

Facultad de Tecnología de la Construcción

**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE  
LAS PROPIEDADES FÍSICO-  
MECÁNICAS DEL SUELO ARCILLOSO  
ESTABILIZADO APLICANDO POLVO DE  
CÁSCARA DE HUEVO Y CENIZA DE  
CÁSCARA DE ARROZ COMO ADITIVO,  
EN EL Bo. WILMER ICAZBALCETA,  
MUNICIPIO DE SÉBACO”.**

Monografía para optar al título de Ingeniero civil.

**Elaborado por:**

**Tutor:**

Br. Grecia Nayerli Molina  
Rodezno.

Carnet: 2018-0835U

Br. Emily Elizabeth Rocha  
Obando.

Carnet: 2018-0720U

Msc. Silvia Isabel Lindo  
O’connors

## Dedicatoria

Esta Investigación monográfica se la dedico eternamente a Dios, por darme sabiduría y fuerzas necesarias para seguir mis metas y sueños planteados, sin la voluntad de él no hubiera sido posible nada.

A mis padres, quienes día a día trabajaron arduamente para que pudiese tener una educación superior, que con su amor, paciencia y esfuerzo me apoyaron hasta el final de este viaje.

A Ing. Xiomara Machado, por ser un ángel que Dios me envió en el transcurso del camino y me brindó su mano amiga, por protegerme y darme los mejores consejos.

A mi familia, quienes estuvieron presentes en los tiempos de tempestad y me dieron ánimos para seguir mis sueños, tía Rosalpina, su apoyo incondicional siempre lo llevaré conmigo, la adoro.

También, al Ing. Carlos Montiel y al Sr. Justo Castillo de la empresa Insuma, por permitirnos hacer uso del laboratorio de suelos, dándonos el apoyo necesario para finalizar nuestro trabajo monográfico.

Finalmente, quiero dedicar esta tesis a aquellos amigos que estuvieron presentes en cada uno de los logros que obtuve a lo largo de la carrera y compartimos los mejores momentos, no importando la situación, los llevo en mi corazón.

Emily Elizabeth Rocha Obando

## Dedicatoria

A Dios por darme fortaleza, sabiduría y siempre cuidarme durante el camino, a mis padres por su amor y apoyo incondicional y a todas las personas que jugaron un papel importante en este viaje. Gracias a quienes compartieron su sustento y un techo cuando más lo necesitaba, a quienes me dieron valiosos consejos y ayuda desinteresada. Cada uno de ustedes ha sido un pilar fundamental en mi camino académico y les estoy eternamente agradecida.

Grecia Nayerli Molina Rodezno

## **Resumen**

La presente investigación tiene como objetivo principal analizar el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas del suelo arcilloso estabilizado aplicando polvo de cáscara de huevo y ceniza de cascara de arroz como aditivo, de acuerdo a la normativa SUCS y AASHTO, en el Bo. Wilmer Icazbalceta, municipio de Sébaco.

La investigación es de tipo experimental y se compone por 5 capítulos:

Capítulo I, contiene introducción, antecedentes, justificación y objetivos.

El capítulo II, define los conceptos de suelos, tipos de suelos, ensayos de suelos, estabilización y obtención de cada uno de los aditivos utilizados.

El capítulo III, contiene las especificaciones del estudio, la ubicación, la obtención de los materiales y las normas utilizadas.

En el capítulo IV se desarrolla el trabajo de campo y el trabajo que se realizó en laboratorio, donde se obtuvieron los resultados de cada ensaye.

Se realizaron ensayos de granulometría y límites de Atterberg, y se calculó el índice de grupo para determinar la clasificación del suelo, obteniendo un A-7-6, un suelo muy malo, que necesita ser estabilizado, para ser aprovechado. Posteriormente a la clasificación, se hizo ensayo de proctor modificado y CBR, para conocer la densidad seca máxima y la capacidad de deformación del suelo.

Se agregó porcentajes de aditivos de 5%, 10% y 15% de cada aditivo al suelo y posteriormente se realizaron los mismos ensayos mencionados anteriormente, con el fin de hacer un análisis comparativo al final y ver cual porcentaje de estabilizante resulta más óptimo para estabilizar el suelo.

En el capítulo V se encuentra el análisis de resultados comparativo de todos los ensayos realizados para el suelo en estado natural y para el suelo estabilizado con los diferentes porcentajes de aditivo.

Y en el capítulo 6 se dan las conclusiones y recomendaciones de los datos obtenidos en el estudio.

Índice.

|                                                           |          |
|-----------------------------------------------------------|----------|
| <b>CAPÍTULO I: Aspectos Generales.....</b>                | <b>1</b> |
| Introducción.....                                         | 1        |
| Antecedentes.....                                         | 3        |
| Justificación.....                                        | 5        |
| Objetivos.....                                            | 6        |
| Objetivo General.....                                     | 6        |
| Objetivos Específicos.....                                | 6        |
| <b>CAPITULO II: Marco Teórico.....</b>                    | <b>7</b> |
| Suelos.....                                               | 7        |
| Propiedades físico-Mecánicas del suelo.....               | 7        |
| Suelo Arcilloso (Sonzocuite o arcilla negra).....         | 9        |
| Localización de suelos arcillosos en Nicaragua.....       | 9        |
| Ensayos de Suelos.....                                    | 9        |
| Contenido de Humedad.....                                 | 10       |
| Análisis Granulométrico.....                              | 10       |
| Granulometría por tamizado.....                           | 10       |
| Límites de Atterberg.....                                 | 11       |
| Límite líquido (LL).....                                  | 11       |
| Límite plástico (LP).....                                 | 12       |
| Método de clasificación de los suelos.....                | 13       |
| El sistema de clasificación SUCS.....                     | 14       |
| Ensayo de Proctor Modificado.....                         | 17       |
| Ensayo de California Bearing Ratio (CBR).....             | 18       |
| Estabilización de suelos.....                             | 18       |
| Métodos de estabilización de suelos.....                  | 19       |
| Estabilización de los suelos con la cáscara de huevo..... | 19       |
| La cáscara del huevo.....                                 | 19       |
| Producción de huevos a nivel nacional.....                | 19       |

|                                                                     |            |
|---------------------------------------------------------------------|------------|
| Estabilización de los suelos con la ceniza de cáscara de arroz..... | 20         |
| Cáscaras de arroz.....                                              | 20         |
| Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA).....                               | 20         |
| Obtención de la ceniza de cáscara de arroz.....                     | 21         |
| Temperatura de calcinación de la CCA.....                           | 21         |
| Producción de la Cáscara de Arroz.....                              | 22         |
| Datos para Nicaragua y producción en Sébaco.....                    | 22         |
| <b>CAPITULO III: Diseño Metodológico.....</b>                       | <b>23</b>  |
| Área de Estudio.....                                                | 23         |
| Tipo de investigación.....                                          | 23         |
| Obtención de los materiales utilizados.....                         | 23         |
| Obtención del suelo estudiado (Toma de muestras).....               | 23         |
| Obtención y preparación de los aditivos.....                        | 24         |
| Normas de ensayos utilizadas.....                                   | 24         |
| <b>CAPITULO IV: Trabajo de campo y laboratorio.....</b>             | <b>25</b>  |
| Trabajo de Campo.....                                               | 25         |
| Localización del sitio:.....                                        | 25         |
| Detalles del suelo en estudio:.....                                 | 26         |
| Trabajo de laboratorio.....                                         | 27         |
| Caracterización del suelo en estado natural.....                    | 27         |
| <b>Caracterización de suelo estabilizado.....</b>                   | <b>38</b>  |
| <b>CAPITULO V: Interpretación de resultados.....</b>                | <b>111</b> |
| <b>CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>             | <b>114</b> |
| Conclusiones.....                                                   | 114        |
| Recomendaciones.....                                                | 116        |
| <b>Bibliografía.....</b>                                            | <b>117</b> |
| <b>Webgrafía.....</b>                                               | <b>119</b> |
| <b>Anexos. 120</b>                                                  |            |
| <b>Anexos A.....</b>                                                | <b>120</b> |
| <b>Anexo B 120</b>                                                  |            |

## **Índice de Tablas.**

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tabla 1. Tamaño de tamices.....</b>                                             | <b>11</b> |
| <b>Tabla 2. Clasificación de suelos de acuerdo a su índice de plasticidad.....</b> | <b>13</b> |
| <b>Tabla 3. Clasificación de suelos- Método AASHTO.....</b>                        | <b>14</b> |
| <b>Tabla 4. Clasificación de suelos- Método SUCS.....</b>                          | <b>16</b> |
| <b>Tabla 5. Clasificación y uso del suelo según el valor de CBR.....</b>           | <b>18</b> |
| <b>Tabla 6. Composición química de la cascarilla de arroz.....</b>                 | <b>21</b> |
| <b>Tabla 7. Contenido de humedad del suelo natural.....</b>                        | <b>27</b> |
| <b>Tabla 8. Determinación de gravedad específica del suelo natural.....</b>        | <b>28</b> |
| <b>Tabla 9. Rangos de gravedades específicas según el tipo de suelo.....</b>       | <b>29</b> |
| <b>Tabla 10. Granulometría para suelo natural.....</b>                             | <b>29</b> |
| <b>Tabla 11. Límite líquido del suelo natural.....</b>                             | <b>31</b> |
| <b>Tabla 12. Limite plástico del suelo natural.....</b>                            | <b>32</b> |
| <b>Tabla 13. Datos del Proctor modificado para suelo Natural.....</b>              | <b>34</b> |
| <b>Tabla 14. Datos obtenidos de ensayo de C.B.R del suelo natural.....</b>         | <b>36</b> |
| <b>Tabla 15. Resultados obtenidos del ensayo de penetración del suelo natural.</b> | <b>37</b> |
| <b>Tabla 16. Granulometría del suelo más 5% de CH.....</b>                         | <b>38</b> |
| <b>Tabla 17. Límite líquido del suelo natural más 5% de CH.....</b>                | <b>40</b> |
| <b>Tabla 18. Límite plástico del suelo natural más 5% de CH.....</b>               | <b>41</b> |
| <b>Tabla 19. Resultados de Límites de Atterberg del 5% CH.....</b>                 | <b>41</b> |
| <b>Tabla 20. Datos de proctor modificado para el suelo más 5% de CH.....</b>       | <b>42</b> |
| <b>Tabla 21. Datos obtenidos del ensayo C.B.R. para el suelo más 5% de CH.....</b> | <b>44</b> |
| <b>Tabla 22. Resultados obtenidos del ensayo de penetración del suelo + 5% CH.</b> | <b>45</b> |
| <b>Tabla 23. Granulometría para el suelo más 10% de CH.....</b>                    | <b>47</b> |
| <b>Tabla 24. Límite Líquido del suelo natural más el 10% de CH.....</b>            | <b>49</b> |
| <b>Tabla 25. Límite plástico del suelo natural más el 10% de CH.....</b>           | <b>50</b> |
| <b>Tabla 26. Resultados de los límites de Atterberg del 10% de CH.....</b>         | <b>50</b> |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 27. Datos del proctor modificado para el suelo más 10% de CH.....           | 51 |
| Tabla 28. Datos obtenidos del ensayo CBR para el suelo más 10% de CH.....         | 53 |
| Tabla 29. Resultados del ensayo de penetración para el suelo más 10% de CH.<br>53 |    |
| Tabla 30. Granulometría para el suelo más 15% de CH.....                          | 55 |
| Tabla 31. Límite líquido para el suelo más 15% de CH.....                         | 57 |
| Tabla 32. Límite plástico para el suelo más 15% de CH.....                        | 58 |
| Tabla 33. Resultados de Límites de Atterberg para el suelo más 15% de CH...       | 58 |
| Tabla 34. Datos del proctor modificado para el suelo más 15% de CH.....           | 59 |
| Tabla 35. Datos obtenidos del ensayo CBR para el suelo más 15% de CH.....         | 61 |
| Tabla 36. Resultados del ensayo de penetración del suelo más 15% de CH...         | 61 |
| Tabla 37. Granulometría para el suelo más 5% de CCA.....                          | 63 |
| Tabla 38. Límite líquido para el suelo más 5% de CCA.....                         | 65 |
| Tabla 39. Límite plástico para el 5% de CCA.....                                  | 66 |
| Tabla 40. Resultados de Límites de Atterberg del 5% de CCA.....                   | 66 |
| Tabla 41. Datos obtenidos de proctor para el suelo más 5% de CCA.....             | 67 |
| Tabla 42. Datos del ensayo CBR del suelo más 5% de CCA.....                       | 69 |
| Tabla 43. Resultados del ensayo de penetración del suelo más 5% de CCA...         | 69 |
| Tabla 44. Granulometría para el suelo más 10% de CCA.....                         | 71 |
| Tabla 45. Límite líquido para el suelo más 10% de CCA.....                        | 73 |
| Tabla 46. Límite plástico para el suelo más 10% de CCA.....                       | 74 |
| Tabla 47. Resultados de Límites de Atterberg del suelo más 10% de CCA.....        | 74 |
| Tabla 48. Datos obtenidos del proctor para el suelo más 10% CCA.....              | 75 |
| Tabla 49. Datos del ensayo CBR para el suelo más 10% de CCA.....                  | 77 |
| Tabla 50. Resultados del ensayo de penetración del suelo más 10% CCA.....         | 77 |
| Tabla 51. Granulometría para el suelo más 15% de CCA.....                         | 79 |
| Tabla 52. Límite líquido para el suelo más 15% de CCA.....                        | 81 |
| Tabla 53. Límite plástico del suelo más 15% de CCA.....                           | 82 |
| Tabla 54. Resultados de Límites de Atterberg del suelo más 15% de CCA.....        | 82 |
| Tabla 55. Datos obtenidos del proctor para el suelo más 15% de CCA.....           | 83 |
| Tabla 56. Datos del ensayo CBR para el suelo más 15% de CCA.....                  | 85 |
| Tabla 57. Resultados del ensayo de penetración del suelo más 15% de CCA..         | 85 |

|                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Tabla 58. Granulometría del suelo más 5% mixto.....</b>                          | <b>87</b>  |
| <b>Tabla 59. Límite líquido para el suelo más 5% mixto.....</b>                     | <b>89</b>  |
| <b>Tabla 60. Límite plástico para el suelo más 5% mixto.....</b>                    | <b>90</b>  |
| <b>Tabla 61. Resultados de los límites de Atterberg del suelo más 5% mixto.....</b> | <b>90</b>  |
| <b>Tabla 62. Datos del proctor para el suelo más 5% mixto.....</b>                  | <b>91</b>  |
| <b>Tabla 63. Datos del ensayo CBR del suelo más 5% mixto.....</b>                   | <b>93</b>  |
| <b>Tabla 64. Resultados del ensayo de penetración del suelo más 5% mixto.....</b>   | <b>93</b>  |
| <b>Tabla 65. Granulometría del suelo más 10% mixto.....</b>                         | <b>95</b>  |
| <b>Tabla 66. Límite líquido para el suelo más 10% mixto.....</b>                    | <b>97</b>  |
| <b>Tabla 67. Límite plástico para el suelo más 10% mixto.....</b>                   | <b>98</b>  |
| <b>Tabla 68. Resultados de límites de Atterberg del suelo más 10% mixto.....</b>    | <b>98</b>  |
| <b>Tabla 69. Datos del ensayo proctor para el suelo más 10% mixto.....</b>          | <b>99</b>  |
| <b>Tabla 70. Datos del ensayo CBR para el suelo más 10% mixto.....</b>              | <b>101</b> |
| <b>Tabla 71. Resultados de la penetración del suelo más 10% mixto.....</b>          | <b>101</b> |
| <b>Tabla 72. Granulometría para el suelo más 15% mixto.....</b>                     | <b>103</b> |
| <b>Tabla 73. Límite Líquido del suelo más 15% mixto.....</b>                        | <b>105</b> |
| <b>Tabla 74. Límite plástico para el suelo más 15% mixto.....</b>                   | <b>106</b> |
| <b>Tabla 75. Resultados de límites de Atterberg del suelo más 15% mixto.....</b>    | <b>106</b> |
| <b>Tabla 76. Datos del proctor para el suelo más 15% mixto.....</b>                 | <b>107</b> |
| <b>Tabla 77. Datos del ensayo CBR para el suelo más 15% mixto.....</b>              | <b>109</b> |
| <b>Tabla 78. Resultados del ensayo de penetración del suelo más 15% mixto..</b>     | <b>109</b> |
| <b>Tabla 79. Tabla Resumen total de los resultados de laboratorio.....</b>          | <b>120</b> |

## **Índice de Gráficas.**

|                    |                                                                                                       |           |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Gráfica 1.</b>  | <b>Curva granulométrica del suelo natural.....</b>                                                    | <b>30</b> |
| <b>Gráfica 2.</b>  | <b>Límite Líquido del suelo natural.....</b>                                                          | <b>32</b> |
| <b>Gráfica 3.</b>  | <b>Clasificación del suelo natural ASTM D 2487.....</b>                                               | <b>33</b> |
| <b>Gráfica 4.</b>  | <b>Clasificación del suelo natural AASHTO M-145.....</b>                                              | <b>33</b> |
| <b>Gráfica 5.</b>  | <b>Curva de compactación para el suelo natural.....</b>                                               | <b>35</b> |
| <b>Gráfica 6.</b>  | <b>Esfuerzo Vs Penetración para el suelo natural.....</b>                                             | <b>37</b> |
| <b>Gráfica 8.</b>  | <b>Límite líquido del suelo más 5% de CH.....</b>                                                     | <b>40</b> |
| <b>Gráfica 9.</b>  | <b>Clasificación del suelo natural más el 5% de CH por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.....</b>  | <b>41</b> |
| <b>Gráfica 10.</b> | <b>Curva de Compactación del 5% de Cáscara de Huevo.....</b>                                          | <b>43</b> |
| <b>Gráfica 11.</b> | <b>Esfuerzo Vs Penetración del suelo más 5% de CH.....</b>                                            | <b>46</b> |
| <b>Gráfica 13.</b> | <b>Límite Líquido del 10% de CH.....</b>                                                              | <b>49</b> |
| <b>Gráfica 14.</b> | <b>Clasificación del suelo natural más el 10% de CH por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.....</b> | <b>50</b> |
| <b>Gráfica 15.</b> | <b>Curva de Compactación del 10% de Cáscara de Huevo.....</b>                                         | <b>52</b> |
| <b>Gráfica 16.</b> | <b>Esfuerzo Vs Penetración para el 10% de CH.....</b>                                                 | <b>54</b> |
| <b>Gráfica 18.</b> | <b>Límite Líquido del suelo más 15% de CH.....</b>                                                    | <b>57</b> |
| <b>Gráfica 19.</b> | <b>Clasificación del suelo natural más el 15% de CH por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.....</b> | <b>58</b> |
| <b>Gráfica 20.</b> | <b>Curva de Compactación del suelo más 15% de CH.....</b>                                             | <b>60</b> |
| <b>Gráfica 21.</b> | <b>Esfuerzo Vs Penetración para el suelo más 15% de CH.....</b>                                       | <b>62</b> |
| <b>Gráfica 23.</b> | <b>Límite Líquido del suelo más 5% de CCA.....</b>                                                    | <b>65</b> |
| <b>Gráfica 24.</b> | <b>Clasificación del suelo natural más el 5% de CCA por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.....</b> | <b>66</b> |
| <b>Gráfica 25.</b> | <b>Curva de Compactación del suelo más 5% de CCA.....</b>                                             | <b>68</b> |
| <b>Gráfica 26.</b> | <b>Esfuerzo Vs Penetración para el suelo más 5% de CCA.....</b>                                       | <b>70</b> |
| <b>Gráfica 28.</b> | <b>Límite Líquido de suelo más 10% de CCA.....</b>                                                    | <b>73</b> |
| <b>Gráfica 30.</b> | <b>Curva de Compactación para el 10% de Cenizas de Cáscara de Arroz.</b>                              | <b>76</b> |

|             |                                                                                                            |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfica 31. | Esfuerzo Vs Penetración para el suelo más 10% de CCA.....                                                  | 78  |
| Gráfica 33. | Gráfica del Límite Líquido del suelo más 15% de CCA.....                                                   | 81  |
| Gráfica 34. | Clasificación del suelo natural más el 15% de CCA por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.....            | 82  |
| Gráfica 35. | Curva de Compactación del suelo más 15% de CCA.....                                                        | 84  |
| Gráfica 36. | Esfuerzo Vs Penetración para el suelo más 15% de CCA.....                                                  | 86  |
| Gráfica 37. | Curva Granulométrica del suelo más 5% Mixto.....                                                           | 88  |
| Gráfica 38. | Límite Líquido del suelo más 5% mixto.....                                                                 | 89  |
| Gráfica 39. | Clasificación del suelo natural más el 5% de CH y CCA por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.....        | 90  |
| Gráfica 40. | Curva de compactación del suelo más 5% mixto.....                                                          | 92  |
| Gráfica 41. | Esfuerzo Vs. Penetración para el suelo más 5% mixto.....                                                   | 94  |
| Gráfica 42. | Curva granulométrica del suelo más 10% mixto.....                                                          | 96  |
| Gráfica 43. | Límite Líquido del suelo más 10% mixto.....                                                                | 97  |
| Gráfica 44. | Clasificación del suelo natural más 10% mixto por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.....                | 98  |
| Gráfica 45. | Curva de Compactación del 10% de Cáscara de Huevo Pulverizado y Cenizas de Cáscara de Arroz.....           | 100 |
| Gráfica 46. | Esfuerzo Vs Penetración para el suelo más 10% mixto.....                                                   | 102 |
| Gráfica 47. | Curva Granulométrica del 15% de Cáscara de Huevo Pulverizado y Cáscara de Cenizas de Cáscara de Arroz..... | 104 |
| Gráfica 48. | Límite Líquido del suelo más 15% mixto.....                                                                | 105 |
| Gráfica 49. | Clasificación del suelo natural más el 15% mixto por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.....             | 106 |
| Gráfica 50. | Curva de Compactación del suelo más 15% mixto.....                                                         | 108 |
| Gráfica 51. | Esfuerzo Vs Penetración para el 15% de Cáscara de Huevo y Cenizas de Cáscara de Arroz.....                 | 110 |

### **Índice de Diagrama de Pastel.**

|                                                                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Diagrama de Pastel 1. Composición Granulométrica del suelo en estado natural.</b>                                                | <b>30</b>  |
| <b>Diagrama de Pastel 2. Composición Granulométrica del suelo más 5% de CH.</b>                                                     | <b>39</b>  |
| <b>Diagrama de Pastel 3. Composición Granulométrica del 10% de Cáscara de Huevo Pulverizado.</b>                                    | <b>48</b>  |
| <b>Diagrama de Pastel 4. Composición Granulométrica del 15% de Cáscara de Huevo Pulverizado.</b>                                    | <b>56</b>  |
| <b>Diagrama de Pastel 5. Composición Granulométrica del suelo más 5% de CCA.</b>                                                    | <b>64</b>  |
| <b>Diagrama de Pastel 6. Composición granulométrica del suelo más 10% de CCA.</b>                                                   | <b>72</b>  |
| <b>Diagrama de Pastel 7. Composición Granulométrica del suelo más 15% de CCA.</b>                                                   | <b>80</b>  |
| <b>Diagrama de Pastel 8. Composición Granulométrica del suelo más 5% mixto.</b>                                                     | <b>88</b>  |
| <b>Diagrama de Pastel 9. Composición Granulométrica del suelo más 10% mixto.</b>                                                    | <b>96</b>  |
| <b>Diagrama de Pastel 10. Composición Granulométrica del 15% de Cáscara de Huevo Pulverizada y Cenizas de Cáscara de Arroz.....</b> | <b>104</b> |

## CAPÍTULO I: Aspectos Generales

### Introducción

Los suelos con las propiedades requeridas para la construcción, no están disponibles tan fácilmente, a menudo se encuentran suelos inestables que tienen baja capacidad portante, por lo que surgen en las construcciones problemas de asentamientos diferenciales, fallas de corte, entre otros; Por lo que, es necesario realizar un tratamiento para mejorar sus propiedades y que sean aptos para la construcción civil.

La estabilización de suelos es una solución económicamente viable para este problema, por lo que, a través de los años, se ha investigado y estudiado diferentes materiales que se pueden utilizar en conjunto con el suelo para mejorar sus propiedades. Algunos de los materiales que se han utilizado para la estabilización de suelos incluyen la cal, cemento, cenizas volantes, etc. El uso de estos productos resulta efectivo, pero incurre en altos costos, por lo que se ha investigado sobre otros materiales sustitutos que sean orgánicos y más económicos que puedan funcionar para aportarle dureza al suelo.

Anteriormente, se ha estudiado el polvo de cáscara de huevo y la ceniza de cáscara de arroz como material estabilizante y se ha demostrado que tienen gran eficacia para la estabilización de suelos, debido a su alto contenido en calcio y silicio respectivamente, componentes que son similares a los que contienen otros estabilizantes que son usados normalmente en la industria de la construcción, pero que son mucho más caros y dañinos para el medio ambiente.

Cabe destacar, que estos productos orgánicos son un desecho doméstico e industrial abundante que no se ha sabido aprovechar adecuadamente; se puede utilizar este residuo para el mejoramiento de las propiedades de los suelos arcillosos contribuyendo al medio ambiente ya que son de origen natural y a la vez reciclados. También es muy beneficioso para la sociedad debido a que son productos económicamente accesibles y están disponibles localmente.

Este estudio tendrá la necesidad de demostrar si los aditivos a utilizar son capaces de dar como resultado una homogeneidad compatible y sea efectivo en la determinación de plasticidad y resistencia, adquiriendo más información para la aplicación en cada una de los ensayos por separado y mixto, además de compararlos y evaluarlos bajo la influencia de capacidad de soporte en el suelo arcilloso.

Como objeto de estudio se tomará un suelo arcilloso, ubicado en el Bo. Wilmer Icazbalceta, municipio de Sébaco, el cual se le hará un muestreo en campo, seguidamente se determinarán sus propiedades en estado natural y posteriormente se realizarán mezclas con distintas dosificaciones de los estabilizantes para ensayarlas y comparar los resultados de las diferentes pruebas para su respectivo análisis y comprobar la eficacia de los materiales empleados como estabilizantes.

## Antecedentes

Desde hace mucho tiempo se han investigado diversos materiales para la estabilización de los suelos, con el fin de mejorar sus propiedades y que sean factibles, económicos y ecológicos para afectar lo menos posible al medio ambiente y a la sociedad.

Los siguientes antecedentes están basados en la experimentación realizada en tesis anteriores:

- Análisis de estabilidad de un suelo arcilloso con ceniza de cáscara de arroz añadida.

(Díaz Vásquez F. 2017) Su tesis tuvo como objetivo analizar si la ceniza de cáscara de arroz puede aportar al mejoramiento de la subrasante en la carretera de San Martín- Lonya Grande, Amazonas, el tipo de investigación fue experimental, se utilizaron muestras de 2 calicatas de 2 metros de profundidad y se concluyó que:

1) La combinación de suelo arcilloso y ceniza de cáscara de arroz nos permite obtener valores más altos de capacidad de soporte de resistencia, incrementando el valor de CBR al 100% de la máxima densidad seca del Proctor modificado de 9.7% hasta 15.2%, es decir, aumenta 1.6 veces, con un contenido del 20% de ceniza de cáscara de arroz.

2) El óptimo contenido de humedad según el porcentaje de contenido de cenizas de cáscara de arroz, disminuyó hasta la combinación S80 – CA20, las cuales tuvo una disminución de 11.2% a 8.1%.

3) Las cenizas de cáscara de arroz absorben menos cantidad de agua, mientras más ceniza de cáscara de arroz se le adicione al suelo, su porcentaje de absorción disminuye notablemente.

4) La combinación de suelo arcilloso con ceniza de cáscara de arroz con una proporción del 20 % de ceniza de cáscara de arroz logró que la capacidad portante

de la subrasante aumente, el resultado del CBR al 95 % fue un aumento de 8.0% hasta 13.80% y el CBR al 100% de 9.7% a 15.2%.

- Análisis de la estabilidad de un suelo arcilloso con cáscaras de huevo pulverizadas añadidas.

(García Araujo B. J., Morales Delgado D. M. 2021) Su tesis tuvo como objetivo analizar y comparar el comportamiento de las características físico-mecánicas de un suelo arcilloso expansivo, con adición de cáscara de huevo y cal, comparando diferentes porcentajes de estos, el tipo de investigación fue experimental y se obtuvieron las muestras de un terreno en Soacha, Cundinamarca, en total se sustrajeron 300 kg. En base en los ensayos realizados se concluye que:

1)En los límites de consistencia, (LL, LP), se evidencia que los aditivos de CHP y cal, disminuyeron el índice de plasticidad del suelo en estudio, el mejor resultado de IP fue el obtenido de la muestra con adición de 4.5% de Cal y 1 % huevo, con un IP de 22. Observando el comportamiento de manera individual de cada aditivo, la CHP no es tan efectiva como la cal, pero con una determinada proporción de CHP, menor que la proporción de cal, esta complementa a la cal, en la disminución del IP del suelo.

2)Según los resultados del CBR en cada una de las muestras, la cáscara de huevo pulverizada tiene un mejor comportamiento frente a la expansión. Con una expansión de 1,73% fue la probeta con el mejor comportamiento, comparándolas con la expansión del suelo natural (2.5%). De acuerdo con los ensayos realizados de CBR y compresión encofinada, la CHP no aporta una resistencia al suelo, como si lo hace la cal, los mejores resultados de resistencia fueron obtenidos en las muestras donde había adición de CHP y cal, se pudo evidenciar que el porcentaje de cal fue mayor en las muestras, esto quiere decir que, la CHP no puede reemplazar del todo a la cal.

3)La evaluación de la expansión permite evidenciar que el uso de la cal y la CHP se debe implementar por separado o en porcentajes similares sin diferenciar en más del 0.5% uno del otro, ya que, estas probetas obtuvieron un comportamiento positivo

frente al cambio volumétrico 47 con valores de 1,95% para la cal (5.5 % Cal), 1.73% para la CHP (5.5 % CHP) y 1.97% para la combinación entre cal y CHP (3.0 % cal + 2.5 % CHP). En general la muestra que tuvo mejor comportamiento en los ensayos realizados fue 4,5 cal + 1,0 CHP, esto permite concluir que la CHP por sí sola no aporta una mejoría al comportamiento de las propiedades índice y de resistencia al suelo expansivo.

## Justificación

La cáscara del huevo es un residuo que puede ser utilizado en la construcción debido al estar constituida principalmente de carbonato de calcio. Este puede aportar el aumento de la dureza mecánica de un material de forma económica.

Las cáscaras de huevo son desechadas en grandes cantidades por hoteles, restaurantes, panaderías, etc. Por lo que, se puede disponer de este producto en la estabilización del suelo reduciendo los problemas de eliminación asociados con las generaciones de cáscara de huevo. Por otra parte, la pulverización de la cáscara de huevo se puede hacer fácilmente ya que no implica la generación de CO<sub>2</sub> como en el caso de la cal donde el calentamiento se realiza a 750 ° C, por lo tanto, utilizar polvo de cáscara de huevo en la estabilización del suelo hará que el proceso de estabilización sea más económico, sostenible y amigable con el medio ambiente.

Por otra parte, la cáscara de arroz constituye un subproducto del proceso agroindustrial con aplicaciones reducidas, que en la práctica puede considerarse como un material de desecho. Por cada tonelada de arroz se generan 200 kg de cascarilla. (Chur, 2010)

La cáscara de arroz al ser sometida a calcinación produce una alta cantidad de ceniza, entre 13-29% del peso inicial, la cual está compuesta principalmente por silicio, a un 87-97% y pequeñas cantidades de sales inorgánicas, además la cascarilla de arroz contiene un 85% de material orgánico. La ceniza obtenida en la calcinación se utiliza en la industria del cemento.

Este proyecto de investigación se justifica en la búsqueda de materiales que reemplazarán los aditivos usados comúnmente como estabilizantes, siendo

reciclados y con ello se pueda contribuir a mejorar el medio ambiente. Se usó la cáscara de huevo y cáscara de arroz, puesto que son residuos que se producen a diario, y están disponibles en grandes cantidades; Se quiere comprobar si estos aditivos son capaces de sustituir otros aditivos comúnmente utilizados en la estabilización de suelos arcillosos y si es capaz de mejorar las propiedades del suelo.

## Objetivos

### Objetivo General

Analizar el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas del suelo arcilloso estabilizado aplicando polvo de cáscara de huevo y ceniza de cáscara de arroz como aditivo, en el Bo. Wilmer Icazbalceta, municipio de Sébaco.

### Objetivos Específicos

- Evaluar las propiedades del suelo en estado natural mediante ensayos de laboratorio.
- Realizar mezclas de suelo con diferentes proporciones de estabilizantes determinado las propiedades físico-mecánicas de cada una de ellas.
- Comparar el comportamiento que tiene el suelo estabilizado en cada una de las proporciones y presentar la dosificación óptima para estabilizar el suelo.

## CAPITULO II: Marco Teórico.

### Suelos

El suelo es la porción más superficial de la corteza terrestre, constituida en su mayoría por residuos de roca provenientes de procesos erosivos y otras alteraciones físicas y químicas, así como de materia orgánica fruto de la actividad biológica que se desarrolla en la superficie.

Los suelos se forman por la destrucción de la roca y la acumulación de materiales distintos a lo largo de los siglos, en un proceso que involucra numerosas variantes físicas, químicas y biológicas, que da como resultado una disposición en capas bien diferenciadas, observables en los puntos de falla o fractura de la corteza terrestre.

Es importante mencionar que, el estudio de los suelos es un instrumento que brinda las herramientas básicas necesarias para abordar con éxito el análisis y las soluciones vinculadas con el manejo de los mismos en la práctica de la ingeniería civil y afines para el seguimiento continuo de un buen proyecto.

A través del estudio de suelos se puede conocer las características físicas y geológicas, se puede ver la secuencia litológica, las diferentes capas y su espesor, la profundidad del nivel del agua subterránea y hasta la capacidad de resistencia de un suelo o una roca. Con estos factores se puede asegurar una construcción segura y, por ende, de una ciudad segura.

### Propiedades físico-Mecánicas del suelo

El suelo es un cuerpo poroso que mezcla partículas orgánicas en mayor o menor grado de desintegración, agua y aire en proporciones variables, la interacción de estos componentes le dan características de textura, estructura, consistencia,

porosidad, drenaje y profundidad efectiva con las cuales se pueden establecer pautas para su manejo y calcular el rendimiento esperado.

**Peso volumétrico:** El peso volumétrico en estado natural del suelo o peso específico de la masa de suelo, es la relación entre el peso del mismo y el volumen que ocupa.

**Peso Específico:** Se denomina peso específico de un mineral al cociente entre su peso y el peso de un volumen equivalente de agua a 4°C (condiciones de máxima densidad del agua), siendo un valor adimensional.

