Figura 5: Beneficiamiento del RCD





Fuente: Autora, 2022

4.1.4 Agua

El agua utilizada para la mezcla de nuestro material suelo, cemento y residuos de construcción y demolición (SC-RCD) fue colectada de la red pública de Foz de Iguazú.

4.2 Dosaje de los materiales

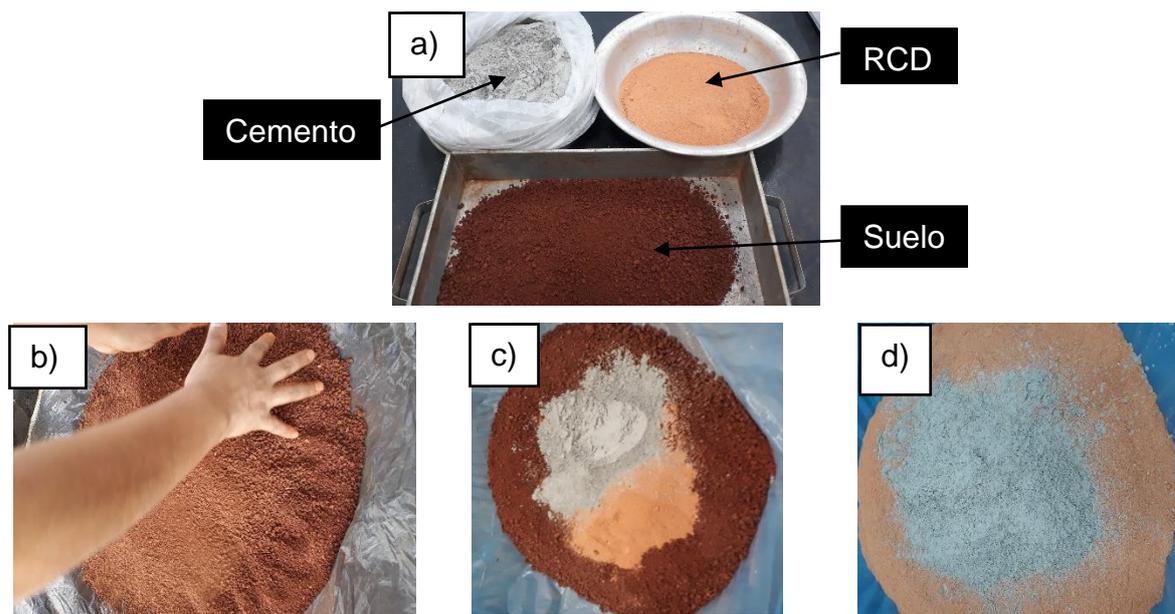
La dosificación de los materiales se realizó incluyendo inicialmente una variación en porcentajes de RCD al suelo, esas variaciones son presentadas en 10%, 20% y 40%, obteniendo así un primer material que es de 100% suelo, un segundo material que compone un 90% de suelo y un 10% de RCD, un tercer material que compone un 80% de suelo y un 20% de RCD, un cuarto material que compone un 60% de suelo y un 40% de RCD y un quinto material que compone un 100% de RCD. Individualmente a cada material se le fue adicionando un 9% de cemento, resultando así, un sexto material que compone 91% del primero material (90% suelo y 10% RCD) más un 9% de cemento, un séptimo material que compone 91% del segundo material (80% suelo y 20% RCD) mas 9% de cemento, un octavo material que compone 91% del tercer material (60% suelo y 40% RCD) más el 9% de cemento y finalmente se obtiene un noveno material que se compone de 91% RCD más 9% de cemento. En la tabla 1, se presenta un resumen de los materiales trabajados y una exposición de sus respectivas nomenclaturas que serán utilizadas a partir de este punto, esto con el objetivo de simplificar la mención de los materiales.

Tabla 1: Dosaje de los materiales

	Material	Nomenclatura
1	100%Suelo	S
2	90%Suelo+ 10%RCD	S+10%RCD
3	80%Suelo + 20%RCD	S+20%RCD
4	60%Suelo + 40%RCD	S+40%RCD
5	100%RCD	RCD
6	91% (Suelo+10%RCD) + 9% Cemento	SC+10%RCD
7	91% (Suelo+20%RCD) + 9% Cemento	SC+20%RCD
8	91% (Suelo+40%RCD) + 9% Cemento	SC+40%RCD
9	91%RCD + 9% Cemento	C+91%RCD

En la siguiente (Fig. 6), se muestran unas imágenes de algunos materiales dosados y trabajados respectivamente.

Figura 6: a) Materiales para el dosaje por separado, b) Suelo + %RCD, c) Suelo + Cemento + %RCD, d) Cemento + 91%RCD



Fuente: Autora, 2022

4.3 Ensayos de caracterización física, química y mineralógica

Los ensayos de caracterización física y mineralógica de los materiales fueron seguidas según los procesos normalizados por la ABNT, ASTM y las recomendaciones sugeridas en la literatura. Las muestras para el ensayo de masa específica, granulometría, compactación fueron preparadas de acuerdo a la NBR 6457 (ABNT, 2016). Por otra parte, el ensayo de caracterización mineralógica (DRX), nos permite analizar los minerales presentes en los materiales de la tabla 1, también es realizado el análisis microestructural de aquel material encontrado como el más

resistente con el MEB y con el ensayo dinámico encontramos el módulo de elasticidad experimentalmente para materiales sin la adición de cemento.

En la siguiente tabla 2, se presentan los ensayos realizados a los materiales presentados en la anterior tabla 1.

Tabla 2: Ensayos realizados a los materiales de la tabla 1

Ensayos	Norma/Referencia	Materiales				
		S	S+%RCD	RCD	SC+%RCD	C+%RCD
Composición Gravimétrica	NBR 15116 (ABNT, 2004)			X		
Preparación de la muestra	NBR 6457 (ABNT, 2016)	X		X	X	
PH	Bowles, (1980)	X			X	X
Determinación de la masa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)	X			X	X
Granulometría	NBR 7181 (ABNT, 2018) y Bowles, (1980)		X	X	X	X
Compactación del suelo	NBR 7182 (ABNT, 1986)	X	X		X	X
Determinación de la resistencia a compresión de suelos	NBR 12770 (ABNT, 1996)	X	X		X	X
Preparo de la mezcla y determinación del índice de consistencia	NBR 13276 (ABNT, 2005)					X
Cámara húmeda y tanques para cuerpos de prueba	NBR 9479 (ABNT, 2006)					X
Determinación de la resistencia a compresión (cemento, mortero)	NBR 7215 (ABNT, 1996)					X
Análisis de difracción de rayo-x (DRX)	Amaral (ASTM, 2017)	X	X	X		
Análisis microestructural (MEB)	Amaral (ASTM, 2017)					X

4.3.1 Ensayos físicos y químico

- Composición Gravimétrica

Inicialmente se realizó el ensayo de composición gravimétrica del RCD, por medio de separación táctil-visual de las muestras, La NBR 15116 (ABNT,2004), prescribe que deben ser separados por fragmentos: (1) fragmentos que presentan pasta de cemento en más de 50% de su volumen; (2) fragmentos constituidos por rocas en más de 50% de su volumen; (3) fragmentos de cerámica en más de 50% de su volumen; (4) fragmentos de materiales no minerales de naturaleza orgánica. Si del RCD en estudio, la suma de los grupos 1 y 2 es mayor que 90% será considerado como agregado de residuo de concreto (ARC), caso contrario el será considerado como agregado reciclado mixto (ARM), en este caso como el RCD en estudio compone aproximadamente un 50% de cemento y 50% de ladrillo, se clasificará como un ARM.

Para este trabajo en particular es importante mencionar que para el tipo de RCD que se tiene, fue inviable la separación en masa, tal como menciona la norma, sin embargo, se buscó que el ARM componga valores equivalentes entre el cemento y ladrillo visualmente, esta tarea fue realizada tanto en la adquisición del RCD (Fig. 7a) como en las cantidades entrantes para su beneficiamiento (Fig. 7b). Finalmente para confirmar que el RCD se compone aproximadamente de 50% de cemento y 50% cerámica (Fig. 7c), se tomó una pequeña muestra de material, fue lavada por el tamiz de abertura 2mm (para dejar pasar aquel material que podría estar adherido, a las partículas mayores) y secado por 24 en la cámara húmeda, posteriormente fue separado visualmente el residuo de cerámica roja (Fig. 7d) y de concreto (Fig. 7e) y pesado cada uno.

Figura 7: Composición gravimétrica del RCD por separación táctil-visual

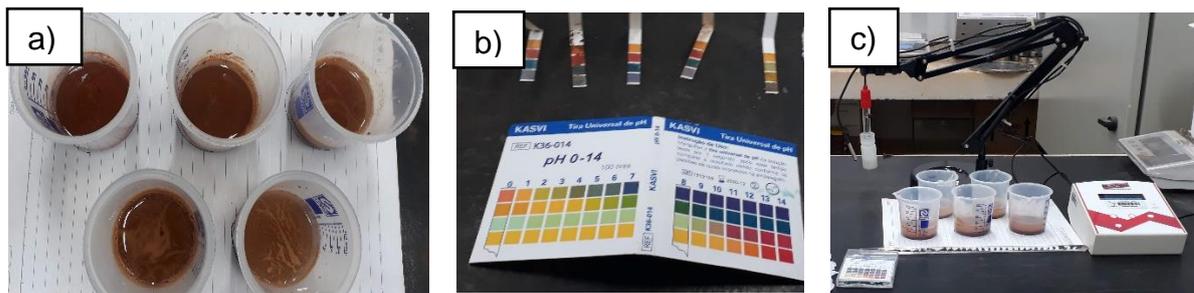


Fuente: Autora, 2022

- pH

Fue realizado el análisis del pH de los materiales a trabajar (S, SC+10%RCD, SC+20%RCD, SC+40%RCD y C+91%RCD) siguiendo los procesos descritos por (TEIXEIRA et al., 2017). Se añadió 25 ml de agua destilada en un bequer plástica de 100 ml el cual contenía 10 g de suelo, luego se mezcla la muestra con un bastón de vidrio individual por cerca de 60 (s) y dejando reposar 1 hora (Fig. 8a), después del reposo, se mezcla ligeramente cada muestra con un bastón de vidrio, para posteriormente sumergir la cinta de pH en la solución (sin que el mismo entre en contacto con la base del bequer) por 1 segundo, retirar el papel y realizar la lectura comparando con los patrones de colores (Fig. 8b), también se utilizó electrodos para realizar el análisis del pH, obteniendo por ambos instrumentos (cinta y electrodo) los mismos resultados (Fig 8c).

Figura 8: Análisis del pH



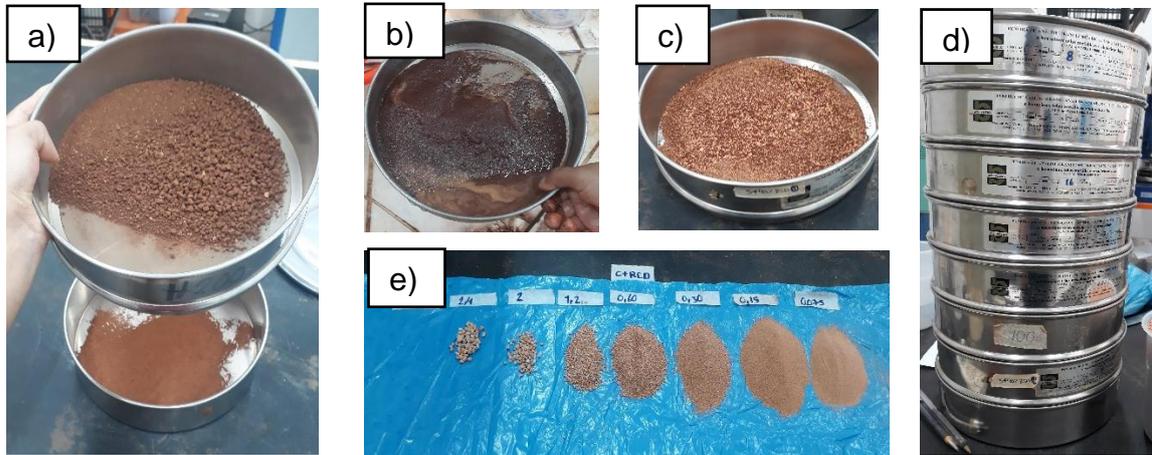
Fuente: Autora, 2022

- Granulometría

En seguida se realiza el análisis granulométrico por tamizado, este ensayo fue realizado siguiendo la NBR 7181 (ABNT, 1984), y Bowles (1980). Para saber la cantidad de material a utilizar fue necesario seguir lo que prescribe la ASTM D1140-54, donde menciona que el peso mínimo es de 200 g, para tamaños de la porción que pasa el tamiz de 4.8mm, el proceso para realizar el ensayo por ambas bibliografías es la siguiente, se toma 200 g de material, en seguida se deja pasar por el tamiz de 4.8 mm, todo lo que quedó retenido en el tamiz de abertura 0.075 mm (#200), debe ser lavada en el mismo tamiz #200 (Fig. 9a), en el lavado se debe evitar la caída directa del agua sobre la muestra (Fig. 9b), lavar hasta que la cantidad de agua saliente sea transparente. Posteriormente llevarlos a la estufa por un periodo de 24 hrs, pasado ese periodo, esa fracción retenida (Fig. 9c) fue sometida al tamizado manual. P el presente trabajo se utilizaron los tamices con aberturas de 4,8 mm, 2,4 mm, 2,00 mm, 1,20 mm, 600 μ m, 300 μ m, 150 μ m y 75 μ m (Fig. 9d), y para realizar el grafico de la

curva granulométrica fue necesario saber las cantidades retenidas en cada tamiz (Fig. 9e), este proceso fue seguido en todos los materiales estudiados.

Figura 9: Análisis granulométrico por tamizado



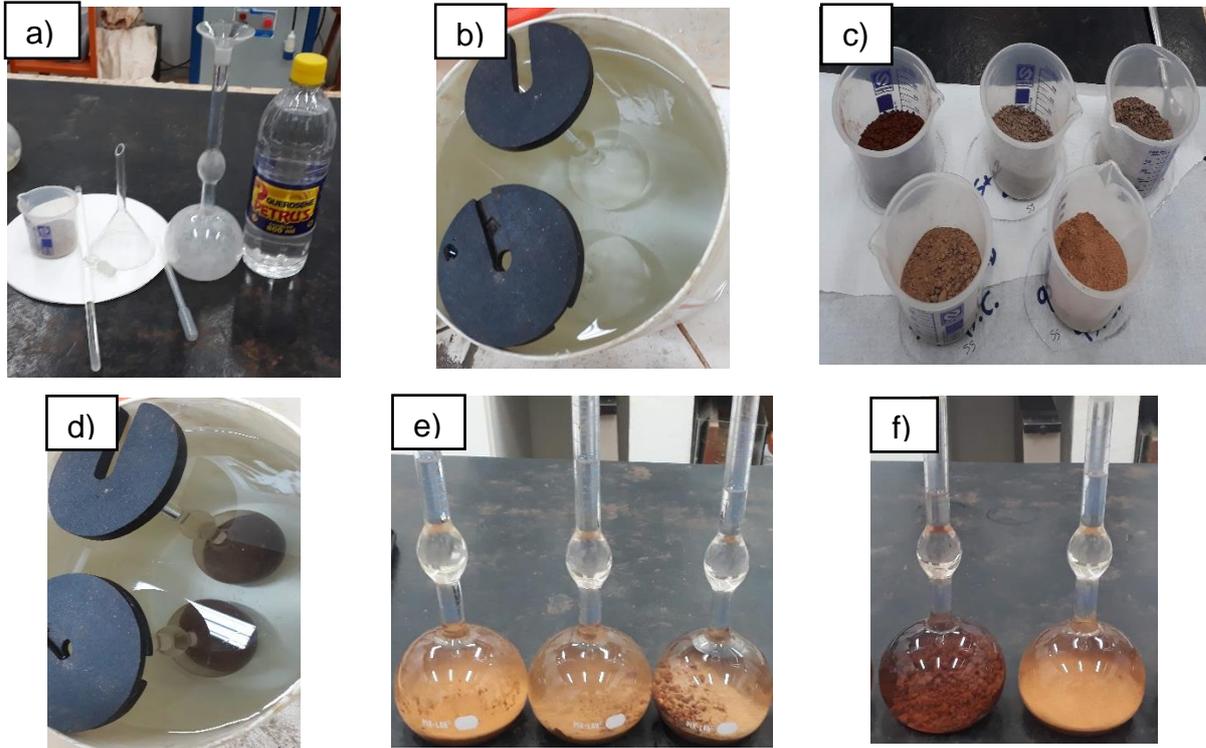
Fuente: Autora, 2022

- Masa específica de sólidos

Posteriormente se realizó el ensayo de la masa específica de los materiales, fue seguido la NBR 16605 (ABNT, 2017), se utiliza esta norma debido a que los materiales en estudio componen cemento, donde también se adaptó esta misma para trabajar con el suelo. En la Fig. 10a se presentan los materiales e instrumentos utilizados. El procedimiento consiste en llenar el frasco volumétrico de Le-Chatelier con querosene hasta el nivel comprendido entre las marcas correspondientes de 0 y 1 cm^3 , secar el inferior del frasco arriba del nivel del líquido, colocar el frasco en el baño de agua en posición vertical e mantenerlo sumergido mínimo por 30 min (Fig. 10b), para equilibrar las temperaturas del líquido del frasco y del baño, donde la temperatura del agua debe ser constante e igual a la temperatura del ambiente que fue de 26°C , registrar la primera lectura (V_1) con aproximación de 0.1 cm^3 , tomar una masa conocida del material. Para el suelo se utilizó 50 g siguiendo la NBR 6508 (ABNT, 1984) y para los otros materiales que compone cemento se utilizó 55 g (Fig. 10c), siendo un valor medio entre lo que prescribe la NBR 6508 (ABNT, 1984) “50g para suelo” y la NBR 16605 (ABNT, 2017) “60 g para cemento”, con aproximación de 0.01 g, que provoque el desplazamiento del líquido en el intervalo comprendido entre las marcas de 18 cm^3 e 24 cm^3 de la escala graduada del frasco, al introducir el material, cuidar de que no se adhiera a las paredes, tapar el frasco e girar en posición inclinada hasta que no suban bolas de aire para la superficie del líquido. Colocar nuevamente el frasco en el baño de agua en posición vertical y sumergirlo durante

mínimo 30 min (Fig. 10d), registrar la lectura final (V2) con aproximación de 0.1 cm^3 , es importante la repetitividad en este ensayo, donde la diferencia de dos resultados individuales de una misma muestra no puede ser mayor que 0.02 g/cm^3 . Finalmente en la (Fig.10e) y (Fig. 10f), se muestran los materiales y el líquido dentro del frasco.

Figura 10: Masa específica de sólidos

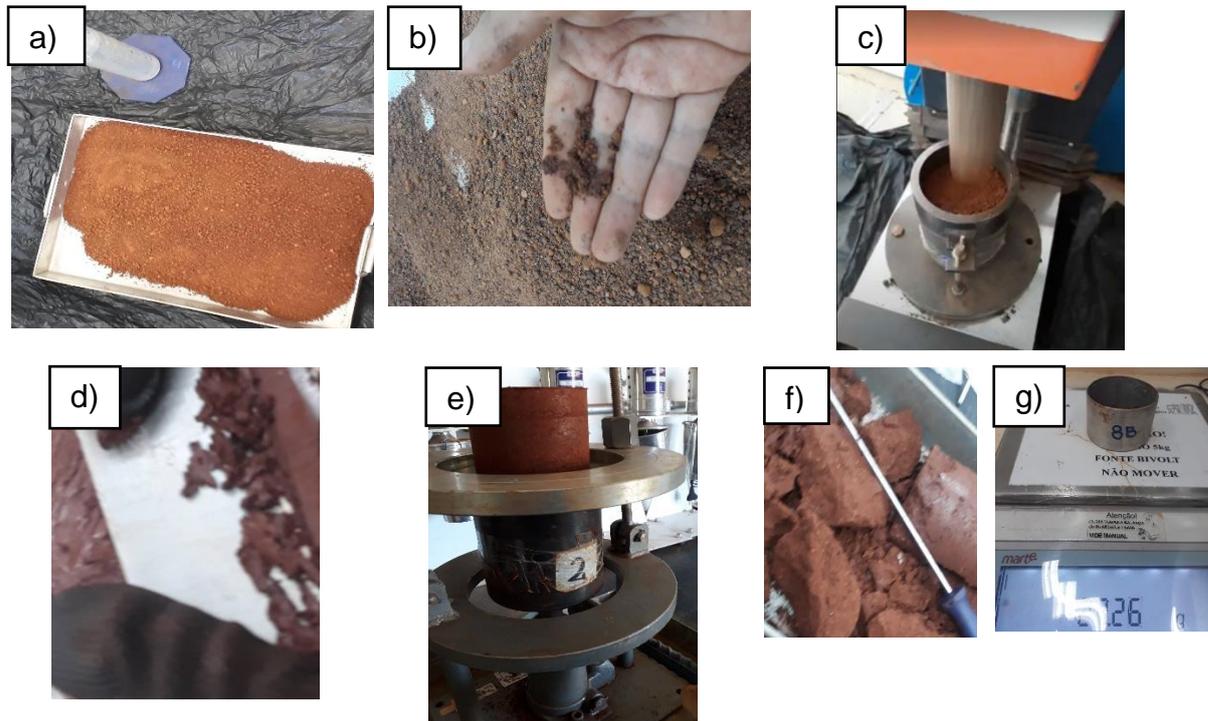


Fuente: Autora, 2022

- Compactación del suelo

Para la ejecución este ensayo siguiendo la NBR 6457 (ABNT,2016), posteriormente se siguen los procesos descritos según la NBR 7182 (ABNT, 2016), Se trabajó con una energía de compactación de Proctor Normal, el molde cilíndrico cuenta con un diámetro de 100 mm y una altura de 127 mm, las muestras reutilizadas, y en total fueron realizados 7 curvas de compactación (S, 3 de S+ Δ %RCD, 2 de SC+ Δ %RCD y C+91%RCD). El procedimiento seguido consiste en tamizar el suelo y RCD por la malla de abertura de 4.8 mm, homogenizar el material a trabajar (Fig. 11a), cuidar bien del humedecimiento y su correspondiente homogenización (Fig. 11b). La compactación fue realizada en 3 capas cada una con 26 golpes consecutivos (Fig. 11c), escarificando antes de colocar la siguiente capa, enrasar la superficie del cuerpo de prueba con el molde (Fig. 11d), pesar el suelo junto con el cilindro y extraer la muestra (Fig. 11e), y finalmente tomar una pequeña muestra del centro del cuerpo de prueba para la obtención de la humedad (Fig. 11f) y (Fig. 11g).

Figura 11: Ensayo de compactación



Fuente: Autora, 2022

- Determinación de la resistencia de suelo

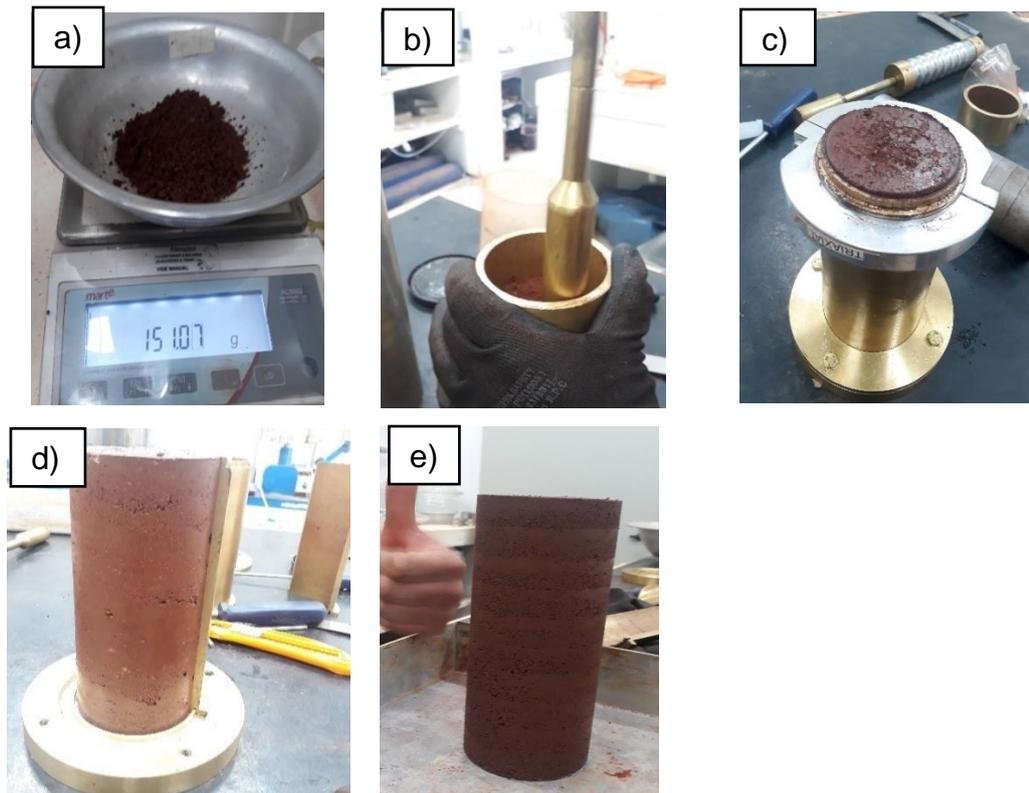
Con los ensayos mencionados hasta el momento fue posible determinar la resistencia de los materiales compuestos de suelo, para realizar este ensayo principalmente se adoptó la NBR 12770 (ABNT,1992), donde se menciona que los CP's deben ser compactados con el contenido de humedad y masa específica aparente deseados. Debido a los tipos de material que se tiene fue necesario revisar la NBR 12025 (ABNT, 2012) y otras normas que se van presentando en el transcurso, en ese sentido este ensayo se divide en tres (3) etapas:

a) Moldaje del cuerpo de prueba

Los cuerpos de prueba fueron moldados siguiendo la NBR 12024 (ABNT, 2012), moldeo y cura de cuerpos de prueba, en esta etapa fueron realizados en total 10 cuerpos de prueba, 4 para los primeros materiales de la tabla 1, (1 de suelo y 3 con variación en RCD de 10%, 20% y 40%) posteriormente 6 para los materiales que componen SC+%RCD vistos en la tabla 1, (3 con SC+20%RCD y 3 con SC+40%RCD). El molde cilíndrico para esta etapa tiene las siguientes dimensiones, 7.5 cm de diámetro y 17 cm de altura, la compactación de cada cuerpo de prueba fue realizada en 10 capas iguales, mediante el siguiente proceso. Pesar la cantidad

necesaria (Fig.12a) y añadir el material homogenizado al molde, compactar (Fig.12b) y escarificar hasta completar la décima capa, en este último nivel dejar al ras del molde (Fig. 12c), retirar el cuerpo de prueba del molde con mucho cuidado y paciencia (Fig. 12d) y (Fig. 12e). Antes de colocar el material al molde, previamente pasar con vaselina las paredes del molde que entrarían en contacto con el material.

Figura 12: Moldeo para el ensayo de compresión axial de suelo



Fuente: Autora, 2022

b) Tiempo de cura

Después de extraer los cuerpos de prueba (CP's), estos fueron llevados a la cámara húmeda a una temperatura de $(24 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, como recomienda la NBR 12024 (ABNT,2012). También menciona que para fines exclusivos de dosaje de SC el periodo de cura debe ser contemplado para 7 días y pueden ser considerados otras edades para control de obra, investigaciones, ensayos especiales, etc. Para el presente estudio se consideraron 7, 14 y 21 días de tiempo de cura para los dosajes de SC+20%RCD y SC+40%RCD (Fig. 13).

Figura 13: Tiempo de cura



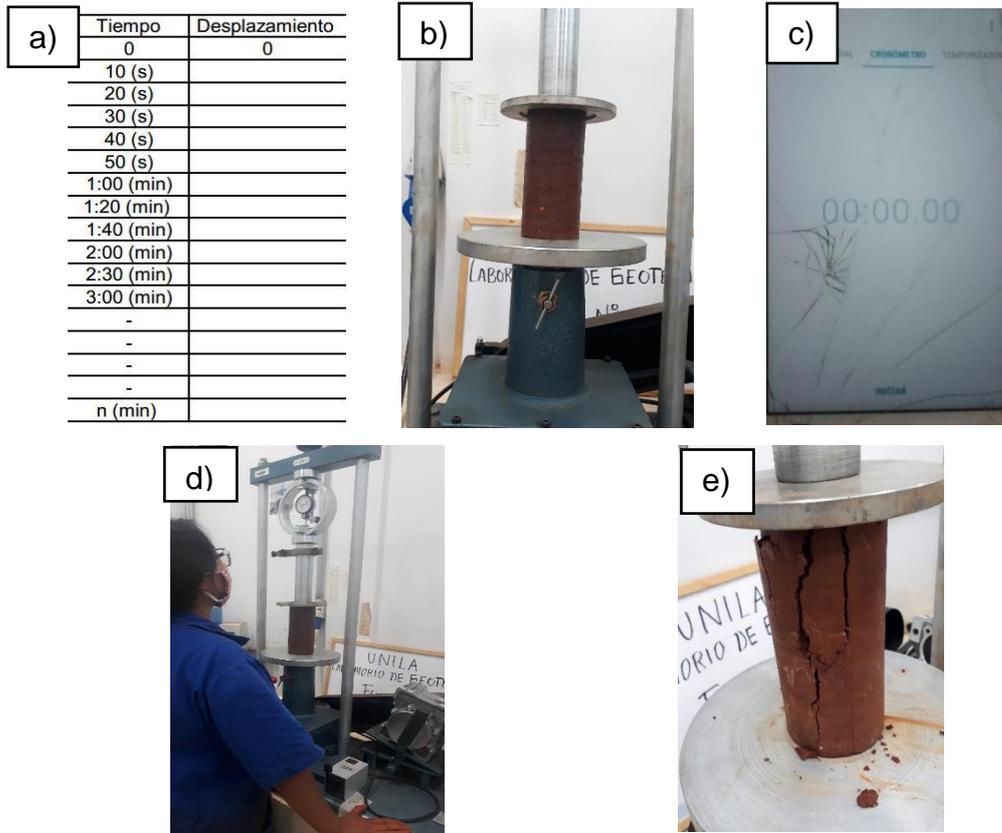
Fuente: Autora, 2022

c) Determinación de la resistencia a la compresión simple

Para poder realizar esta etapa se siguen las recomendaciones de la NBR 12025 (ABNT, 2012), donde menciona que la máquina de ensayo puede ser de cualquier tipo, de capacidad suficiente, que posibilite la aplicación de la carga continua. La NBR 12770 (ABNT, 1992) sugiere que al momento de realizar el ensayo se debe colocar el CP en el equipo de compresión de forma que quede centrado sobre el plato inferior, así también, lo describe la NBR 12025 (ABNT, 2012), además la NBR 12770 (ABNT, 1992) recomienda que la velocidad de compresión puede ser ligeramente rápida o ligeramente lenta, dependiendo el tipo de material.