**La Densidad:** La densidad de partículas de un suelo mide la masa de una muestra de suelo en volumen dado de partículas (masa dividida entre volumen). La densidad de partículas se centra sólo en las partículas del suelo y no en el volumen total que ocupan las partículas y los poros en el suelo.

**Absorción:** La relación entre pesos de fases más empleadas en suelos, es la humedad, que es el peso de agua dividido por el peso de las partículas sólidas de una muestra de suelo. El agua total del suelo corresponde a la suma del agua libre, del agua capilar y del agua higroscópica de las partículas sólidas.

**Granulometría:** Es la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de las partículas de un suelo, por medio de un proceso de tamizado para tamaños de partículas retenidas en la malla N° 200 (0.075mm) La manera de hacer esta determinación es por medio de tamices de abertura cuadrada.

**Consistencia:** es la firmeza con que se unen los materiales que lo componen o la resistencia de los suelos a la deformación y la ruptura. La consistencia del suelo se mide por muestras de suelo mojado, húmedo y seco.

Según su textura podemos distinguir tres tipos de suelos: arena, arcilla y limo.

La arena es la que existe en los diversos ríos. Los suelos arenosos, como son más sueltos son fáciles de trabajar, pero tienen pocas reservas de nutrientes aprovechables por las plantas.

Los suelos limosos tienen gránulos de tamaño intermedio, son fértiles y fáciles de trabajar. Forman terrones fáciles de desagregar cuando están secos.

La arcilla son partículas muy finas y forman barro cuando están saturadas de agua. Los suelos arcillosos son pesados, no drenan ni se desecan fácilmente y contienen buenas reservas de nutrientes. Son fértiles, pero difíciles de trabajar cuando están muy secos.

#### Suelo Arcilloso (Sonzocuite o arcilla negra)

Son los que resultan de la descomposición lenta de las rocas madres, alteradas por la acción prolongada de la intemperie. Estos suelos forman un lodazal tenaz en la época de lluvias, pero se seca, se agrieta y se desmorona en el verano. Es muy abundante en los llanos, junto al mar y alrededor de los lagos. Sobre él crece una vegetación pobre, raquífica y matorralosa como distintivo. Estos suelos en su gran mayoría son adecuados, con riego, para cultivos como arroz, caña de azúcar, sorgo y bosques de explotación.

#### Localización de suelos arcillosos en Nicaragua

Predominan en la Región Central, en el Departamento de Chontales y se extienden hasta parte del Río San Juan (Municipio de San Carlos) y pequeños bloques diseminados en la Región del Pacífico en los Departamentos de León y Chinandega, en áreas bajas con pendientes suaves, generalmente a inclinadas.

## Ensayos de Suelos

Los ensayos de suelos nos permiten conocer las propiedades físico-mecánicas de los suelos para poder definir características básicas principales, estas están basadas en las normativas de American Society for Testing and Materials ASTM y American of State Highway and Transportation Officials AASHTO, estas también son definidas para las propiedades por el método SUCS (sistema unificado de clasificación de suelo).

### Contenido de Humedad

Es la relación de la masa de agua contenida en los poros o agua libre en una masa dada de material, respecto a la masa de las partículas sólidas de ese material, expresadas como porcentaje.

La norma que se utiliza para este ensaye es la ASTM D 2216 y la ecuación para determinar el contenido de humedad es:

$$\%W = \frac{(W_h + T) - (W_s + T)}{(W_s + T) - T} * 100$$

Donde:

$\%W$  = Porcentaje de Humedad.

$W_h$  = Peso de la muestra húmeda.

$W_s$  = Peso de la muestra seca.

$T$  = Peso de la Tara.

### Análisis Granulométrico.

La determinación del tamaño de partícula del suelo comprende básicamente la separación y clasificación de las partículas que componen el suelo según su tamaño, es decir, la distribución según el tamaño de las partículas. En este estudio, se utiliza un método para encontrar la distribución de partículas de la muestra de suelo a estudiar; granulometría por tamizado se usa para partículas gruesas y la granulometría por hidrómetro para partículas finas. La unión de resultados de ambos métodos ayuda a obtener la curva completa de la distribución granulométrica.

Granulometría por tamizado.

Consiste en pasar las partículas de suelo previamente retenidas en la malla No. 200 (0.075mm), a través de una serie de aberturas conocidas; por tanto, el diámetro de la partícula se encuentra definido por la abertura de los tamices utilizados para el ensayo. El diámetro de las partículas viene definido por la apertura del tamiz utilizado para la prueba. Para este tipo de prueba, puede usar un tamiz desde una abertura de 4 pulgadas (10,16 cm) hasta un tamiz No. 200 (0,075 mm).

Las normas utilizadas en el desarrollo de la prueba son: la ASTM D422 (Determinación del tamaño de las partículas de un suelo). y la ASTM D 421 (Práctica estándar para el análisis de tamaño de partículas y determinación de constantes del suelo).

*Imagen 1. Serie de tamices*



*Tabla 1. Tamaño de tamices*

| Tamiz  | Abertura (mm) |
|--------|---------------|
| 3"     | 75            |
| 1 1/2" | 38.1          |
| 3/4"   | 19            |
| 3/8"   | 9.5           |
| Nº 4   | 4.76          |
| Nº 8   | 2.36          |
| Nº 16  | 1.1           |
| Nº 30  | 0.59          |
| Nº 50  | 0.297         |
| Nº 100 | 0.149         |
| Nº 200 | 0.075         |

*Fuente: Chicaiza, Oña, 2018*

*Fuente: MTC. Manual de suelos y pavimentos.*

Límites de Atterberg.

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se determinan bajo la norma ASTM D 4318 y establecen la sensibilidad del suelo con respecto al contenido de humedad. Según la humedad, se determina el límite correspondiente a los cuatro estados de consistencia, pudiendo darse un tipo de suelo según este estado: plástico, líquido, sólido o semisólido. Para medir la cohesión del suelo son el límite plástico y límite líquido. La prueba debe realizarse en suelo que haya pasado un tamiz No. 40.

Límite líquido (LL).

El Límite Líquido de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentajes del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico.

Método A: multipunto límite líquido.

Representar la relación entre el contenido de agua W y el correspondiente número de golpes N, en un gráfico semilogarítmico. Dibujar una línea recta a través de los mejores tres o cuatro puntos marcados.

Tomar el contenido de agua correspondiente a la intersección de 25 golpes con el límite líquido gráficamente.

Límite plástico (LP).

El límite plástico es la humedad del suelo en el límite entre el estado plástico y el estado semisólido, se ha definido arbitrariamente como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro se rompe o se resquebraja, cuando se enrolla a un diámetro de aproximadamente 3mm. Esta prueba es más subjetiva (dependiendo del operador) que el ensayo de límite líquido pues la definición del resquebrajamiento del cilindro de suelo, así como el cilindro de 3 mm está sujeta a la interpretación del operador.

$$LP = \frac{(W_h + T) - (W_s + T)}{(W_s + T) - T} * 100$$

Donde:

LP= Límite plástico

$W_h$  = Peso de la muestra húmeda.

$W_s$  = Peso de la muestra seca.

T= Peso de la Tara.

Índice de plasticidad (IP).

Se expresa con la siguiente fórmula:

$$IP = \textcolor{red}{L} - LP$$

Donde

$IP$  = Índice de Plasticidad.

$\textcolor{red}{L}$  = Límite Líquido.

$LP$  = Límite Plástico.

El índice de plasticidad permite indicar el contenido de humedad del suelo en estado plástico (antes de que se vuelva líquido), para que el suelo se pueda clasificar bien.

Según el índice de plasticidad se pueden obtener las siguientes clasificaciones:

Tabla 2. *Clasificación de suelos de acuerdo a su índice de plasticidad.*

| Índice de Plasticidad | Plasticidad | Características           |
|-----------------------|-------------|---------------------------|
| $IP > 20$             | Alta        | Suelos muy arcillosos     |
| $7 < IP \leq 20$      | Media       | Suelos arcillosos         |
| $IP < 7$              | Baja        | Suelos poco arcillosos    |
| $IP = 0$              | No Plástico | Suelos exentos de arcilla |

*Fuente: Manual de suelos y pavimento.*

Método de clasificación de los suelos.

Hay dos sistemas de clasificación de suelos de uso común para propósitos de ingeniería.

- 1) El Sistema Unificado de Clasificación del suelo SUCS: Se utiliza para casi todos los trabajos de ingeniería geotécnica
- 2) El sistema de clasificación AASHTO que se usa para la construcción de carreteras y terraplenes.

Ambos sistemas utilizan los resultados del análisis granulométrico y la determinación de los límites de Atterberg (LL, LP, IP) para determinar la clasificación del suelo.

Las fracciones texturales del suelo son: grava, arena, limo, arcilla. A un suelo que comprende uno o más de estos componentes se le da un nombre descriptivo y una designación que consta de letras o números y letras. Estas letras dependen de las

proporciones relativas de los componentes y de las características de plasticidad del suelo.

Tabla 3. *Clasificación de suelos- Método AASHTO*

| Clasificación general                           | Suelos granulosos 35% máximo que pasa por tamiz de 0,08mm |        |            |                                      |        |                   |        | Suelos finos más de 35% pasa por el tamiz de 0.08 mm |        |                  |                    |                    |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------|------------|--------------------------------------|--------|-------------------|--------|------------------------------------------------------|--------|------------------|--------------------|--------------------|
| Grupo                                           | A1                                                        |        | A3         | A2                                   |        |                   |        | A4                                                   | A5     | A6               | A7                 |                    |
| Símbolo                                         | A1-a                                                      | A1-b   |            | A2-4                                 | A2-5   | A2-6              | A2-7   |                                                      |        |                  | A7-5               | A7-6               |
| Análisis Granulométrico % que pasa por el tamiz |                                                           |        |            |                                      |        |                   |        |                                                      |        |                  |                    |                    |
| N° 10                                           | máx.50                                                    |        |            |                                      |        |                   |        |                                                      |        |                  |                    |                    |
| N° 40                                           | máx.30                                                    | máx.50 | máx.50     |                                      |        |                   |        |                                                      |        |                  |                    |                    |
| N° 200                                          | máx.15                                                    | máx.25 | máx.10     | máx.35                               | máx.35 | máx.35            | máx.35 | mín.35                                               | mín.35 | mín.35           | mín.35             | mín.35             |
| Limites Atterberg                               |                                                           |        |            | máx.40                               | mín.40 | máx.40            | mín.40 | máx.40                                               | máx.40 | máx.40           | mín.40             | mín.40             |
| Límite de liquidez<br>Índice de plasticidad     | máx.6                                                     | máx.6  |            | máx.10                               | máx.10 | mín.10            | mín.10 | máx.10                                               | máx.10 | mín.10           | mín.10<br>IP<LL-30 | mín.10<br>IP<LL-30 |
| Índice de grupo                                 | 0                                                         | 0      | 0          | 0                                    | 0      | máx.4             | máx.4  | máx.8                                                | máx.12 | máx.16           | máx.20             | máx.20             |
| Tipo de material                                | Piedras, gravas y arena                                   |        | Arena Fina | Gravas y arenas limosas y arcillosas |        |                   |        | Suelos limosos                                       |        | Suelos arcilloso |                    |                    |
| Estimación general del suelo como subrasante    | De excedente a bueno                                      |        |            |                                      |        | De pasable a malo |        |                                                      |        |                  |                    |                    |

*Fuente: AASHTO, 2010*

El sistema de clasificación SUCS.

El Sistema Unificado de Clasificación del suelo SUCS se basa en el sistema de clasificación desarrollado por Casagrande durante la Segunda Guerra Mundial. Con algunas modificaciones fue aprobado conjuntamente por varias agencias de gobierno de los EE.UU. en 1952. Refinamientos adicionales fueron hechas y actualmente está estandarizado como la norma ASTM D 2487-93.

Se utiliza en los EE.UU. y gran parte del mundo para trabajos geotécnicos que no sean los caminos y carreteras. los suelos de un sistema unificado se designan por un símbolo de dos letras: el primero considera que el principal componente de la tierra, y la segunda describe informaciones de la curva granulométrica o características de plasticidad. Por ejemplo: la arena pobremente graduada se denomina SP y la arcilla con baja plasticidad es CL.

SUCS: se utilizan los símbolos de cinco letras:

G por grava (gravel)

S por arena (sand)

M por limo (Silt)

C por arcilla (clay)

O por suelos organico (organic soil)

P for turba (peat soils)

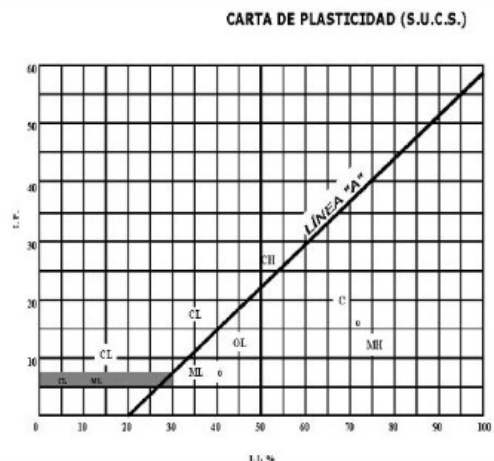
Regla 1. Si menor del 50% del suelo pasa la malla No. 200 (0.075 mm), el suelo es de grano grueso, y la primera letra será G o S;

Regla 2. Si más del 50% pasa la malla No. 200(0.075 mm), el suelo es de grano fino y la primera letra será M o C

Regla 3. Arenas y gravas limpias (con menos del 5% que pasa la malla No. 200): se les da una segunda letra P si están mal graduadas o W si bien graduadas. Arenas y gravas, con más de 12% en peso que pasa la malla No. 200: se les da una segunda letra M si son limosas o C, si son arcillosos. Arenas y gravas que tienen entre 5 y 12%: se dan clasificaciones duales como SP-SM. Limos, arcillas y suelos orgánicos se les da la segunda letra H o L para designar a la plasticidad de alta o baja. Las normas específicas para la clasificación se describen detalladamente en la norma ASTM D 2487.

Tabla 4. Clasificación de suelos- Método SUCS.

| DIVISIÓN MAYOR                                                                                    |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           | SÍMBOLO                                                                                            | NOMBRES TÍPICOS                                                                               | CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO                                                   |                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS<br>Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 Ø | MÁS DE LA MITAD DE LA FRACCIÓN GRUESA ES RETENIDA POR LA MALLA N.º 4 | GRAVAS                                                                                    | MÁS DE LA MITAD DE LA FRACCIÓN GRUESA ES RETENIDA POR LA MALLA N.º 4                                                      | COMO PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE ½ cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA N.º 4 | GRAVAS LIMPIAS<br>Poco o nada de partículas finas                                             | GW                                                                                            | Gravas bien graduadas,mezclas de grava y arena con poco o nada de finos | DETERMINÉSE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla N.º 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: Menos del 5%:GW,GP,SW,SP; más del 12%: GM,GC,SM,SC. Entre 5% y 12%: Casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles ** | COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4.<br>COEFICIENTE DE CURVATURA Cc: entre 1 y 3.<br>Cu = D <sub>60</sub> / D <sub>10</sub> Cc = (D <sub>30</sub> ) <sup>2</sup> / (D <sub>10</sub> )(D <sub>60</sub> ) |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    | GRAVAS CON PARTICULAS FINAS                                                                   | GP                                                                                            | Gravas mal graduadas,mezclas de grava y arena con poco o nada de finos  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    | GRAVA CON FINOS<br>Cantidad apreciable de partículas finas                                    | * GM<br>d<br>u                                                                                | Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.                                                                                                                                                | Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.                                                          |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    | GRAVAS ARCILLOSAS                                                                             | GC                                                                                            | Gravas arcillosas,mezclas de gravas,arena y arcilla                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      | ARENAS                                                                                    | MÁS DE LA MITAD DE LA FRACCIÓN GRUESA PASA POR LA MALLA N.º 4                                                             | PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE ½ cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA N.º 4      | ARENA LIMPIA<br>Poco o nada de partículas finas                                               | SW                                                                                            | Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.      | Cu = D <sub>60</sub> / D <sub>10</sub> mayor de 6 ; Cc = (D <sub>30</sub> ) <sup>2</sup> / (D <sub>10</sub> )(D <sub>60</sub> ) entre 1 y 3.                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    | ARENAS CON PARTICULAS FINAS                                                                   | SP                                                                                            | Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Nó satisfacen todos los requisitos de graduación para SW                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    | ARENA CON FINOS<br>Cantidad apreciable de partículas finas                                    | * SM<br>d<br>u                                                                                | Arenas limosas, mezclas de arena y limo.                                | LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.                                                                                                                                                                                                                                                                      | Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.                                                                                                  |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    | ARENAS ARCILLOSAS                                                                             | SC                                                                                            | Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.                          | LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      | SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS<br>Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 Ø | LAS PARTICULAS DE 0.074 mm de diámetro (la malla N.º 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista. | LIMOS Y ARCILLAS                                                                                   | Límite Líquido menor de 50                                                                    | PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE ½ cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA N.º 4 | LIMOS INORGÁNICOS                                                       | ML                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.                                                                                                                          | G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo<br>C – Arcilla, W – Bien Graduada, P – Mal Graduada, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    |                                                                                               |                                                                                               | ARCILLAS INORGÁNICAS                                                    | CL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.                                                                                   |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    |                                                                                               |                                                                                               | LIMOS ORGÁNICOS                                                         | OL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    |                                                                                               |                                                                                               | ARCILLAS ORGÁNICAS                                                      | OH                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.                                                                                                                         |                                                                                                                                                                       |
| LIMOS Y ARCILLAS                                                                                  | Límite Líquido Mayor de 50                                           |                                                                                           |                                                                                                                           | PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE ½ cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA N.º 4      | LIMOS INORGÁNICOS                                                                             |                                                                                               | MH                                                                      | Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.                                                                                                                                                                                                                                                                     | CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    | ARCILLAS INORGÁNICAS                                                                          |                                                                                               | CH                                                                      | Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    | ARCILLAS ORGÁNICAS                                                                            |                                                                                               | OH                                                                      | Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    | SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS                                                                    |                                                                                               | P                                                                       | Turbas y otros suelos altamente orgánicos.                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                       |
| SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS                                                                        | Límite Líquido Mayor de 50                                           |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    | PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE ½ cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA N.º 4 |                                                                                               | LIMOS INORGÁNICOS                                                       | ML                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    |                                                                                               |                                                                                               | ARCILLAS INORGÁNICAS                                                    | CH                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    |                                                                                               |                                                                                               | ARCILLAS ORGÁNICAS                                                      | OH                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.                                                                                                                         |                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                   |                                                                      |                                                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                    |                                                                                               |                                                                                               | SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS                                              | P                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Turbas y otros suelos altamente orgánicos.                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                       |



Fuente: ASTM D 2487-93

### Ensayo de Proctor Modificado.

En la prueba proctor modificado, el suelo se compacta en un molde, con un martillo que pesa 10 libras para formar cinco capas. Según la norma ASTM D 1557, la altura de caída es de 46 cm. Para cada relación de agua en la muestra, la densidad húmeda del suelo.

$$\gamma_h = \frac{W}{V_m}$$

Donde:

$W$  = Peso del suelo compactado (gr.)

$V_m$  = Volumen del molde ( $\text{cm}^3$ ) Después de determinar el contenido de agua en el laboratorio de acuerdo con la dosis de agua y la densidad húmeda, la densidad seca ( $\gamma_s$ ) se puede calcular como:

$$\gamma_h = \gamma_s \times \left(1 + \frac{W(\%)}{100}\right)$$

$$\gamma_s = \frac{\gamma_h}{1 + \frac{W(\%)}{100}}$$

$$\gamma_h = \gamma_s \times \left(1 + \frac{w(\%)}{100}\right) \quad \gamma_s = \frac{\gamma_h}{1 + \frac{w(\%)}{100}}$$

Donde:

$\gamma_h$  = Densidad húmeda ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

$W$  = Contenido de humedad (%)

Al trazar el valor de densidad seca determinado en función del contenido de humedad, se obtiene una curva de compactación, obteniendo así la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo de la muestra de suelo analizada.

## Ensayo de California Bearing Ratio (CBR).

La prueba denominada CBR se expresa como un porcentaje de la relación entre la carga unitaria requerida para introducir un pistón en el suelo en una muestra tipo grava y la carga unitaria requerida para introducir el mismo pistón en la misma profundidad de una muestra rocosa. El CBR del suelo varía con el grado de compactación, el contenido de humedad en el momento de la compactación y el contenido de humedad durante la prueba. Este ensaye se rige bajo la norma ASTM D1883.

Tabla 5. *Clasificación y uso del suelo según el valor de CBR*

| CBR      | Clasificación cualitativa del suelo | Uso        |
|----------|-------------------------------------|------------|
| 2 – 5    | Muy mala                            | Subrasante |
| 5 – 8    | Mala                                | Subrasante |
| 8 – 20   | Regular a buena                     | Subrasante |
| 20 – 30  | Excelente                           | Subrasante |
| 30 – 60  | Buena                               | Subbase    |
| 60 – 80  | Buena                               | Base       |
| 80 - 100 | Excelente                           | Base       |

*Fuente: Guía de laboratorio de mecánica de suelos.*

## Estabilización de suelos.

Proceso que consiste en mejorar sustancialmente el comportamiento esfuerzo-deformación de un suelo. En otras palabras, estabilizar un suelo es modificar las propiedades del material existente para hacerlo capaz de cumplir en mejor forma los requisitos deseados. Existen tres formas de alterar las propiedades que presenta el suelo natural, estas son las estabilizaciones física, mecánica y química.

Métodos de estabilización de suelos.

Estabilización mecánica: su objetivo es lograr un material denso y bien graduado mediante la mezcla y compactación de dos o más suelos y/o agregados.

Estabilización química: se refiere a la alteración de las propiedades del suelo al cambiar su composición química con diferentes aditivos como cal, cemento, cenizas de carbón o mediante la adición de productos químicos como polímeros, resinas y enzimas.

Estabilización biológica: se refiere a la plantación de una cubierta vegetal para evitar la erosión por el viento, el agua y el suelo. Las raíces retienen y agregan las partículas del suelo, aunque al principio se deben usar otros métodos de estabilización para apoyar el crecimiento de las semillas y las plantas.

Estabilización de los suelos con la cáscara de huevo.

La cáscara del huevo.

La cáscara constituye la cubierta protectora del huevo, la pared que le defiende de la acción de los agentes externos, y el medio a través del cual pueden realizarse intercambios gaseosos y líquidos con el ambiente que le rodea. La cáscara representa entre el 9 – 12 % del peso del huevo, lo que haría unos 5 – 7 gramos, según las razas de donde procede; y se compone principalmente de sustancias minerales, entre las cuales el Carbonato de calcio (94.0%) es una de las más importantes como componente estructural.

La cáscara de huevo en polvo, no está en uso como un material de estabilización, pero podría ser un buen remplazo para la cal, ya que su composición química es similar al de esta que actualmente se utiliza como aditivo estabilizante de suelos.

Producción de huevos a nivel nacional.

En el año 2020, la producción de huevos en las granjas avícolas de Nicaragua, fue de 10,8 millones de cajillas de huevos, cifra que superó en un 25,6% a los 8,6 millones de cajillas de huevos logradas en el año 2016. En el período del año 2020-

2021, hubo un crecimiento positivo para la producción de huevo, alcanzando 42,4 millones de cajillas, observándose un incremento del 4% con relación al período del año anterior analizado.

Estabilización de los suelos con la ceniza de cáscara de arroz.

#### Cáscaras de arroz

La cascarilla de arroz es un tejido vegetal lignocelulósico constituido por un 85 % de material orgánico, representado por celulosa, lignina, D-xilosa y pequeñas cantidades de D- galactosa.

#### Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA).

Los estudios han demostrado que la quema de cascarilla de arroz a 700 °C produce una ceniza con la composición óptima de un material puzolánico (Metha, 1989).

Cuando la cascarilla de arroz es sometida a altas temperaturas produce ceniza entre el 13 y 29 % del peso inicial, constituida principalmente por sílice entre un 87 y 97 % debido a que no se disocia al quemarse, y pequeñas cantidades de sales inorgánicas.

Las cenizas son utilizables para la estabilización, tanto mecánica como químico de los suelos. En la estabilización mecánica, por su granulometría fina permiten rellenar los huecos entre los granos más gruesos que componen las arenas y los sedimentos lo que conlleva a un mejoramiento de su resistencia a la compresión; mientras que, en la estabilización química, su alto contenido de sílice la convierte en un material cementante (Alvarado & Guerra, 2018).

Tabla 6. *Composición química de la cascarilla de arroz.*

| Componente                                                                | Porcentaje (%) |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Ceniza de Sílice ( $\text{SiO}_2$ )                                       | 94.1           |
| Óxido de Calcio ( $\text{CaO}$ )                                          | 0.55           |
| Óxido de Magnesio ( $\text{MgO}$ )                                        | 0.95           |
| Óxido de Potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ )                                 | 2.10           |
| Óxido de Sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ )                                  | 0.11           |
| Sulfato                                                                   | 0.06           |
| Cloro                                                                     | 0.05           |
| Óxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ )                                       | 0.05           |
| Óxido de Aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )                             | 0.12           |
| Otros componentes<br>( $\text{P}_2\text{O}_5$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) | 1.82           |

*Fuente: Varón, 2005.*

Obtención de la ceniza de cáscara de arroz.

La ceniza de cáscara de arroz, se obtiene previamente recolectando la cáscara de arroz. Luego se retirarán las impurezas presentes (tallos, raíces, insectos, cáscaras negras y piedras), quitándolas manualmente, posteriormente se tamiza la cáscara de arroz en una malla o colador para eliminar el polvo. Una vez limpia se calcina dentro de una olla de barro; Se dejará en el fuego la olla con la cáscara de arroz hasta que esta elimine todo el dióxido de carbono y cambie su color a negro sin perder su forma. Se retirará cuidadosamente la cáscara ya calcinada para dejarla enfriar a temperatura ambiente. Una vez fría, la cáscara calcinada se molerá en un mortero de madera o en un molinillo, hasta obtener la ceniza fina y uniforme. (Saldaña, 2017).

Temperatura de calcinación de la CCA.

La práctica más generalizada a base de combustiones de cáscara a temperaturas de aproximadamente  $850^\circ\text{C}$ , durante unas dos horas, muestran la presencia de sílice en una base cristalina de cuarzo. Igualmente muestra que la sílice permanece en estado amorfo cuando las temperaturas permanecen entre  $450$  y  $700^\circ\text{C}$  durante 3 y 4 horas. Dado que las formas cristalinas presentan menor reactividad que las amorfas, es esencial que la combustión de la cáscara no supere temperaturas muy elevadas (del orden de  $900^\circ\text{C}$ ). (Salas, Castillo, Sánchez y Veras, 1986).

Saldaña (2017), concluyó que la temperatura de calcinación de la cáscara de arroz es de 430° C. Por lo tanto, calcinó la cáscara de arroz en una mufla a 430° C por dos horas.

#### Producción de la Cáscara de Arroz.

A Nivel Internacional: La FAO (2018), ha aumentado su pronóstico de la producción mundial de arroz en 2017 en 2,9 millones de toneladas a 759,6 millones de toneladas (503,9 millones de toneladas de arroz elaborado). El primer pronóstico de la FAO de la producción mundial de arroz en 2018, suponiendo que las condiciones de crecimiento sean normales, prevé un aumento global de 10,3 millones de toneladas anuales a un nuevo máximo de 769,9 millones de toneladas (510,6 millones de toneladas de arroz elaborado). Por lo tanto, se puede deducir que anualmente se producen aproximadamente 151.9 millones de toneladas de cáscara de arroz.

#### Datos para Nicaragua y producción en Sébaco.

A Nivel Nacional: Según la página oficial del gobierno nacional de Nicaragua (2022-2023), se produjeron para el 2022 aproximadamente un total 690,000 quintales de arroz en cáscara en el país, con 21,569 manzanas de tierra, 2.0% superior en relación a igual época del ciclo anterior.

A Nivel Local: Según los datos proporcionados por ANAR, La producción entre riego y secano es de más de 230,000 toneladas al año en todo Sébaco. El cultivo de arroz se conoció a profundidad las actividades que se realizan, desde la siembra hasta la cosecha. La producción nacional tiene una duración de 6 meses iniciando en diciembre hasta principios de junio donde empiezan las importaciones de otros países como Guatemala, Estados Unidos, Perú, China y Holanda.

### CAPITULO III: Diseño Metodológico

#### Área de Estudio.

Esta investigación se realizó en la rama de la Ingeniería Civil, sobre el mejoramiento de los suelos con materiales orgánicos como la Cáscara de huevo y la ceniza de cascarilla de Arroz, que sea amigable con el medio ambiente donde aporte a su resistencia, plasticidad e impermeabilidad del suelo.

Se realizó los cálculos y ensayos de laboratorio requeridos involucrados en este estudio bajo las normativas de la ASTM y AASHTO.

#### Tipo de investigación.

Se realizó una investigación experimental con el propósito de determinar el efecto que hacen estos estabilizantes orgánicos en estudio como lo es la cáscara de huevo y la ceniza de cascarilla de arroz, a través de ensayos de laboratorio que permitieron definir las propiedades del suelo arcilloso específicamente el de zonzocuite o arcilla negra y datos que nos propició una respuesta a la problemática de esta tesis.

#### Obtención de los materiales utilizados.

#### Obtención del suelo estudiado (Toma de muestras).

Obtención de las muestras de suelo: Se sustrajo de un terreno ubicado en la ciudad de Sébaco, Matagalpa, donde estudios previos demuestran que en esta zona hay suelos arcillosos. El material se extrajo de 1 calicata con una profundidad de 1.20m.

*Imagen 2. Calicata N°1. Extracción de muestra en campo.*



*Fuente: Propia.*

Obtención y preparación de los aditivos.

Obtención de la ceniza de cáscara de arroz (CCA):

Se compró un saco de Cenizas de Cáscara de Arroz, que tuvo un costo de 150 córdobas y se tamizó por el tamiz N°16 para eliminar impurezas que tenía.

Obtención del polvo de cáscara de huevo (CH): Las cáscaras de huevo se obtuvieron de diferentes establecimientos de la ciudad de Sébaco, panaderías y pastelerías, que son los que producen una mayor cantidad de este desecho al día.

Cada día que se recolectaban, se lavaron muy las cáscaras con agua para eliminar los restos de las yemas y las claras. Después de limpias se dejaron secar al sol y se trituraron en un molino industrial. Este proceso de recolección tardó alrededor de un mes, se recolectaron aproximadamente 50 libras de este material.

Normas de ensayos utilizadas.

- ✓ Análisis de Granulométrico: ASTM D 422 (AASHTO T-88).
- ✓ Límites de Atterberg: ASTM D 4318 (AASHTO 89-90).
- ✓ Proctor Estándar Modificado: ASTM D 1557 (AASHTO T180).
- ✓ Valor relativo de soporte CBR: ASTM D 1883 (AASHTO T-193).

## CAPITULO IV: Trabajo de campo y laboratorio.

### Trabajo de Campo

#### Localización del sitio:

El lugar de la extracción del estrato se encuentra en la ciudad de Sébaco, departamento de Matagalpa-Nicaragua en las coordenadas (12°51'36''N y 86°06'41.1''W) ubicado en el Bo. Wilmer Icazbalceta.

#### Macro localización del sitio.



*Fuente: Google Earth*

#### Micro localización del sitio.



*Fuente: Google Earth*

Detalles del suelo en estudio:

Se realizaron 2 calicatas de 1.20 m de profundidad, de donde se extrajeron cuatro sacos de la tierra de forma alterada. Como las 4 muestras pertenecen al mismo tipo de suelo, se mezclaron, para obtener una muestra homogéneamente representativa del estrato.

Para la extracción de estas muestras se descartó una capa inicial de 40 cm, debido a que contenía maleza y cenizas de cáscara de arroz, ya que el lugar antes era ocupado como una zona de quema de algunas arroceras;

Inicialmente, se tenía contemplado hacer una excavación de 1.50m, pero a la profundidad de 1.20m, se encontró un estrato diferente, un suelo arenoso, por lo que se decidió descartar la excavación de 1.50 como se tenía establecido inicialmente.

## Trabajo de laboratorio

Teniendo los materiales ya en el laboratorio se procedió a realizar los respectivos ensayos normados por la ASTM Y AASHTO.

Caracterización del suelo en estado natural.

- Determinación de Contenido de Humedad.

Para la realización del contenido de humedad del suelo, se tomó una pequeña muestra representativa del suelo con su humedad natural, luego se procedió a meterlo al horno a 110 °C por 24 horas, lista la muestra seca se pesó en la balanza.

Tabla 7. *Contenido de humedad del suelo natural.*

| Contenido de Humedad           |                 |
|--------------------------------|-----------------|
| Muestra No.                    | 1               |
| Profundidad                    | 1.2             |
| Clasificación de campo         | Suelo Arcilloso |
| Color                          | Café Oscuro     |
| Tara No.                       | 15M-01          |
| Peso Tara (g)                  | 166.5           |
| Peso Tara mas suelo húmedo (g) | 850             |
| Peso Tara mas suelo seco (g)   | 744.6           |
| Peso de agua                   | 105.4           |
| Peso seco (g)                  | 578.1           |
| Contenido de humedad (%)       | 18.23           |

*Fuente propia.*

Ecuación para calcular el contenido de humedad:

$$W \% = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{peso seco}}$$

$$W \% = \frac{(105.4 \text{ g})}{(578.1 \text{ g})} * 100 = 18.23 \%$$

Se encontró que el suelo en estado natural posee un 18.23% de humedad.

- Determinación de la gravedad específica.

Para este ensayo el procedimiento utilizado fue el del método B para suelos secados al horno y se desairó la lechada con el método de succión, mediante el uso de una bomba de vacío donde se coloca el picnómetro durante 15 minutos. Posteriormente se llena el picnómetro hasta la marca de calibración, se seca el cuello del picnómetro y se procede a pesar el frasco más agua más el material y se toma la temperatura de ensaye.

Tabla 8. *Determinación de gravedad específica del suelo natural.*

| GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SUELOS SOLIDOS , ASTM D-854 |        |        |          |
|--------------------------------------------------------|--------|--------|----------|
| Picnómetro No.                                         | 1      | 2      | Promedio |
| Volumen de Picnómetro (ml)                             | 250.00 | 200.00 | 225.00   |
| Peso del Picnómetro (gr)                               | 91.23  | 87.06  | 89.15    |
| Peso del Picnómetro + Suelo Seco (gr)                  | 206.23 | 127.29 | 166.76   |
| Peso Suelo Seco (gr)                                   | 115.00 | 40.23  | 77.62    |
| Peso Picnómetro +Agua+ Suelo (gr)                      | 408.23 | 310.60 | 359.42   |
| Peso Picnómetro + Agua (gr)                            | 338.00 | 286.15 | 312.08   |
| Peso Picnómetro + agua a temperatura de ensaye (gr)    | 337.33 | 285.59 | 311.46   |
| Temperatura de ensaye (°C)                             | 28.2   | 28.6   | 28       |
| Gbs a Temperatura de ensaye                            | 2.610  | 2.640  | 2.625    |
| Gbs a 20 ° C                                           | 2.610  | 2.640  | 2.625    |

*Fuente propia.*

Se realizaron dos ensayos de la gravedad específica del suelo en estado natural y se promediaron para tener un valor más exacto, teniendo como resultado un Gs de 2.6, valor que corresponde a un suelo orgánico, según la tabla de Rangos de gravedades específicas según el tipo de suelo de la norma (ASTM C 127), ver tabla 8.