Entonces considerando la NBR 12025 (ABNT, 2012), para este estudio se utilizó la prensa disponible en el laboratorio de suelo, de Marca USIMACHI, la cual cuenta con una capacidad de 50 KN y una velocidad constante de desplazamiento igual a 1.38 (mm/min), el procedimiento para realizar este ensayo fue la siguiente: previamente tener pronto una tabla habilitada con 2 columnas, en una columna los tiempos en las que se realizaran las lecturas y otra para anotar las lecturas del desplazamiento del deformímetro (Fig. 14 a), el modelo de esta tabla es seguido según el cuadro 2 de la NBR 9895 (ABNT, 1987), centrar el CP (Fig14 b), activar la maquina hasta que el deformímetro intente iniciar un movimiento, inmediatamente parar, e iniciar el ensayo activando la prensa paralelamente al cronometro (Fig. 14c). Empezar las lecturas conforme a los tiempos establecidos (Fig. 14d), hasta llegar a la ruptura del cuerpo de prueba (Fig. 14e).

Figura 14: Compresión axial simple



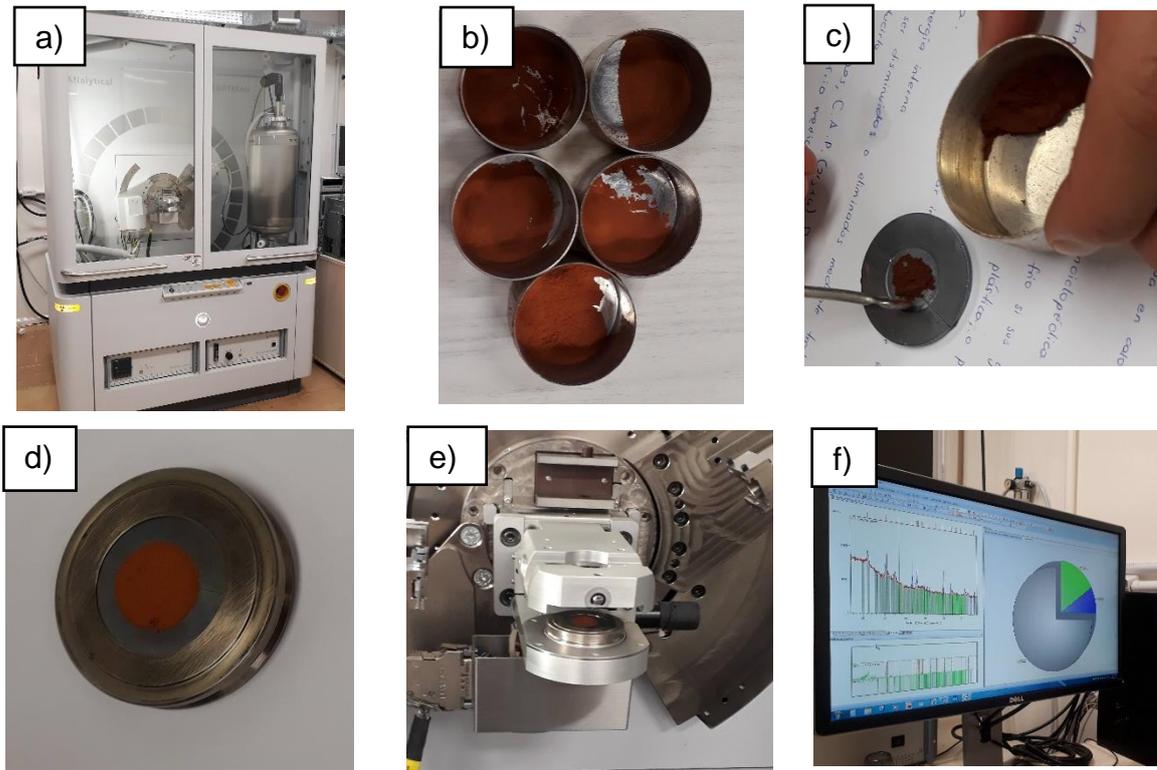
Fuente: Autora, 2022

4.3.2 Analisis Mineralógico

- Análisis de difracción de rayos X (DRX)

Para realizar el análisis de difracción de rayos X (DRX), fue necesario el equipo de difractómetro Empyrean de propósito múltiple de la PANalytical (Fig 15a), se realizó para 7 tipos de materiales que son: S, S+10%RCD, S+20%RCD, S+40%RCD, RCD (Fig. 15b) y C+91%RCD (para este material fueron llevados 2 muestras, según los 2 métodos trabajados, que se exponen en el siguiente capítulo). ejecutarla ejecución de este ensayo se realizó con material del tipo polvo, que incluye partículas pasantes en la malla de abertura de 0.15mm, estas fueron colocadas en una capsula (Fig 15c) de manera que el material este muy bien centrado y acomodado (Fig 15d), seguidamente llevarlo al difractómetro por unos 45 minutos (Fig 15e), con excepción del C+91%RCD que fue por 90 minutos, esto con el objetivo de tener una mejor resolución de los picos de este material y finalmente realizar el análisis de los componentes químicos que se encuentran en cada uno de los materiales (Fig 15f).

Figura 15: Análisis de difracción de rayos x (DRX)

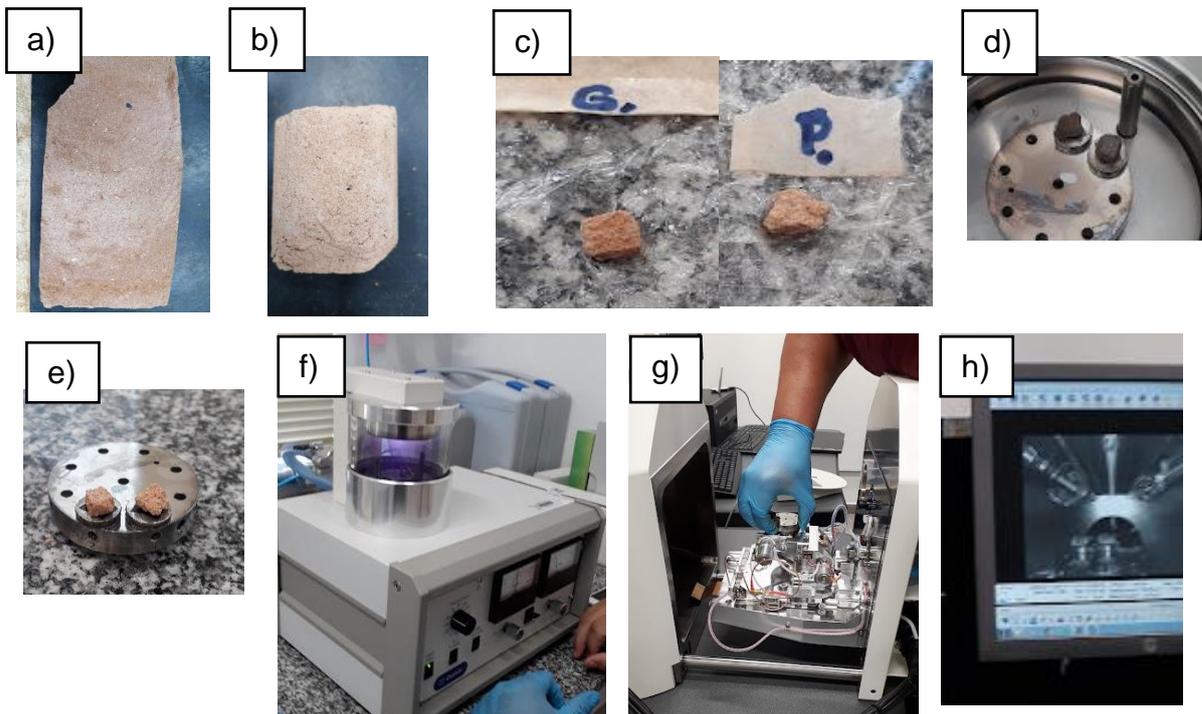


Fuente: Autora, 2022

4.3.3 Análisis microestructural (MEB)

Análisis microestructural fue realizado en aquellos CP's que componen C+91%RCD ensayadas a los 7 días. En la (Fig. 16a) se presenta el CP trabajado por el método compactado y en la (Fig. 16b) el CP por el método plástico respectivamente, ambos obtenidos después de la ruptura del ensayo de compresión simple. De estos CPs fueron colectadas muestras para realizar los análisis microestructurales. En la (Fig. 16c), se puede observar las muestras a ser analizadas en el MEB (microscopio electrónico de barradura), las dimensiones aproximadas son de 1.5 mm de alto y un área de sección transversal de 16 mm^2 . El equipo utilizado es de marca Zeiss y modelo EvoMA10. Las pequeñas muestras para que puedan ser analizadas, previamente tuvieron que ser metalizadas con una fina camada de oro, en la (Fig. 16d) se presenta las muestras previas al metalizado, en la (Fig. 16e) se observa el proceso de metalización dentro de la campana de vacío, en la (Fig. 16f) se encuentran las muestras ya metalizadas y prontas para poder ingresar al MEB, (Fig. 16g), y finalmente poder iniciar el ensayo (Fig. 16h). Las imágenes obtenidas en el presente ensayo fueron con aumentos de 5000X y 10000X para cada muestra.

Figura 16: Análisis microestructural en el MEB



Fuente: Autora, 2022

4.4 Metodología de trabajo para la evaluación de la resistencia del material que compone C+91%RCD

En este punto se estudia 2 metodologías de trabajo, primeramente, el método compactado del C+91%RCD y en seguida se estudia el método plástico del C+91%RCD.

4.4.1 Método compactado

Este método se trabajó siguiendo el mismo procedimiento seguido para los materiales que componen SC+ Δ %RCD, donde también se trabajó con los mismos ensayos con excepción del ensayo de resistencia, este último tuvo que pasar por algunos cambios para adaptar al material en estudio que es el C+91%RCD.

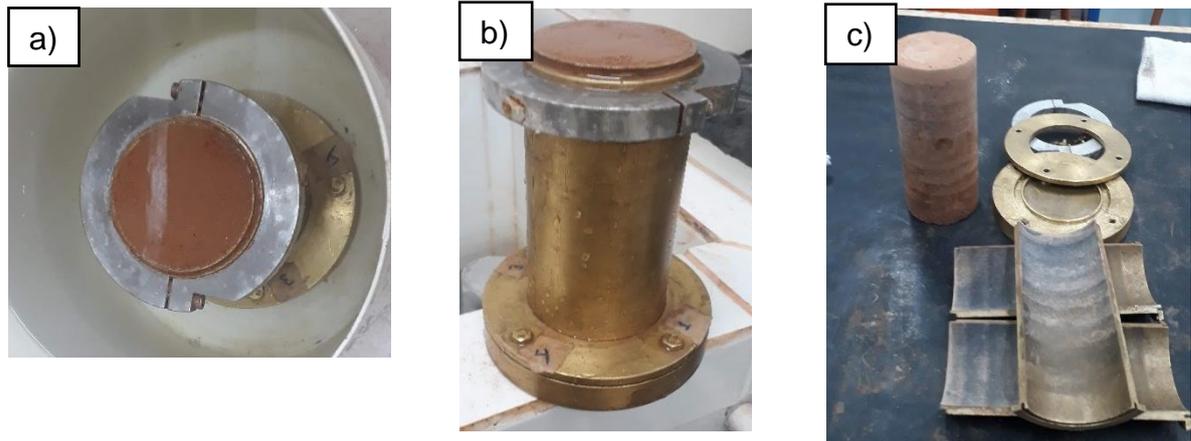
El ensayo de resistencia como se vio en el capítulo anterior viene dividido en 3 etapas las cuales fueron (moldaje del CP, tiempo de cura y determinación de la resistencia):

a) Moldaje del cuerpo de prueba

El moldeo del C+91%RCD fue la misma que de los otros materiales ya estudiados que en su dosificación componen suelo, con excepción del retiro del molde, en los otros materiales el retiro era al instante, sin embargo, para este material eso no era posible ya que este se comportaba de diferente manera. Entonces, fue

necesario sumergir el CP's junto al molde por un periodo de 3 días (Fig. 17a), esto porque el cuerpo por sí solo no soportaba las fuerzas que ejercía el agua sobre él, pasado ese tiempo, se retira del agua el molde junto al cuerpos de prueba (Fig. 17b) y se esperaron 2 días más, antes de retirar el molde del cuerpo de prueba, en la (Fig.17c), se observa el CP desmoldado.

Figura 17: Moldeo del CP del material que compone C+91%RCD, método compactado

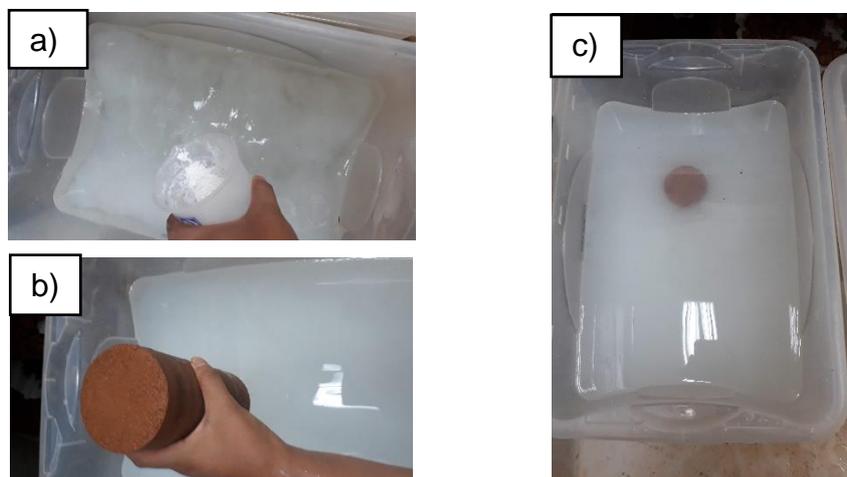


Fuente: Autora, 2022

b) Tiempo de Cura

Después de desmoldar el CP, el tiempo de cura para el dosaje de C+91%RCD fueron de 7, 14 y 28 días de cura, siguiendo y respetando la misma norma que se utilizó para los otros materiales del capítulo anterior, que es la NBR 12024 (ABNT,2012), se satura con cal el agua (Fig. 18a) para evitar la pérdida de calcio y finalmente se sumerge el CP (Fig. 18b) y (Fig. 18c), hasta realizarles el ensayo de compresión axial.