Tabla 9. Rangos de gravedades específicas según el tipo de suelo

| Tipos de suelos                                 | Rango de gravedades específicas |
|-------------------------------------------------|---------------------------------|
| Cenizas Volcánicas                              | 2.20 a 2.50                     |
| Suelos Orgánicos                                | 2.50 a 2.65                     |
| Arenas y Gravas                                 | 2.65 a 2.67                     |
| Limos Inorgánicos                               | 2.67 a 2.72                     |
| Arcillas poco Plásticas                         | 2.72 a 2.78                     |
| Arcillas medianamente plásticas y muy plásticas | 2.78 a 2.84                     |
| Arcillas Expansivas                             | 2.84 a 2.88                     |
| Suelos con Abundante Hierro                     | 3.00                            |

Fuente: Guía de Laboratorio de mecánica de suelos I.

- Análisis granulométrico.

Este ensaye se realizó con el fin de determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de la partícula del suelo en estudio, las mallas utilizadas en la granulometría fueron: (N°4, N°10, N°40, N°200).

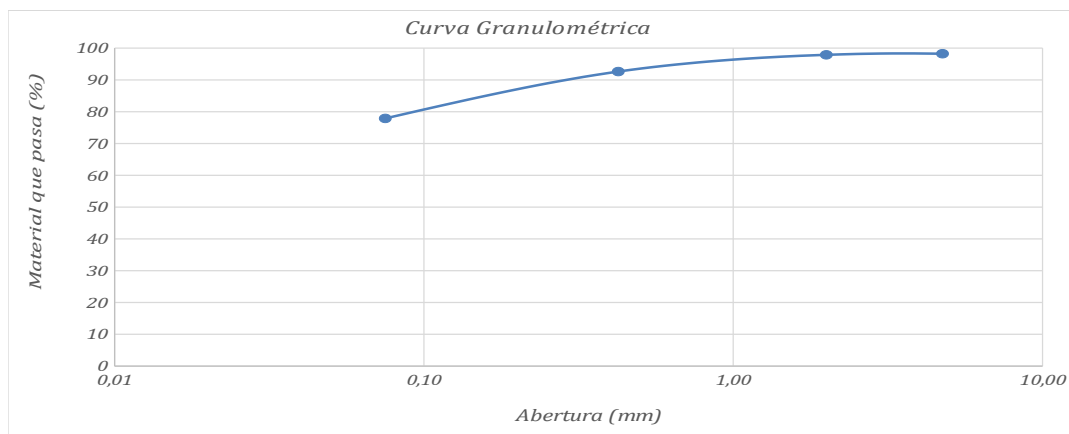
Tabla 10. Granulometría para suelo natural.

| Descripción de las Fracciones | Tamaño del Tamiz |       | Peso Retenido | Peso Retenido corregido | Porcentaje Retenido | Retenido Acumulado | Material Pasante |
|-------------------------------|------------------|-------|---------------|-------------------------|---------------------|--------------------|------------------|
|                               | Nº               | mm    | g             |                         | %                   | %                  | %                |
| Grava Fina                    | Nº 4             | 4.75  | 1.5           |                         | 1.8                 | 1.8                | 98.2             |
| Arena Gruesa                  | Nº 10            | 2.0   | 0.3           | 0.3                     | 0.4                 | 2.1                | 97.9             |
| Arena Media                   | Nº 40            | 0.43  | 4.5           | 4.5                     | 5.3                 | 7.4                | 92.6             |
| Arena Fina                    | Nº 75            | 0.075 | 12.6          | 12.6                    | 14.7                | 22.1               | 77.9             |

|                  |              |      |      |      |      |     |  |
|------------------|--------------|------|------|------|------|-----|--|
|                  | 2<br>0<br>0  |      |      |      |      |     |  |
| Limos y arcillas | Pasa No. 200 | 66.5 | 66.6 | 77.8 | 99.9 | 0.1 |  |

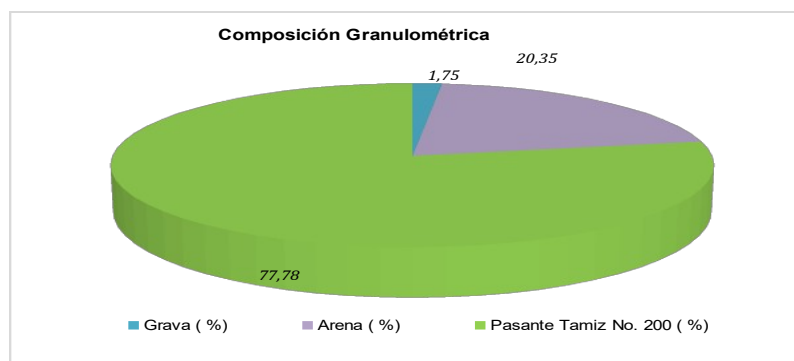
Fuente: Propia

Gráfica 1. Curva granulométrica del suelo natural.



Fuente: Propia.

Diagrama de Pastel 1. Composición Granulométrica del suelo en estado natural.



Fuente Propia.

En el ensayo se observa en los resultados que en su composición granulométrica en el porcentaje de gravas es de 1.75%, arenas 20.35% y limos y arcillas de 77.78%, además se puede observar un comportamiento uniforme en la curva de la relación material que pasa y la abertura de los tamices.

- Límites de Atterberg.

Para la realización de este ensayo, se pesó una muestra de 150g ya tamizada por la N°40 y se procedió a sacar el límite líquido y límite plástico para el suelo natural.

Para el límite líquido se usaron los intervalos de: 15-20 golpes, 20-25 golpes, 25-30 golpes. Y para el límite plástico, se roló el suelo hasta tener cilindros fracturados con 3mm de diámetro aproximadamente.

Imagen 2: mezclando el suelo en la taza de porcelana para realizar los límites líquidos.



*Fuente: Propia.*

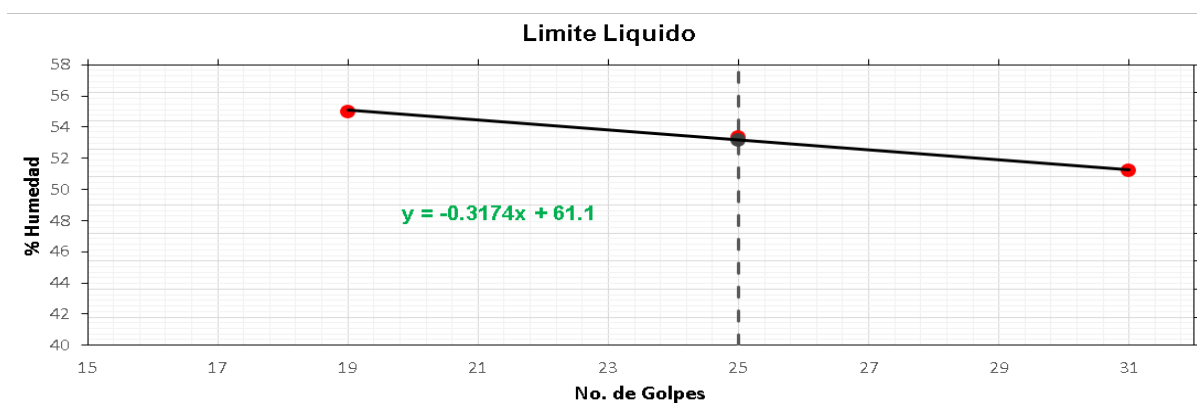
Tabla 11. *Límite líquido del suelo natural.*

| Límite Líquido (ASTM D4318-17) |      |                 |                               |                             |                         |               |                      |
|--------------------------------|------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| No.                            | Tara | Peso de la tara | Peso de tara + muestra húmeda | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de Humedad |
| Golpes                         | No.  | (g)             | (g)                           | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| 31                             | A-01 | 16.20           | 29.67                         | 25.11                       | 8.91                    | 4.56          | 51.2                 |

|    |      |       |       |       |      |      |      |
|----|------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 25 | M-21 | 16.20 | 29.34 | 24.77 | 8.57 | 4.57 | 53.3 |
| 19 | A-05 | 16.33 | 29.07 | 24.55 | 8.22 | 4.52 | 55.0 |

Fuente: Propia.

Gráfica 2. Límite Líquido del suelo natural.



Fuente: Propia

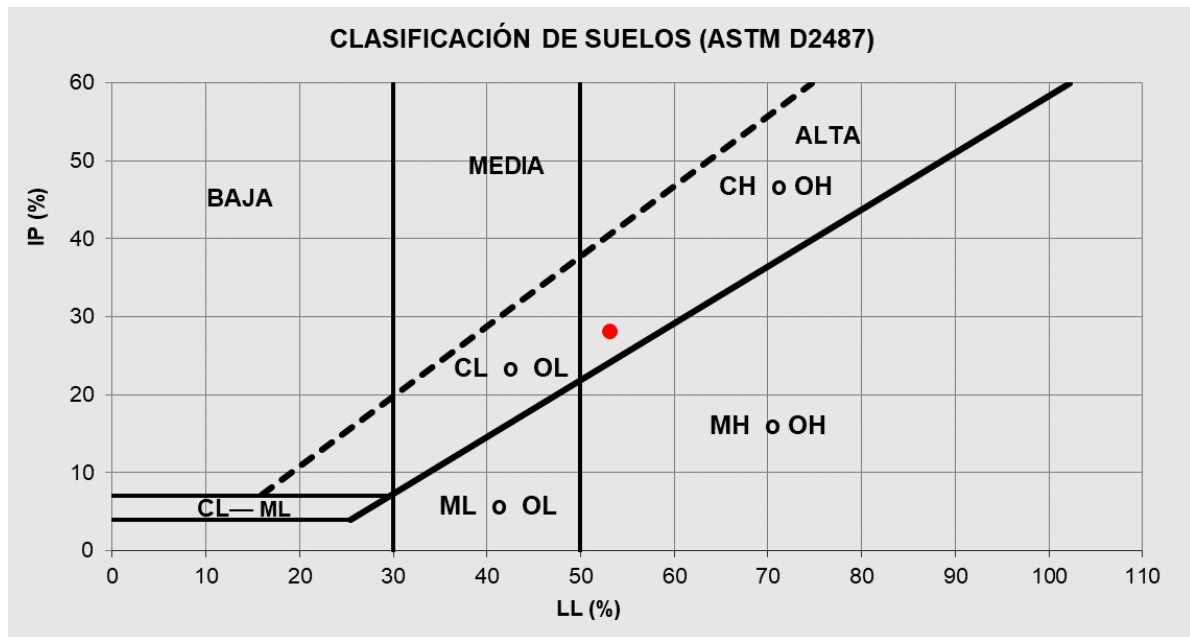
Tabla 12. Límite plástico del suelo natural.

| Límite plástico (ASTM D4318-17) |                 |                                |                             |                         |               |                      |
|---------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| Envase                          | Peso de la tara | Peso de tara + muestra humedad | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de humedad |
| No.                             | (g)             | (g)                            | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| M-2                             | 16.03           | 30.98                          | 27.97                       | 11.94                   | 3.01          | 25.2                 |
| D-09                            | 16.50           | 29.99                          | 27.25                       | 10.75                   | 2.74          | 25.5                 |

Fuente: Propia.

Tenemos que el suelo tiene un límite líquido de 53 y un límite plástico de 25, con un índice de plasticidad de 28 y un índice de grupo de 23; Además se clasifica como un suelo Arcilloso de Alta plasticidad.

Gráfica 3. Clasificación del suelo natural ASTM D 2487



Fuente: Propia

Gráfica 4. Clasificación del suelo natural AASHTO M-145



Fuente: Propia

- Proctor modificado.

Se realizó proctor modificado para el suelo en estado natural, el resultado de densidad seca máxima y humedad óptima será utilizado para la realización de los CBR, todos los ensayos proctor realizados en este documento se hicieron con el método A con un molde de 4 pulgadas, todo el material pasa el tamiz No 4.

Para el ensaye se le agregaron al molde 5 capas con 25 golpes por cada capa, la curva graficada de este ensaye es una curva polinómica que toma la mayor cantidad de puntos obtenidos en el ensaye, ya que puede haber errores humanos cometidos dando así que esta curva de valores más acertados y una variación constante.

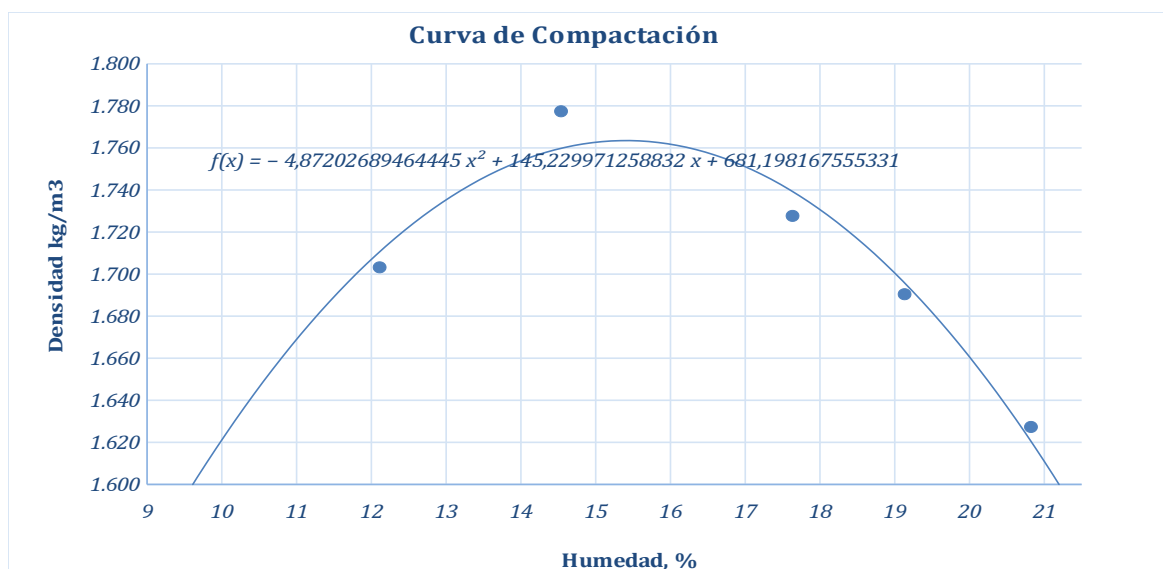
Tabla 13. Datos del Proctor modificado para suelo Natural

|                  |   |
|------------------|---|
| Método Utilizado | A |
|------------------|---|

| Determinación de Densidad Seca Máxima, (kg/m³) y Humedad Óptima, (%) |        |        |        |        |        |
|----------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ensayo No.                                                           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| Peso del Molde, (g)                                                  | 4290.0 |        |        |        |        |
| Volumen del Molde, (cm³)                                             | 929    |        |        |        |        |
| Peso del Molde + Material Compactado, (g)                            | 6056.0 | 6173.0 | 6170.0 | 6153.0 | 6109.0 |
| Peso Húmedo (g)                                                      | 268.2  | 281.1  | 293.3  | 280.8  | 209.6  |
| Peso Seco (g)                                                        | 240.3  | 246.5  | 250.4  | 236.7  | 174.2  |
| Densidad Húmeda (g/cm³)                                              | 1.901  | 2.027  | 2.024  | 2.005  | 1.958  |
| Densidad Seca (g/cm³)                                                | 1.703  | 1.777  | 1.728  | 1.690  | 1.627  |
| Densidad Seca (kg/m³)                                                | 1,703  | 1,777  | 1,728  | 1,690  | 1,627  |
| Contenido de Humedad, (%)                                            | 11.6   | 14.0   | 17.1   | 18.6   | 20.3   |

Fuente: Propia

**Gráfica 5. Curva de compactación para el suelo natural**



|                                      |              |
|--------------------------------------|--------------|
| <b>Densidad Seca Máxima, (kg/m3)</b> | <b>1,763</b> |
| <b>Humedad Óptima, (%)</b>           | <b>15.0</b>  |

*Fuente: Propia.*

Se obtuvo una densidad seca máxima de 1,763 kg/m<sup>3</sup> donde el suelo obtuvo una humedad óptima de 15% en estado natural.

- Valor relativo de soporte CBR.

A partir de la densidad seca máxima y humedad óptima calculadas del proctor modificado, se procedió con la compactación en un cilindro de 6" de diámetro, se realizó solamente el CBR al 100% de compactación, o sea el de 56 golpes, ya que sólo era del interés de este estudio conocer el comportamiento del suelo a su compactación máxima.

Luego del prensado, se sumergió en una pila, durante 96 horas, con el fin de simular condiciones naturales extremas y ver cuanta capacidad de expansión tiene el suelo y su capacidad de deformación, al terminar ese lapso de tiempo, se procedió a escurrir el ensayo 15 minutos y se determinó la expansión y la resistencia a la penetración.

Mediante los cálculos se determinó la densidad seca máxima y la compactación reproducida, siendo la densidad seca máxima producida en el CBR, bastante similar a la del proctor modificado y el porcentaje de humedad varió un poco respecto a la humedad óptima indicada en el ensayo proctor modificado.

En los cálculos de los esfuerzos de penetración corregidos, las cargas fueron corregidas, con los factores del anillo de la máquina, para tener los resultados correctos.

Para la corrección de la gráfica, se hizo con el método de la parábola que intercepta la mayor cantidad de puntos en una línea de tendencia polinómica, de la cual se obtuvo una ecuación donde remplazamos los factores de penetración de 0.1" y 0.2", así mismo, se obtuvo los esfuerzos de penetración dados por la ecuación de la curva.

Posteriormente, se encontró el CBR de dichos esfuerzos.

Tabla 14. *Datos obtenidos de ensayo de C.B.R del suelo natural*

| Ensayo de Relación Soporte C.B.R. | Ensayos de Expansión de los suelos |
|-----------------------------------|------------------------------------|
|-----------------------------------|------------------------------------|

|                                       |          |                              |                                |                                 |
|---------------------------------------|----------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| <b>Peso del molde (g)</b>             | 6,590.8  | <b>Hora y Fecha</b>          | <b>Tiempo transcurrido (h)</b> | <b>Lectura del Deformímetro</b> |
| <b>Volumen del molde (cm3)</b>        | 2,095.0  | 19-10-23<br>11:39 a.m        | 0                              | 11.84                           |
| <b>Numero de golpes por capa</b>      | 56.0     | 23-10-23<br>11:30 a.m        | 96                             | 18.8                            |
| <b>No. de Capas</b>                   | 5.0      | <b>Altura del molde (mm)</b> |                                | 116.43                          |
| <b>Peso del molde +material (g)</b>   | 10,936.0 | <b>Expansión (%)</b>         |                                | 5.98                            |
| <b>Peso del material húmedo</b>       | 180.8    |                              |                                |                                 |
| <b>Peso del material seco (g)</b>     | 155.0    |                              |                                |                                 |
| <b>peso del agua</b>                  | 16.6     |                              |                                |                                 |
| <b>Densidad Máximo Húmeda (kg/m3)</b> | 2,074.1  |                              |                                |                                 |
| <b>Densidad Máxima Seca (kg/m3)</b>   | 1,778.1  |                              |                                |                                 |
| <b>Compactación Reproducida (%)</b>   | 100.8    |                              |                                |                                 |

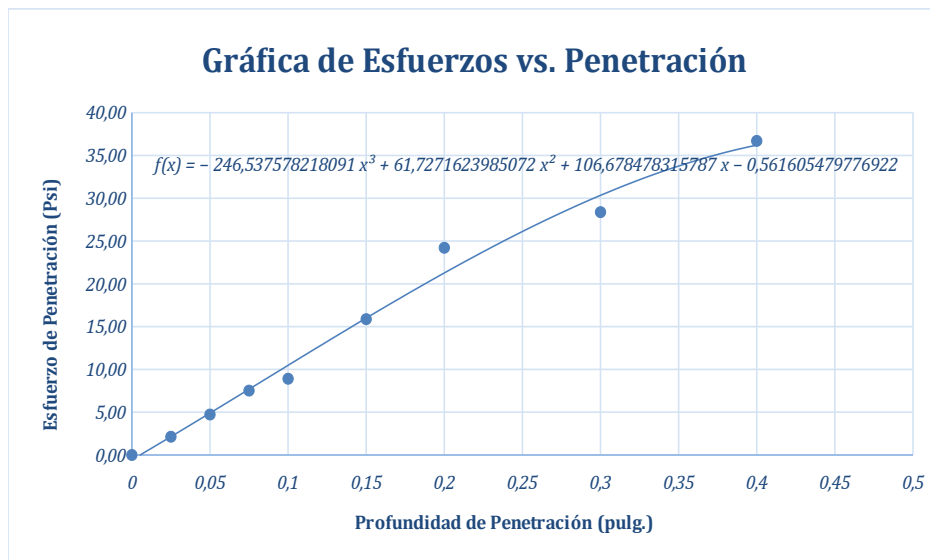
*Fuente: Propia*

Tabla 15. *Resultados obtenidos del ensayo de penetración del suelo natural.*

| Ensayo de Penetración de Cargas |       |                              |             |                               |            |                                              |                       |
|---------------------------------|-------|------------------------------|-------------|-------------------------------|------------|----------------------------------------------|-----------------------|
| Penetración                     |       | Resistencia a la penetración |             |                               |            |                                              |                       |
| mm                              | pulg  | Lectura deformimetro         | Carga (Lbs) | Esfuerzo de Penetración (Psi) | C.B.R. (%) | Esfuerzo de Penetración dado por la ecuación | C.B.R. de la ecuación |
| 0                               | 0     | 0                            | 0           | 0.00                          |            |                                              |                       |
| 0.635                           | 0.025 | 10.19                        | 6           | 2.13                          |            |                                              |                       |
| 1.27                            | 0.05  | 13.88                        | 14          | 4.73                          |            |                                              |                       |
| 1.91                            | 0.075 | 17.85                        | 23          | 7.52                          |            |                                              |                       |
| 2.54                            | 0.1   | 19.82                        | 27          | 8.91                          | 1          | 10.48                                        | 1                     |
| 3.81                            | 0.15  | 29.73                        | 48          | 15.87                         |            |                                              |                       |
| 5.08                            | 0.2   | 41.62                        | 73          | 24.21                         | 2          | 21.27                                        | 1                     |
| 7.62                            | 0.3   | 47.56                        | 85          | 28.38                         |            |                                              |                       |
| 10.16                           | 0.4   | 59.45                        | 110         | 36.70                         |            |                                              |                       |

*Fuente: Propia*

**Gráfica 6. Esfuerzo Vs Penetración para el suelo natural.**



*Fuente: Propia.*

El CBR para el suelo en estado natural al 100% de compactación a una penetración de 0.1" es de 1, y 0.2" de 1, teniendo una densidad máxima seca de 1,778 .1 kg/m<sup>3</sup> a una compactación producida de 100.8%, este ensayo cumplió las 96 horas establecidas en la normativa con una expansión de 5.98%.

### **Caracterización de suelo estabilizado**

Se le agregó al suelo en estado natural tres diferentes dosificaciones de 5%, 10% y 15% con los aditivos, cáscara de huevo, ceniza de cáscara de arroz y la mezcla de ambos aditivos, para ver el comportamiento del suelo estabilizado.

En el caso de la mezcla de ambos aditivos se agregó el 50% de cada uno, por cada porcentaje de dosificación; por ejemplo, para el 5 % mixto, se le añadió 2.5% de CH y 2.5% de CCA y así sucesivamente para las demás dosificaciones.

Se seleccionó como dosificaciones el 5%, 10% y 15%, ya que fueron utilizados en estudios realizados anteriormente.

### Ensayos para la adición de 5% de Polvo de Cáscara de Huevo (CH).

Para cada uno de los ensayos se tomó una muestra de suelo natural, según lo que se requería y se le agregó el 5% de polvo de cáscara de huevo, y se procedió a realizar los ensayos.

- Análisis granulométrico.

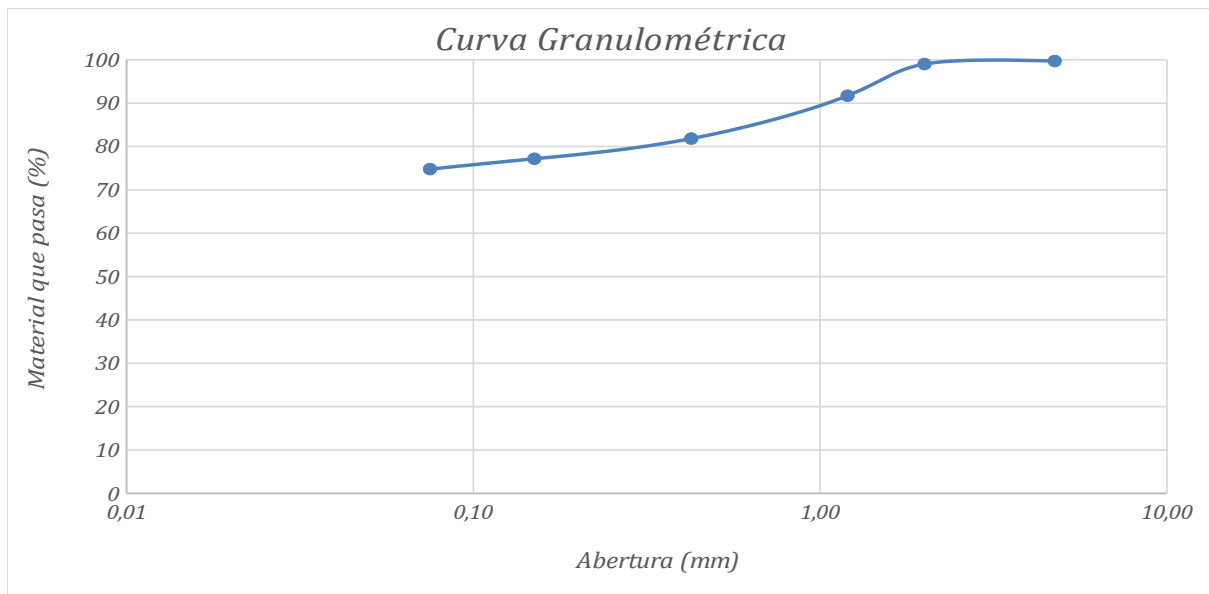
Para este ensaye, se tomó como muestra un peso de 526.6g y las mallas utilizadas fueron: (N°4, N°10, N16°, N°40, N°100, N°200).

Tabla 16. *Granulometría del suelo más 5% de CH.*

| Descripción de las Fracciones | Tamaño del Tamiz |       | Peso Retenido | Peso Retenido corregido | Porcentaje Retenido | Retenido Acumulado | Material Pasante |
|-------------------------------|------------------|-------|---------------|-------------------------|---------------------|--------------------|------------------|
|                               | No.              | mm    | g             |                         | %                   | %                  | %                |
| Grava Fina                    | No. 4            | 4.75  | 1.5           |                         | 0.3                 | 0.3                | <b>99.7</b>      |
| Arena Gruesa                  | No. 10           | 2.0   | 3.7           | 3.7                     | 0.7                 | 1.0                | <b>99.0</b>      |
|                               | No. 16           | 1.2   | 38.4          | 38.4                    | 7.3                 | 8.3                | <b>91.7</b>      |
| Arena Media                   | No. 40           | 0.43  | 52.1          | 52.1                    | 9.9                 | 18.2               | <b>81.8</b>      |
|                               | No. 100          | 0.15  | 24.5          | 24.5                    | 4.7                 | 22.8               | <b>77.2</b>      |
| Arena Fina                    | No. 200          | 0.075 | 12.6          | 12.6                    | 2.4                 | 25.2               | <b>74.8</b>      |
| Limos y arcillas              | Pasa No. 200     |       | 393.8         | 393.8                   | 74.8                | 100.0              | <b>0.0</b>       |

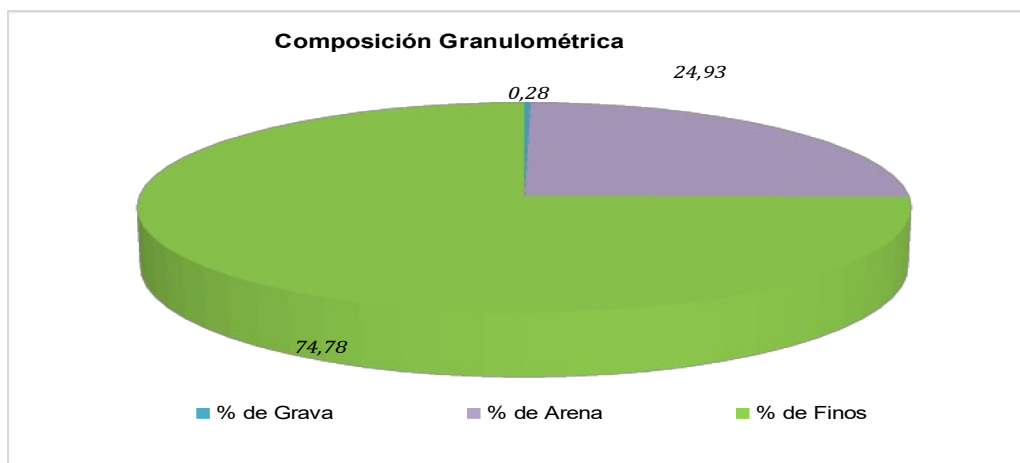
*Fuente: Propia.*

**Gráfica 7. Curva Granulométrica del suelo más 5% de CH.**



Fuente: Propia.

**Diagrama de Pastel 2. Composición Granulométrica del suelo más 5% de CH.**



Fuente: Propia

En el ensayo se observa en los resultados que en su composición granulométrica en el porcentaje de gravas de 0.28%, arenas 24. 93% y de limos y arcillas de 74.78%, además podemos observar un comportamiento uniforme de la curva.

- Límites de Atterberg.

Para la realización de los límites, se pesó una muestra de 150g ya tamizada por la N°40 y se le agregó el 5% de CH tamizado también; Para proceder a encontrar el límite líquido y límite plástico para el suelo.

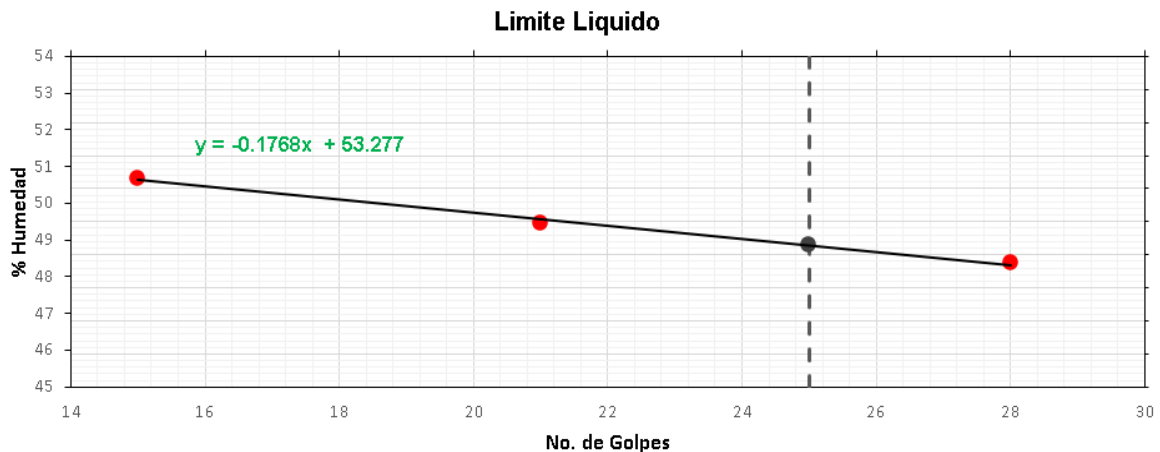
Para el límite líquido se usaron los intervalos de: 15-20 golpes, 20-25 golpes, 25-30 golpes y para el límite plástico, se realizaron cilindros fracturados de 3mm de diámetro aproximadamente.

Tabla 17. *Límite líquido del suelo natural más 5% de CH.*

| Límite Líquido (ASTM D4318-17) |      |                 |                               |                             |                         |               |                      |
|--------------------------------|------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| No.                            | Tara | Peso de la tara | Peso de tara + muestra húmeda | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de Humedad |
| Golpes                         | No.  | (g)             | (g)                           | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| 28                             | D-21 | 20.07           | 29.24                         | 26.25                       | 6.18                    | 2.99          | 48.4                 |
| 21                             | T-7  | 20.03           | 29.52                         | 26.38                       | 6.35                    | 3.14          | 49.4                 |
| 15                             | T-9  | 20.61           | 31.55                         | 27.87                       | 7.26                    | 3.68          | 50.7                 |

Fuente: Propia.

Gráfica 8. *Límite líquido del suelo más 5% de CH.*



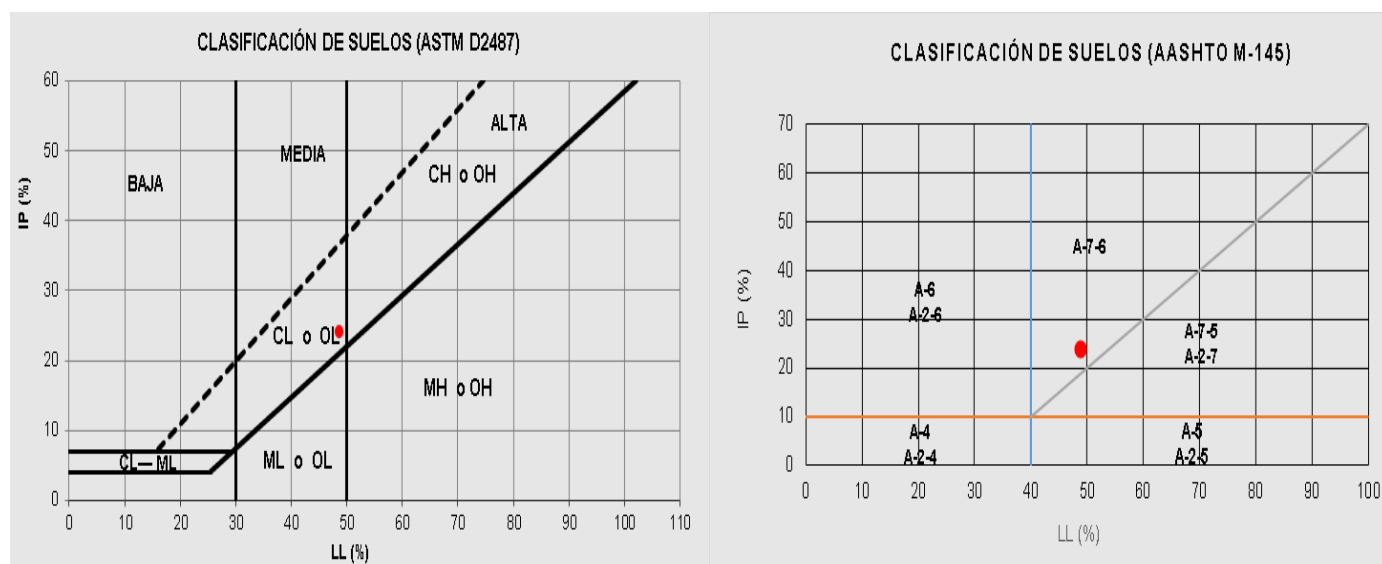
Fuente: Propia.