Figura 18: Tiempo de cura método compactado



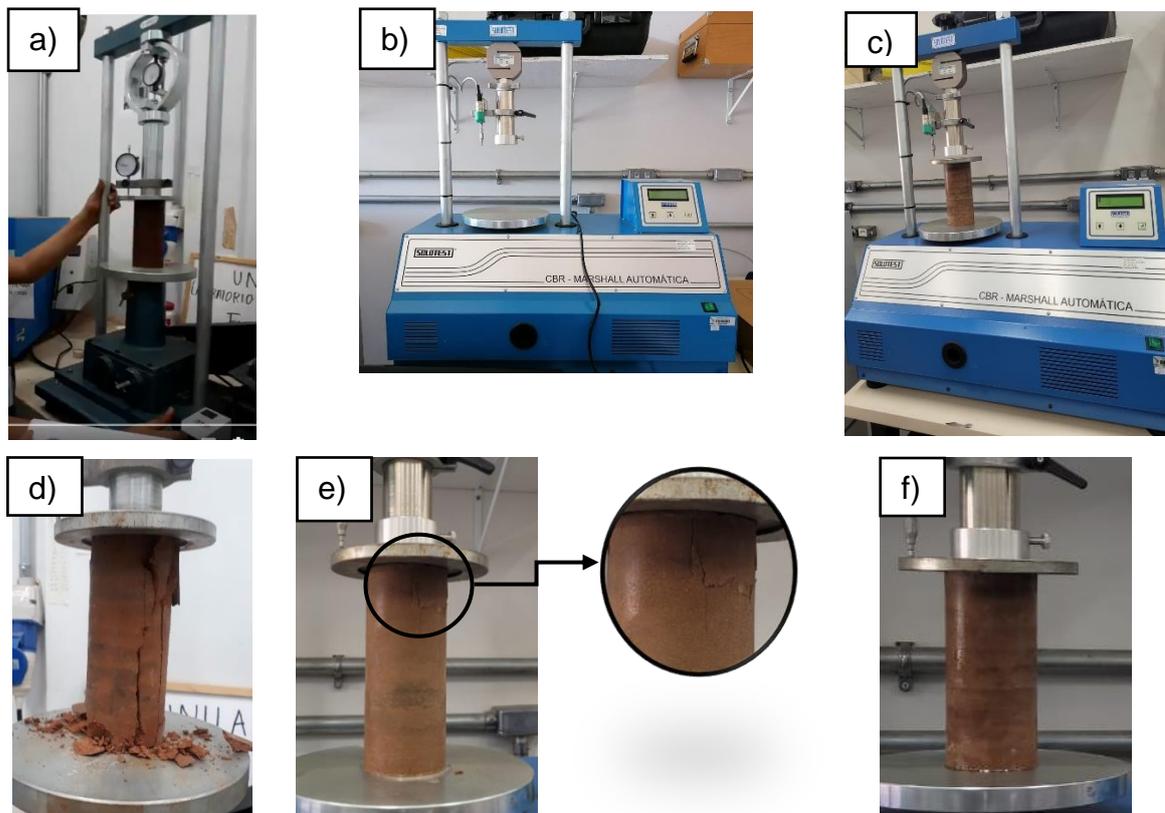
Fuente: Autora, 2022

c) Determinación de la resistencia a compresión simple

Para poder finalmente determinar la resistencia se realiza el ensayo de compresión axial, igual a los otros materiales que componen suelo, se sigue lo preestablecido por las normas NBR 12025 (ABNT, 2012), la NBR 12770 (ABNT, 1992) y el modelo del cuadro 2 de la NBR 9895 (ABNT, 1987), para la obtención de los datos.

Para poder realizar el ensayo de compresión a los 7 días fue utilizado una prensa de CBR (Fig. 19a), con una velocidad constante de desplazamiento de 1.38 mm/min, hasta que el cuerpo llegue a la ruptura (Fig. 19b). Las muestras de 14 y 28 días fueron ensayados en una prensa CBR-Marshall (Fig. 19c), con capacidad de 50 KN, con una velocidad de 1.38 mm/min. En la Fig. 19d, se presenta a la prensa junto al cuerpo de prueba, prontos para iniciar el ensayo, en la (Fig. 19e) se presenta la ruptura sufrida por el cuerpo a los 14 días, con un zoom del lugar de la fisura y en la (Fig. 19f) se presenta la ruptura a los 28 días, para este último la maquina marcaba ruptura pero visualmente no se observó ninguna fisura.

Figura 19: Compresión axial del C+91%RCD



Fuente: Autora, 2022

4.4.2 Método Plástico

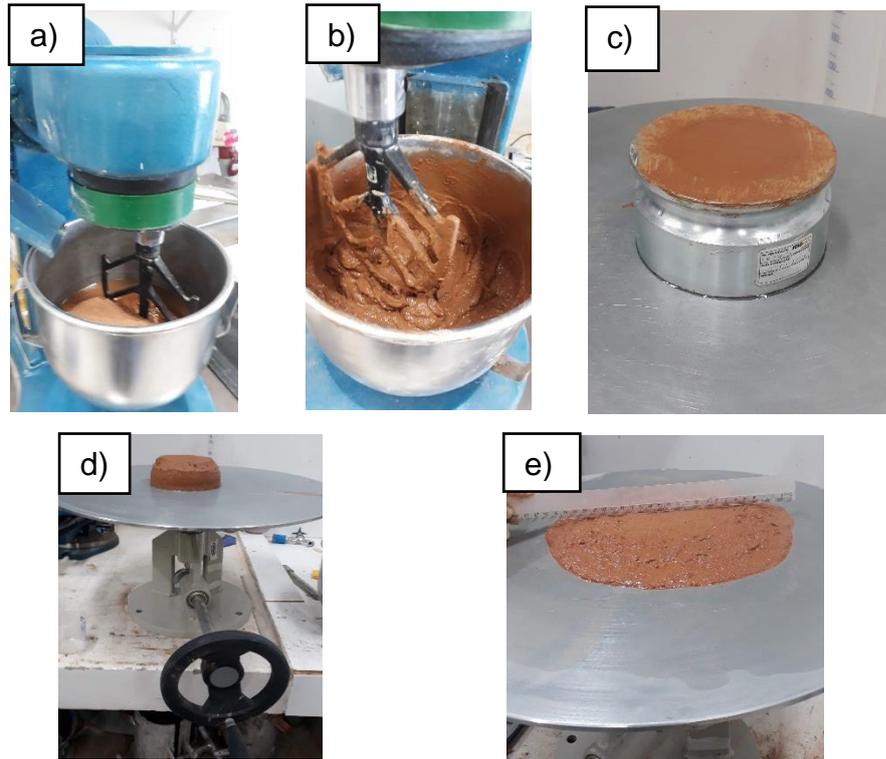
Para poder desarrollar el método plástico, nombrándolo así debido a que el material trabaja como fluido, fue necesario adoptar algunos ensayos que son para mortero y hormigón, en el transcurso será explicado cada ensayo utilizado para poder llegar a realizar el ensayo de resistencia.

- Determinación del índice de consistencia

Para saber la cantidad de agua que debe llevar este material, por este método es necesario realizar la determinación del índice de consistencia de argamasas, fue adoptado la NBR 13276 (ABNT, 2005).

La mencionada norma, prescribe los siguientes procedimientos, colocar la cantidad de agua necesaria (la norma deja en claro que a falta de información cuanto a la cantidad de agua de la mezcla, se recomienda adoptar la cantidad de agua necesaria para que proporcione el índice de consistencia de $(260 \pm 5\text{mm})$ y colocar el material seco de modo continuo (Fig. 20a), accionar la mezcladora en velocidad baja por 30 s, apagar el equipo, retirar la pala mezcladora y raspar toda la superficie interna del recipiente y de la pala (Fig. 20b), efectuar esta tarea y recolocar la pala en un intervalo de 60 s, nuevamente encender el equipo y mezclar por otros 30 s. Luego de la preparación, llenar el molde tronco-cónico, colocado de modo centralizado sobre la mesa de índice de consistencia, llenar en tres capas sucesivas, con altura aproximadamente iguales y aplicar en cada una de ellas respectivamente, 15, 10 y 5 golpes con el soquete, de manera a distribuirlo uniformemente, el enraizamiento debe ser realizado con una regla metálica, con movimiento de viene y va a lo largo de toda la superficie (Fig. 20c), retirar el molde (Fig. 20d) y accionar la manivela de la mesa para el índice de consistencia, de modo a que la mesa suba y caiga 30 veces en 30 s de manera uniforme, inmediatamente después de la última caída de la mesa, medir la dispersión del molde tronco-cónico de material (Fig. 20e). Se realizan 3 lecturas del diámetro, el índice de consistencia corresponde a la media de las tres medidas del diámetro.

Figura 20: Determinación del índice de consistencia



Fuente: Autora, 2022

- Determinación de la resistencia a compresión

Con eso es posible dar el siguiente paso que es el ensayo de resistencia, para realizar el ensayo de resistencia para este método fue dividida en 3 etapas, moldaje del CP, cura y determinación de la resistencia:

a) Moldaje del CP

Después del ensayo de consistencia se procede con el moldado, en la cual el molde cilíndrico cuenta con las siguientes dimensiones, altura de 10 cm y diámetro de 5 cm, fue seguido el procedimiento descrito según la NBR 7215 (ABNT, 1996) que fue: incluir el material con el auxilio de una cuchara en 4 capas de alturas aproximadamente iguales, recibiendo cada camada 30 golpes uniformes con el soquete normal, esto con el objetivo de acomodar el material y evitar vacíos dentro del molde, la última camada se debe finalizar con el nivelamiento del material al molde con un ligero movimiento de viene y va, en la (Fig. 21), se presenta un CP moldado, También es importante mencionar que para desmoldar sin mucha complejidad se utiliza aceite que se unta en las paredes del molde que entrarían en contacto con el material.

Figura 21: C+91%RCD moldado por el método plástico

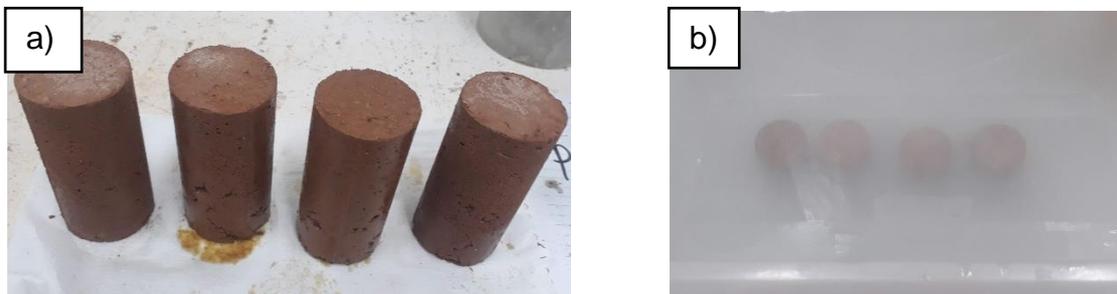


Fuente: Autora, 2022

b) Cura

Esta etapa es sujeta a la NBR 9479 (ABNT,1994) y la NBR 7215 (ABNT,1996), posterior al moldaje, existen 2 tipos de cura: “Cura inicial al aire” y “Cura final en agua”. La cura inicial al aire, se da cuando los CP’s continúan en el molde, estos deben ser colocados en la cámara húmeda y permanecer durante 20 a 24 hrs. La cura final en agua, se da cuando los CP’s son retirados del molde, trascurridas las 24 hrs de la cura inicial (Fig 22a), posteriormente sumergidos al tanque de cura (Fig 22b), con agua potable, saturada de cal, en él permanecerán hasta realizarles el ensayo de compresión axial, para el presente estudio se consideraron 7, 14 y 28 días de cura.

Figura 22: Tiempo de cura, método plástico



Fuente: Autora, 2022

c) Determinación de la resistencia

Según la NBR 7215 (ABNT, 1996) colocar el CP directamente sobre el plato inferior de la prensa, de manera que quede rigurosamente centrado en relación al eje de la carga, para el presente estudio se utilizó la prensa de CBR disponible en el laboratorio de mecánica de suelos de la UNILA y la prensa disponible en el Colegio Estadual Prof. Flavio Warcken, el CP que se rompió a los 7 días con la prensa del laboratorio de suelos, al no ser sufriende la altura de estos cuerpos, fue necesario colocar un cilindro sobre el plato central de la prensa, para poder realizar el ensayo de compresión simple, conforme se muestra en la (Fig. 23), fue adoptado el mismo

procedimiento del ensayo de compresión simple, visto en el capítulo anterior, para los CP que se rompieron a los 14 y 28 días, se utilizó, la prensa que está disponible en el Colegio Estadual Prof. Flavio Warken (debido a que la prensa del LAGEO estaba en mantenimiento).

Figura 23: Determinación de la resistencia a compresión del material C+%RCD



Fuente: Autora, 2022

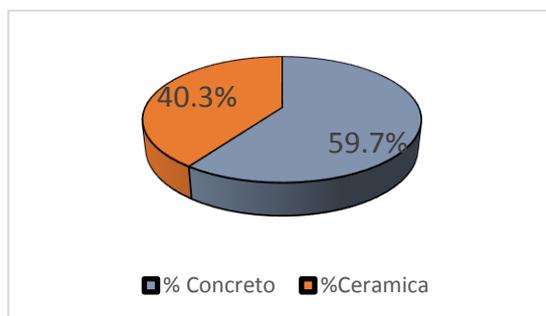
5 RESULTADOS Y DISCUSIONES

En esta sección se presentan los resultados y discusiones de los os ensayos realizados y descritos en el capítulo anterior. Inicialmente se presentan los resultados de los ensayos físicos, seguido de los resultados del análisis mineralógico, análisis microestructural y resistencia a la compresión simple.

5.1 Caracterización física y química

Los resultados obtenidos para el ensayo de gravimetría del RCD se muestran en la Fig. 24, e indican que en su mayoría esta constituido por los residuos de concreto. En la tabla 3, se observa los resultados obtenidos en mayor detalle, recordando que estos materiales pasaron por el tamiz 4.8 mm y fueron retenido en el tamiz 2 mm. Ferreira (2011) utilizó una combinación de 50% residuo de argamasa y 50% de residuos de cerámica roja. Pitta (2017) uso un RCD con 50% residuo de concreto y 50% de residuos de cerámica roja. Ambos aplicaron el material para refuerzo de suelo como base para fundaciones superficiales.

Figura 24: Composición Gravimétrica



Fuente: Autora, 2022

Tabla 3. Resultados del ensayo de gravimetría

Tamiz (mm)	Concreto (%)	Cerámica (%)
2	59.7	40.3

Fuente: Autora, 2022

Los resultados obtenidos para el ensayo de pH, se encuentran presentes en la tabla 4. El suelo utilizado resultó ser ácido. Similar al resultado de otros investigadores (OCHOA AVEROS; BIZARRETA ORTEGA; CHICAIZA ORTIZ 2022). También fue observado que el suelo al ser mezclado con el RCD corrige su pH de ácido para base. Tal observación fue visto por otros autores que utilizaron residuos de concreto mezclados con suelo residual de basalto (OCHOA AVEROS; BIZARRETA ORTEGA; CHICAIZA ORTIZ 2022). Conforme aumenta el porcentaje de RCD aumenta el pH, eso se debe la presencia de materiales de cemento presentes en el residuo.