Tabla 18. Límite plástico del suelo natural más 5% de CH.

| Límite Plástico (ASTM D4318-17) |                 |                                |                             |                         |               |                      |
|---------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| Envase                          | Peso de la tara | Peso de tara + muestra humedad | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de humedad |
| No.                             | (g)             | (g)                            | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| T-2                             | 20.49           | 29.51                          | 27.70                       | 7.21                    | 1.81          | 25.1                 |
| T-10                            | 20.96           | 29.75                          | 27.95                       | 6.99                    | 1.80          | 25.8                 |

Fuente: Propia.

Gráfica 9. Clasificación del suelo natural más el 5% de CH por las normas



ASTM D2487 Y AASHTO M-145.

Fuente: Propia.

Tabla 19. Resultados de Límites de Atterberg del 5% CH.

| Límite Líquido | Límite Plástico | Índice de Plasticidad | Índice de Grupo | Clasificación<br>SUCS/AASHTO |
|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|------------------------------|
| 49             | 25              | 24                    | 18              | CL / A-7-6                   |

Fuente: Propia.

El suelo tiene un límite líquido de 49 y un límite plástico de 25, con un índice de plasticidad de 24 y un índice de grupo de 18; Además se clasifica como un suelo Arcilloso de mediana plasticidad.

- Proctor modificado.

Se realizó proctor modificado para el suelo en estado natural más 5% de cáscara de huevo, los resultados de densidad seca máxima y humedad óptima de cada muestra serán utilizados para la realización de los CBR, todos los ensayos proctor realizados se hicieron con el método A, todo el material pasa el tamiz N° 4.

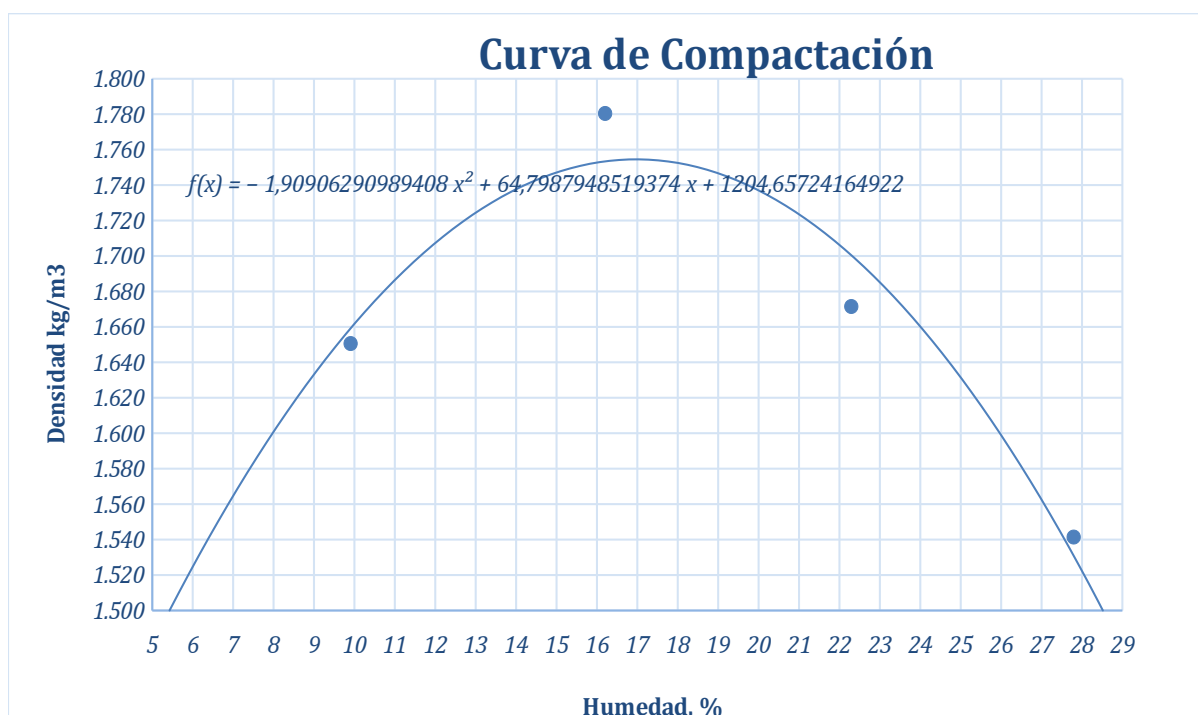
Para el ensaye se le agregaron al molde 5 capas con 25 golpes por cada capa, la curva graficada de este ensaye es una curva polinómica que toma la mayor cantidad de puntos obtenidos en el ensaye, ya que puede haber errores humanos cometidos, y esta curva nos da los valores más acertados y una variación constante de los resultados.

Tabla 20. *Datos de proctor modificado para el suelo más 5% de CH.*

| Método Utilizado                                                     | A      |        |        |        |   |
|----------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---|
| Determinación de Densidad Seca Máxima, (kg/m³) y Humedad Óptima, (%) |        |        |        |        |   |
|                                                                      |        |        |        |        |   |
| Ensayo No.                                                           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5 |
| Peso del Molde, (g)                                                  | 4133.0 |        |        |        |   |
| Volumen del Molde, (cm³)                                             | 929    |        |        |        |   |
| Peso del Molde + Material Compactado, (g)                            | 5818.3 | 6055.0 | 6032.0 | 5963.0 |   |
| Peso Húmedo (g)                                                      | 349.5  | 475.5  | 578.2  | 385.3  |   |
| Peso Seco (g)                                                        | 318.0  | 409.2  | 472.8  | 301.5  |   |
| Densidad Húmeda (g/cm³)                                              | 1.814  | 2.069  | 2.044  | 1.970  |   |
| Densidad Seca (g/cm³)                                                | 1.651  | 1.780  | 1.672  | 1.541  |   |
| Densidad Seca (kg/m³)                                                | 1,651  | 1,780  | 1,672  | 1,541  |   |
| Contenido de Humedad, (%)                                            | 9.9    | 16.2   | 22.3   | 27.8   |   |

*Fuente: Propia*

Gráfica 10. Curva de Compactación del 5% de Cáscara de Huevo.



|                                          |              |
|------------------------------------------|--------------|
| <b>Densidad Seca<br/>Máxima, (kg/m3)</b> | <b>1,755</b> |
| <b>Humedad Óptima, (%)</b>               | <b>17.0</b>  |

*Fuente: Propia*

En este caso sólo se realizaron 4 puntos, debido a que el suelo ya se encontraba demasiado saturado y no se acomodaba bien en el molde, ya que con el golpe del martillo se deformaba.

Se obtuvo una densidad seca máxima seca de 1,755 kg/m³ donde el suelo obtuvo una humedad óptima de 17% en un suelo arcilloso aplicado el 5% de polvo de cáscara de huevo.

- Valor relativo de soporte CBR.

Para la preparación del ensayo, se trabajó con 3 kg de suelo natural y se le agregó el 5% de CH.

Tabla 21. *Datos obtenidos del ensayo C.B.R. para el suelo más 5% de CH.*

| Ensayo de Relación Soporte C.B.R.           |          | Ensayos de Expansión de los suelos |                         |                          |
|---------------------------------------------|----------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Peso del molde (g)                          | 6,656.7  | Hora y Fecha                       | Tiempo transcurrido (h) | Lectura del Deformímetro |
| Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )        | 2,105.0  | 19-10-23 11:39 a.m.                | 0                       | 13.21                    |
| Numero de golpes por capa                   | 56.0     | 23-10-23 11:30 a.m.                | 96                      | 20.14                    |
| No. de Capas                                | 5.0      | Altura del molde (mm)              |                         | 116.43                   |
| Peso del molde +material (g)                | 10,999.1 | Expansión (%)                      |                         | 5.95                     |
| Peso del material húmedo                    | 206.6    |                                    |                         |                          |
| Peso del material seco (g)                  | 175.2    |                                    |                         |                          |
| peso del agua                               | 17.9     |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima húmeda (kg/m <sup>3</sup> ) | 2,062.9  |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima seca (kg/m <sup>3</sup> )   | 1,749.4  |                                    |                         |                          |
| Compactación reproducida (%)                | 99.7     |                                    |                         |                          |

*Fuente: Propia*

Para la corrección de la gráfica, se hizo con el método de la parábola que intercepta la mayor cantidad de puntos en una línea de tendencia polinómica, de la cual se obtuvo una ecuación donde remplazamos los factores de penetración de 0.1" y 0. 2", así mismo, se obtuvo los esfuerzos de penetración dados por la ecuación de la curva.

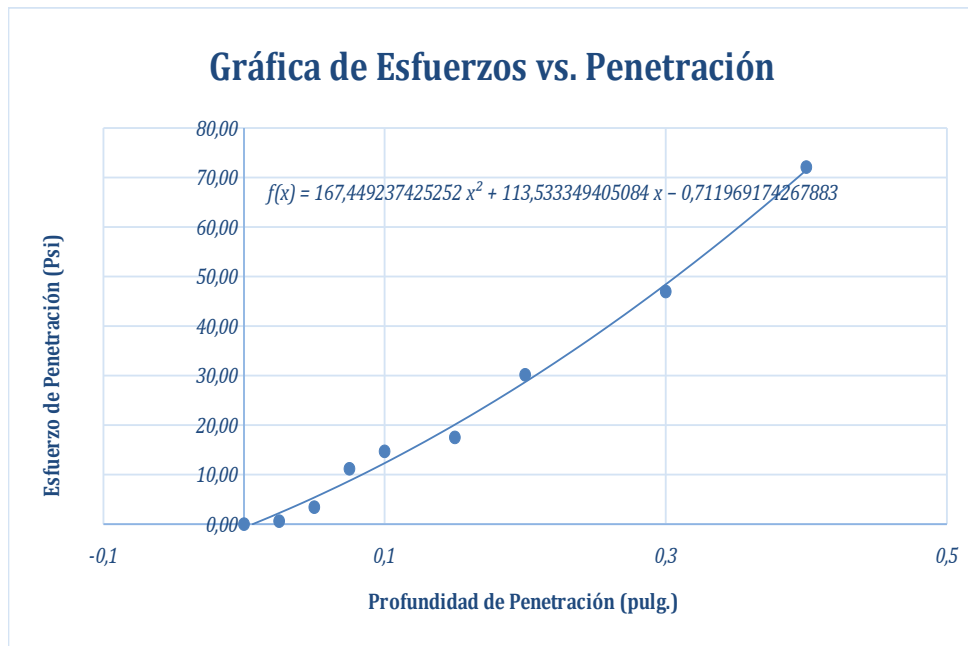
Posteriormente, se encontró el CBR de dichos esfuerzos.

Tabla 22. *Resultados obtenidos del ensayo de penetración del suelo + 5% CH.*

| Ensayo de Penetración de Cargas |       |                              |             |                               |            |                                                    |                       |
|---------------------------------|-------|------------------------------|-------------|-------------------------------|------------|----------------------------------------------------|-----------------------|
| Penetración                     |       | Resistencia a la penetración |             |                               |            |                                                    |                       |
| mm                              | pulg  | Lectura Deformímetro         | Carga (Lbs) | Esfuerzo de Penetración (Psi) | C.B.R. (%) | Esfuerzo de Penetración dado por la ecuación (Psi) | C.B.R. de la ecuación |
| 0                               | 0     | 0                            | 0           | 0.00                          |            |                                                    |                       |
| 0.635                           | 0.025 | 8.02                         | 1.81        | 0.60                          |            |                                                    |                       |
| 1.27                            | 0.05  | 12.03                        | 10.28       | 3.43                          |            |                                                    |                       |
| 1.91                            | 0.075 | 23.05                        | 33.53       | 11.18                         |            |                                                    |                       |
| 2.54                            | 0.1   | 28.06                        | 44.09       | 14.70                         | 1          | 12.32                                              | 1                     |
| 3.81                            | 0.15  | 32.07                        | 52.54       | 17.51                         |            |                                                    |                       |
| 5.08                            | 0.2   | 50.1                         | 90.47       | 30.16                         | 2          | 28.69                                              | 2                     |
| 7.62                            | 0.3   | 74.15                        | 140.92      | 46.97                         |            |                                                    |                       |
| 10.16                           | 0.4   | 110.23                       | 216.31      | 72.10                         |            |                                                    |                       |

*Fuente: Propia*

Gráfica 11. Esfuerzo Vs Penetración del suelo más 5% de CH



Fuente: Propia.

El CBR para el suelo más el 5 % de CH al 100% de compactación y a una penetración de 0.1" es de 1, y 0.2" es de 2, teniendo una densidad máxima seca de 1,749 .4 kg/m<sup>3</sup> a una compactación producida de 100% y una expansión de 5.96%.

### Ensayos para la adición de 10% de polvo de cáscara de huevo (CH).

Para cada uno de los ensayos se tomó una muestra de suelo natural, según lo que se requería y se le agregó el 10% de CH.

- Análisis granulométrico.

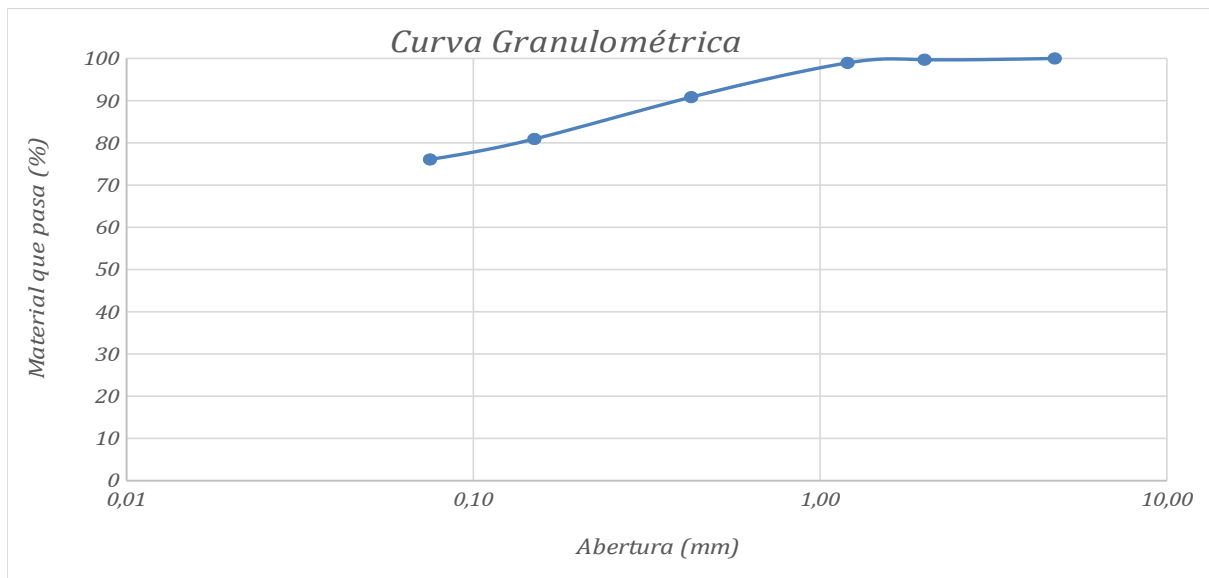
Para este ensaye, se tomó como muestra un peso de 550g y las mallas utilizadas fueron: (N°4, N°10, N16°, N°40, N°100, N°200).

Tabla 23. *Granulometría para el suelo más 10% de CH.*

| Descripción de las Fracciones | Tamaño del Tamiz |       | Peso Retenido | Peso Retenido corregido | Porcentaje Retenido | Retenido Acumulado | Materia I Pasante |
|-------------------------------|------------------|-------|---------------|-------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|
|                               | No.              | mm    | g             |                         | %                   | %                  | %                 |
| Grava Fina                    | No. 4            | 4.75  | 0.0           |                         | 0.0                 | 0.0                | <b>100.0</b>      |
| Arena Gruesa                  | No. 10           | 2.0   | 1.6           | 1.6                     | 0.3                 | 0.3                | <b>99.7</b>       |
|                               | No. 16           | 1.2   | 4.2           | 4.2                     | 0.8                 | 1.1                | <b>98.9</b>       |
| Arena Media                   | No. 40           | 0.43  | 44.6          | 44.6                    | 8.1                 | 9.2                | <b>90.8</b>       |
|                               | No. 100          | 0.15  | 54.5          | 54.5                    | 9.9                 | 19.1               | <b>80.9</b>       |
| Arena Fina                    | No. 200          | 0.075 | 26.7          | 26.7                    | 4.9                 | 23.9               | <b>76.1</b>       |
| Limos y arcillas              | Pasa No. 200     |       | 418.4         | 418.4                   | 76.1                | 100.0              | <b>0.0</b>        |

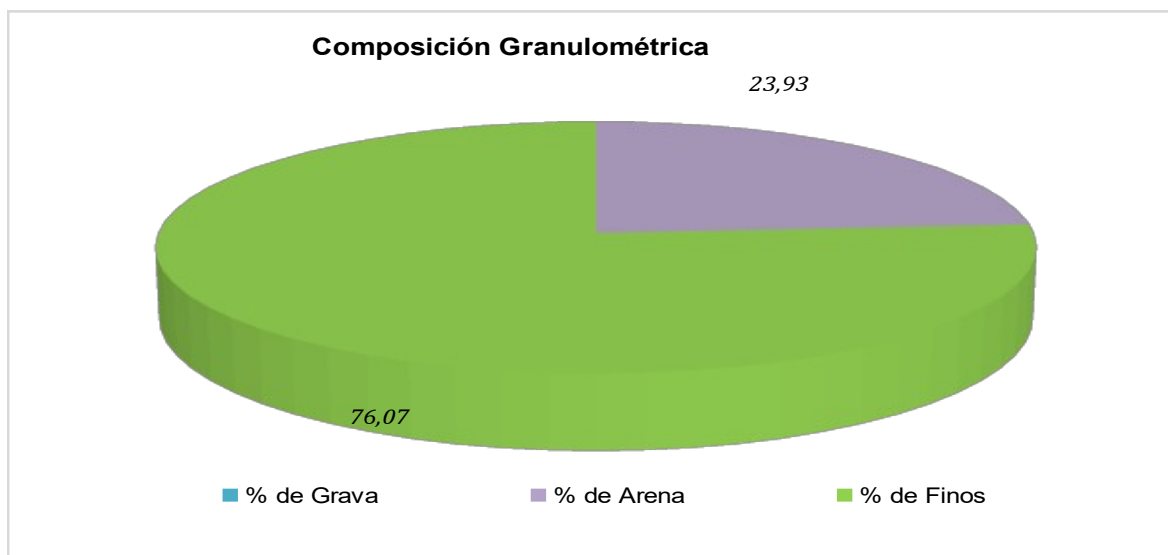
*Fuente: Propia.*

**Gráfica 12. Curva Granulométrica del suelo más 10% de CH**



Fuente: Propia.

**Diagrama de Pastel 3. Composición Granulométrica del 10% de Cáscara de Huevo Pulverizado.**



Fuente: Propia.

En el ensayo se observa los resultados que en su composición granulométrica en el porcentaje de arenas es de 23.93% y de limos y arcillas es de 76.07%, además se observa una curva uniforme de la relación material que pasa y abertura de los tamices.

- Límites de Atterberg.

Para la realización de los límites, se pesó una muestra de 150g ya tamizada por la N°40 y se le agregó el 10% de CH tamizado también; Para proceder a encontrar el límite líquido y límite plástico para el suelo.

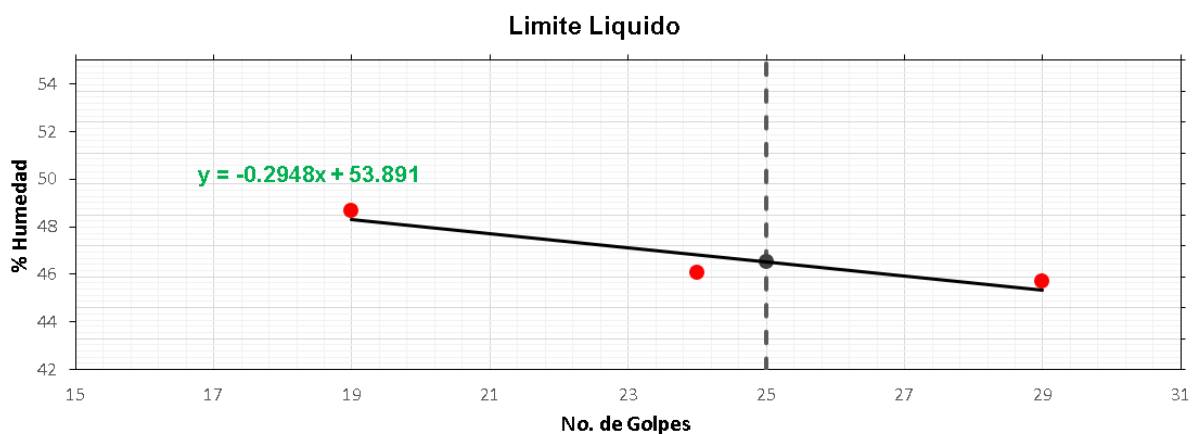
Para el límite líquido se usaron los intervalos de: 15-20 golpes, 20-25 golpes, 25-30 golpes y para el límite plástico, se realizaron cilindros fracturados de 3mm de diámetro aproximadamente.

Tabla 24. *Límite Líquido del suelo natural más el 10% de CH.*

| Límite Líquido (ASTM D4318-17) |       |                 |                               |                             |                         |               |                      |
|--------------------------------|-------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| No. Golpes                     | Tar a | Peso de la tara | Peso de tara + muestra húmeda | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de Humedad |
|                                | No.   | (g)             | (g)                           | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| 29                             | S-3   | 15.73           | 21.50                         | 19.69                       | 3.96                    | 1.81          | 45.7                 |
| 24                             | I-11  | 16.12           | 27.31                         | 23.78                       | 7.66                    | 3.53          | 46.1                 |
| 19                             | N-16  | 16.20           | 28.36                         | 24.38                       | 8.18                    | 3.98          | 48.7                 |

Fuente: Propia.

Gráfica 13. *Límite Líquido del 10% de CH.*



Fuente: Propia

Tabla 25. *Límite plástico del suelo natural más el 10% de CH.*

| Límite Plástico (ASTM D4318-17) |                 |                                |                             |                         |               |                      |
|---------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| Envase                          | Peso de la tara | Peso de tara + muestra humedad | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de humedad |
| No.                             | (g)             | (g)                            | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| M-10                            | 16.27           | 35.24                          | 31.73                       | 15.46                   | 3.51          | 22.7                 |
| M-11                            | 16.11           | 34.81                          | 31.33                       | 15.22                   | 3.48          | 22.9                 |

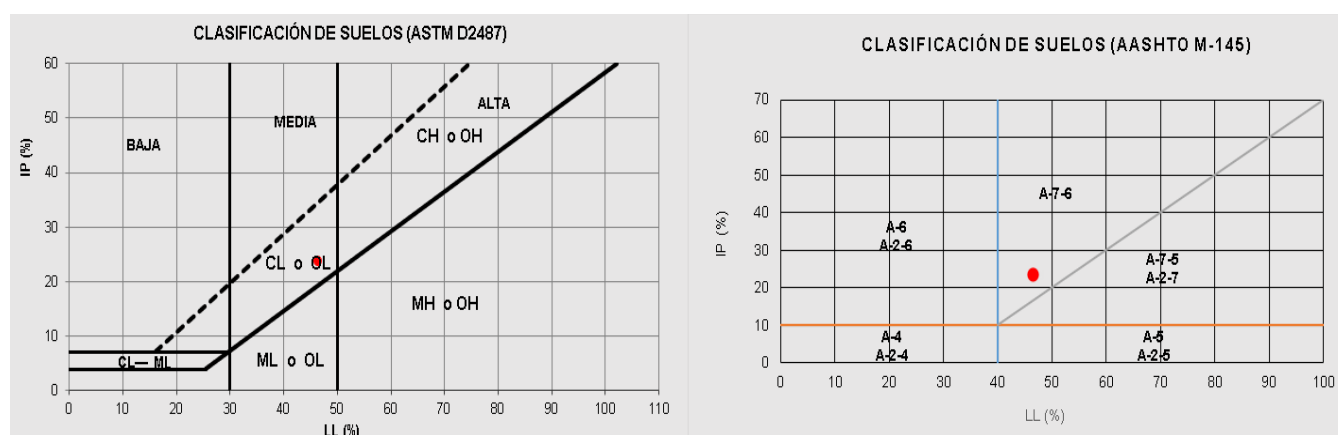
Fuente: Propia.

Tabla 26. *Resultados de los límites de Atterberg del 10% de CH.*

| Límite Líquido | Límite Plástico | Índice de Plasticidad | Índice de Grupo | Clasificación SUCS/ AASHTO |
|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|----------------------------|
| 47             | 23              | 24                    | 18              | CL/ A-7-6                  |

Fuente: Propia.

Gráfica 14. *Clasificación del suelo natural más el 10% de CH por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.*



Fuente: Propia

El suelo tiene un límite líquido de 47 y un límite plástico de 23, con un índice de plasticidad de 24 y un índice de grupo de 18; Además se clasifica como un suelo Arcilloso de mediana plasticidad.

- Proctor modificado.

Se realizó Proctor modificado para el suelo en estado natural más 10% de cáscara de huevo, los resultados de densidad seca máxima y humedad óptima de cada muestra serán utilizados para la realización de los CBR, todos los ensayos Proctor realizados se hicieron con el método A, todo el material pasa el tamiz No 4.

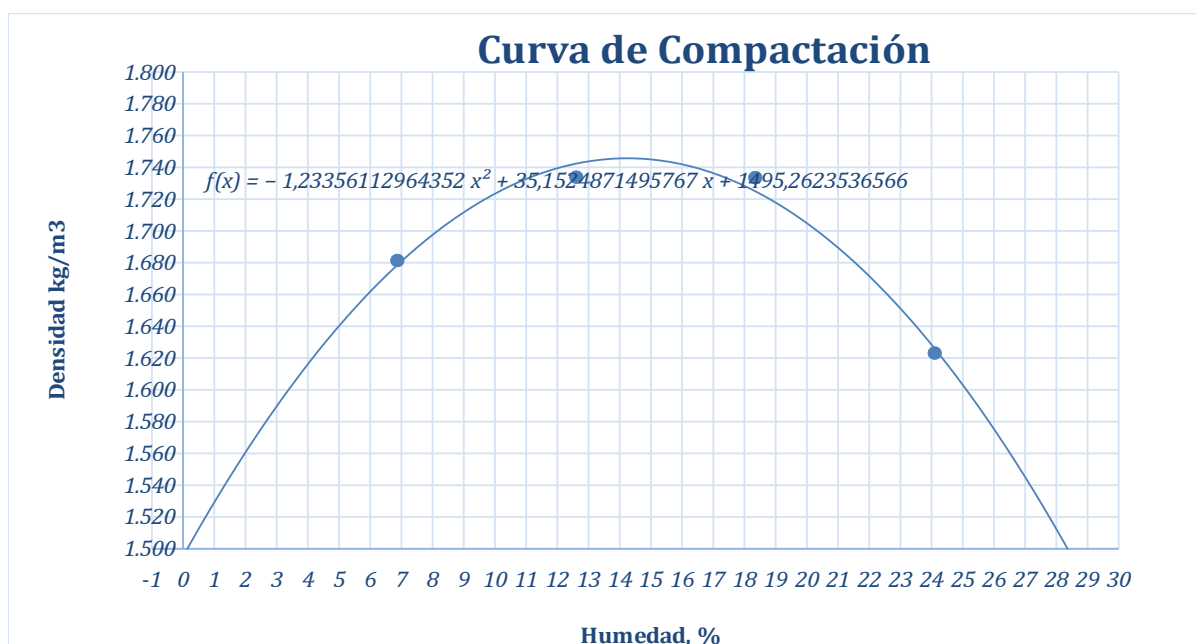
Para el ensaye se le agregaron al molde 5 capas con 25 golpes por cada capa, la curva graficada de este ensaye es una curva polinómica que toma la mayor cantidad de puntos obtenidos en el ensaye, ya que puede haber errores humanos cometidos, y esta curva nos dio los valores más acertados y una variación constante de los resultados.

Tabla 27. *Datos del proctor modificado para el suelo más 10% de CH.*

| Método Utilizado                                                     | A      |        |        |        |   |
|----------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---|
| Determinación de Densidad Seca Máxima, (kg/m³) y Humedad Óptima, (%) |        |        |        |        |   |
|                                                                      |        |        |        |        |   |
| Ensayo No.                                                           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5 |
| Peso del Molde, (g)                                                  | 4133.4 |        |        |        |   |
| Volumen del Molde, (cm³)                                             | 929    |        |        |        |   |
| Peso del Molde + Material Compactado, (g)                            | 5802.7 | 5947.2 | 6039.3 | 6004.7 |   |
| Peso Húmedo (g)                                                      | 351.6  | 417.1  | 412.2  | 530.4  |   |
| Peso Seco (g)                                                        | 329.0  | 370.4  | 348.3  | 427.4  |   |
| Densidad Húmeda (g/cm³)                                              | 1.797  | 1.952  | 2.052  | 2.014  |   |
| Densidad Seca (g/cm³)                                                | 1.681  | 1.734  | 1.734  | 1.623  |   |
| Densidad Seca (kg/m³)                                                | 1,681  | 1,734  | 1,734  | 1,623  |   |
| Contenido de Humedad, (%)                                            | 6.9    | 12.6   | 18.3   | 24.1   |   |

*Fuente: Propia.*

Gráfica 15. Curva de Compactación del 10% de Cáscara de Huevo.



|                                          |              |
|------------------------------------------|--------------|
| <b>Densidad Seca Máxima,<br/>(kg/m3)</b> | <b>1,746</b> |
| <b>Humedad Óptima, (%)</b>               | <b>14.5</b>  |

Fuente: Propia

En este caso sólo se realizaron 4 puntos, debido a que el suelo ya se encontraba demasiado saturado y no se acomodaba bien en el molde, ya que con el golpe del martillo se deformaba.

Se obtuvo una densidad Seca Máxima seca de 1,746 kg/m3 con una humedad óptima de 14.5% para el suelo más 10% de CH.

- Valor relativo de soporte CBR.

Para la preparación del ensayo, se trabajó con 3 kg de suelo en estado natural y a eso se le agregó el 10% de CH.

| Ensayo de Relación Soporte C.B.R.           |          | Ensayos de Expansión de los suelos |                         |                          |
|---------------------------------------------|----------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Peso del molde (g)                          | 6,656.7  | Hora y Fecha                       | Tiempo transcurrido (h) | Lectura del Deformímetro |
| Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )        | 2,069.0  | 19-10-23<br>11:39 a.m.             | 0                       | 16.03                    |
| Numero de golpes por capa                   | 56.0     | 23-10-23<br>11:30 a.m.             | 96                      | 22.81                    |
| No. de Capas                                | 5.0      | Altura del molde (mm)              |                         | 116.43                   |
| Peso del molde +material (g)                | 10,836.7 | Expansión (%)                      |                         | 5.82                     |
| Peso del material húmedo                    | 199.8    |                                    |                         |                          |
| Peso del material seco (g)                  | 173.3    |                                    |                         |                          |
| peso del agua                               | 15.3     |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima húmeda (kg/m <sup>3</sup> ) | 2,020.3  |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima seca (kg/m <sup>3</sup> )   | 1,752.3  |                                    |                         |                          |
| Compactación reproducida (%)                | 100      |                                    |                         |                          |

Tabla 28. Datos obtenidos del ensayo CBR para el suelo más 10% de CH.

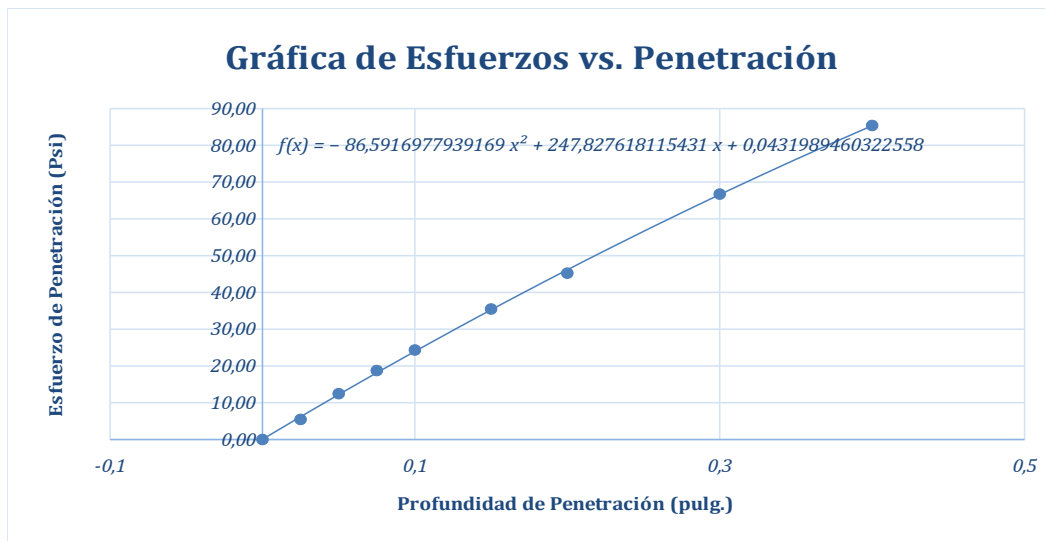
Fuente: Propia

| Ensayo de Penetración de Cargas |       |                              |             |                               |             |                                                    |                       |
|---------------------------------|-------|------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|----------------------------------------------------|-----------------------|
| Penetración                     |       | Resistencia a la penetración |             |                               |             |                                                    |                       |
| mm                              | pulg  | Lectura Deformímetro         | Carga (Lbs) | Esfuerzo de Penetración (Psi) | C.B.R . (%) | Esfuerzo de Penetración dado por la ecuación (Psi) | C.B.R. de la ecuación |
| 0                               | 0     | 0                            | 0           | 0.00                          |             |                                                    |                       |
| 0.635                           | 0.025 | 14.93                        | 16          | 5.47                          |             |                                                    |                       |
| 1.27                            | 0.05  | 24.88                        | 37          | 12.46                         |             |                                                    |                       |
| 1.91                            | 0.075 | 33.84                        | 56          | 18.76                         |             |                                                    |                       |
| 2.54                            | 0.1   | 41.8                         | 73          | 24.34                         | 2           | 23.96                                              | 2                     |
| 3.81                            | 0.15  | 57.72                        | 106         | 35.49                         |             |                                                    |                       |
| 5.08                            | 0.2   | 71.66                        | 136         | 45.24                         | 3           | 46.15                                              | 3                     |
| 7.62                            | 0.3   | 102.51                       | 200         | 66.74                         |             |                                                    |                       |
| 10.16                           | 0.4   | 129.38                       | 256         | 85.39                         |             |                                                    |                       |

Tabla 29. Resultados del ensayo de penetración para el suelo más 10% de CH.