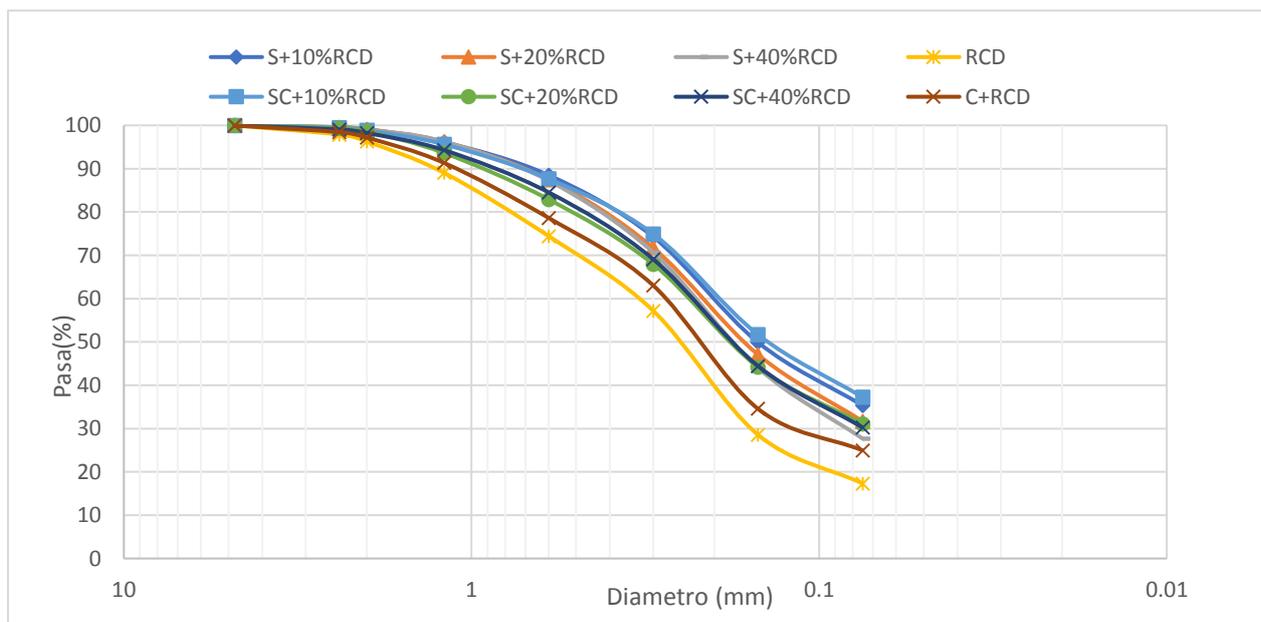
Tabla 4: Resultados de pH

Material	pH
S	6
SC+10%RCD	11
SC+20%RCD	11
SC+40%RCD	12
C+91%RCD	12

Fuente: Autora, 2022

En seguida se presentan las curvas granulométricas de los materiales en estudio. En la Fig. 25, se tiene graficadas todas las curvas de los materiales estudiados, donde es posible observar que conforme aumenta el % de RCD la curva tiende hacia la izquierda y abajo, lo que significa que aumenta el porcentaje de arena y disminuye el porcentaje de finos (limo y arcilla).

Figura 25: Curva granulométrica de materiales estudiados



Fuente: Autora, 2022

La NBR 6502 (ABNT, 1995) menciona que las partículas que tienen diámetro entre 0.06 mm e 2 mm son clasificadas como arena, en este sentido los materiales trabajados son considerados como arena. En la tabla 5 se resume los porcentajes de arena fina, media y gruesa por cada material, basándonos en la respectiva norma.

Tabla 5. Distribución granulométrica de los materiales según la ABNT

Material	Arena fina (%)	Arena media (%)	Arena gruesa (%)
S+10%RCD	60	28.5	10.5
S+20%RCD	55	32.48	11.52
S+40%RCD	54	33.24	11.76
RCD	40	34.44	21.56
SC+10%RCD	60	27.66	10.34
SC+20%RCD	53	29.91	15.67
SC+40%RCD	53	31.53	13.47
C+RCD	45	33.64	18.53

Fuente: Autora, 2022

Los resultados de la masa específica de sólidos se muestran en la tabla 6, considerando la repetividad que recomienda la NBR 16605 (ABNT, 2017), donde la variación de los resultados entre un primer ensayo y el siguiente sea menor a 0.02, caso contrario se repite el ensayo.

Tabla 6: Resultados de la masa específica de sólidos

Material	1er ρ (g/cm ³)	2do ρ (g/cm ³)	$\Delta\rho$ (g/cm ³)	Satisfacción	ρ (g/cm ³)
S	2.847	2.832	0.015	Satisfecho	2.840
SC+10%RCD	2.792	2.806	0.014	Satisfecho	2.799
SC+20%RCD	2.778	2.792	0.014	Satisfecho	2.785
SC+40%RCD	2.750	2.736	0.014	Satisfecho	2.743
C+91%RCD	2.670	2.657	0.013	Satisfecho	2.663
100%RCD	2.690	2.700	0.010	Satisfecho	2.695

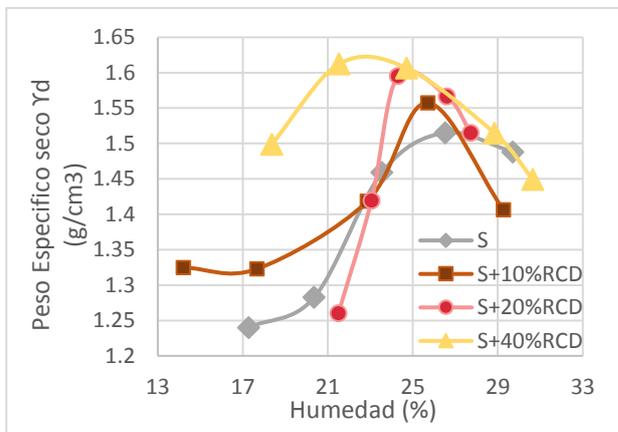
Fuente: Autora, 2022

Algunos autores que trabajaron con suelo residual de basalto, característico de la región de Foz de Iguazú obtuvieron una masa específica de sólidos de 2.71 a 2.80 (g/cm³) (ANAGUA 2019, OLIVEIRA 2019, OCHOA AVEROS; BIZARRETA ORTEGA 2021), valores próximos a los valor medio encontrado en este trabajo. Por otra parte, en relación al RCD, Oliveira (2019) encontró valores de 2.70 (g/cm³), valores similares al encontrado en este trabajo, e superiores al encontrado por Bizarreta-Ortega e Campos (2017) para materiales del municipio de Rio de Janeiro con predominancia de residuos de concreto.

Se presentan las curvas de compactación para la energía de Proctor normal de los materiales estudiados. En la Fig. 26, se presenta los resultados de la curva de compactación de la mezcla del suelo con RCD, y en la tabla 7, se presenta un resumen de los valores de humedad óptima y peso específico seco máximo de cada material.

Observe que conforme aumenta el porcentaje de RCD, el peso específico seco aumenta y la humedad óptima disminuye, tal observación también fue encontrada por otros autores en combinaciones similares de suelo y RCD (FERREIRA; THOME 2011, COSTA 2015). En relación al suelo residual de basalto, la masa específica seca varía de 1,58 (g/cm³) hasta 1,63 (g/cm³), y la humedad óptima varía de 21,3% hasta 28,4% (OLIVEIRA et al. 2018, ANAGUA 2019, OCHOA AVEROS; BIZARRETA ORTEGA 2021).

Figura 26: Curva de compactación para materiales sin cemento



Fuente: Autora, 2022

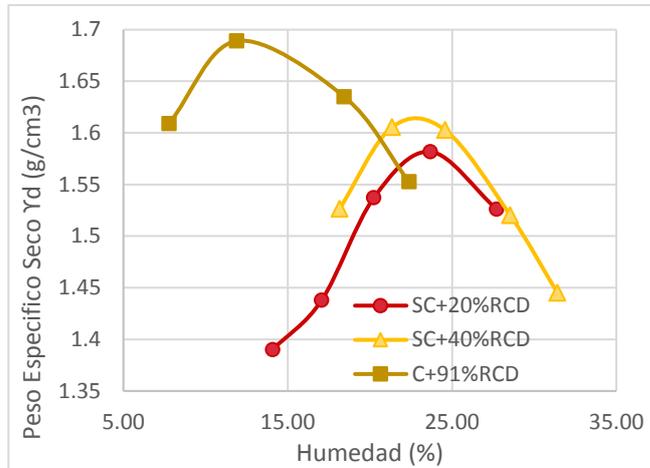
Tabla 7. Valores óptimos para materiales sin cemento

Materiales	Humedad óptima (%)	Ydmax (g/cm ³)
S	27	1.515
S+10%RCD	25.7	1.56
S+20%RCD	24.9	1.604
S+40%RCD	23	1.625

Fuente: Autora, 2022

En la Fig. 27, se presenta la curva de compactación de los últimos tres materiales con adición de cemento y en la tabla 8 se presenta un resumen de los valores de peso específico seco y humedad óptima de cada material. De la misma manera se observa un incremento del peso específico seco máximo y una disminución de la humedad óptima con el incremento del porcentaje de RCD. Souza, Segantini y Pereira (2006), investigaron materiales formados por suelo, 10% cemento y Δ% de RCD (esta variación en 20%, 40% y 60%), obteniendo un resultado semejante, es decir, que a medida que incrementa el RCD, perciben una elevación del peso específico seco y una leve reducción de la humedad.

Figura 27: Curva de compactación para materiales con cemento



Fuente: Autora, 2022

Tabla 8. Valores óptimos para material con cemento.

Materiales	Humedad óptima (%)	Ydmax (g/cm3)
SC+20%RCD	23.3	1.583
SC+40%RCD	23	1.6135
C+91%RCD	11.9	1.689

Fuente: Autora, 2022

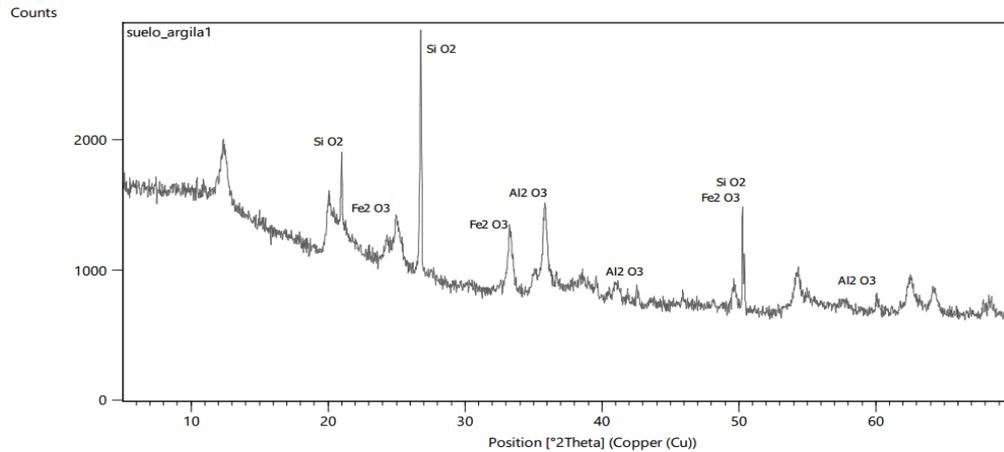
En relación al índice de consistencia, que fue realizado para el material que compone la muestra de cemento+91%RCD, cumpliendo con la recomendación de la NBR 13276 (ABNT, 2005) de llegar a un índice de consistencia de $(260 \pm 5 \text{ mm})$, entre prueba y error, se encontró que es necesario añadir una cantidad de 450 (ml) de agua para 2500 (g) de material, con estas cuantías es posible llegar a un índice de consistencia de aproximadamente de 258 (mm), así como exige la norma.

5.2 Caracterización mineralógica y microestructural

5.2.1 Caracterización mineralógica

En la Fig. 28, se presenta el diagrama de difracción de rayos-X del suelo utilizado en este trabajo. Puede observarse que el suelo presenta picos característicos predominantes de sílica (SiO_2), la cual es un mineral típico presente en las arcillas, la alúmina (Al_2O_3) es el segundo elemento más abundante en las composiciones de las arcillas, y el óxido de hierro (Fe_2O_3) es un compuesto frecuente en materiales de coloración rojiza como es el caso del suelo residual de origen basáltico estudiado. La sílice y alúmina, casi siempre forman parte de las estructuras de los aluminosilicatos como ser la caolinita y minerales micáceos resultando en gibsita (CALDAS 2012), estos minerales también fueron obtenidos por Amaral (2016), en su diagrama de difracción de rayos-X del suelo.

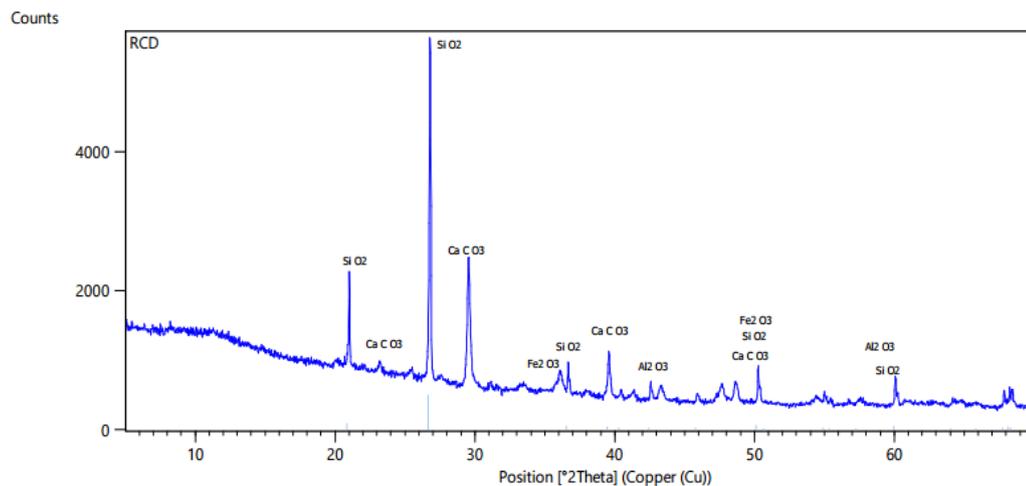
Figura 28: Diagrama de difracción de Rayos-X del suelo



Fuente: Autora, 2022

En la Fig. 29, se presenta el diagrama de difracción de rayos-X del RCD utilizado en este trabajo. Para el diagrama de difracción de rayo-X del RCD, se observan picos de sílice libre (Si O₂), este es el principal oxido constituyente del RCD, su origen está asociado principalmente a los agregados naturales de concreto y argamasa presente en el RCD, los picos de Alúmina (Al₂ O₃) la cual está relacionada principalmente a la presencia de la cerámica roja y el suelo (ULSEL. et al, 2010), los picos de óxido de hierro (Fe₂O₃) estarían relacionado con la procedencia del mismo, también fue identificado el mineral calcario (Ca C O₃) el cual es un principal constituyente del clinker y la escoria de alto horno utilizado en la fabricación del cemento (AMARAL, 2016), que son responsables por el endurecimiento de la mezcla después de que sufran hidratación (NEVILLE, 2016).