Fuente: Propia.

Gráfica 16. Esfuerzo Vs Penetración para el 10% de CH.



Fuente: Propia.

El CBR para el suelo más el 10% de CH al 100% de compactación a una penetración de 0.1" es de 2, y 0.2" de 3, teniendo una densidad máxima seca de 1,752 .3 kg/m3 a una compactación producida de 100% y una expansión de 5.82%.

### Ensayos para la adición del 15% de polvo de cáscara de huevo (CH).

Para cada uno de los ensayos se tomó una muestra de suelo natural, según lo que se requería y se le agregó el 15% de CH.

- Análisis granulométrico.

Para este ensaye, se tomó como muestra un peso de 575g y las mallas utilizadas fueron: (N°4, N°10, N°16, N°40, N°100, N°200).

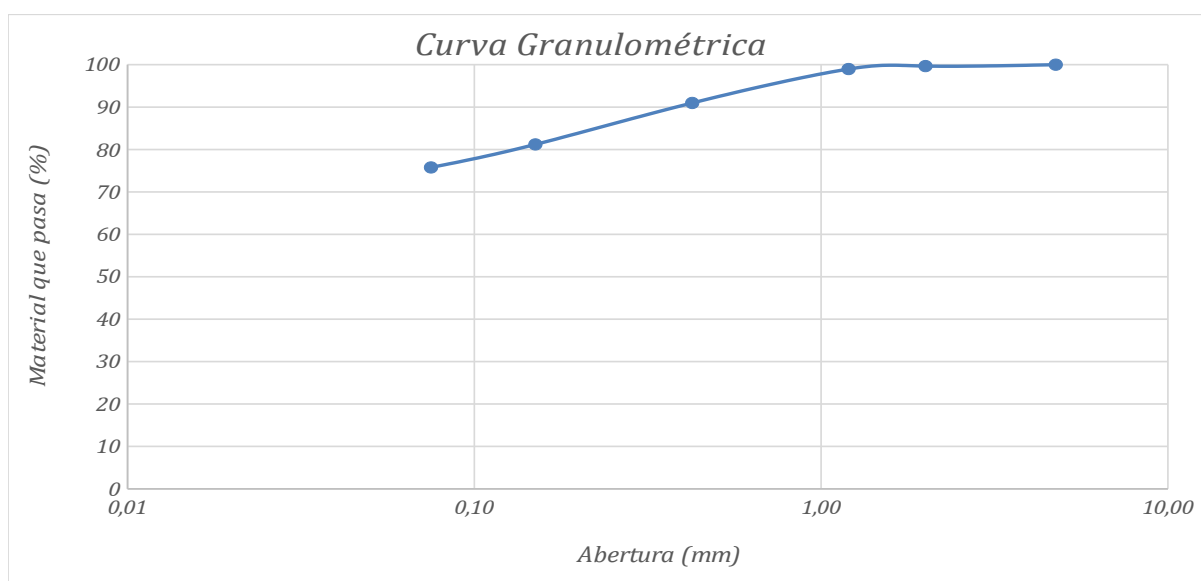
Tabla 30. *Granulometría para el suelo más 15% de CH.*

| Descripción de las Fracciones | Tamaño del Tamiz |      | Peso Retenido | Peso Retenido corregido | Porcentaje Retenido | Retenido Acumulado | Material Pasante |
|-------------------------------|------------------|------|---------------|-------------------------|---------------------|--------------------|------------------|
|                               | Nº               | mm   | g             |                         | %                   | %                  | %                |
| Grava Fina                    | Nº 4             | 4.75 | 0.0           |                         | 0.0                 | 0.0                | <b>100.0</b>     |
| Arena Gruesa                  | Nº 10            | 2.0  | 1.9           | 1.9                     | 0.3                 | 0.3                | <b>99.7</b>      |
|                               | Nº 16            | 1.2  | 4.0           | 4.0                     | 0.7                 | 1.0                | <b>99.0</b>      |
| Arena Media                   | Nº 40            | 0.43 | 46.0          | 46.0                    | 8.0                 | 9.0                | <b>91.0</b>      |

|                  |                                 |               |           |           |      |       |             |
|------------------|---------------------------------|---------------|-----------|-----------|------|-------|-------------|
|                  | N<br>o<br>·<br>1<br>0<br>0<br>0 | 0.<br>15      | 56.2      | 56.2      | 9.8  | 18.8  | <b>81.2</b> |
| Arena Fina       | N<br>o<br>·<br>2<br>0<br>0<br>0 | 0.<br>07<br>5 | 31.2      | 31.2      | 5.4  | 24.2  | <b>75.8</b> |
| Limos y arcillas | Pasa<br>No.<br>200              |               | 435.<br>7 | 435.<br>7 | 75.8 | 100.0 | <b>0.0</b>  |

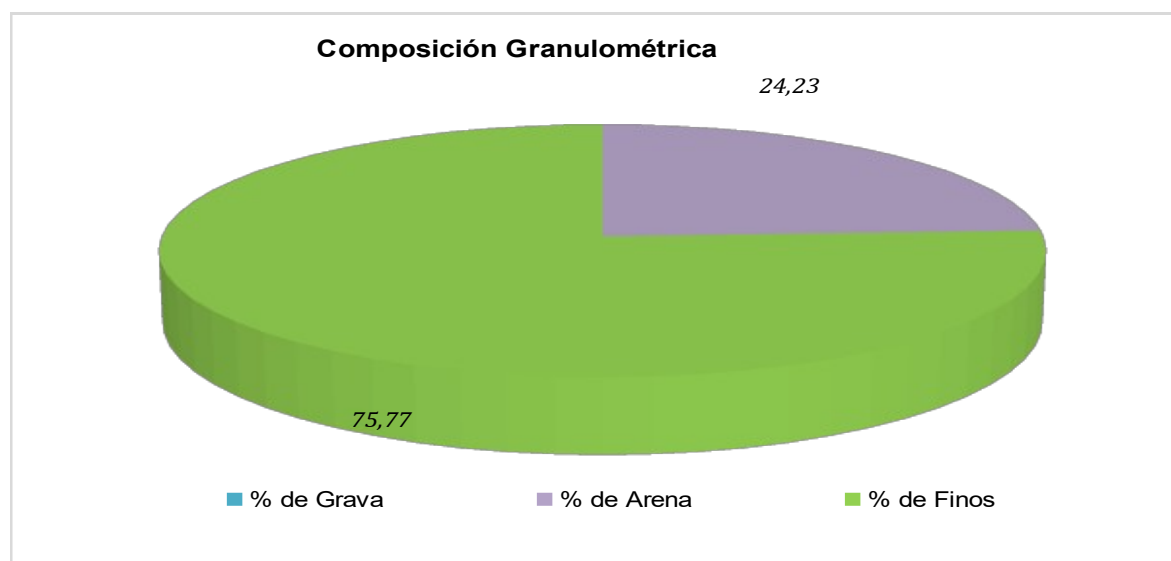
Fuente: Propia

Gráfica 17. Curva Granulométrica del suelo más 15% de CH.



Fuente: Propia.

Diagrama de Pastel 4. Composición Granulométrica del 15% de Cáscara de Huevo Pulverizado.



En el ensayo se observa que en su composición granulométrica en el porcentaje de arenas es de 24.23% y de limos y arcillas es de 75.77%, se observa un buen comportamiento de la curva.

- Límites de Atterberg.

Para la realización de los límites, se pesó una muestra de 150g ya tamizada por la N°40 y se le agregó el 10% de CH tamizado también; Para proceder a encontrar el límite líquido y límite plástico para el suelo.

Para el límite líquido se usaron los intervalos de: 15-20 golpes, 20-25 golpes, 25-30 golpes y para el límite plástico, se realizaron cilindros fracturados de 3mm de diámetro aproximadamente.

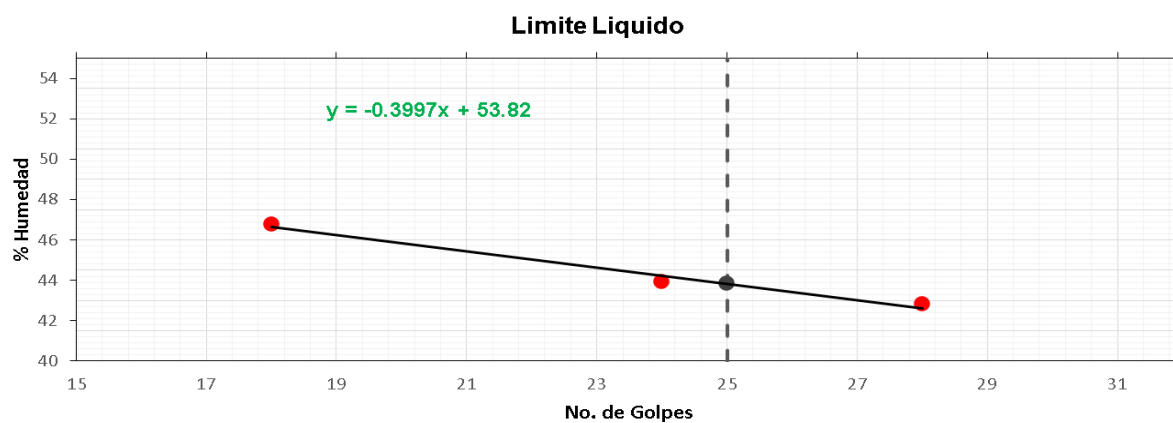
Tabla 31. Límite líquido para el suelo más 15% de CH.

| Límite Líquido (ASTM D4318-17) |      |                 |                               |                             |                         |               |                      |
|--------------------------------|------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| No.                            | Tara | Peso de la tara | Peso de tara + muestra húmeda | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de Humedad |
| Golpes                         | No.  | (g)             | (g)                           | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| 28                             | L-10 | 15.88           | 20.95                         | 19.43                       | 3.55                    | 1.52          | 42.8                 |
| 24                             | L-10 | 15.96           | 21.40                         | 19.74                       | 3.78                    | 1.66          | 43.9                 |

|    |      |       |       |       |      |      |      |
|----|------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 18 | M-44 | 15.90 | 25.16 | 22.21 | 6.31 | 2.95 | 46.8 |
|----|------|-------|-------|-------|------|------|------|

Fuente: Propia.

Gráfica 18. Límite Líquido del suelo más 15% de CH.



Fuente: Propia.

Tabla 32. Límite plástico para el suelo más 15% de CH.

| Límite Plástico (ASTM D4318-17) |                 |                               |                             |                         |               |                      |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| Envase                          | Peso de la tara | Peso de tara + muestra húmeda | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de humedad |
| No.                             | (g)             | (g)                           | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| JR-12                           | 16.22           | 31.60                         | 28.80                       | 12.58                   | 2.80          | 22.3                 |
| P-4                             | 16.14           | 35.33                         | 31.75                       | 15.61                   | 3.58          | 22.9                 |

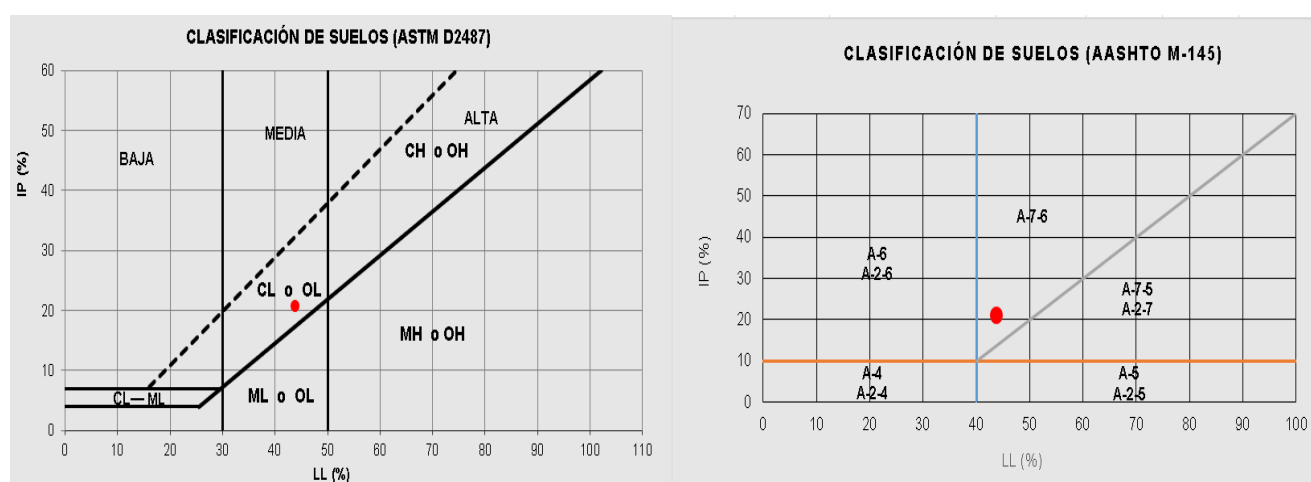
Fuente: Propia.

**Gráfica 19. Clasificación del suelo natural más el 15% de CH por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.**

Fuente: Propia.

**Tabla 33. Resultados de Límites de Atterberg para el suelo más 15% de CH.**

| Límite Líquido | Límite Plástico | Índice de Plasticidad | Índice de Grupo | Clasificación SUCS/ AASHTO |
|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|----------------------------|
| 44             | 23              | 21                    | 16              | CL/ A-7-6                  |



Fuente: Propia.

El suelo tiene un límite líquido de 44 y un límite plástico de 23, con un índice de plasticidad de 21 y un índice de grupo de 16; Además se clasifica como un suelo Arcilloso de mediana plasticidad.

- Proctor modificado.

Se realizó proctor modificado para el suelo en estado natural más 15% de cáscara de huevo, los resultados de densidad seca máxima y humedad óptima de cada muestra serán utilizados para la realización de los CBR, todos los ensayos Proctor realizados se hicieron con el método A, todo el material pasa el tamiz No 4.

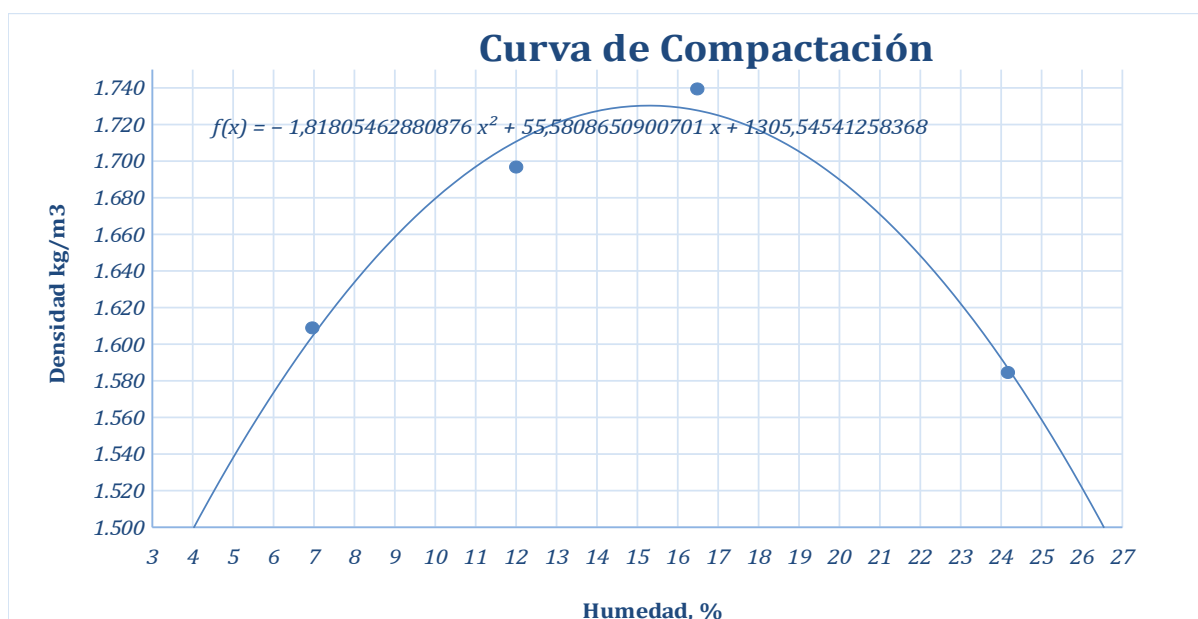
Para el ensaye se le agregaron al molde 5 capas con 25 golpes por cada capa, la curva graficada de este ensaye es una curva polinómica que toma la mayor cantidad de puntos obtenidos en el ensaye, ya que puede haber errores humanos cometidos, y esta curva nos dio los valores más acertados y una variación constante de los resultados.

Tabla 34. *Datos del proctor modificado para el suelo más 15% de CH.*

| Método Utilizado                                                     | A      |        |        |        |   |
|----------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---|
| Determinación de Densidad Seca Máxima, (kg/m³) y Humedad Óptima, (%) |        |        |        |        |   |
|                                                                      |        |        |        |        |   |
| Ensayo No.                                                           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5 |
| Peso del Molde, (g)                                                  | 4133.4 |        |        |        |   |
| Volumen del Molde, (cm³)                                             | 929    |        |        |        |   |
| Peso del Molde + Material Compactado, (g)                            | 5732.1 | 5898.9 | 6015.7 | 5961.2 |   |
| Peso Húmedo (g)                                                      | 468.8  | 427.4  | 550.5  | 335.5  |   |
| Peso Seco (g)                                                        | 438.3  | 381.6  | 472.6  | 270.2  |   |
| Densidad Húmeda (g/cm³)                                              | 1.721  | 1.900  | 2.026  | 1.967  |   |
| Densidad Seca (g/cm³)                                                | 1.609  | 1.697  | 1.739  | 1.585  |   |
| Densidad Seca (kg/m³)                                                | 1,609  | 1,697  | 1,739  | 1,585  |   |
| Contenido de Humedad, (%)                                            | 7.0    | 12.0   | 16.5   | 24.2   |   |

*Fuente: Propia*

Gráfica 20. Curva de Compactación del suelo más 15% de CH.



|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| Densidad Seca Máxima, (kg/m3) | 1,730 |
| Humedad Óptima, (%)           | 15.2  |

Fuente: Propia

Se obtuvo una densidad Seca Máxima seca de 1,730 kg/m3 con una humedad óptima de 15.8% % para el suelo más 15% de CH.

- Valor relativo de soporte CBR

Para la preparación del ensayo, se trabajó con 3 kg de suelo en estado natural y a eso se le agregó el 15% de CH.

| Ensayo de Relación Soporte C.B.R.           |          | Ensayos de Expansión de los suelos |                         |                          |
|---------------------------------------------|----------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Peso del molde (g)                          | 6,703.1  | Hora y Fecha                       | Tiempo transcurrido (h) | Lectura del Deformímetro |
| Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )        | 2,105.0  | 19-10-23<br>11:39 a.m.             | 0                       | 12.19                    |
| Numero de golpes por capa                   | 56.0     | 23-10-23<br>11:30 a.m.             | 96                      | 17.68                    |
| No. de Capas                                | 5.0      | Altura del molde (mm)              |                         | 116.43                   |
| Peso del molde +material (g)                | 10,908.0 | Expansión (%)                      |                         | 4.72                     |
| Peso del material húmedo                    | 147.3    |                                    |                         |                          |
| Peso del material seco (g)                  | 125.8    |                                    |                         |                          |
| peso del agua                               | 17.1     |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima húmeda (kg/m <sup>3</sup> ) | 1,997.6  |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima seca (kg/m <sup>3</sup> )   | 1,706.0  |                                    |                         |                          |
| Compactación reproducida (%)                | 99       |                                    |                         |                          |

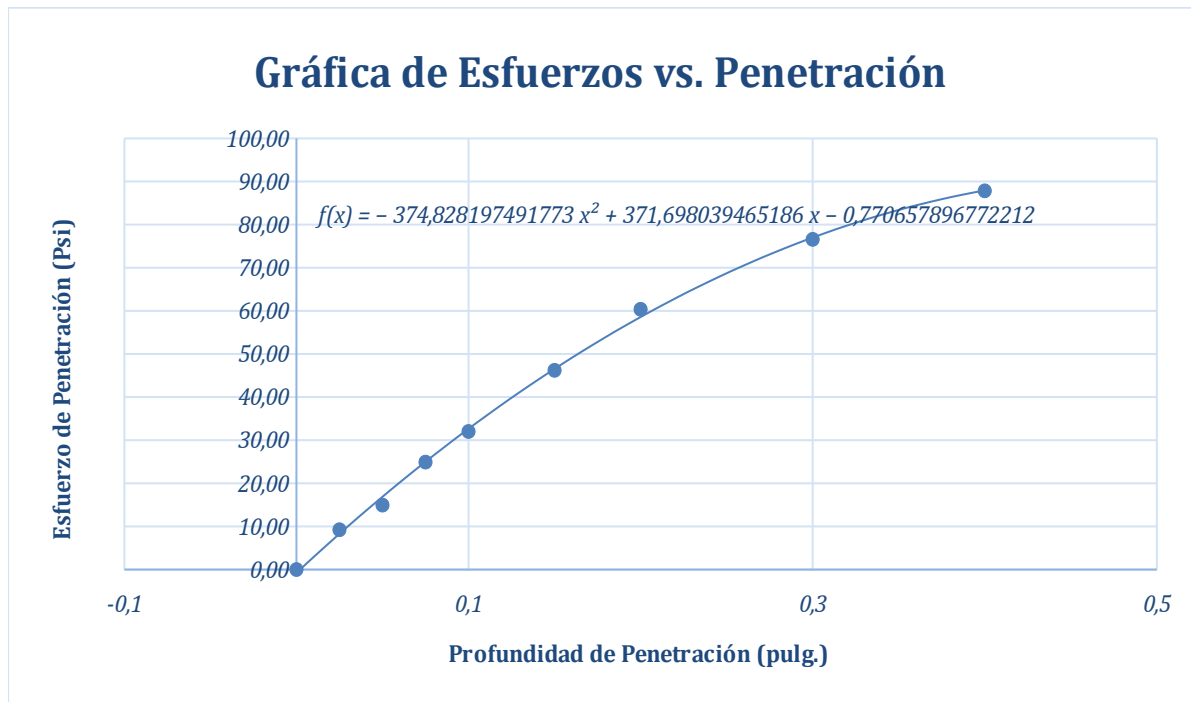
Tabla 35. Datos obtenidos del ensayo CBR para el suelo más 15% de CH.

Fuente: Propia.

| Ensayo de Penetración de Cargas |       |                              |             |                               |            |                                                    |                       |
|---------------------------------|-------|------------------------------|-------------|-------------------------------|------------|----------------------------------------------------|-----------------------|
| Penetración                     |       | Resistencia a la penetración |             |                               |            |                                                    |                       |
| mm                              | pulg  | Lectura Deformímetro         | Carga (Lbs) | Esfuerzo de Penetración (Psi) | C.B.R. (%) | Esfuerzo de Penetración dado por la ecuación (Psi) | C.B.R. de la ecuación |
| 0                               | 0     | 0                            | 0           | 0.00                          |            |                                                    |                       |
| 0.635                           | 0.025 | 20.29                        | 28          | 9.24                          |            |                                                    |                       |
| 1.27                            | 0.05  | 28.41                        | 45          | 14.94                         |            |                                                    |                       |
| 1.91                            | 0.075 | 42.62                        | 75          | 24.91                         |            |                                                    |                       |
| 2.54                            | 0.1   | 52.76                        | 96          | 32.02                         | 3          | 32.65                                              | 3                     |
| 3.81                            | 0.15  | 73.05                        | 139         | 46.21                         |            |                                                    |                       |
| 5.08                            | 0.2   | 93.35                        | 181         | 60.36                         | 4          | 58.58                                              | 4                     |
| 7.62                            | 0.3   | 116.68                       | 230         | 76.58                         |            |                                                    |                       |
| 10.16                           | 0.4   | 132.92                       | 264         | 87.84                         |            |                                                    |                       |

Tabla 36. *Resultados del ensayo de penetración del suelo más 15% de CH.*

*Fuente: Propia.*



Gráfica 21. *Esfuerzo Vs Penetración para el suelo más 15% de CH.*

*Fuente: Propia.*

El CBR para el suelo Arcilloso más el 15 % de Cáscara de Huevo Pulverizado al 100% de compactación a una penetración de 0.1" es de 3, y 0.2" 4, teniendo una densidad máxima seca de 1,706 .1 kg/m<sup>3</sup> a una compactación producida de 99% bastante aceptable, este ensayo cumplió las 96 horas establecidas en la normativa con una expansión de 4.71%. Podemos observar que en la gráfica hay un comportamiento regular de ascendencia.

### Ensayos para la adición de 5% de cenizas de cáscara de Arroz. (CCA).

Para cada uno de los ensayos se tomó una muestra de suelo natural, según lo que se requería y se le agregó el 5% de CCA.

- Análisis granulométrico.

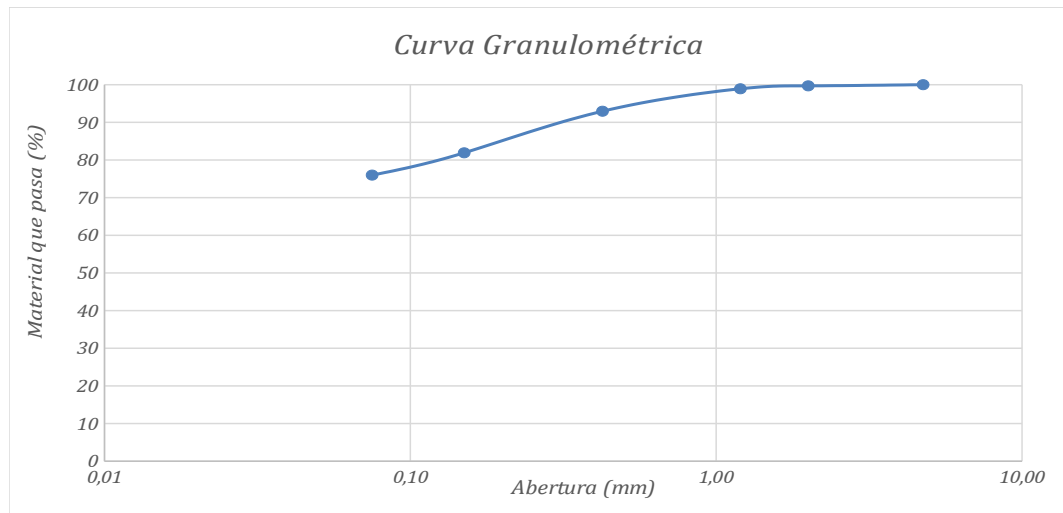
Para este ensaye, se tomó como muestra un peso de 525g y las mallas utilizadas fueron: (N°4, N°10, N16°, N°40, N°100, N°200).

Tabla 37. *Granulometría para el suelo más 5% de CCA.*

| Descripción de las Fracciones | Tamaño del Tamiz |       | Peso Retenido | Peso Retenido corregido | Porcentaje Retenido | Retenido Acumulado | Materia I Pasante |
|-------------------------------|------------------|-------|---------------|-------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|
|                               | No.              | mm    | g             |                         | %                   | %                  | %                 |
| Grava Fina                    | No. 4            | 4.75  | 0.0           |                         | 0.0                 | 0.0                | <b>100.0</b>      |
| Arena Gruesa                  | No. 10           | 2.0   | 1.6           | 1.6                     | 0.3                 | 0.3                | <b>99.7</b>       |
|                               | No. 16           | 1.2   | 4.1           | 4.1                     | 0.8                 | 1.1                | <b>98.9</b>       |
| Arena Media                   | No. 40           | 0.43  | 31.3          | 31.3                    | 6.0                 | 7.0                | <b>93.0</b>       |
|                               | No. 100          | 0.15  | 58.0          | 58.0                    | 11.0                | 18.1               | <b>81.9</b>       |
| Arena Fina                    | No. 200          | 0.075 | 31.1          | 31.1                    | 5.9                 | 24.0               | <b>76.0</b>       |
| Limos y arcillas              | Pasa No. 200     |       | 399.0         | 399.0                   | 76.0                | 100.0              | <b>0.0</b>        |

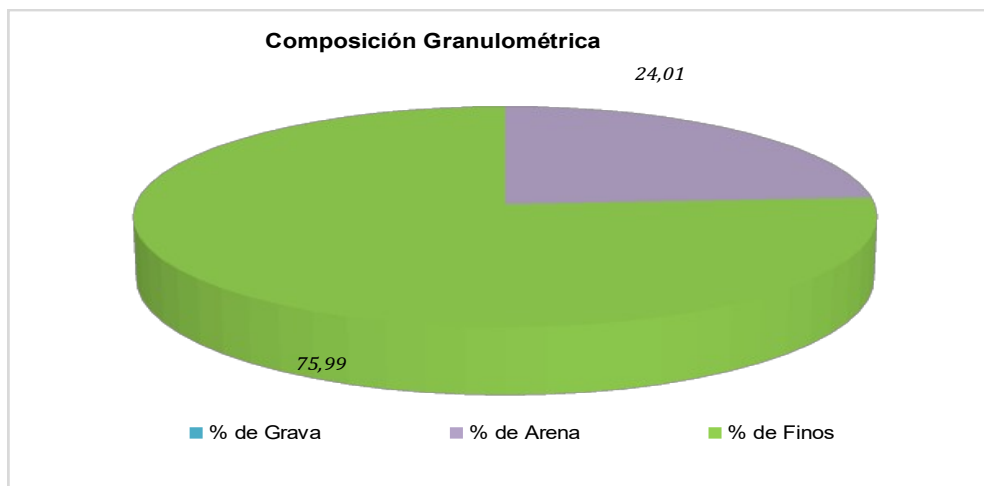
Fuente: Propia.

**Gráfica 22. Curva Granulométrica del suelo más 5% de CCA.**



*Fuente: Propia*

**Diagrama de Pastel 5. Composición Granulométrica del suelo más 5% de CCA.**



*Fuente: Propia.*

En el ensayo se observa en los resultados que en su composición granulométrica en el porcentaje de arenas es de 24.01% y de limos y arcillas es de 75.99%, se observa un comportamiento uniforme de la curva granulométrica.

- Límites de Atterberg.

Para la realización de los límites, se pesó una muestra de 150g ya tamizada por la N°40 y se le agregó el 5% de CCA tamizado también; Para proceder a encontrar el límite líquido y límite plástico para el suelo.

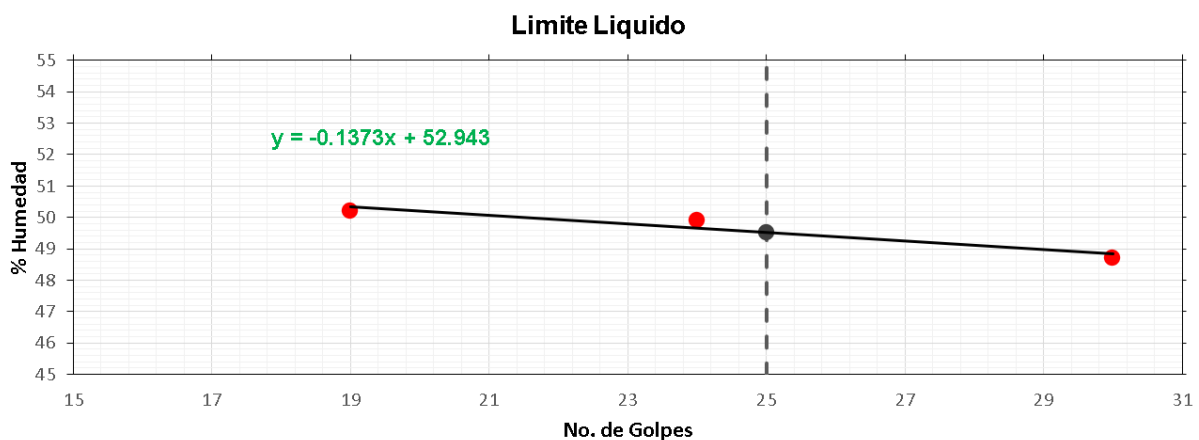
Para el límite líquido se usaron los intervalos de: 15-20 golpes, 20-25 golpes, 25-30 golpes y para el límite plástico, se realizaron cilindros fracturados de 3mm de diámetro aproximadamente.

Tabla 38. *Límite líquido para el suelo más 5% de CCA.*

| Límite Líquido (ASTM D4318-17) |          |                           |                                        |                                      |                                   |                     |                                 |
|--------------------------------|----------|---------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| No.                            | Tar<br>a | Pes<br>o de<br>la<br>tara | Peso de<br>tara +<br>muestra<br>húmeda | Peso de<br>tara +<br>muestra<br>seca | Peso<br>de la<br>muestr<br>a seca | Peso<br>del<br>agua | Contenid<br>o de<br>Humeda<br>d |
| Golpe<br>s                     | No.      | (g)                       | (g)                                    | (g)                                  | (g)                               | (g)                 | ( % )                           |
| 30                             | D-2      | 22.7<br>0                 | 43.55                                  | 36.72                                | 14.02                             | 6.83                | 48.7                            |
| 24                             | A-2      | 23.0<br>1                 | 43.41                                  | 36.62                                | 13.61                             | 6.79                | 49.9                            |
| 19                             | D-4      | 20.7<br>0                 | 42.78                                  | 35.40                                | 14.70                             | 7.38                | 50.2                            |

Fuente: Propia.

Gráfica 23. *Límite Líquido del suelo más 5% de CCA.*

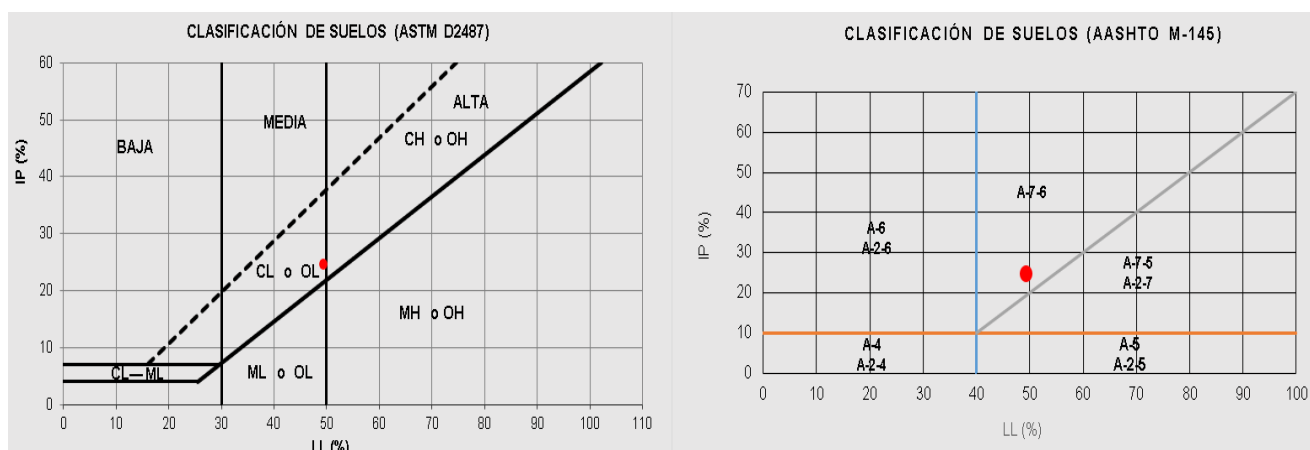


Fuente: Propia.

Tabla 39. Límite plástico para el 5% de CCA.

| Límite Plástico (ASTM D4318-17) |                 |                               |                             |                         |               |                      |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| Envase                          | Peso de la tara | Peso de tara + muestra húmeda | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de humedad |
| No.                             | (g)             | (g)                           | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| AV-4                            | 20.19           | 34.62                         | 31.72                       | 11.53                   | 2.90          | 25.2                 |
| AV-2                            | 20.48           | 34.67                         | 31.82                       | 11.34                   | 2.85          | 25.1                 |

Fuente: Propia.



Gráfica 24. Clasificación del suelo natural más el 5% de CCA por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.

Fuente: Propia.

Tabla 40. Resultados de Límites de Atterberg del 5% de CCA.

| Límite Líquido | Límite Plástico | Índice de Plasticidad | Índice de Grupo | Clasificación SUCS/ AASHTO |
|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|----------------------------|
| 50             | 25              | 25                    | 19              | CL/ A-7-6                  |

Fuente: Propia.

El suelo tiene un límite líquido de 50 y un límite plástico de 25, con un índice de plasticidad de 25 y un índice de grupo de 19; Además se clasifica como un suelo Arcilloso de mediana plasticidad.

- Proctor modificado.

Se realizó Proctor modificado para el suelo en estado natural más 5% de cenizas de cáscara de arroz, los resultados de densidad seca máxima y humedad óptima de cada muestra serán utilizados para la realización de los CBR, todos los ensayos Proctor realizados se hicieron con el método A, todo el material pasa el tamiz No 4.

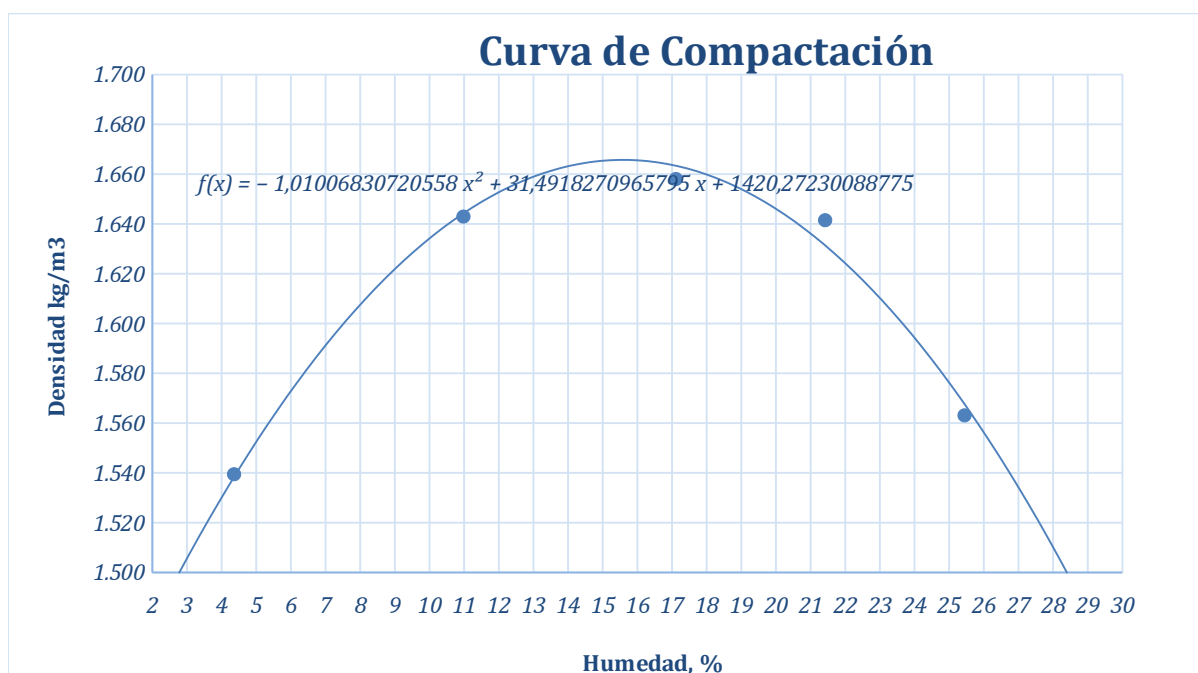
Para el ensaye se le agregaron al molde 5 capas con 25 golpes por cada capa, la curva graficada de este ensaye es una curva polinómica que toma la mayor cantidad de puntos obtenidos en el ensaye, ya que puede haber errores humanos cometidos, y esta curva da los valores más acertados y una variación constante de los resultados.

Tabla 41. *Datos obtenidos de proctor para el suelo más 5% de CCA.*

| Método Utilizado                                                     | A      |        |        |        |        |
|----------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Determinación de Densidad Seca Máxima, (kg/m³) y Humedad Óptima, (%) |        |        |        |        |        |
|                                                                      |        |        |        |        |        |
| Ensayo No.                                                           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| Peso del Molde, (g)                                                  | 4146.1 |        |        |        |        |
| Volumen del Molde, (cm³)                                             | 929    |        |        |        |        |
| Peso del Molde + Material Compactado, (g)                            | 5638.6 | 5840.0 | 5950.0 | 5997.7 | 5967.7 |
| Peso Húmedo (g)                                                      | 347.1  | 404.3  | 320.3  | 314.6  | 360.4  |
| Peso Seco (g)                                                        | 332.6  | 364.3  | 273.5  | 259.1  | 287.3  |
| Densidad Húmeda (g/cm³)                                              | 1.607  | 1.823  | 1.942  | 1.993  | 1.961  |
| Densidad Seca (g/cm³)                                                | 1.539  | 1.643  | 1.658  | 1.641  | 1.563  |
| Densidad Seca (kg/m³)                                                | 1,539  | 1,643  | 1,658  | 1,641  | 1,563  |
| Contenido de Humedad, (%)                                            | 4.4    | 11.0   | 17.1   | 21.4   | 25.4   |

*Fuente: Propia.*

Gráfica 25. Curva de Compactación del suelo más 5% de CCA.



|                                          |              |
|------------------------------------------|--------------|
| <b>Densidad Seca Máxima,<br/>(kg/m3)</b> | <b>1,666</b> |
| <b>Humedad Óptima, (%)</b>               | <b>15.2</b>  |

Fuente: Propia.

Se obtuvo una densidad Seca Máxima seca de 1,666 kg/m³ con una humedad óptima de 15.2% del suelo aplicado el 5% de CCA.

- Valor relativo de soporte CBR.

Para la preparación del ensayo, se trabajó con 3 kg de suelo en estado natural y a eso se le agregó el 5% de CCA.

Tabla 42. Datos del ensayo CBR del suelo más 5% de CCA.

| Ensayo de Relación Soporte C.B.R.           |          | Ensayes de Expansión de los suelos |                         |                          |
|---------------------------------------------|----------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Peso del molde (g)                          | 6,612.4  | Hora y Fecha                       | Tiempo transcurrido (h) | Lectura del Deformímetro |
| Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )        | 2,105.0  | 19-10-23<br>11:39 a.m              | 0                       | 14.93                    |
| Numero de golpes por capa                   | 56.0     | 23-10-23<br>11:30 a.m              | 96                      | 21.39                    |
| No. de Capas                                | 5.0      | Altura del molde (mm)              |                         | 116.43                   |
| Peso del molde +material (g)                | 10,665.3 | Expansión (%)                      |                         | 5.55                     |
| Peso del material húmedo                    | 156.7    |                                    |                         |                          |
| Peso del material seco (g)                  | 133.9    |                                    |                         |                          |
| peso del agua                               | 17.0     |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima húmeda (kg/m <sup>3</sup> ) | 1,925.4  |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima seca (kg/m <sup>3</sup> )   | 1,645.2  |                                    |                         |                          |
| Compactación reproducida (%)                | 99       |                                    |                         |                          |

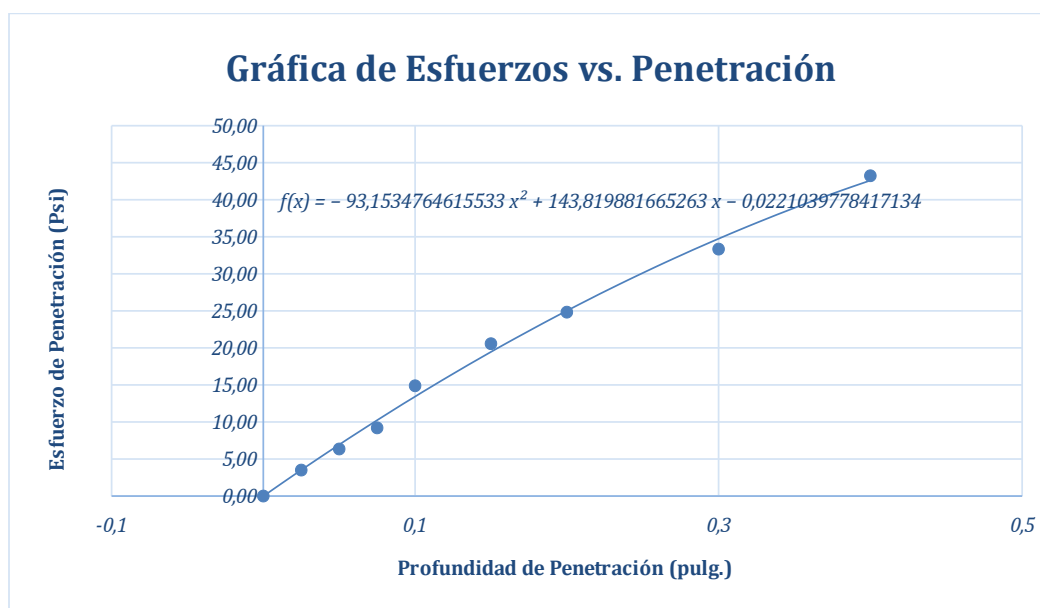
Fuente: Propia.

Tabla 43. Resultados del ensayo de penetración del suelo más 5% de CCA.

| Ensayo de Penetración de Cargas |       |                              |             |                               |            |                                                    |                       |
|---------------------------------|-------|------------------------------|-------------|-------------------------------|------------|----------------------------------------------------|-----------------------|
| Penetración                     |       | Resistencia a la penetración |             |                               |            |                                                    |                       |
| mm                              | pulg  | Lectura deformímetro         | Carga (Lbs) | Esfuerzo de Penetración (Psi) | C.B.R. (%) | Esfuerzo de Penetración dado por la ecuación (Psi) | C.B.R. de la ecuación |
| 0                               | 0     | 0                            | 0           | 0.00                          |            |                                                    |                       |
| 0.635                           | 0.025 | 12.14                        | 11          | 3.50                          |            |                                                    |                       |
| 1.27                            | 0.05  | 16.19                        | 19          | 6.35                          |            |                                                    |                       |
| 1.91                            | 0.075 | 20.24                        | 28          | 9.20                          |            |                                                    |                       |
| 2.54                            | 0.1   | 28.33                        | 45          | 14.89                         | 1          | 13.43                                              | 1                     |
| 3.81                            | 0.15  | 36.42                        | 62          | 20.57                         |            |                                                    |                       |
| 5.08                            | 0.2   | 42.49                        | 74          | 24.82                         | 2          | 25.02                                              | 2                     |
| 7.62                            | 0.3   | 54.64                        | 100         | 33.34                         |            |                                                    |                       |
| 10.16                           | 0.4   | 68.8                         | 130         | 43.24                         |            |                                                    |                       |

Fuente: Propia.

Gráfica 26. Esfuerzo Vs Penetración para el suelo más 5% de CCA.



Fuente: Propia.

El CBR para el suelo natural más 5 % de Cenizas de cáscara de arroz al 100% de compactación a una penetración de 0.1" es de 1, y 0.2" de 2, teniendo una densidad máxima seca de 1,645.2 kg/m<sup>3</sup> a una compactación producida de 99% bastante aceptable y una expansión de 5.55%.

### Ensayos para la adición de 10% de Cenizas de Cáscaras de Arroz. (CCA).

Para cada uno de los ensayos se tomó una muestra de suelo natural, según lo que se requería y se le agregó el 10% de CCA.

- Análisis granulométrico.

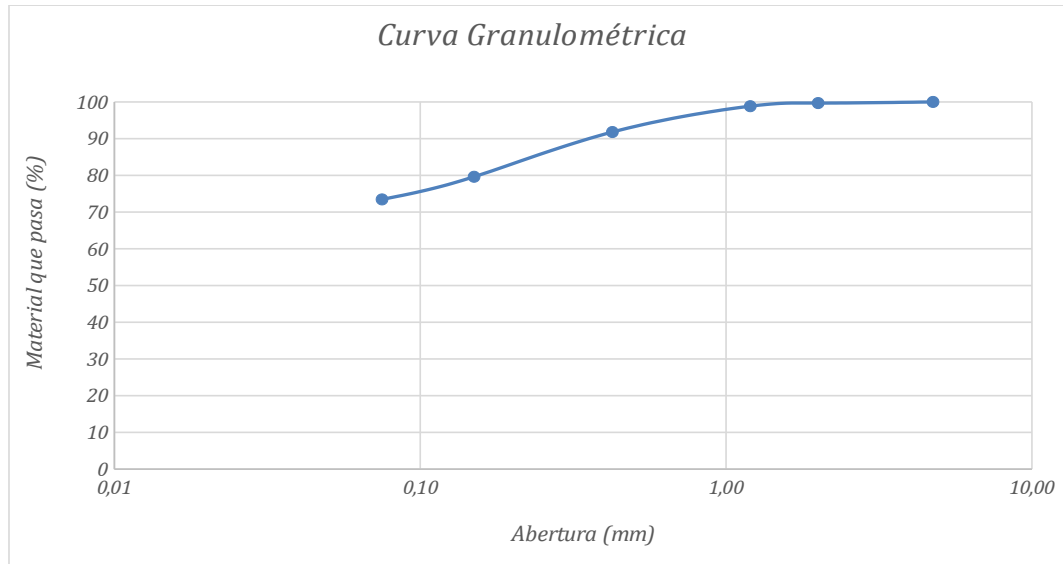
Para este ensaye, se tomó como muestra un peso de 550g y las mallas utilizadas fueron: (N°4, N°10, N16°, N°40, N°100, N°200).

Tabla 44. *Granulometría para el suelo más 10% de CCA.*

| Descripción de las Fracciones | Tamaño del Tamiz |       | Peso Retenido | Peso Retenido corregido | Porcentaje Retenido | Retenido Acumulado | Material Pasante |
|-------------------------------|------------------|-------|---------------|-------------------------|---------------------|--------------------|------------------|
|                               | No.              | mm    | g             |                         | %                   | %                  | %                |
| Grava Fina                    | No. 4            | 4.75  | 0.0           |                         | 0.0                 | 0.0                | <b>100.0</b>     |
| Arena Gruesa                  | No. 10           | 2.0   | 1.7           | 1.7                     | 0.3                 | 0.3                | <b>99.7</b>      |
|                               | No. 16           | 1.2   | 4.7           | 4.7                     | 0.9                 | 1.2                | <b>98.8</b>      |
| Arena Media                   | No. 40           | 0.43  | 38.7          | 38.7                    | 7.0                 | 8.2                | <b>91.8</b>      |
|                               | No. 100          | 0.15  | 67.0          | 67.0                    | 12.2                | 20.4               | <b>79.6</b>      |
| Arena Fina                    | No. 200          | 0.075 | 33.9          | 33.9                    | 6.2                 | 26.5               | <b>73.5</b>      |
| Limos y arcillas              | Pasa No. 200     |       | 404.0         | 404.0                   | 73.5                | 100.0              | <b>0.0</b>       |

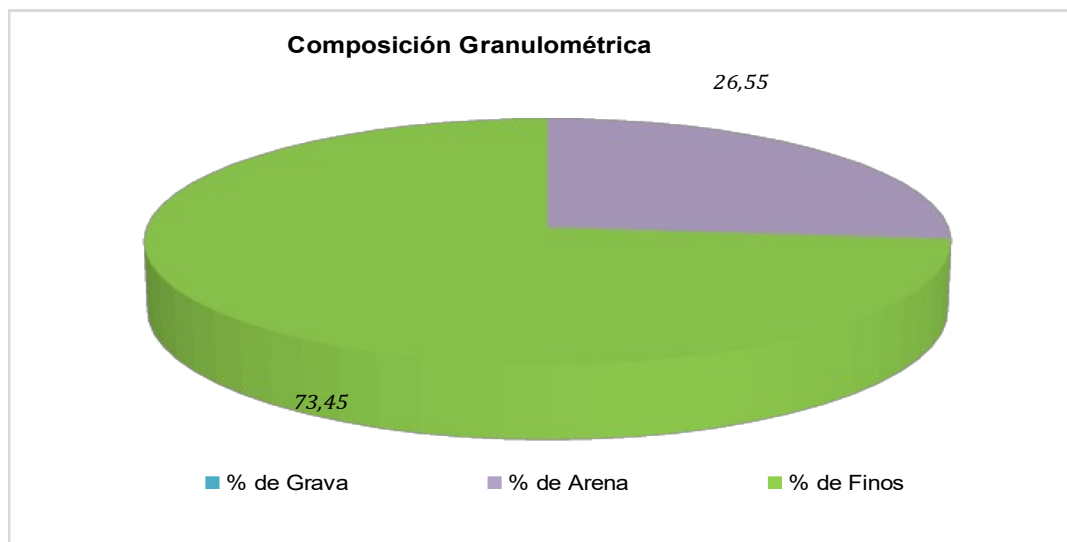
*Fuente: Propia.*

**Gráfica 27. Curva granulométrica del suelo más 10% de CCA.**



*Fuente: Propia*

**Diagrama de Pastel 6. Composición granulométrica del suelo más 10% de CCA.**



*Fuente: Propia.*

En el ensayo se observa en los resultados que en su composición granulométrica en el porcentaje de arenas es de 26.55% y de limos y arcillas es de 73.45%, se observa un buen comportamiento de la curva granulométrica.

- Límites de Atterberg.

Para la realización de los límites, se pesó una muestra de 150g ya tamizada por la N°40 y se le agregó el 10% de CCA tamizado también; Para proceder a encontrar el límite líquido y límite plástico para el suelo.

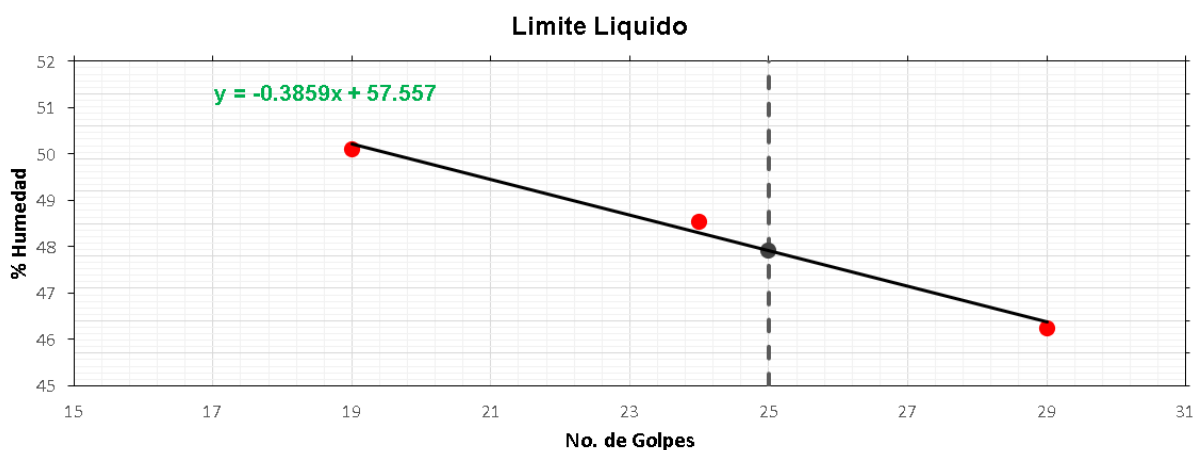
Para el límite líquido se usaron los intervalos de: 15-20 golpes, 20-25 golpes, 25-30 golpes y para el límite plástico, se realizaron cilindros fracturados de 3mm de diámetro aproximadamente.

Tabla 45. *Límite líquido para el suelo más 10% de CCA.*

| Límite Líquido (ASTM D4318-17) |          |                           |                                        |                                      |                                   |                     |                                 |
|--------------------------------|----------|---------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| No.                            | Tar<br>a | Pes<br>o de<br>la<br>tara | Peso de<br>tara +<br>muestra<br>húmeda | Peso de<br>tara +<br>muestra<br>seca | Peso<br>de la<br>muestr<br>a seca | Peso<br>del<br>agua | Contenid<br>o de<br>Humeda<br>d |
| Golpe<br>s                     | No.      | (g)                       | (g)                                    | (g)                                  | (g)                               | (g)                 | ( % )                           |
| 19                             | T-<br>15 | 20.3<br>1                 | 28.01                                  | 25.44                                | 5.13                              | 2.57                | 50.1                            |
| 24                             | T-<br>15 | 20.4<br>9                 | 29.70                                  | 26.69                                | 6.20                              | 3.01                | 48.5                            |
| 29                             | AB-<br>3 | 20.4<br>0                 | 29.73                                  | 26.78                                | 6.38                              | 2.95                | 46.2                            |

Fuente: Propia.

Gráfica 28. *Límite Líquido de suelo más 10% de CCA.*

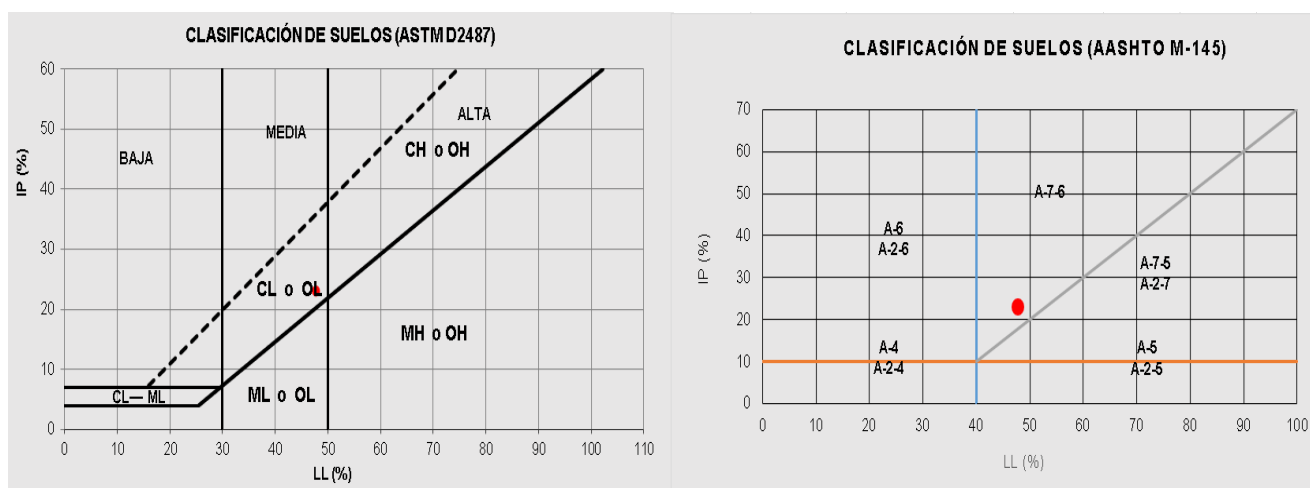


Fuente: Propia.

| Límite Plástico (ASTM D4318-17) |                 |                                |                             |                         |               |                      |
|---------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| Envase                          | Peso de la tara | Peso de tara + muestra humedad | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de humedad |
| No.                             | (g)             | (g)                            | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| K-2                             | 20.22           | 30.04                          | 28.08                       | 7.86                    | 1.96          | 24.9                 |
| K-7                             | 20.95           | 31.79                          | 29.62                       | 8.67                    | 2.17          | 25.0                 |

Tabla 46. Límite plástico para el suelo más 10% de CCA.

Fuente: Propia.



Gráfica 29. Clasificación del suelo natural más el 10% de CCA por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.

Fuente: Propia.

Tabla 47. *Resultados de Límites de Atterberg del suelo más 10% de CCA.*

| Límite Líquido | Límite Plástico | Índice de plasticidad | Índice de Grupo | Clasificación SUCS/ AASHTO |
|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|----------------------------|
| 48             | 25              | 23                    | 17              | CL/ A-7-6                  |

*Fuente: Propia.*

El suelo tiene un límite líquido de 48 y un límite plástico de 25, con un índice de plasticidad de 23 y un índice de grupo de 17; Además se clasifica como un suelo Arcilloso de mediana plasticidad.

- Proctor modificado.

Se realizó Proctor modificado para el suelo en estado natural más 10% de cenizas de cáscara de arroz, los resultados de densidad seca máxima y humedad óptima de cada muestra serán utilizados para la realización de los CBR, todos los ensayos Proctor realizados se hicieron con el método A, todo el material pasa el tamiz No 4.

Para el ensaye se le agregaron al molde 5 capas con 25 golpes por cada capa, la curva graficada de este ensaye es una curva polinómica que toma la mayor cantidad de puntos obtenidos en el ensaye, ya que puede haber errores humanos cometidos, y esta curva nos dio los valores más acertados y una variación constante de los resultados.

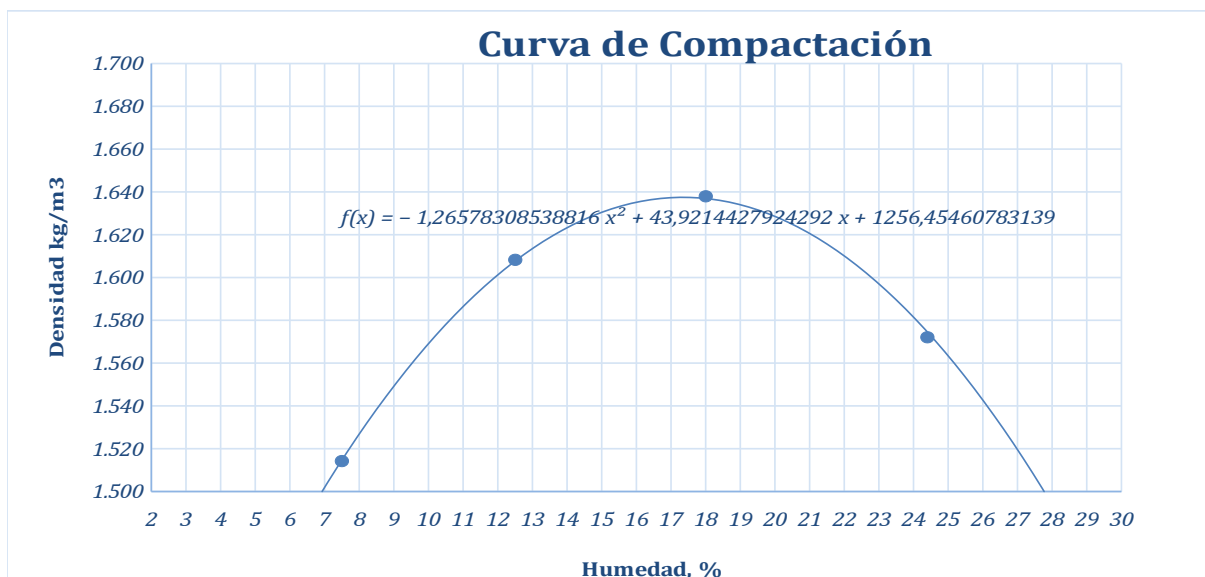
Tabla 48. *Datos obtenidos del proctor para el suelo más 10% CCA.*

| Método utilizado                                                     | A      |        |        |        |        |
|----------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Determinación de Densidad Seca Máxima, (kg/m³) y Humedad Óptima, (%) |        |        |        |        |        |
|                                                                      |        |        |        |        |        |
| Ensayo No.                                                           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| Peso del Molde, (g)                                                  | 4128.7 |        |        |        |        |
| Volumen del Molde, (cm³)                                             | 929    |        |        |        |        |
| Peso del Molde +                                                     | 5640.9 | 5809.6 | 5924.3 | 5945.5 | 5908.9 |

|                                      |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Material Compactado, (g)             |       |       |       |       |       |
| Peso Húmedo (g)                      | 258.0 | 310.4 | 354.6 | 342.1 | 254.1 |
| Peso Seco (g)                        | 240.0 | 275.9 | 300.5 | 275.0 | 198.7 |
| Densidad Húmeda (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.628 | 1.809 | 1.933 | 1.956 | 1.916 |
| Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )   | 1.514 | 1.608 | 1.638 | 1.572 | 1.498 |
| Densidad Seca (kg/m <sup>3</sup> )   | 1,514 | 1,608 | 1,638 | 1,572 | 1,498 |
| Contenido de Humedad, (%)            | 7.5   | 12.5  | 18.0  | 24.4  | 27.9  |

Fuente: Propia.

Gráfica 30. Curva de Compactación para el 10% de Cenizas de Cáscara de Arroz.



|                                                 |              |
|-------------------------------------------------|--------------|
| <b>Densidad Seca Máxima, (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>1,637</b> |
| <b>Humedad Óptima, (%)</b>                      | <b>17.5</b>  |

Fuente: Propia.

Se obtuvo una densidad Seca Máxima seca de 1,637 kg/m<sup>3</sup> con una humedad óptima de 17.5% para el suelo más 10% de CCA.

- Valor relativo de soporte CBR.

Para la preparación del ensayo, se trabajó con 3 kg de suelo en estado natural y a eso se le agregó el 10% de CCA.

Tabla 49. *Datos del ensayo CBR para el suelo más 10% de CCA.*

| Ensayo de Relación Soporte C.B.R.           |          | Ensayos de Expansión de los suelos |                         |                          |
|---------------------------------------------|----------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Peso del molde (g)                          | 6,565.8  | Hora y Fecha                       | Tiempo transcurrido (h) | Lectura del Deformímetro |
| Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )        | 2,105.0  | 19-10-23<br>11:39 a.m.             | 0                       | 1.25                     |
| Numero de golpes por capa                   | 56.0     | 23-10-23<br>11:30 a.m.             | 96                      | 8.51                     |
| No. de Capas                                | 5.0      | Altura del molde (mm)              |                         | 116.43                   |
| Peso del molde +material (g)                | 10,607.2 | Expansión (%)                      |                         | 6.24                     |
| Peso del material húmedo                    | 144.3    |                                    |                         |                          |
| Peso del material seco (g)                  | 122.3    |                                    |                         |                          |
| peso del agua                               | 18.0     |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima húmeda (kg/m <sup>3</sup> ) | 1,919.9  |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima Seca (kg/m <sup>3</sup> )   | 1,627.2  |                                    |                         |                          |
| Compactación Reproducida (%)                | 99       |                                    |                         |                          |

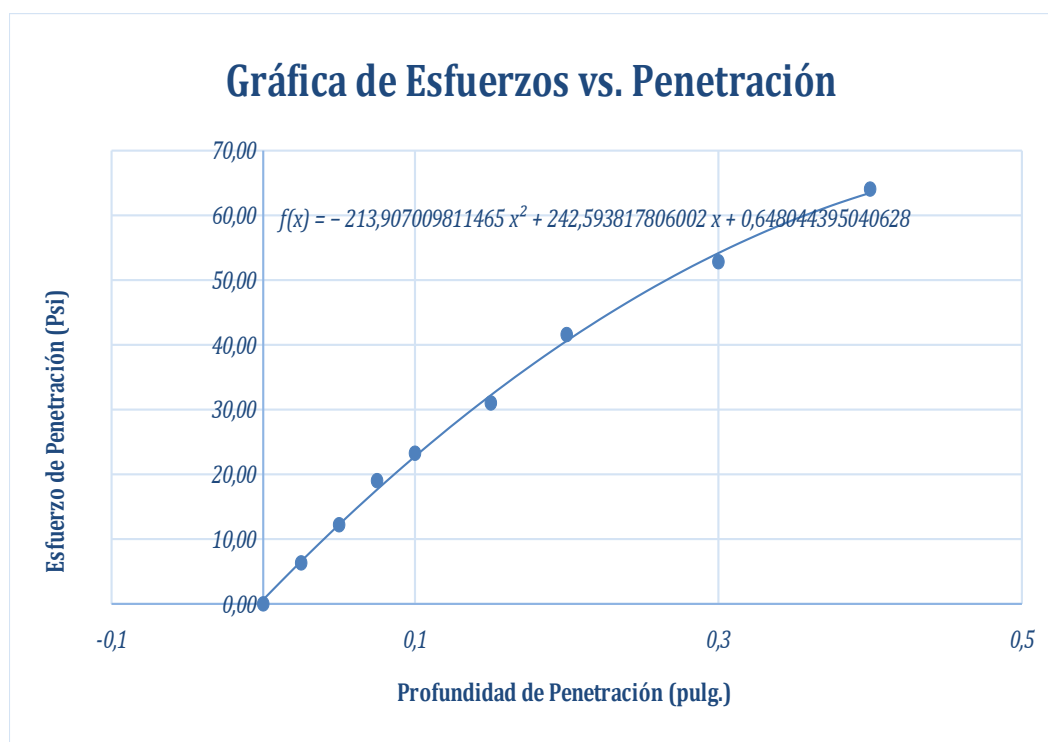
Fuente: Propia.