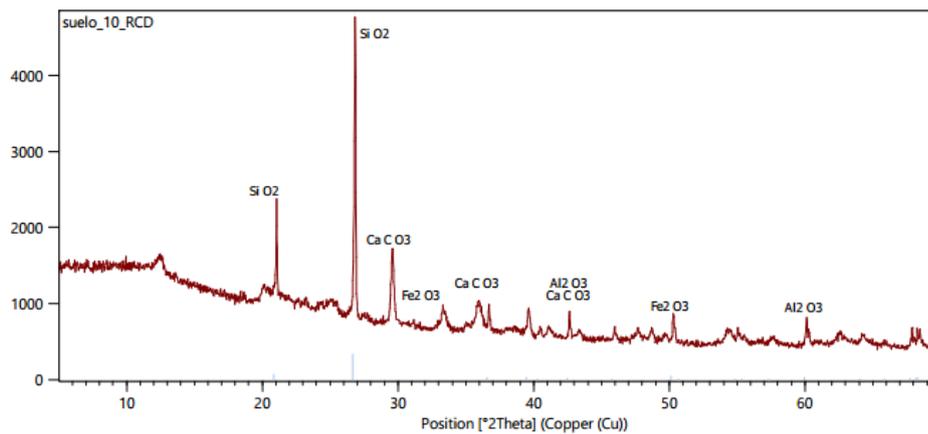
Figura 29: Diagrama de difracción de Rayos-X del RCD



Fuente: Autora, 2022

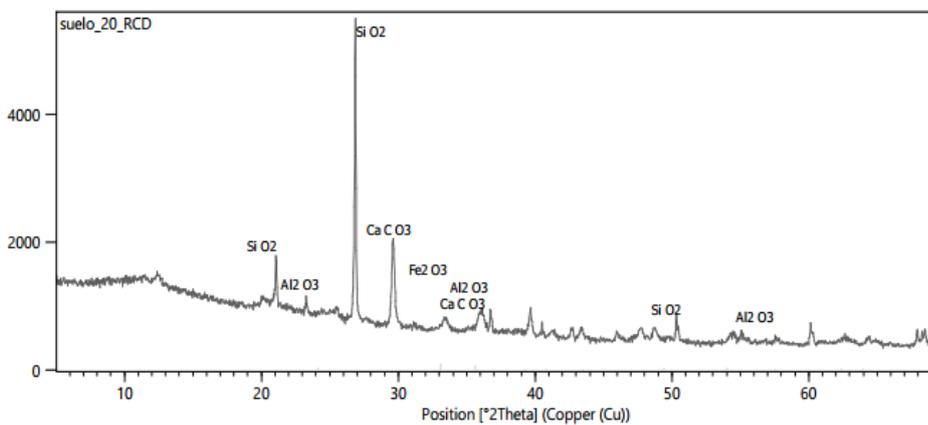
En seguida se presentan los diagramas de difracción de rayos-X de los materiales que componen S+10%RCD, S+20%RCD y S+40%RCD. Como puede observar-se en las Fig. 30, 31, y 32. Se verifican los principales picos de cuarzo y calcita, los cuales eran de esperar-se debido a los diagramas de rayo-x del suelo y del RCD además de la bibliografía estudiada.

Figura 30: Diagrama de difracción de Rayos-X del S+10%RCD



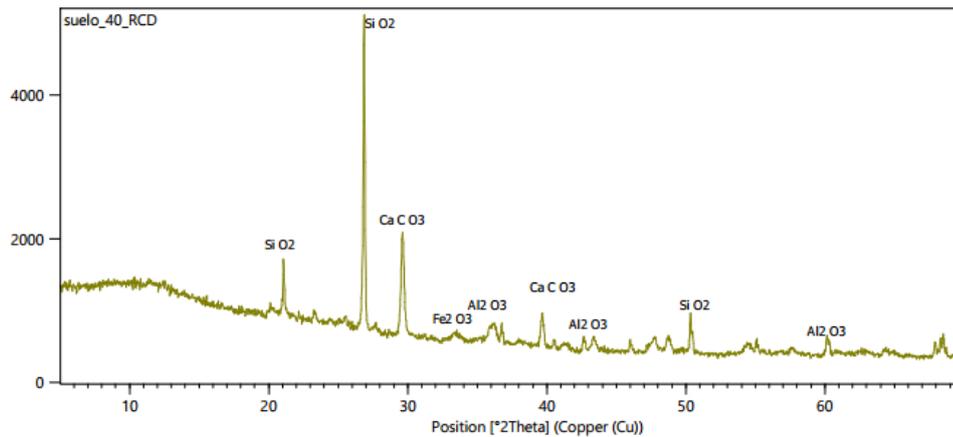
Fuente: Autora, 2022

Figura 31: Diagrama de difracción de Rayos-X del S+20%RCD



Fuente: Autora, 2022

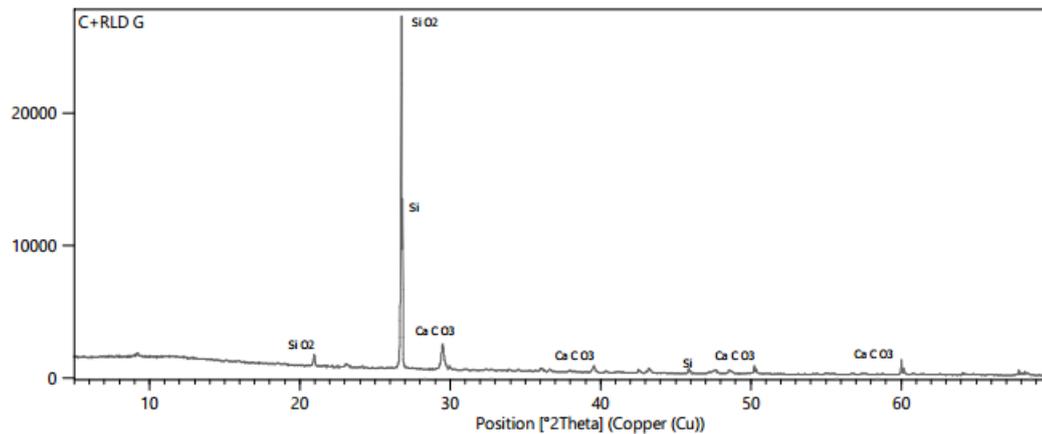
Figura 32: Diagrama de difracción de Rayos-X del S+40%RCD



Fuente: Autora, 2022

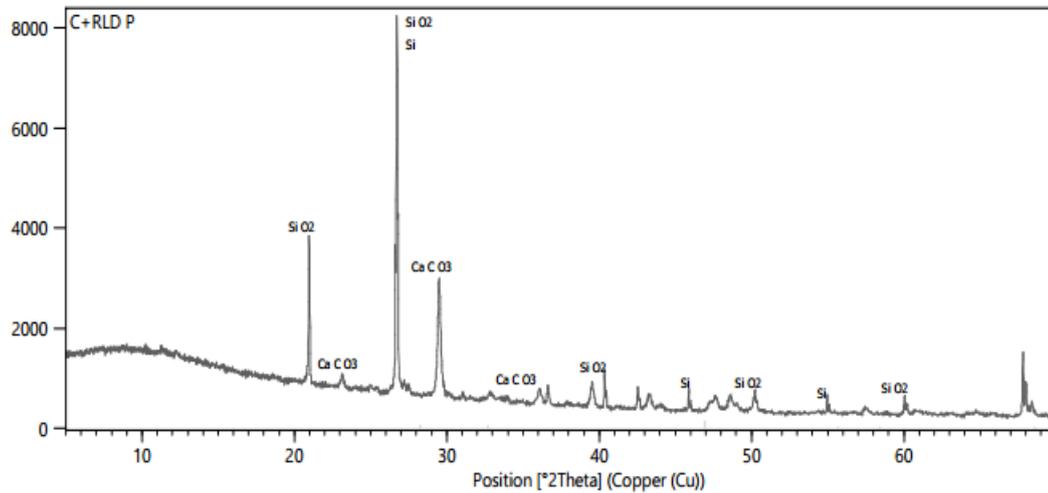
Finalmente se presentan los diagramas de rayo-x del C+RCD, después de que estos sufrieron hidratación, los cuales se trabajaron por los métodos compactado (Fig. 33) y plástico (Fig. 34). Para los diagramas de rayo-x del C+91%RCD trabajados por el método compactado y plástico, en el cual se puede observar los picos esperados de cuarzo y calcita.

Figura 33: Diagrama de difracción de Rayos-X del C+RCD, compactado



Fuente: Autora, 2022

Figura 34: Diagrama de difracción de Rayo-X del C+RCD, plástico



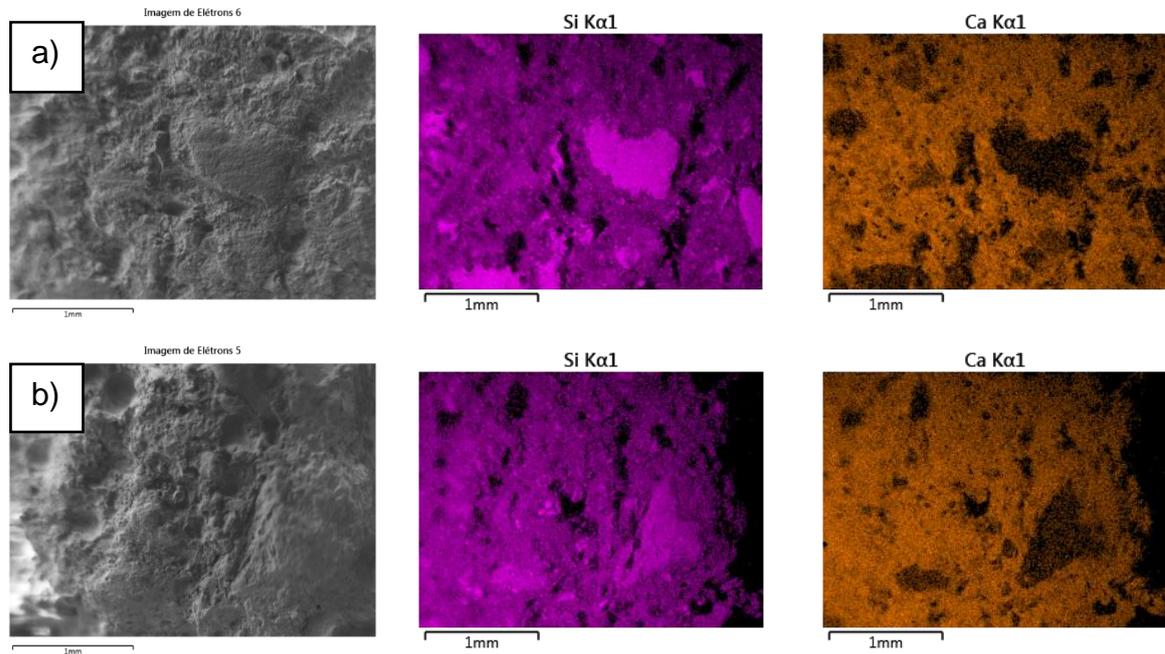
Fuente: Autora, 2022

El ensayo mineralógico fue realizado principalmente con el propósito de saber si existen materiales aglomerantes, que reaccionan con la cal en la presencia de agua, resultando en compuestos cementicios, estos materiales aglomerantes en el residuo pueden ser provenientes de mortero, concreto y materiales cerámicos. (NASCIMENTO. et al, 2021), fue posible encontrar la mineral calcita, este mineral es de gran abundancia en la piedra calcario, esta piedra es sometida a altas temperaturas y luego molido, después de ese proceso se convierte en clinker, que es responsable por el endurecimiento de la mezcla después de que sufran hidratación (NEVILLE, 2016), el cual influencia en la resistencia del material.

5.2.2 Caracterización microestructural

Inicialmente se presenta imágenes de la microestructura del material dosado con C+91%RCD, que fueron trabajados por 2 métodos, en seguida se realiza un mapeo de los elementos químicos más importante de este material, y posteriormente nuevas imágenes de la microestructura con ampliación de 1000X, 5000X y 10000X.

Figura 35: Microestructura y mapeo de los elementos silicio (Si), calcio (Ca) - a) C+91%RCD por el método plástico, b) C+91%RCD por el método compactado.



En la Fig. 35a y 35b, esta la microestructura y el mapeo de los elementos químicos de aquella muestra que fue trabajada por el método plástico y por el método compactado, respectivamente, se evidencia la presencia de silicio y calcio, donde estas darían lugar al cuarzo y calcita, que fueron reconocidos en los picos del diagrama de difracción de rayos-X de este material (C+91%RCD). También es posible observar que la microestructura del método compactado (Fig. 35b), es más denso que la microestructura del método plástico (Fig. 35a), lo cual estaría relacionado con la resistencia.

En seguida se presentan las microestructuras en 3 diferentes escalas, en la Fig. 36, se encuentra la microestructura de aquella muestra que fue trabajada por el método plástico, con el material de dosaje C+91%RCD y en la Fig. 37 con el mismo material, sin embargo, trabajado por el método compactado.

Figura 36: Microestructura de la muestra de C+91%RCD trabajado por el método plástico

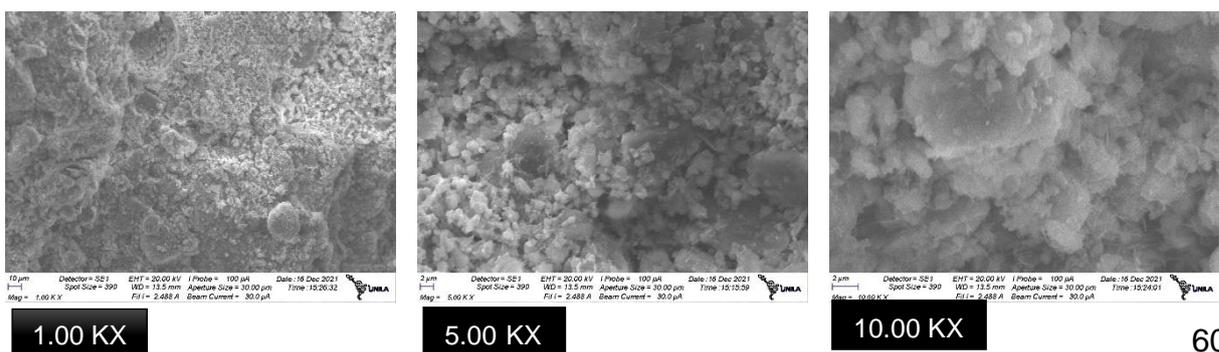
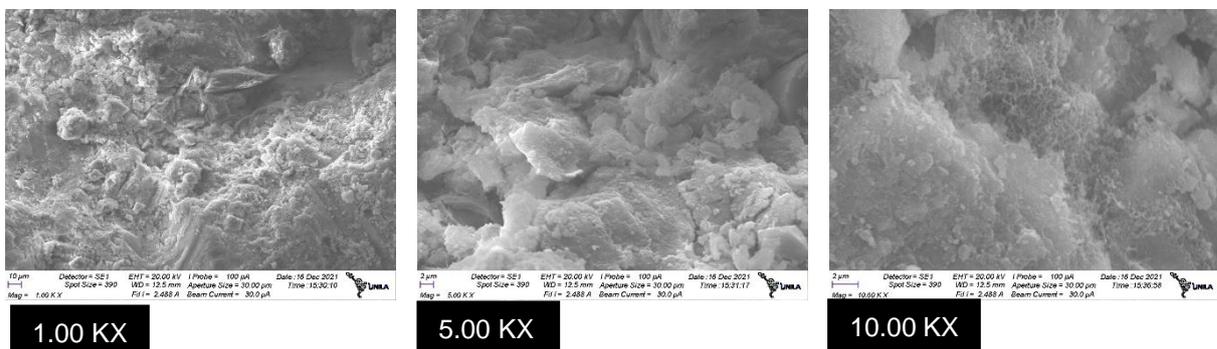


Figura 37: Microestructura de la muestra de C+91%RCD trabajado por el método compactado



Si se realiza una breve comparación visual entre las Fig. 36 y Fig. 37 se puede observar que es más densa aquel que fue trabajado por el método compactado que por el método plástico, esa clara granulación vista en la Fig. 36, en sus diferentes escalas, es debido a los vacíos presentes que remarcan las partículas del material. No obstante, en la Fig. 37, se reduce ese efecto de granulación, a causa de la compactación, donde existe una mejor acomodación de las partículas, resultando ser esta más densa, con menor cantidad de poros y consecuentemente de fisuras, con la disminución de la porosidad existe un aumento de la resistencia mecánica debido a la mejor distribución de carga en su interfaz, de acuerdo con Amaral (2016).