Tabla 50. *Resultados del ensayo de penetración del suelo más 10% CCA.*

| Ensayo de Penetración de Cargas |      |                              |             |                         |            |                         |              |
|---------------------------------|------|------------------------------|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|--------------|
| Penetración                     |      | Resistencia a la penetración |             |                         |            |                         |              |
| mm                              | pulg | Lectura Deformímetro         | Carga (Lbs) | Esfuerzo de Penetración | C.B.R. (%) | Esfuerzo de Penetración | C.B.R. de la |

|       |       |       |     | (Psi) |   | dado por la ecuación (Psi) | ecuación |
|-------|-------|-------|-----|-------|---|----------------------------|----------|
| 0     | 0     | 0     | 0   | 0.00  |   |                            |          |
| 0.635 | 0.025 | 16.15 | 19  | 6.33  |   |                            |          |
| 1.27  | 0.05  | 24.53 | 37  | 12.22 |   |                            |          |
| 1.91  | 0.075 | 34.23 | 57  | 19.03 |   |                            |          |
| 2.54  | 0.1   | 40.27 | 70  | 23.27 | 2 | 23.09                      | 2        |
| 3.81  | 0.15  | 51.34 | 93  | 31.02 |   |                            |          |
| 5.08  | 0.2   | 66.44 | 125 | 41.59 | 3 | 40.73                      | 3        |
| 7.62  | 0.3   | 82.55 | 159 | 52.84 |   |                            |          |
| 10.16 | 0.4   | 98.66 | 192 | 64.06 |   |                            |          |

Gráfica 31. Esfuerzo Vs Penetración para el suelo más 10% de CCA.



Fuente: Propia.

El CBR para el suelo natural más 10 % de Cenizas de cáscara de arroz al 100% de compactación a una penetración de 0.1" es de 2, y 0.2" de 3, teniendo una densidad máxima seca de 1,627.2 kg/m<sup>3</sup> a una compactación producida de 99% bastante

aceptable, este ensayo cumplió las 96 horas establecidas en la normativa con una expansión de 6.24%.

### Ensayos para la adición de 15% de Cenizas de Cáscaras de Arroz. (CCA).

Para cada uno de los ensayos se tomó una muestra de suelo natural, según lo que se requería y se le agregó el 15% de CCA.

- Análisis granulométrico.

Para este ensaye, se tomó como muestra un peso de 575g y las mallas utilizadas fueron: (N°4, N°10, N16°, N°40, N°100, N°200).

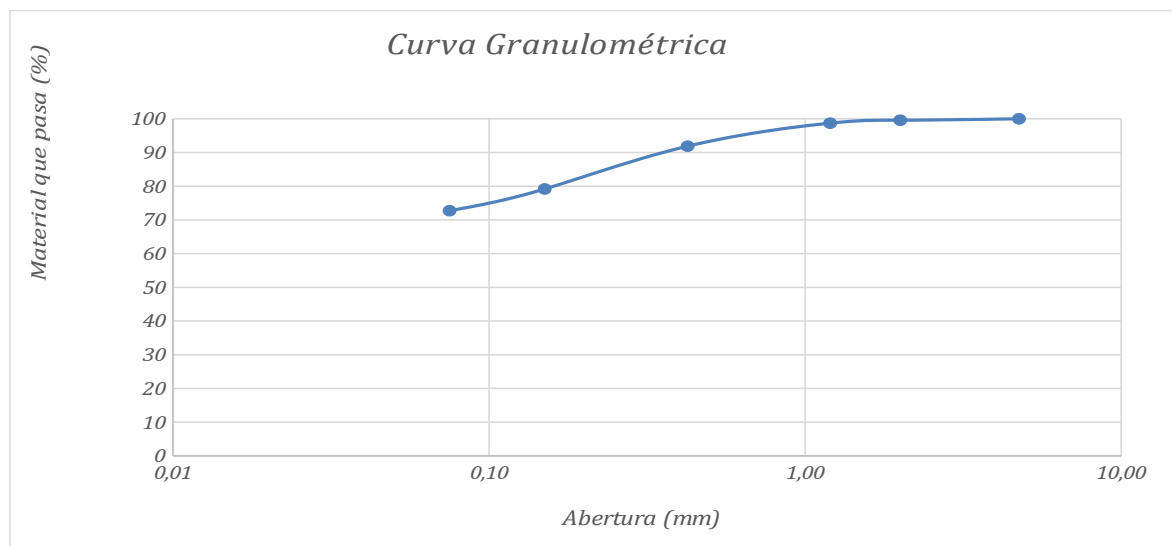
Tabla 51. *Granulometría para el suelo más 15% de CCA.*

| Descripción de las Fracciones | Tamaño del Tamiz |      | Peso Retenido | Peso Retenido corregido | Porcentaje Retenido | Retenido Acumulado | Material Pasante |
|-------------------------------|------------------|------|---------------|-------------------------|---------------------|--------------------|------------------|
|                               | No.              | mm   | g             |                         | %                   | %                  | %                |
| Grava Fina                    | No. 4            | 4.75 | 0.0           |                         | 0.0                 | 0.0                | <b>100.0</b>     |
| Arena Gruesa                  | No. 10           | 2.0  | 2.4           | 2.4                     | 0.4                 | 0.4                | <b>99.6</b>      |

|                  |              |       |       |       |      |       |             |
|------------------|--------------|-------|-------|-------|------|-------|-------------|
|                  | No. 16       | 1.2   | 5.0   | 5.0   | 0.9  | 1.3   | <b>98.7</b> |
| Arena Media      | No. 40       | 0.43  | 39.3  | 39.3  | 6.8  | 8.1   | <b>91.9</b> |
|                  | No. 100      | 0.15  | 73.0  | 73.0  | 12.7 | 20.8  | <b>79.2</b> |
| Arena Fina       | No. 200      | 0.075 | 37.1  | 37.1  | 6.5  | 27.3  | <b>72.7</b> |
| Limos y arcillas | Pasa No. 200 |       | 418.2 | 418.2 | 72.7 | 100.0 | <b>0.0</b>  |

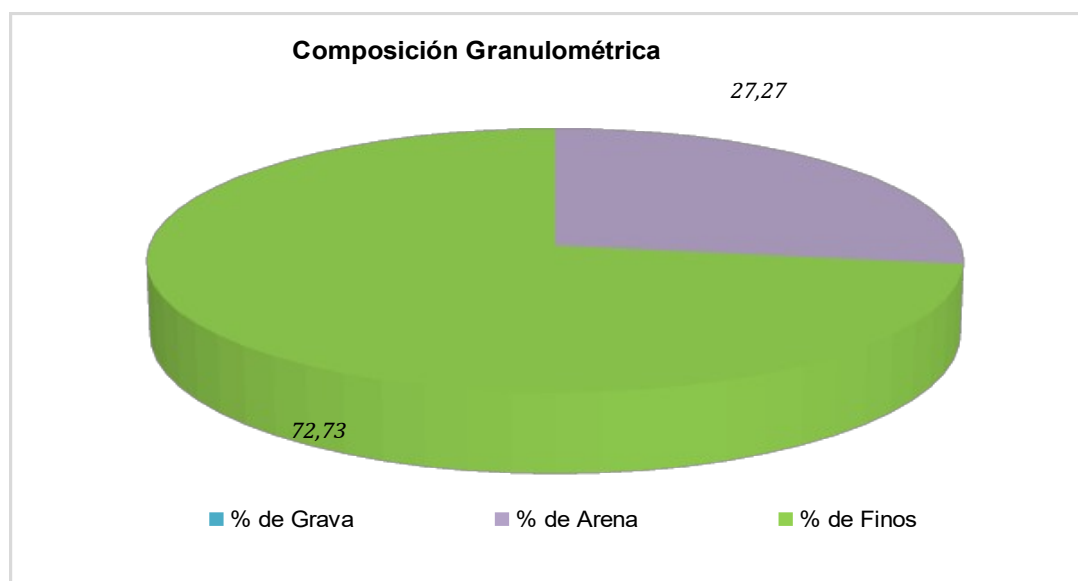
*Fuente: Propia.*

*Gráfica 32. Curva Granulométrica del suelo más 15% de CCA.*



*Fuente: Propia*

Diagrama de Pastel 7. Composición Granulométrica del suelo más 15% de CCA.



Fuente: Propia.

En el ensayo se observa en los resultados que en su composición granulométrica en el porcentaje de arenas es de 27.27% y de limos y arcillas es de 72.73%, se observa un comportamiento uniforme de la curva.

- Límites de Atterberg.

Para la realización de los límites, se pesó una muestra de 150g ya tamizada por la N°40 y se le agregó el 15% de CCA tamizado también; Para proceder a encontrar el límite líquido y límite plástico para el suelo.

Para el límite líquido se usaron los intervalos de: 15-20 golpes, 20-25 golpes, 25-30 golpes y para el límite plástico, se realizaron cilindros fracturados de 3mm de diámetro aproximadamente.

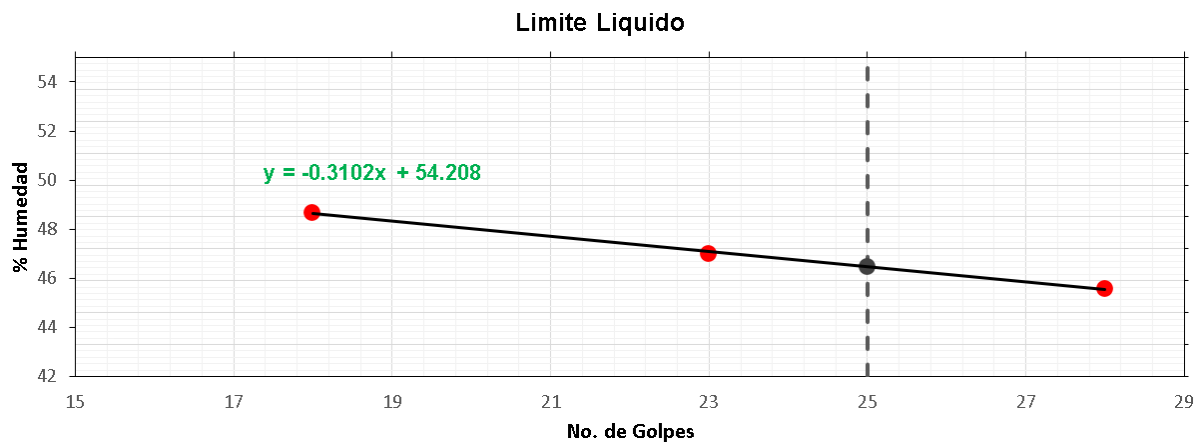
Tabla 52. Límite líquido para el suelo más 15% de CCA.

| Límite Líquido (ASTM D4318-17) |      |                 |                               |                             |                         |               |                      |
|--------------------------------|------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| No.                            | Tara | Peso de la tara | Peso de tara + muestra húmeda | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de Humedad |

| Golpes | No.  | (g)   | (g)   | (g)   | (g)  | (g)  | ( % ) |
|--------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| 18     | D-3  | 20.43 | 30.48 | 27.19 | 6.76 | 3.29 | 48.7  |
| 23     | A-86 | 20.61 | 33.28 | 29.23 | 8.62 | 4.05 | 47.0  |
| 28     | P-1  | 21.19 | 33.01 | 29.31 | 8.12 | 3.70 | 45.6  |

Fuente: Propia.

Gráfica 33. Gráfica del Límite Líquido del suelo más 15% de CCA.



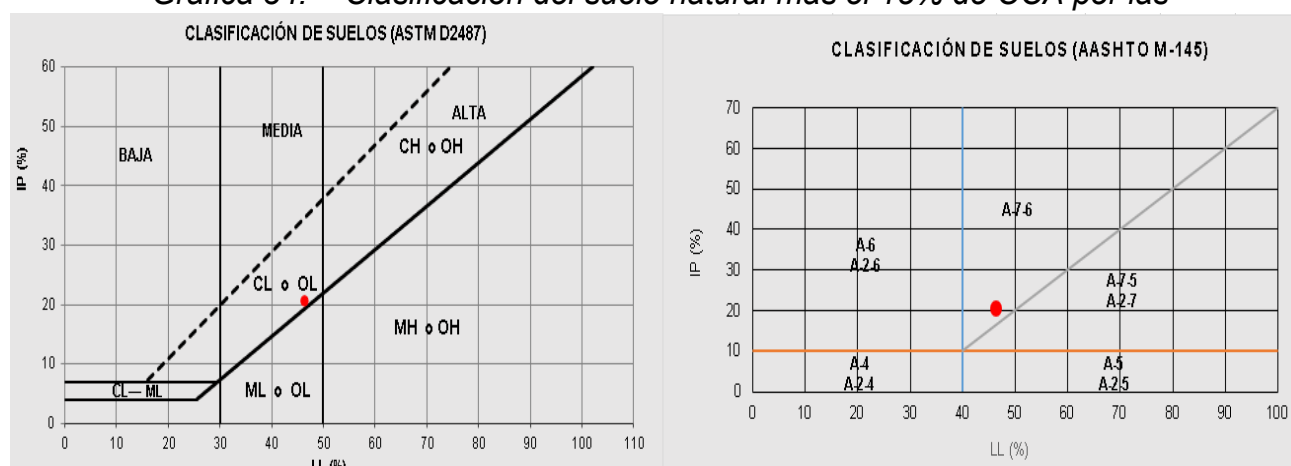
Fuente: Propia.

Tabla 53. Límite plástico del suelo más 15% de CCA.

| Límite Plástico (ASTM D4318-17) |                 |                               |                             |                         |               |                      |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| Envase                          | Peso de la tara | Peso de tara + muestra húmeda | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de humedad |
| No.                             | (g)             | (g)                           | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| T-13                            | 20.89           | 28.30                         | 26.75                       | 5.86                    | 1.55          | 26.5                 |
| T-27                            | 20.33           | 27.65                         | 26.12                       | 5.79                    | 1.53          | 26.4                 |

Fuente: Propia.

Gráfica 34. Clasificación del suelo natural más el 15% de CCA por las



normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.

Fuente: Propia.

Tabla 54. Resultados de Límites de Atterberg del suelo más 15% de CCA.

| Límite Líquido | Límite Plástico | Índice de Plasticidad | Índice de Grupo | Clasificación SUCS/ AASHTO |
|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|----------------------------|
| 46             | 26              | 20                    | 15              | CL/ A-7-6                  |

Fuente: Propia.

El suelo tiene un límite líquido de 46 y un límite plástico de 26, con un índice de plasticidad de 20 y un índice de grupo de 15; Además se clasifica como un suelo Arcilloso de mediana plasticidad.

- Proctor modificado.

Se realizó Proctor modificado para el suelo en estado natural más 15% de cenizas de cáscara de arroz, los resultados de densidad seca máxima y humedad óptima de cada muestra serán utilizados para la realización de los CBR, todos los ensayos Proctor realizados se hicieron con el método A, todo el material pasa el tamiz No 4.

Para el ensaye se le agregaron al molde 5 capas con 25 golpes por cada capa, la curva graficada de este ensaye es una curva polinómica que toma la mayor cantidad de puntos obtenidos en el ensaye, ya que puede haber errores humanos cometidos, y esta curva nos dio los valores más acertados y una variación constante de los resultados.

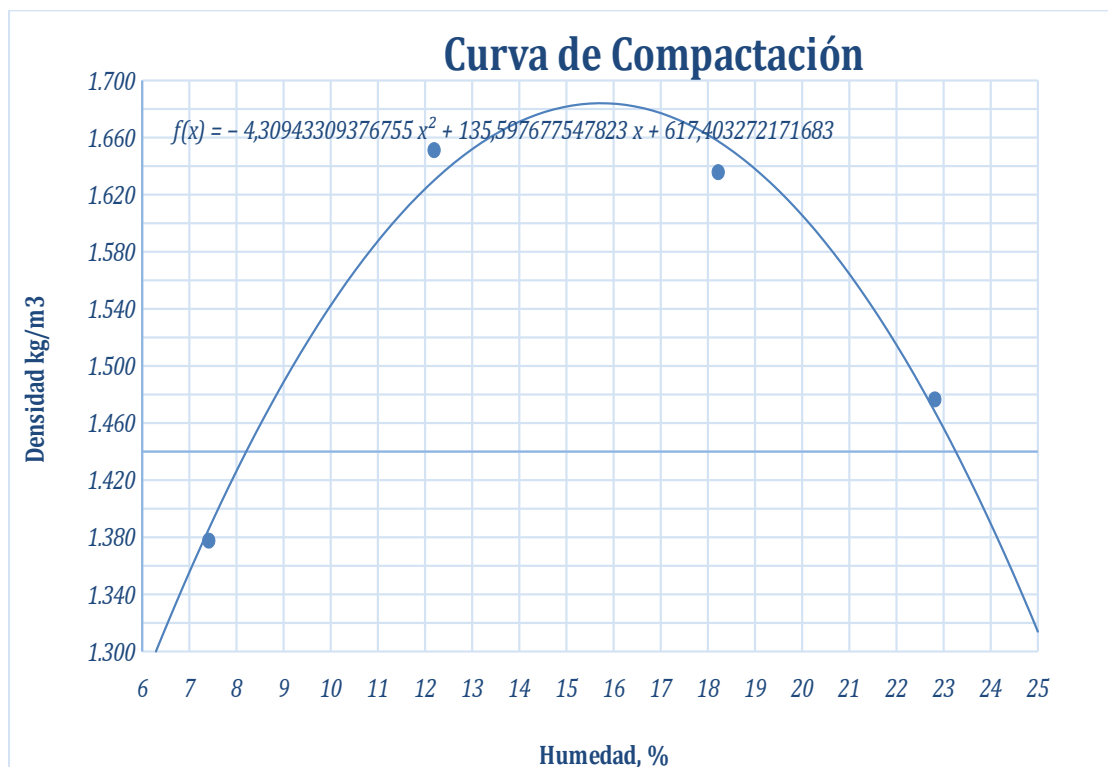
Tabla 55. *Datos obtenidos del proctor para el suelo más 15% de CCA.*

| Método Utilizado                                                     | A      |        |        |        |   |
|----------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---|
| Determinación de Densidad Seca Máxima, (kg/m³) y Humedad Óptima, (%) |        |        |        |        |   |
|                                                                      |        |        |        |        |   |
| Ensayo No.                                                           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5 |
| Peso del Molde, (g)                                                  | 4141.0 |        |        |        |   |
| Volumen del Molde, (cm³)                                             | 929    |        |        |        |   |
| Peso del Molde + Material Compactado, (g)                            | 5515.7 | 5862.0 | 5937.5 | 5825.7 |   |
| Peso Húmedo (g)                                                      | 210.1  | 373.6  | 290.7  | 412.9  |   |
| Peso Seco (g)                                                        | 195.6  | 333.0  | 245.9  | 336.2  |   |
| Densidad Húmeda (g/cm³)                                              | 1.480  | 1.853  | 1.934  | 1.813  |   |
| Densidad Seca (g/cm³)                                                | 1.378  | 1.651  | 1.636  | 1.477  |   |
| Densidad Seca (kg/m³)                                                | 1,378  | 1,651  | 1,636  | 1,477  |   |

|                           |     |      |      |      |  |
|---------------------------|-----|------|------|------|--|
| Contenido de Humedad, (%) | 7.4 | 12.2 | 18.2 | 22.8 |  |
|---------------------------|-----|------|------|------|--|

Fuente: Propia

Gráfica 35. Curva de Compactación del suelo más 15% de CCA.



|                                          |              |
|------------------------------------------|--------------|
| <b>Densidad Seca Máxima,<br/>(kg/m3)</b> | <b>1,684</b> |
| <b>Humedad Óptima, (%)</b>               | <b>15.8</b>  |

Se obtuvo una densidad Seca Máxima seca de 1,684 kg/m3 con una humedad óptima de 15.8% para el suelo más el 10% de Ceniza de Cáscara de Arroz.

- Valor relativo de soporte CBR.

Para la preparación del ensayo, se trabajó con 3 kg de suelo en estado natural y a eso se le agregó el 15% de CCA.

Tabla 56. *Datos del ensayo CBR para el suelo más 15% de CCA.*

| Ensayo de Relación Soporte C.B.R.           |          | Ensayos de Expansión de los suelos |                         |                          |
|---------------------------------------------|----------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Peso del molde (g)                          | 7,118.0  | Hora y Fecha                       | Tiempo transcurrido (h) | Lectura del Deformímetro |
| Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )        | 2,105.0  | 19-10-23<br>11:39 a.m.             | 0                       | 7.58                     |
| Numero de golpes por capa                   | 56.0     | 23-10-23<br>11:30 a.m.             | 96                      | 13.28                    |
| No. de Capas                                | 5.0      | Altura del molde (mm)              |                         | 116.43                   |
| Peso del molde +material (g)                | 11,229.0 | Expansión (%)                      |                         | 4.90                     |
| Peso del material húmedo                    | 136.6    |                                    |                         |                          |
| Peso del material seco (g)                  | 115.6    |                                    |                         |                          |
| peso del agua                               | 18.2     |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima húmeda (kg/m <sup>3</sup> ) | 1,953.0  |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima seca (kg/m <sup>3</sup> )   | 1,652.7  |                                    |                         |                          |
| Compactación reproducida (%)                | 98       |                                    |                         |                          |

Fuente: Propia.

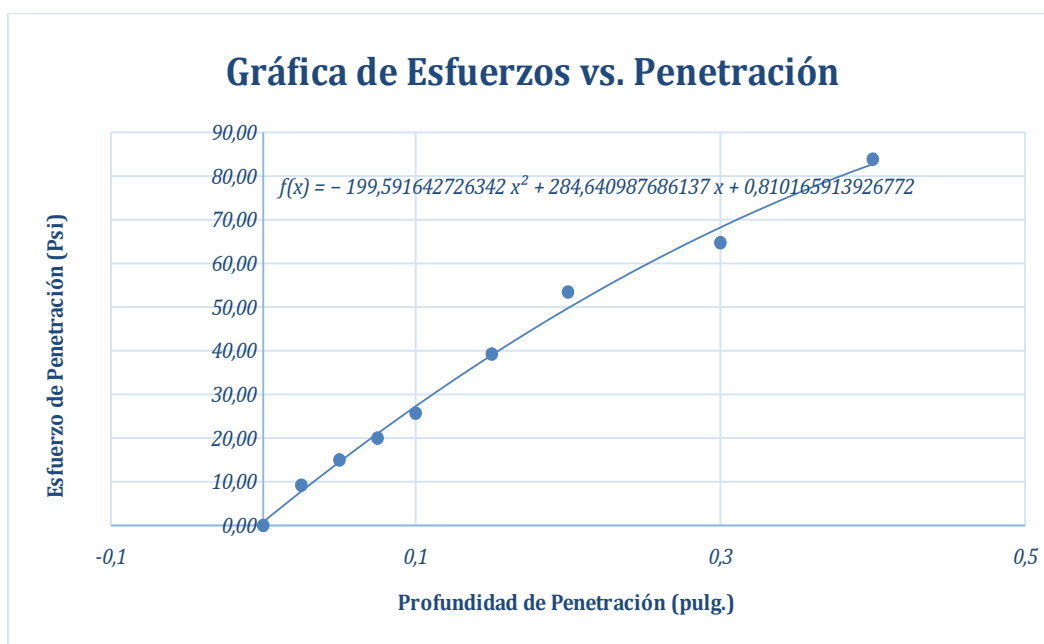
Tabla 57. *Resultados del ensayo de penetración del suelo más 15% de CCA.*

| Ensayo de Penetración de Cargas |       |                              |             |                               |            |                                                    |                       |
|---------------------------------|-------|------------------------------|-------------|-------------------------------|------------|----------------------------------------------------|-----------------------|
| Penetración                     |       | Resistencia a la penetración |             |                               |            |                                                    |                       |
| mm                              | pulg  | Lectura Deformímetro         | Carga (Lbs) | Esfuerzo de Penetración (Psi) | C.B.R. (%) | Esfuerzo de Penetración dado por la ecuación (Psi) | C.B.R. de la ecuación |
| 0                               | 0     | 0                            | 0           | 0.00                          |            |                                                    |                       |
| 0.635                           | 0.025 | 20.25                        | 28          | 9.21                          |            |                                                    |                       |
| 1.27                            | 0.05  | 28.49                        | 45          | 15.00                         |            |                                                    |                       |
| 1.91                            | 0.075 | 35.61                        | 60          | 20.00                         |            |                                                    |                       |
| 2.54                            | 0.1   | 43.75                        | 77          | 25.71                         | 3          | 27                                                 | 3                     |
| 3.81                            | 0.15  | 63.08                        | 118         | 39.24                         |            |                                                    |                       |

|       |     |        |     |       |   |    |   |
|-------|-----|--------|-----|-------|---|----|---|
| 5.08  | 0.2 | 83.43  | 160 | 53.45 | 4 | 50 | 3 |
| 7.62  | 0.3 | 99.64  | 194 | 64.74 |   |    |   |
| 10.16 | 0.4 | 127.18 | 252 | 83.87 |   |    |   |

Fuente: Propia

Gráfica 36. Esfuerzo Vs Penetración para el suelo más 15% de CCA.



El CBR para el suelo natural más 15 % de CCA al 100% de compactación a una penetración de 0.1" es de 3, y 0.2" de 3, teniendo una densidad máxima seca de 1,652.7 kg/m<sup>3</sup> a una compactación producida de 98% bastante aceptable y una expansión de 5.55%.

### Ensayos para la adición de 5% de Polvo de Cáscara de Huevo y Cenizas de Cáscara de Arroz (Mixto).

Para cada uno de los ensayos se tomó una muestra de suelo natural, según lo que se requería y se le agregó el 5% Mixto.

Se debe mencionar, que se agregó el 50% de cáscara de huevo pulverizado y 50% de cenizas de cáscara de arroz al 5% aplicado al suelo, es decir, 2.5% de CH y 2.5% de CCA.

- Análisis granulométrico.

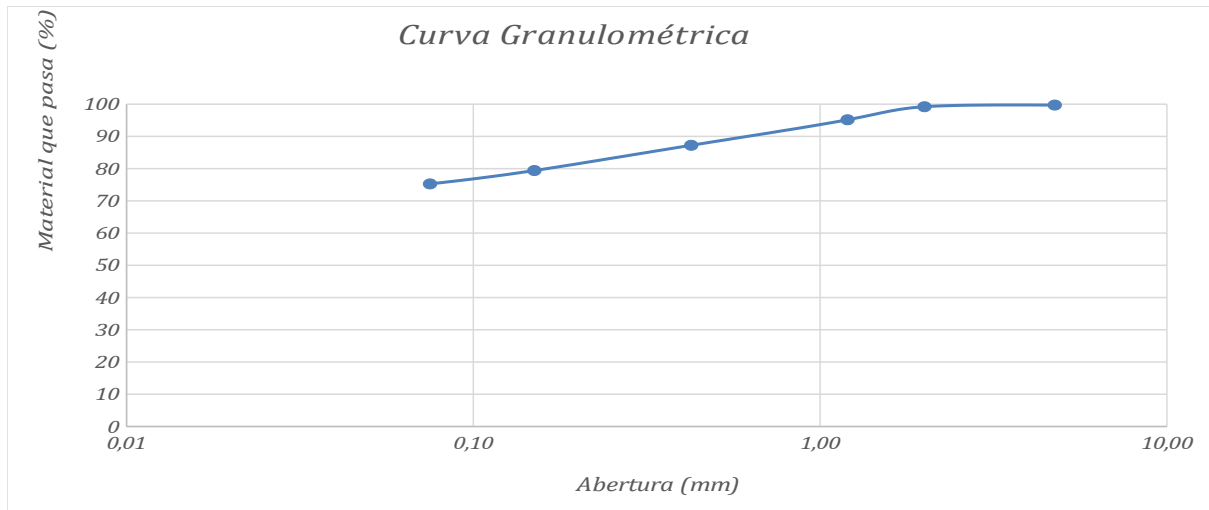
Para este ensaye, se tomó como muestra un peso de 526.6g y las mallas utilizadas fueron: (N°4, N°10, N16°, N°40, N°100, N°200).

Tabla 58. *Granulometría del suelo más 5% mixto.*

| Descripción de las Fracciones | Tamaño del Tamiz |       | Peso Retenido | Peso Retenido corregido | Porcentaje Retenido | Retenido Acumulado | Material Pasante |
|-------------------------------|------------------|-------|---------------|-------------------------|---------------------|--------------------|------------------|
|                               | No.              | mm    | g             |                         | %                   | %                  | %                |
| Grava Fina                    | No. 4            | 4.75  | 1.5           |                         | 0.3                 | 0.3                | <b>99.7</b>      |
| Arena Gruesa                  | No. 10           | 2.0   | 2.7           | 2.7                     | 0.5                 | 0.8                | <b>99.2</b>      |
|                               | No. 16           | 1.2   | 21.3          | 21.3                    | 4.0                 | 4.8                | <b>95.2</b>      |
| Arena Media                   | No. 40           | 0.43  | 41.7          | 41.7                    | 7.9                 | 12.8               | <b>87.2</b>      |
|                               | No. 100          | 0.15  | 41.3          | 41.3                    | 7.8                 | 20.6               | <b>79.4</b>      |
| Arena Fina                    | No. 200          | 0.075 | 21.9          | 21.9                    | 4.1                 | 24.7               | <b>75.3</b>      |
| Limos y arcillas              | Pasa No. 200     |       | 396.3         | 396.3                   | 75.3                | 100.0              | <b>0.0</b>       |

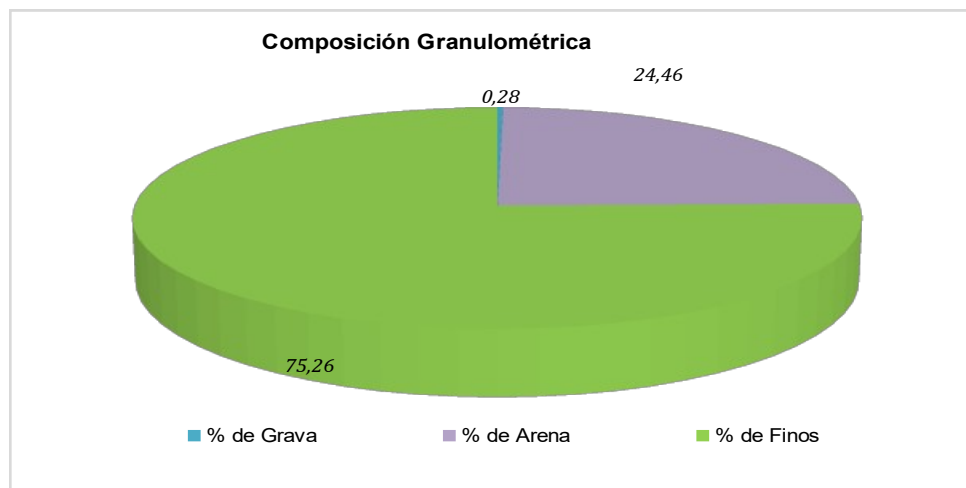
*Fuente: Propia.*

**Gráfica 37. Curva Granulométrica del suelo más 5% Mixto.**



*Fuente: Propia.*

**Diagrama de Pastel 8. Composición Granulométrica del suelo más 5% mixto.**



*Fuente: Propia.*

En el ensayo se observa en los resultados que en su composición granulométrica en el porcentaje de gravas es de 0.28%, arenas 24.46% y de limos y arcillas es de 75.26%, se observa un comportamiento uniforme de la curva.

- Límites de Atterberg.

Para la realización de los límites, se pesó una muestra de 150g ya tamizada por la N°40 y se le agregó el 5% mixto tamizado también; Para proceder a encontrar el límite líquido y límite plástico para el suelo.

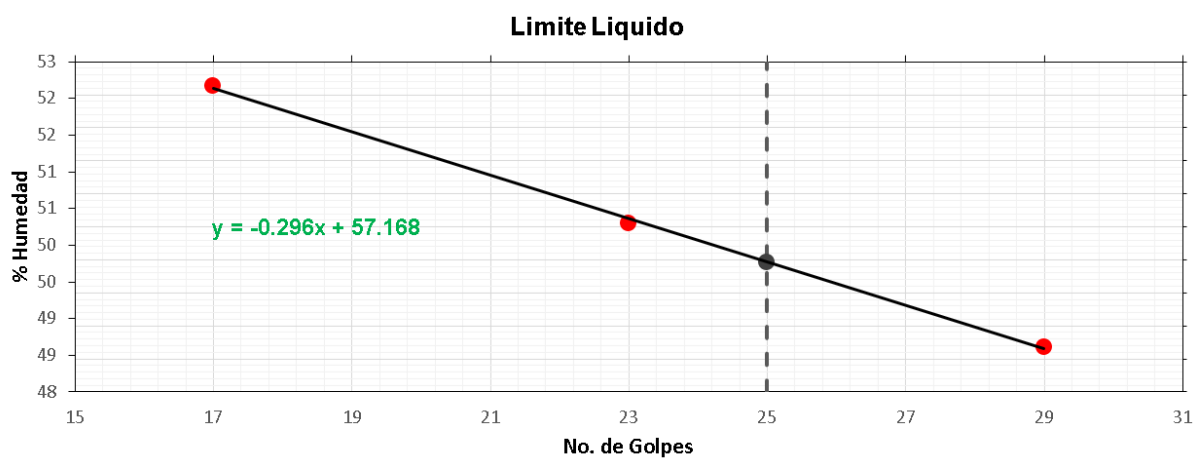
Para el límite líquido se usaron los intervalos de: 15-20 golpes, 20-25 golpes, 25-30 golpes y para el límite plástico, se realizaron cilindros fracturados de 3mm de diámetro aproximadamente.

Tabla 59. *Límite líquido para el suelo más 5% mixto.*

| <b>Límite Líquido (ASTM D4318-17)</b> |          |                       |                                        |                                      |                                  |                     |                                 |
|---------------------------------------|----------|-----------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| No.                                   | Tar<br>a | Peso<br>de la<br>tara | Peso de<br>tara +<br>muestra<br>húmeda | Peso de<br>tara +<br>muestra<br>seca | Peso de<br>la<br>muestra<br>seca | Peso<br>del<br>agua | Contenid<br>o de<br>Humeda<br>d |
| Golpe<br>s                            | No.      | (g)                   | (g)                                    | (g)                                  | (g)                              | (g)                 | ( % )                           |
| 29                                    | D-<br>30 | 21.3<br>9             | 36.40                                  | 31.49                                | 10.10                            | 4.91                | 48.6                            |
| 23                                    | T-<br>01 | 21.5<br>2             | 36.52                                  | 31.50                                | 9.98                             | 5.02                | 50.3                            |
| 17                                    | P-9      | 20.6<br>6             | 37.17                                  | 31.51                                | 10.85                            | 5.66                | 52.2                            |

Fuente: Propia.

Gráfica 38. Límite Líquido del suelo más 5% mixto.