5.3 Resistencia a la compresión

Se presentan 4 gráficos de resistencia a compresión simple, con variaciones de material, 2 gráficos con estudios de la influencia en el tiempo y comparación de métodos de trabajo para el C+91%RCD, también se presentarán las curvas de tensión vs deformación.

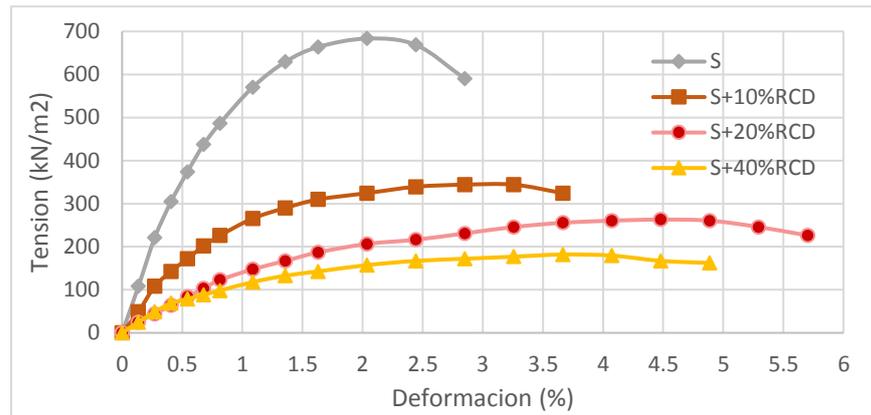
5.3.1 Resistencia a compresión de materiales por el método compactado

- Materiales en estudio S, S+10%RCD, S+20%RCD y S+40%RCD.

Los cuerpos de prueba realizados con los materiales en estudio de este punto no pasaron por un proceso de inundación, estos fueron llevados al ensayo de resistencia a compresión simple, inmediatamente después del desmolde.

En la Fig. 38, puede observarse el comportamiento del suelo que presenta un pico definido, sin embargo, cuando se incrementa el RCD al suelo el comportamiento de estos nuevos materiales son diferentes, donde es posible observar que no presentan picos definidos.

Figura 38: Curva tensão Vs Deformación de materiales sin cemento



Fuente: Autora, 2022

En la tabla 9 se tiene algunas propiedades de estos materiales, donde se observa los valores de la resistencia a la compresión simple de cada material, deformación, grado de saturación y módulo de elasticidad. Con relación al esfuerzo axial puede observarse que a medida que se incrementa el porcentaje de RCD al suelo existe un decrecimiento en la resistencia a medida que se incrementa el RCD al suelo. Observase también que la adición del RCD en el tiempo cero de cura, cambia el comportamiento tensión deformación del suelo, pues no presenta pico y si deformaciones excesivas en la ruptura.

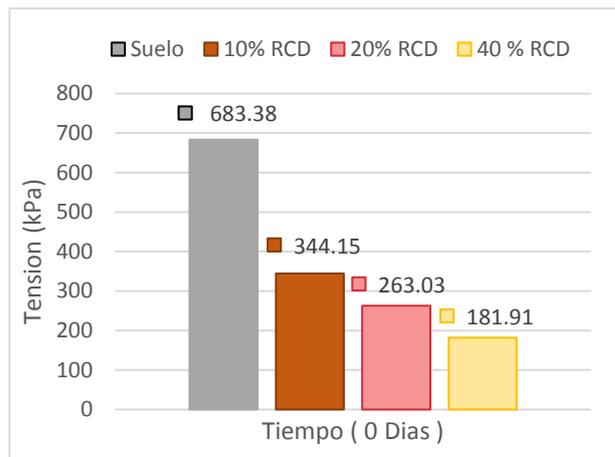
Tabla 9: Propiedades de los materiales

Material	Resistencia (kPa)	Deformación (%)	Grado de Saturación (%)	E ₀ (MPa)
S	683.38	2.036	87.68	81.94
S+10%RCD	344.15	3.258	89.61	40.06
S+20%RCD	263.03	4.479	93.24	18.21
S+40%RCD	181.91	3.665	90.33	18.21

Fuente: Autora, 2022

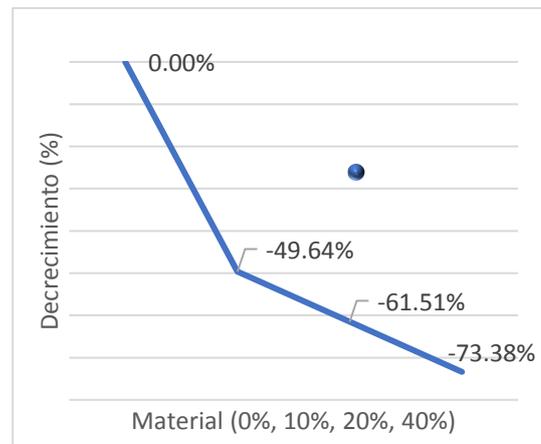
En seguida se tiene un gráfico de barras donde se estudia la influencia del incremento del RCD al suelo y una línea de decrecimiento reflejando esos resultados.

Figura 39: Influencia del %RCD en el suelo



Fuente: Autora, 2022

Figura 40: Decrecimiento de la resistencia con relación al suelo



Fuente: Autora, 2022

En la Fig. 39, se observa los resultados de resistencia a la comprensión simple de cada material. Estos muestran un decrecimiento de la resistencia con el aumento del porcentaje de RCD. Costa (2015) obtuvo resultados similares, aunque con menores decrecimientos. En este trabajo, como se muestra en la Fig. 40, con 10% de RCD el decrecimiento de la resistencia es del orden de 49,6%, y los posteriores decrecimientos son menores. Al parecer el efecto de la compactacion en la mezcla de RCD y suelo no es la adecuada.

- Materiales en estudio SC+20%RCD y SC+40%RCD

Teniendo en conocimiento las cantidades de RCD a ser incluida en el suelo, a estos materiales fue adicionado 9% de cemento, así estos CP pasan por el proceso de cura, correspondiente a los 7, 14 y 21 días, y de esa manera se estudia la influencia del tiempo en estos CP.

En la Fig.41 y Fig.42, se presentan las curvas de tensión vs deformación de los materiales que componen SC+20%RCD y SC+40%RCD respectivamente, donde se observa la evolución de su resistencia con relación al tiempo. Esto debido a que las partículas de RCD cementicios al ser rehidratados empiezan a ganar resistencia, a su vez las partículas de cementos al ser hidratados también empiezan a ganar resistencia. Sousa et al. (2016) trabajaron también con suelo-cemento y RCD, y observaron que existe un crecimiento de la resistencia con el tiempo de cura, de forma similar al presente trabajo. Estos autores inclusive observaron lo mismo para tiempos de cura mucho mayores.

En las tablas 10 y 11 se tiene un resumen de la resistencia a la compresión y su respectiva deformación para cada, y se puede observar un incremento de la resistencia y la rigidez a medida que aumenta el tiempo de cura .

Figura 41: Influencia del tiempo en el SC+20%RCD

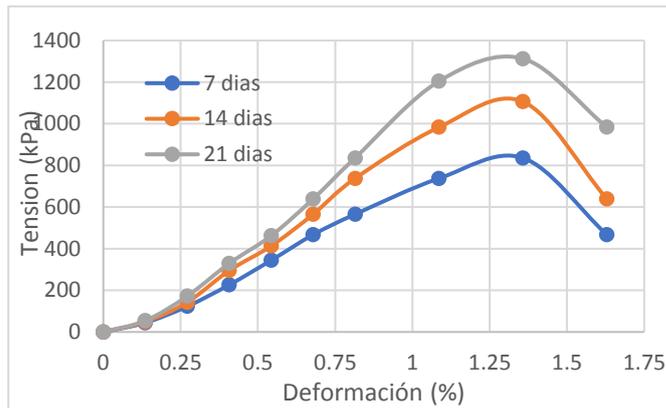


Tabla 10: Resumen de los picos alcanzados en la curva tensión deformación para SC+20%RCD

Tiempo (días)	Tensión (kPa)	Deformación (%)
7	835.79	1.357
14	1106.19	1.357
21	1312.68	1.357

Fuente: Autora, 2022

Fuente: Autora, 2022

Figura 42: Influencia del tiempo en el SC+40%RCD

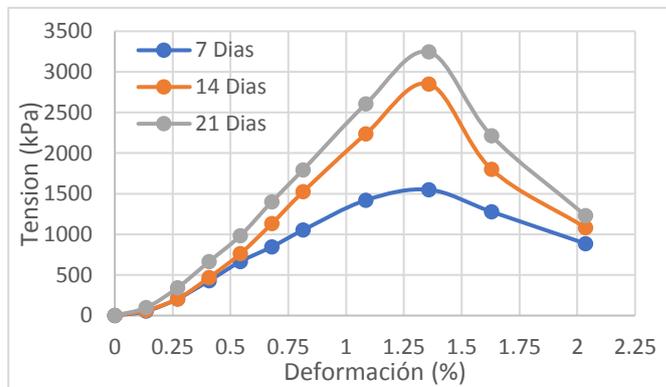


Tabla 11: Resumen de los picos alcanzados en la curva tensión deformación para SC+40%RCD

Tiempo (días)	Tensión (kPa)	Deformación (%)
7	1548.67	1.357
14	2851.51	1.357
21	3244.83	1.357

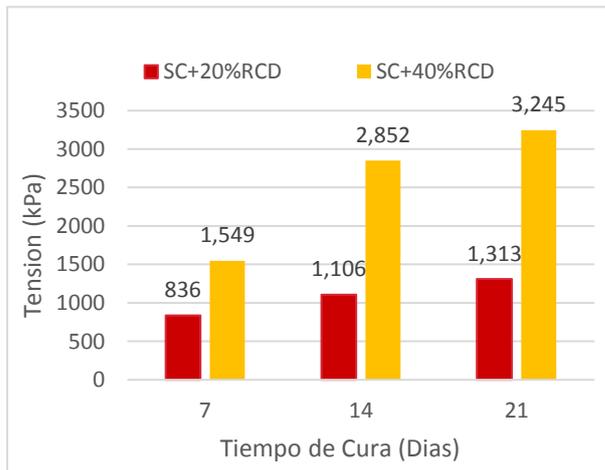
Fuente: Autora, 2022

Fuente: Autora, 2022

En la Fig. 43, se muestra la comparación de las resistencias alcanzadas por cada material para cada tiempo de cura. En la Fig. 44, se observa la comparación en relación al porcentaje de crecimiento de la resistencia en el tiempo. Entrando en detalle sobre la Fig. 44, se observa un crecimiento de la resistencia en ambos materiales, la línea roja representa al material que compone SC+20%RCD, puede observarse que existe un crecimiento de la resistencia en un 32% del día 7 al día 14, sin embargo del día 14 al día 21 crece en un 19%. Ahora estudiando el material que

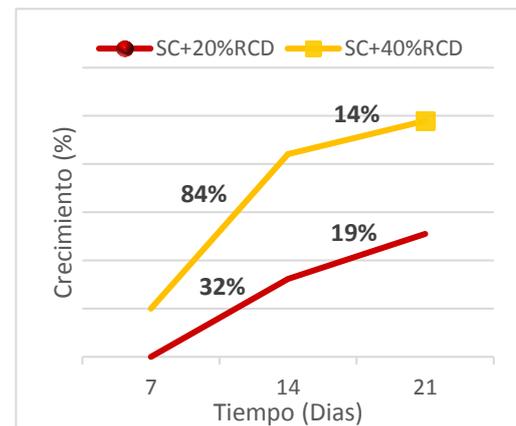
compone SC+40%RCD, entre las edades, de los 7 a los 14 días este crece en un 84% y entre los 14 a 21 días crece en un 14%. Realizando la comparación de un material con el otro, SC+40%RCD con SC+20%RCD, se puede observar que en todas las edades el SC+40%RCD es más resistente que el SC+20%RCD, a los 7 días este es mayor en un 85%, ya a los 14 días, su incremento llega en 158%, y a los 21 días su resistencia es mayor con un 147%. En ambas figuras se puede observar que conforme se aumenta el porcentaje de RCD y disminuye el porcentaje de suelo, la resistencia a la compresión aumenta. Por ese motivo es de esperar que al retirar el suelo (para SC+100%RCD) la resistencia será mayor. Dado que no existe suelo, esta mezcla se va denominar C+91%RCD, considerando el porcentaje de 9% de cemento y el 91% de RCD.

Figura 43: Influencia del tiempo en el SC+Δ%RCD



Fuente: Autora, 2022

Figura 44: Líneas de crecimiento de las resistencias en el tiempo

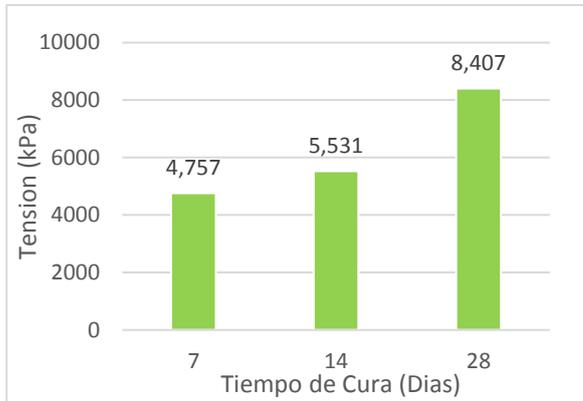


Fuente: Autora, 2022

5.3.2 Resistencia a compresión del C+91%RCD por el método plástico.

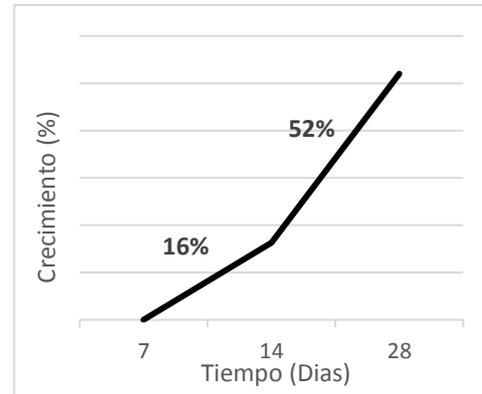
En la Fig. 45 se muestra la influencia del tiempo en la resistencia a la compresión del material que compone C+91%RCD, cuyos cuerpos de prueba fueron preparados por el método plástico. Observase que, conforme aumenta el tiempo aumenta la resistencia a la compresión de este material. El crecimiento de la resistencia con el pasar de los días se muestra en la Fig. 46. Un ganó inicial de un 16% de resistencia de 7 a 14 días, y un incremento mayor de 14 a 28 días (52 %). A los 28 días o valor fue del orden de 8400 kPa o 8,4 MPa, un valor considerable que supera en 8 veces el resultado de resistencia a la mezcla de suelo-cemento al 9% del trabajo de Anagua (2019).

Figura 45: Influencia del tiempo de C+91%RCD, por el método plástico.



Fuente: Autora, 2022

Figura 46: Crecimiento de la resistencia, método plástico

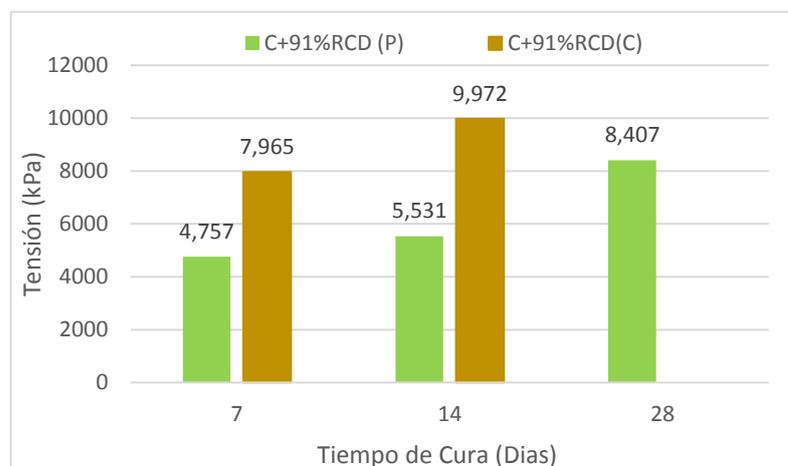


Fuente: Autora, 2022

5.3.2 Comparación de resultados del método compactado y plástico.

En la Fig. 47 se expone un gráfico de barras comparando las resistencias de los CP's que fueron preparados por el método compactado y plástico respectivamente, para el material que compone C+91%RCD. Ambos métodos mostraron un incremento de la resistencia a la compresión con el tiempo. Los cuerpos de prueba preparados por el método compactado presentaron una mayor resistencia a la compresión que el método plástico, esa diferencia es del 70% a los 7 días de curado, y 81% a los 14 días. No se pudo evaluar la diferencia a los 28 días, por falta de ese dato en el método compactado, mas es de esperar que la tendencia sea similar a los tiempos de 7 y 14 días.

Figura 47: Influencia del tiempo y comparación de metodologías para el C+91%RCD



Fuente: Autora, 2022

6 CONSIDERACIONES FINALES

En el presente trabajo se analizó la alternativa del mejoramiento del suelo residual blando con columnas de suelo - cemento - RCD, como forma de viabilizar el uso de cimentaciones superficiales, mediante ensayos de compresión simple, llegando a las siguientes conclusiones:

- A medida que se adiciona RCD en el suelo, se observa un decrecimiento de su resistencia. De esa forma, el RCD no tiene un efecto inmediato en el aumento de la resistencia a la compresión del suelo.
- La adición de 9% de cemento a las mezclas de suelo con RCD, contribuye a incrementar su resistencia a la compresión. El mayor valor se da con el SC+100%RCD, es decir cuando ya no existe suelo en la mezcla. Por ese motivo fue mostrado que la mezcla de RCD y cemento compactadas son consideradas de mayor importancia para aplicación como columnas de refuerzo de suelo blando en fundaciones superficiales.
- La influencia de la compactación en la preparación de la muestra es fundamental para el aumento de la resistencia, posiblemente por su mayor densidad y poros de menor tamaño. Por ese motivo el método compactado mostró resultados mayores que el método plástico.
- En los diagramas de rayos X de aquellos materiales que componen C+91%RCD fue posible observar picos referentes a los minerales a esperar de cuarzo y calcita, la sílice libre es un óxido constituyente del RCD (agregados naturales de concreto y mortero) y la caliza es un constituyente del clinker y la escoria de alto horno que es responsable por el endurecimiento de la mezcla.

7 PROPUESTAS PARA TRABAJOS FUTUROS

- Evaluación del mejoramiento de suelo residual blando con columnas de C+91%RCD trabajados por el método compactado, para viabilizar el uso de cimentaciones superficiales, mediante ensayo de placa.
- Estudio de la permeabilidad del C+91%RCD trabajado por el método compactado.
- Análisis económico de las columnas de C+91%RCD por el método compactado, como refuerzo de suelo blando para viabilizar el uso de fundaciones superficiales.
- Comparación del módulo de elasticidad realizados por el ensayo estático y dinámico, del C+91%RCD.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 D1140-54:** Sample size

ANAGUA COILA, Rolando. **Evaluación del comportamiento carga-asentamiento em escala completa de zapatas sobre limo arcillo blando y limo arcilloso reforzado por columnas de suelo-cemento compactado.** 2019. 76p. Trabajo de Conclusión de Curso Ingeniería Civil de Infraestructura – Universidad Federal de Integración Latino-Americana, Foz do Iguazú, 2019.

ANTUNES, Franklin dos Santos; POLIVANOV, Helena; PORTOCARRERO, Hugo; CAMPOS, Tácio Mauro Pereira de. Solos: Subsídio Para Estudos de Geologia de Engenharia: Soils: Contribution For Engineering Geology Studies. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, [S. l.], v. 38, p. 180-198, jan 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6122:** Projeto de Execução de Fundações: Procedimento. Rio de Janeiro, 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6484:** Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT- Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6502:** Rochas e solos. Rio de Janeiro, 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 7181:** Solo -Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

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 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 9479:** Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 9895:** Índice de Suporte de California: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 12024:** Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 12025:** Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 12770:** Solo coesivo - Determinação da resistência a compressão não confinada. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos de sólidos da construção civil-Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural-Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BARENDT, Frans. **Introduction to Soft Soil Geotechnique:** Content, Context and Application. Amsterdam, Netherlands IOS Press, 2011. 354 p. ISBN 1607507889, 9781607507888.

BERGADO, D. T.; RUENKRAIRERGS, T.; TAESIRI, Y.; BALASUBRAMANIAM, A. S. Deep soil mixing used to reduce embankment settlement. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement.**, 3 (4), p. 145-162, 1999.

BERRY, Peter L.; REID, David. **Mecânica de solos**. São Paulo: McGraw-HILL, 1996.

BITENCOURT, E. R. **Utilização de matéria-prima alternativa na fabricação de tijolos de argila vermelha e branca**. Dissertação de Mestrado, UFSC, 2004.

BIZARRETA-ORTEGA, J. C.; CAMPOS, T. M. Caracterização geotécnica de um RCD e uma argila visando sua utilização como barreira capilar. In: CARDOZO, E. L. (org.). **Geologia Ambiental: Tecnologias para o desenvolvimento sustentável**. Ponta Grossa: Atena, 2017. v. 2, p. 19-33. ISBN 978-85-93243-38-7. E-book (252 p.).

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

BRAJA DAS, M. **Fundamentos de ingenieria geotecnica**. Quarta. ed. México:: Cengage, 2015.

BRASIL. Ministério do Médio Ambiente, **Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA**, Resolução CONAMA nº 307, de 5 de Júlio de 2002, disponível em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>> acesso em: 4 de novembro, 2018

CALDAS, Thais Cristina da Costa. **Reciclagem de resíduo de vidro plano em cerâmica vermelha**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF. Campos dos Goytacazes, RJ. 2012.

CASAGRANDE, Michéle Dal Toé. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. 2001. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CHELLIS, R. D. **Cimentaciones profundas**. 2. ed. Mexico: Diana, 1971.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson; ALBIERO, José Henrique. **Fundações directas: projeto geotécnico**. [S. l.]: Oficina de Textos, 2011. 142 p. ISBN 978-85-7975-035-9.

COSTA, Conceição de Maria Cardoso. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos**. 2015. xviii, 163 f., il. Tese (Doutorado em Geotecnia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

Decimo Quinto Encuentro Regiona Ibero-americano de CIGRE. Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, Brasil, 2013.

DSOARES (2015). **Relatório Técnico de Sondagens–UNILA.** 20-11-2015. Controle SO-07815. Foz do Iguaçu.

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.

FERREIRA, CONTO, M., THOMÉ, A. Utilização de residuo da construção e demolição como reforço de um solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais. **Teoria e Practica na Engenharia Civil** , n. 18, p. p1-12, 2011.

FREIRE, Paulo Roberto de Paula. **Utilização dos residuos da construção civil na produção de blocos de argamassa sem função estrutural.** 2010. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Catolica de Pernambuco, Recife, 2010.

MEDEIROS, Caroline Ramos; SILVA, José Augusto Ferreira da; MOREIRA, Marcos Antônio Cruz. Resíduos da construção civil: cenário atual, planejamento e propostas para o município de Macaé, RJ - Brasil. **Revista Internacional de Ciências**, Rio de Janeiro, v. v.09, p. 225-243, 28 dez. 2018.

MORAND, Fernanda Guerra. **Estudo das principais aplicações de resíduos de obra como materiais de construção.** 2016. 104 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, 2016.

NASCIMENTO, E. C. do. LAFAYETTE, K. P. V. SILVA, L. C. L. da, BEZERRA, J. da S. PORTELA, M. F. de A. Avaliação do uso do agregado reciclado da construção civil como barreira hidráulica em camadas de coberturas de aterros sanitários. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 10, p. e547101019158, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i10.19158. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/19158>. Acesso em: 11 marzo. 2022.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5. ed. Rio de Janeiro: Bookman, 2016. Disponible en: https://books.google.com.br/books/about/Propriedades_do_Concreto_5%C2%AA_Edi%C3%A7%C3%A3o.html?id=dYOPCgAAQBAJ&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false> Acceso en: 10 marzo 2022.

OCHOA AVEROS, S., BIZARRETA ORTEGA, J. Experimental Study on Stabilization Subgrade Soil Soft with Fine Concrete Residue. **ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.**, 1 (1), p. 1044-1052, 2021.

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

OLIVEIRA Thays Car Feliciano. **Avaliação experimental de barreira capilar com rcd como camada de bloqueio para coberturas finais de arsu.** Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Civil de Infraestrutura – Universidade Federal de Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019.

OLIVEIRA Thays Car Feliciano, et al. **Estacas de Solo Cimento como forma de viabilizar o uso de Sapatas em Solo Residual Mole.** XIX Congresso brasileiro de mecânica dos solos e Engenharia Geotecnia e Desenvolvimento Urbano Cobranseg 2018, Salvador, Bahia, ABMS, 2018.

PINTO, Tarcísio de Paula. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** 1999. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PITTA, Lucas Lima da Rocha. **Aplicação de resíduos de construção e demolição como camada de reforço para fundações radier.** 2016. xiii, 83 f., il. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil)—Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

RASHID, Ahmad Safuan et al. 2018. Behaviour of soft soil improved by floating soil-cement column. **Int. J. Phys. Modell. Geotech.** 18 (2): 95–116. 2018.

REBELLO, Yopanan Conrado Pe. **Guia Prático de Projeto, Execução e Dimensionamento.** São Paulo, 2008. 239 p.

Secretaria municipal de planejamento "Captação" recursos. **Plano diretor de desenvolvimento integrado sustentável (pddis).** Foz do Iguaçu, 2016

SAID, Khairum Nissa Mat et al. Settlement Evaluation of Soft Soil Improved by Floating Soil Cement Column. **International Journal of Geomechanics**, v. 19, n. 1, p. 04018183, 2018.

SANDOVAL, Otilio Acevedo; HERNÁNDEZ, Enrique Ortiz; SÁNCHEZ, Misael Cruz. EL PAPEL DE ÓXIDOS DE HIERRO EN SUELOS. **Terra Latinoamericana**, 22 (4), p. 485-497, 2004.

SANTOS, Alaílson Domingos dos. (2004) **Estudo de propriedades de físicas e químicas de um novo cimento selador endodôntico**. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Ilha Solteira - SP. Universidade Estadual Paulista – UNESP, 68 p. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/88360>>. Acesso em: 12 enero 2022.

SIQUEIRA, Fabricio Bagli (2013). **Avaliação da incorporação de resíduo grits nas propriedades e microestrutura de tijolo solo-cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Campos dos Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF.

SOUZA, M. L. de; SOUZA, V. de. Avaliação de solos residuais de rochas basálticas e a ocorrência de feições erosivas (trópico de capricórnio, sul do brasil): Evaluation of residual soils of basaltic rocks and the occurrence of erosive features (tropic of capricorn, south of brazil). Separata de: QUINTA, Ferreira, M.; BARATA, M. T.; LOPES, F. C.; HENRIQUES, M. H.; REIS, R. Pena dos. **Para desenvolver a Terra: memórias e notícias de Geociências no espaço lusófono**. Coímbra: [s. n.], 2012. cap. 14, p. 141-151. ISBN 978-989-26-0532-6.

SOUZA, Márcia I. B.; SEGANTINI, Antonio A. S.; PEREIRA, Joelma A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto: Soil-cement pressed bricks made with concrete wastes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 205-212, 18 set. 2007. Disponível em:< <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000200014>> Acesso em 22 janeiro 2022.

TEIXEIRA, Paulo César; DONAGEMMA, Guilherme Kangussu; FONTANA, Ademir; TEIXEIRA, Wenceslau Geraldes. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. rev. e aum. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2017. 574 p. ISBN 978-85-7035-771-7.

ULSEN, Carina; KAHN, Henrique; ANGULO, Sergio C.; JOHN, Venderley M. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo: Chemical composition of mixed construction and demolition recycled aggregates from the State of São Paulo. **Rem: Revista Escola de Minas: Mineração**, Ouro Preto, Abr. Jun. 2010.

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. **Fundações**: Critérios de Projeto | Investigações do Subsolo | Fundações Superficiais | Fundações Profundas. 2. ed. [S. l.]: Oficina de Textos, 2011. 240 p. v. 1. ISBN 978-85-7975-014-4.

VENDRUSCOLO, Marcio Antonio. **Análise numérica e experimental do comportamento de fundações superficiais assentes em solo melhorado**. 1996.

163 f. Tesis de maestria (Mestre em Engenharia) - Universidade federal do rio grande do sul-UFRGS- Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 1996.

VIEIRA, Carlos Maurício Fontes; MONTEIRO, Sérgio Neves; FILHO, Jamil Duailibi. Formulação de Massa de Revestimento Cerâmico com Argilas Plásticas de Campos dos Goytacazes (RJ) e Taguá (SP). **Cerâmica Industrial**, [s. l.], Novembro/Dezembro 2001.