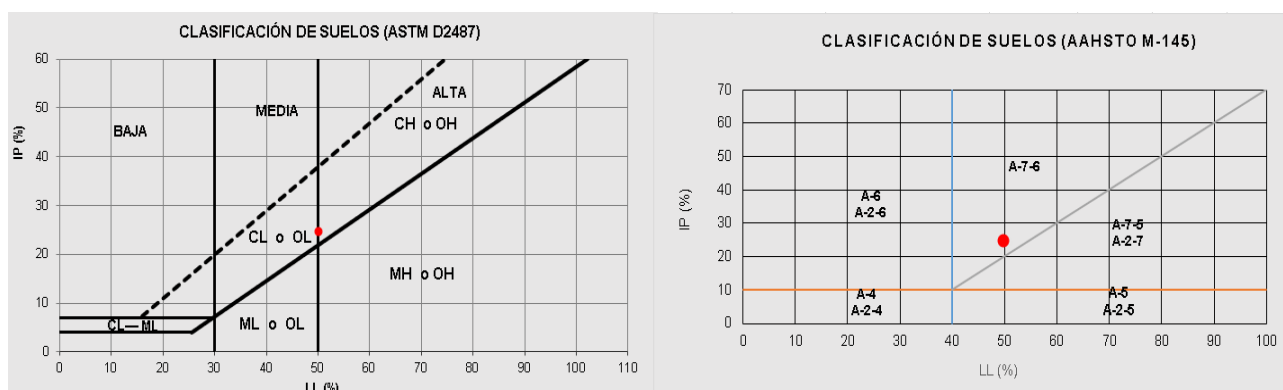
Fuente: Propia.

Tabla 60. Límite plástico para el suelo más 5% mixto.

| Límite Plástico (ASTM D4318-17) |                 |                               |                             |                         |               |                      |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| Envase                          | Peso de la tara | Peso de tara + muestra húmeda | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de humedad |
| No.                             | (g)             | (g)                           | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| T-21                            | 20.34           | 32.07                         | 29.71                       | 9.37                    | 2.36          | 25.2                 |
| P-01                            | 20.72           | 32.21                         | 29.89                       | 9.17                    | 2.32          | 25.3                 |

Fuente: Propia.

**Gráfica 39. Clasificación del suelo natural más el 5% de CH y CCA por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.**



*Fuente: Propia.*

| Límite Líquido | Límite Plástico | Índice de Plasticidad | Índice de Grupo | Clasificación SUCS/ AASHTO |
|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|----------------------------|
| 50             | 25              | 25                    | 19              | CL/ A-7-6                  |

**Tabla 61. Resultados de los límites de Atterberg del suelo más 5% mixto.**

*Fuente: Propia.*

El suelo tiene un límite líquido de 50 y un límite plástico de 25, con un índice de plasticidad de 25 y un índice de grupo de 19; Además se clasifica como un suelo Arcilloso de mediana plasticidad.

- Proctor modificado.

Se realizó Proctor modificado para el suelo en estado natural más 5% de cáscara de huevo pulverizado y cenizas de cáscara de arroz, los resultados de densidad seca máxima y humedad óptima de cada muestra serán utilizados para la realización de los CBR, todos los ensayos Proctor realizados se hicieron con el método A, todo el material pasa el tamiz No 4.

Para el ensaye se le agregaron al molde 5 capas con 25 golpes por cada capa, la curva graficada de este ensaye es una curva polinómica que toma la mayor cantidad de puntos obtenidos en el ensaye, ya que puede haber errores humanos cometidos,

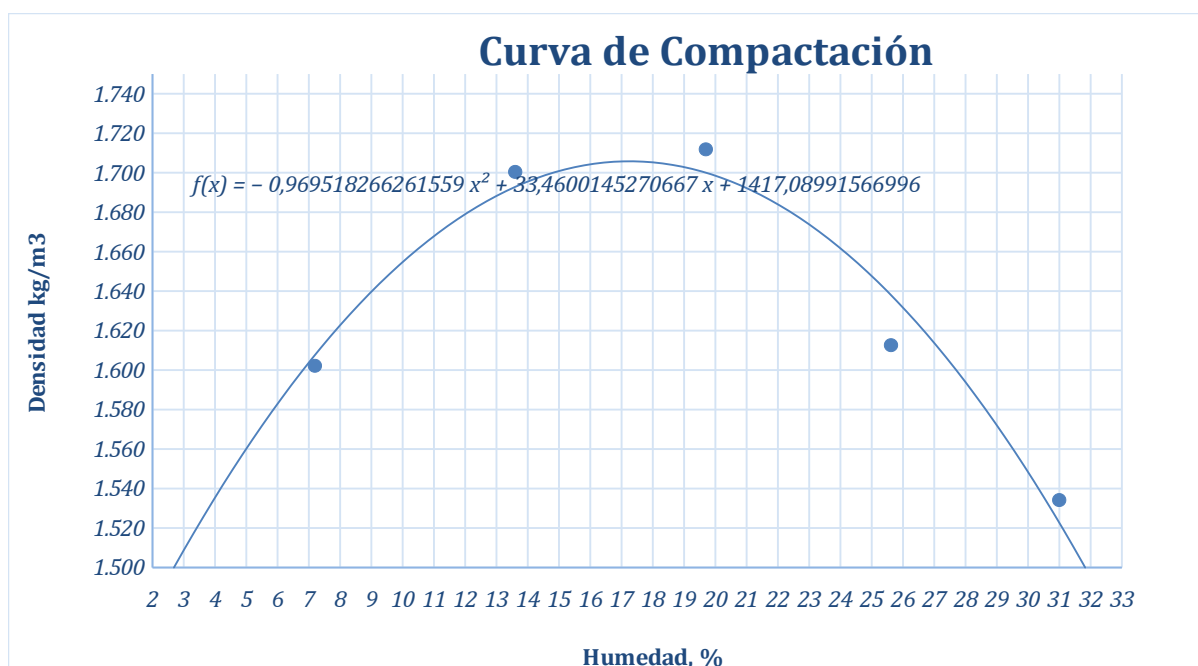
y esta curva nos dio los valores más acertados y una variación constante de los resultados.

Tabla 62. *Datos del proctor para el suelo más 5% mixto.*

| Método Utilizado                                                     | A      |        |        |        |        |
|----------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Determinación de Densidad Seca Máxima, (kg/m³) y Humedad Óptima, (%) |        |        |        |        |        |
|                                                                      |        |        |        |        |        |
| Ensayo No.                                                           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| Peso del Molde, (g)                                                  | 4133.0 |        |        |        |        |
| Volumen del Molde, (cm³)                                             | 929    |        |        |        |        |
| Peso del Molde + Material Compactado, (g)                            | 5728.5 | 5927.5 | 6036.5 | 6014.9 | 6000.0 |
| Peso Húmedo (g)                                                      | 348.7  | 439.4  | 446.7  | 352.1  | 334.3  |
| Peso Seco (g)                                                        | 325.3  | 386.8  | 373.2  | 280.3  | 255.2  |
| Densidad Húmeda (g/cm³)                                              | 1.717  | 1.932  | 2.049  | 2.026  | 2.010  |
| Densidad Seca (g/cm³)                                                | 1.602  | 1.700  | 1.712  | 1.613  | 1.534  |
| Densidad Seca (kg/m³)                                                | 1,602  | 1,700  | 1,712  | 1,613  | 1,534  |
| Contenido de Humedad, (%)                                            | 7.2    | 13.6   | 19.7   | 25.6   | 31.0   |

*Fuente: Propia.*

Gráfica 40. Curva de compactación del suelo más 5% mixto.



|                                          |              |
|------------------------------------------|--------------|
| <b>Densidad Seca Máxima,<br/>(kg/m3)</b> | <b>1,706</b> |
| <b>Humedad Óptima, (%)</b>               | <b>17.3</b>  |

Fuente: Propia.

Se obtuvo una densidad Seca Máxima seca de 1,706 kg/m³ con una humedad óptima de 17.3% para el suelo aplicado el 5% de polvo de cáscara de huevo y cenizas de cáscara de arroz.

- Valor relativo de soporte CBR.

Para la preparación del ensayo, se trabajó con 3 kg de suelo en estado natural y a eso se le agregó el 5% de estabilizante mixto.

Tabla 63. *Datos del ensayo CBR del suelo más 5% mixto.*

| Ensayo de Relación Soporte C.B.R.           |          | Ensayos de Expansión de los suelos |                         |                          |
|---------------------------------------------|----------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Peso del molde (g)                          | 6,670.0  | Hora y Fecha                       | Tiempo transcurrido (h) | Lectura del Deformímetro |
| Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )        | 2,105.0  | 19-10-23<br>11:39 a.m.             | 0                       | 10.92                    |
| Numero de golpes por capa                   | 56.0     | 23-10-23<br>11:30 a.m.             | 96                      | 17.65                    |
| No. de Capas                                | 5.0      | Altura del molde (mm)              |                         | 116.43                   |
| Peso del molde +material (g)                | 10,908.0 | Expansión (%)                      |                         | 5.78                     |
| Peso del material húmedo                    | 211.6    |                                    |                         |                          |
| Peso del material seco (g)                  | 177.2    |                                    |                         |                          |
| peso del agua                               | 19.4     |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima húmeda (kg/m <sup>3</sup> ) | 2,013.3  |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima seca (kg/m <sup>3</sup> )   | 1,686.0  |                                    |                         |                          |
| Compactación Reproducida (%)                | 99       |                                    |                         |                          |

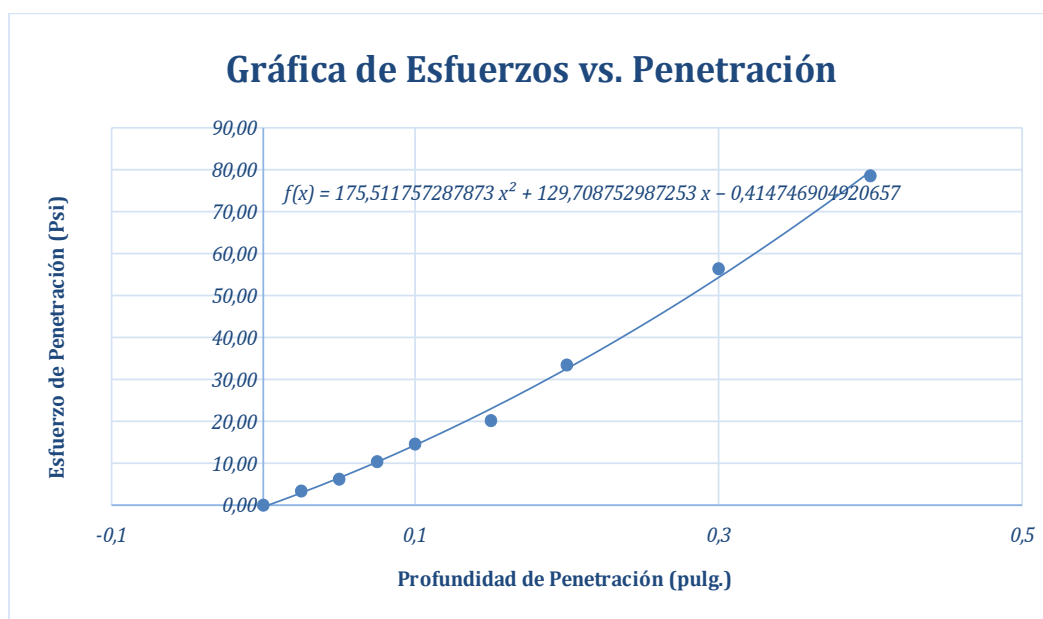
Fuente: Propia.

Tabla 64. *Resultados del ensayo de penetración del suelo más 5% mixto.*

| Ensayo de Penetración de Cargas |       |                              |             |                               |            |                                                    |                       |
|---------------------------------|-------|------------------------------|-------------|-------------------------------|------------|----------------------------------------------------|-----------------------|
| Penetración                     |       | Resistencia a la penetración |             |                               |            |                                                    |                       |
| mm                              | pulg  | Lectura deformimetro         | Carga (Lbs) | Esfuerzo de Penetración (Psi) | C.B.R. (%) | Esfuerzo de Penetración dado por la ecuación (Psi) | C.B.R. de la ecuación |
| 0                               | 0     | 0                            | 0           | 0.00                          |            |                                                    |                       |
| 0.635                           | 0.025 | 11.95                        | 10.11       | 3.37                          |            |                                                    |                       |
| 1.27                            | 0.05  | 15.97                        | 18.60       | 6.20                          |            |                                                    |                       |
| 1.91                            | 0.075 | 21.91                        | 31.13       | 10.38                         |            |                                                    |                       |
| 2.54                            | 0.1   | 27.88                        | 43.71       | 14.57                         | 1          | 13.87                                              | 1                     |
| 3.81                            | 0.15  | 35.85                        | 60.50       | 20.17                         |            |                                                    |                       |
| 5.08                            | 0.2   | 54.77                        | 100.28      | 33.43                         | 2          | 32.60                                              | 2                     |
| 7.62                            | 0.3   | 87.63                        | 169.13      | 56.38                         |            |                                                    |                       |
| 10.16                           | 0.4   | 119.5                        | 235.62      | 78.54                         |            |                                                    |                       |

Fuente: Propia.

Gráfica 41. Esfuerzo Vs. Penetración para el suelo más 5% mixto.



*Fuente: Propia.*

El CBR para el suelo natural más 5 % de Cáscara de Huevo Pulverizada y Cenizas de cáscara de arroz al 100% de compactación a una penetración de 0.1" es de 1, y 0.2" de 2, teniendo una densidad máxima seca de 1,686 kg/m<sup>3</sup> a una compactación producida de 99% bastante aceptable y una expansión de 5.78%.

### Ensayos para la adición de 10% de Polvo de Cáscara de Huevo y Cenizas de Cáscara de Arroz (Mixto).

Para cada uno de los ensayos se tomó una muestra de suelo natural, según lo que se requería y se le agregó el 10% de estabilizante mixto.

Se debe mencionar, que se agregó el 50% de polvo de cáscara de huevo y 50% de cenizas de cáscara de arroz al 10% aplicado al suelo, es decir, 5% de CH y 5% de CCA.

- Análisis granulométrico.

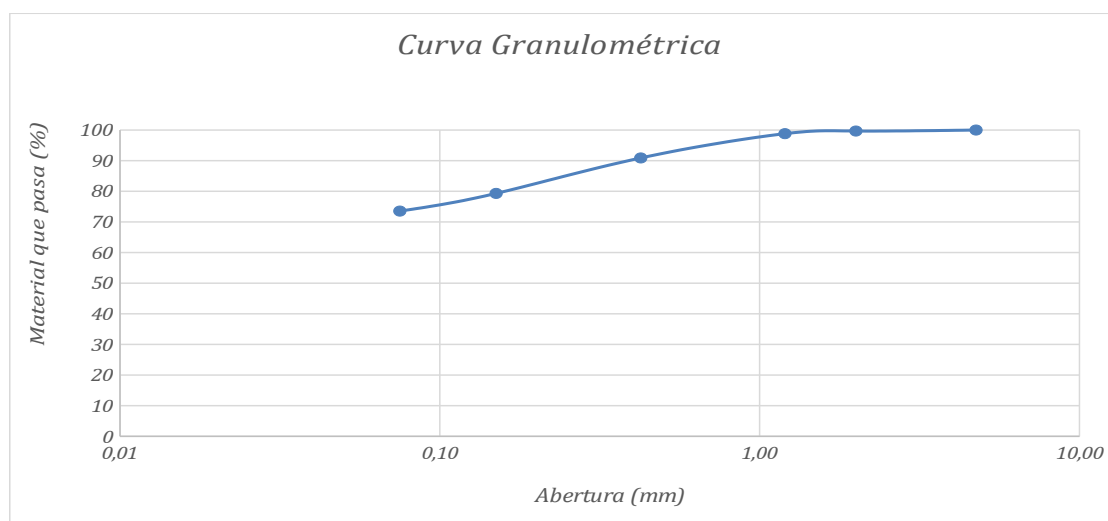
Para este ensaye, se tomó como muestra un peso de 526.6g y las mallas utilizadas fueron: (N°4, N°10, N16°, N°40, N°100, N°200).

Tabla 65. *Granulometría del suelo más 10% mixto.*

| Descripción de las Fracciones | Tamaño del Tamiz |       | Peso Retenido | Peso Retenido corregido | Porcentaje Retenido | Retenido Acumulado | Material Pasante |
|-------------------------------|------------------|-------|---------------|-------------------------|---------------------|--------------------|------------------|
|                               | No.              | mm    | g             |                         | %                   | %                  | %                |
| Grava Fina                    | No. 4            | 4.75  | 0.0           |                         | 0.0                 | 0.0                | <b>100.0</b>     |
| Arena Gruesa                  | No. 10           | 2.0   | 1.7           | 1.7                     | 0.3                 | 0.3                | <b>99.7</b>      |
|                               | No. 16           | 1.2   | 4.5           | 4.5                     | 0.9                 | 1.2                | <b>98.8</b>      |
| Arena Media                   | No. 40           | 0.43  | 41.7          | 41.7                    | 7.9                 | 9.1                | <b>90.9</b>      |
|                               | No. 100          | 0.15  | 60.8          | 60.8                    | 11.6                | 20.7               | <b>79.3</b>      |
| Arena Fina                    | No. 200          | 0.075 | 30.3          | 30.3                    | 5.8                 | 26.5               | <b>73.5</b>      |
| Limos y arcillas              | Pasa No. 200     |       | 386.2         | 386.2                   | 73.5                | 100.0              | <b>0.0</b>       |

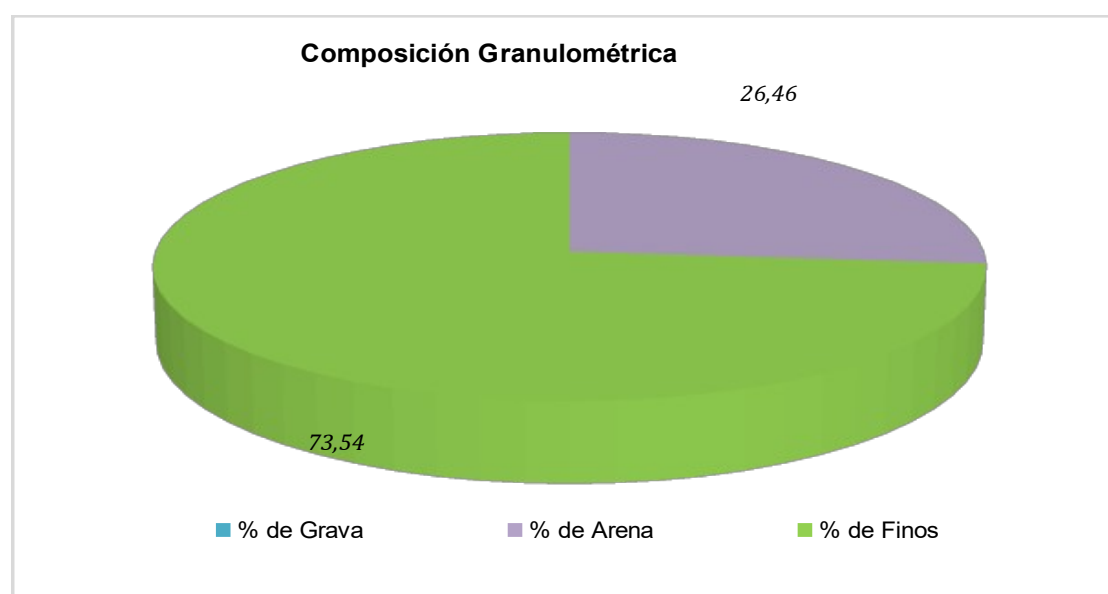
*Fuente: Propia.*

**Gráfica 42. Curva granulométrica del suelo más 10% mixto.**



*Fuente: Propia.*

**Diagrama de Pastel 9. Composición Granulométrica del suelo más 10% mixto.**



*Fuente: Propia.*

En el ensayo se observa en los resultados que en su composición granulométrica en el porcentaje de arenas es de 26.46% y de limos y arcillas es de 73.54%, además podemos observar un buen comportamiento de la curva granulométrica.

- Límites de Atterberg.

Para la realización de los límites, se pesó una muestra de 150g ya tamizada por la N°40 y se le agregó el 10% de estabilizante mixto tamizado también; Para proceder a encontrar el límite líquido y límite plástico para el suelo.

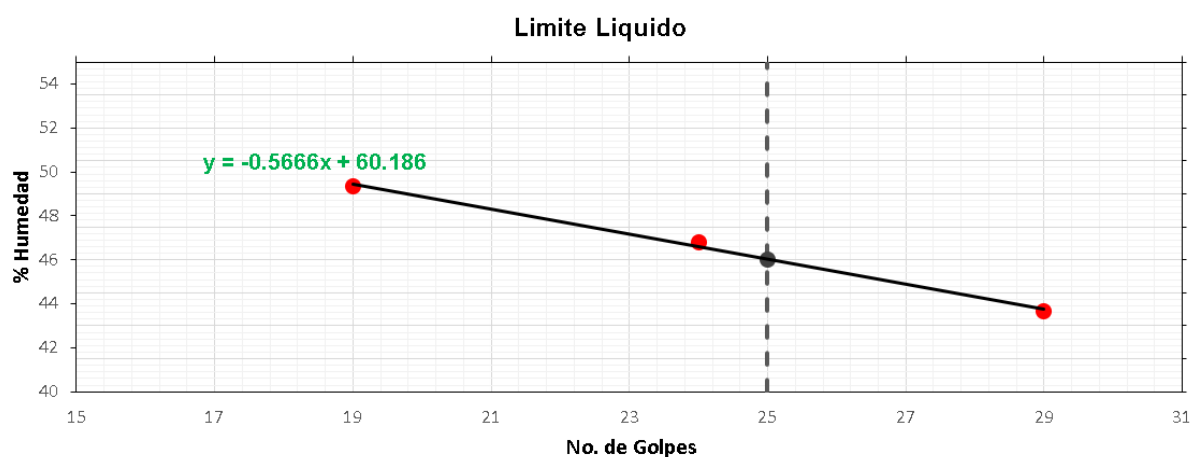
Para el límite líquido se usaron los intervalos de: 15-20 golpes, 20-25 golpes, 25-30 golpes y para el límite plástico, se realizaron cilindros fracturados de 3mm de diámetro aproximadamente.

Tabla 66. *Límite líquido para el suelo más 10% mixto.*

| Límite Líquido (ASTM D4318-17) |      |                 |                               |                             |                         |               |                      |
|--------------------------------|------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| No.                            | Tara | Peso de la tara | Peso de tara + muestra húmeda | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de Humedad |
| Golpes                         | No.  | (g)             | (g)                           | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| 19                             | A-10 | 18.26           | 28.19                         | 24.91                       | 6.65                    | 3.28          | 49.3                 |
| 24                             | T-15 | 18.31           | 28.57                         | 25.30                       | 6.99                    | 3.27          | 46.8                 |
| 29                             | A-07 | 17.03           | 25.75                         | 23.10                       | 6.07                    | 2.65          | 43.7                 |

Fuente: Propia.

Gráfica 43. *Límite Líquido del suelo más 10% mixto.*



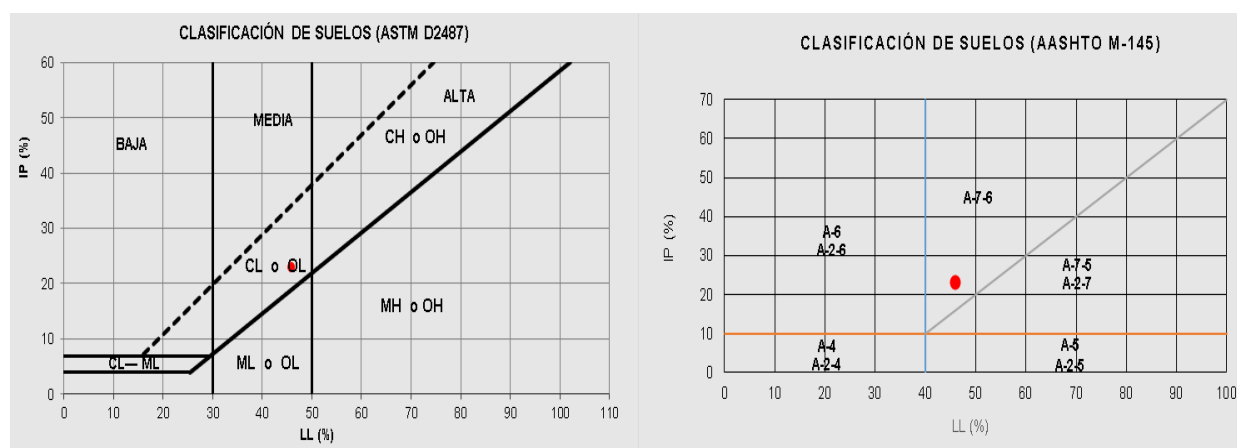
Fuente: Propia.

Tabla 67. Límite plástico para el suelo más 10% mixto.

| Límite Plástico (ASTM D4318-17) |                 |                               |                             |                         |               |                      |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| Envase                          | Peso de la tara | Peso de tara + muestra húmeda | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de humedad |
| No.                             | (g)             | (g)                           | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| K-21                            | 18.25           | 32.63                         | 29.91                       | 11.66                   | 2.72          | 23.3                 |
| M-07                            | 18.53           | 33.25                         | 30.48                       | 11.95                   | 2.77          | 23.2                 |

Fuente: Propia.

Gráfica 44. Clasificación del suelo natural más 10% mixto por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.



Fuente: Propia.

Tabla 68. Resultados de límites de Atterberg del suelo más 10% mixto.

| Límite Líquido | Límite Plástico | Índice de Plasticidad | Índice de Grupo | Clasificación SUCS/ AASHTO |
|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|----------------------------|
| 46             | 23              | 23                    | 16              | CL/ A-7-6                  |

Fuente: Propia.

El suelo tiene un límite líquido de 46 y un límite plástico de 23, con un índice de plasticidad de 23 y un índice de grupo de 16; Además se clasifica como un suelo Arcilloso de mediana plasticidad.

- Proctor modificado.

Se realizó Proctor modificado para el suelo en estado natural más 10% de cáscara de huevo pulverizado y cenizas de cáscara de arroz, los resultados de densidad seca máxima y humedad óptima de cada muestra serán utilizados para la realización de los CBR, todos los ensayos Proctor realizados se hicieron con el método A, todo el material pasa el tamiz No 4.

Para el ensaye se le agregaron al molde 5 capas con 25 golpes por cada capa, la curva graficada de este ensaye es una curva polinómica que toma la mayor cantidad de puntos obtenidos en el ensaye, ya que puede haber errores humanos cometidos, y esta curva nos dio los valores más acertados y una variación constante de los resultados.

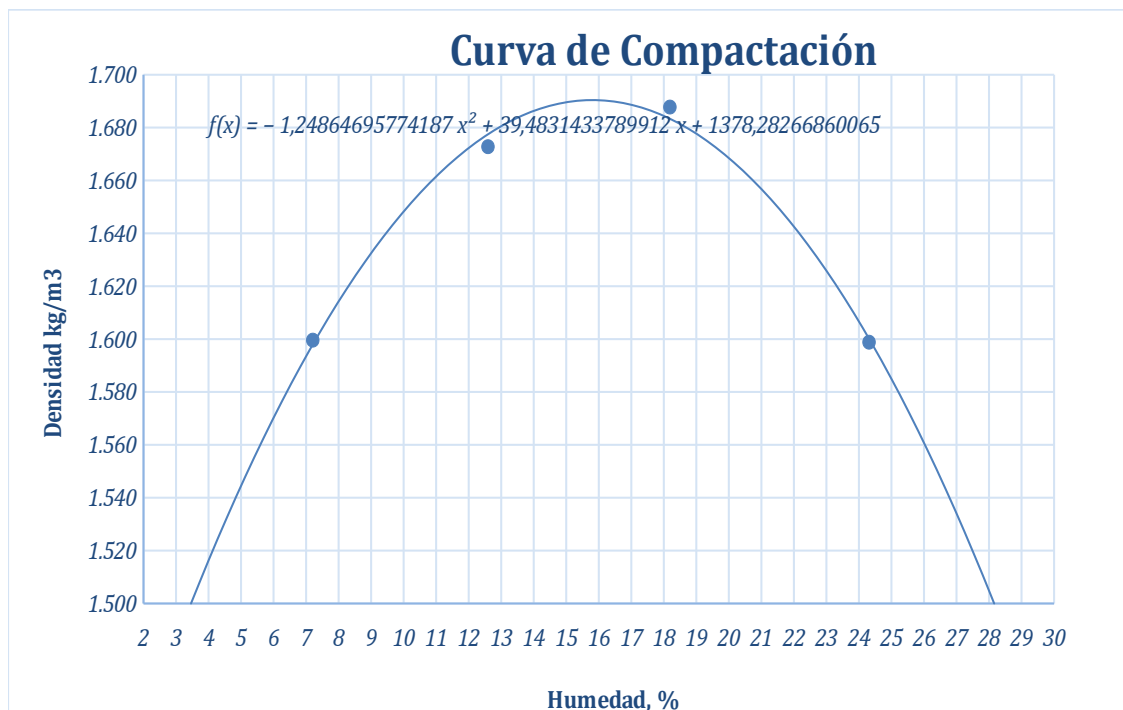
Tabla 69. *Datos del ensayo proctor para el suelo más 10% mixto.*

| Método Utilizado                                                     | A      |        |        |        |   |
|----------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---|
| Determinación de Densidad Seca Máxima, (kg/m³) y Humedad Óptima, (%) |        |        |        |        |   |
| Ensayo No.                                                           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5 |
| Peso del Molde, (g)                                                  | 4128.7 |        |        |        |   |
| Volumen del Molde, (cm³)                                             | 929    |        |        |        |   |
| Peso del Molde + Material Compactado, (g)                            | 5721.8 | 5878.4 | 5981.8 | 5975.1 |   |
| Peso Húmedo (g)                                                      | 305.0  | 363.9  | 383.4  | 500.6  |   |
| Peso Seco (g)                                                        | 284.5  | 323.2  | 324.4  | 402.7  |   |
| Densidad Húmeda (g/cm³)                                              | 1.715  | 1.883  | 1.995  | 1.988  |   |
| Densidad Seca (g/cm³)                                                | 1.600  | 1.673  | 1.688  | 1.599  |   |
| Densidad Seca (kg/m³)                                                | 1,600  | 1,673  | 1,688  | 1,599  |   |
| Contenido de                                                         | 7.2    | 12.6   | 18.2   | 24.3   |   |

|              |  |  |  |  |  |
|--------------|--|--|--|--|--|
| Humedad, (%) |  |  |  |  |  |
|--------------|--|--|--|--|--|

Fuente: Propia.

Gráfica 45. Curva de Compactación del 10% de Cáscara de Huevo Pulverizado y Cenizas de Cáscara de Arroz.



|                                          |              |
|------------------------------------------|--------------|
| <b>Densidad Seca<br/>Máxima, (kg/m³)</b> | <b>1,690</b> |
| <b>Humedad Óptima, (%)</b>               | <b>16.3</b>  |

Fuente: Propia.

Se obtuvo una densidad Seca Máxima seca de 1,690 kg/m³ con una humedad óptima de 16.3% del suelo aplicado el 10% de polvo de cáscara de huevo y cenizas de cáscara de arroz.

- Valor relativo de soporte CBR.

Para la preparación del ensayo, se trabajó con 3 kg de suelo en estado natural y a eso se le agregó el 10% de estabilizante mixto.

Tabla 70. Datos del ensayo CBR para el suelo más 10% mixto.

| Ensayo de Relación Soporte C.B.R.           |          | Ensayos de Expansión de los suelos |                         |                          |
|---------------------------------------------|----------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Peso del molde (g)                          | 6,785.0  | Hora y Fecha                       | Tiempo transcurrido (h) | Lectura del Deformímetro |
| Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )        | 2,105.0  | 19-10-23<br>11:39 a.m.             | 0                       | 3.18                     |
| Numero de golpes por capa                   | 56.0     | 23-10-23<br>11:30 a.m.             | 96                      | 9.83                     |
| No. de Capas                                | 5.0      | Altura del molde (mm)              |                         | 116.43                   |
| Peso del molde +material (g)                | 10,885.0 | Expansión (%)                      |                         | 5.71                     |
| Peso del material húmedo                    | 158.6    |                                    |                         |                          |
| Peso del material seco (g)                  | 135.5    |                                    |                         |                          |
| peso del agua                               | 17.0     |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima húmeda (kg/m <sup>3</sup> ) | 1,947.7  |                                    |                         |                          |
| Densidad máxima seca (kg/m <sup>3</sup> )   | 1,664.1  |                                    |                         |                          |
| Compactación reproducida (%)                | 98       |                                    |                         |                          |

Fuente: Propia.

| Ensayo de Penetración de Cargas |       |                              |             |                               |            |                                                    |                       |
|---------------------------------|-------|------------------------------|-------------|-------------------------------|------------|----------------------------------------------------|-----------------------|
| Penetración                     |       | Resistencia a la penetración |             |                               |            |                                                    |                       |
| mm                              | pulg  | Lectura Deformímetro         | Carga (Lbs) | Esfuerzo de Penetración (Psi) | C.B.R. (%) | Esfuerzo de Penetración dado por la ecuación (Psi) | C.B.R. de la ecuación |
| 0                               | 0     | 0                            | 0           | 0.00                          |            |                                                    |                       |
| 0.635                           | 0.025 | 16.15                        | 19          | 6.33                          |            |                                                    |                       |
| 1.27                            | 0.05  | 24.23                        | 36          | 12.01                         |            |                                                    |                       |
| 1.91                            | 0.075 | 30.29                        | 49          | 16.26                         |            |                                                    |                       |
| 2.54                            | 0.1   | 36.34                        | 62          | 20.51                         | 2          | 23.07                                              | 2                     |
| 3.81                            | 0.15  | 55.53                        | 102         | 33.96                         |            |                                                    |                       |
| 5.08                            | 0.2   | 70.67                        | 134         | 44.54                         | 3          | 44.02                                              | 3                     |
| 7.62                            | 0.3   | 98.94                        | 193         | 64.25                         |            |                                                    |                       |
| 10.16                           | 0.4   | 116.1                        | 229         | 76.18                         |            |                                                    |                       |

Tabla 71. Resultados de la penetración del suelo más 10% mixto.

Fuente: Propia.

Gráfica 46. Esfuerzo Vs Penetración para el suelo más 10% mixto.



Fuente: Propia.

El CBR para el suelo natural más 10% de polvo de cáscara de huevo y cenizas de cáscara de arroz al 100% de compactación a una penetración de 0.1" es 2, y a 0.2" de 3, teniendo una densidad máxima seca de 1,664.1 kg/m<sup>3</sup> con una compactación producida de 98% bastante aceptable y una expansión de 5.72%. Podemos observar que en la gráfica hay un comportamiento regular de ascendencia.

### Ensayos para la adición de 15% de polvo de cáscara de huevo y cenizas de cáscaras de arroz (mixto).

Para cada uno de los ensayos se tomó una muestra de suelo natural, según lo que se requería y se le agregó el 15% de estabilizante mixto.

Se debe mencionar, que se agregó el 50% de polvo de cáscara de huevo y 50% de cenizas de cáscara de arroz al 15% aplicado al suelo, es decir, 7.5% de CH y 7.5% de CCA.

- Análisis granulométrico.

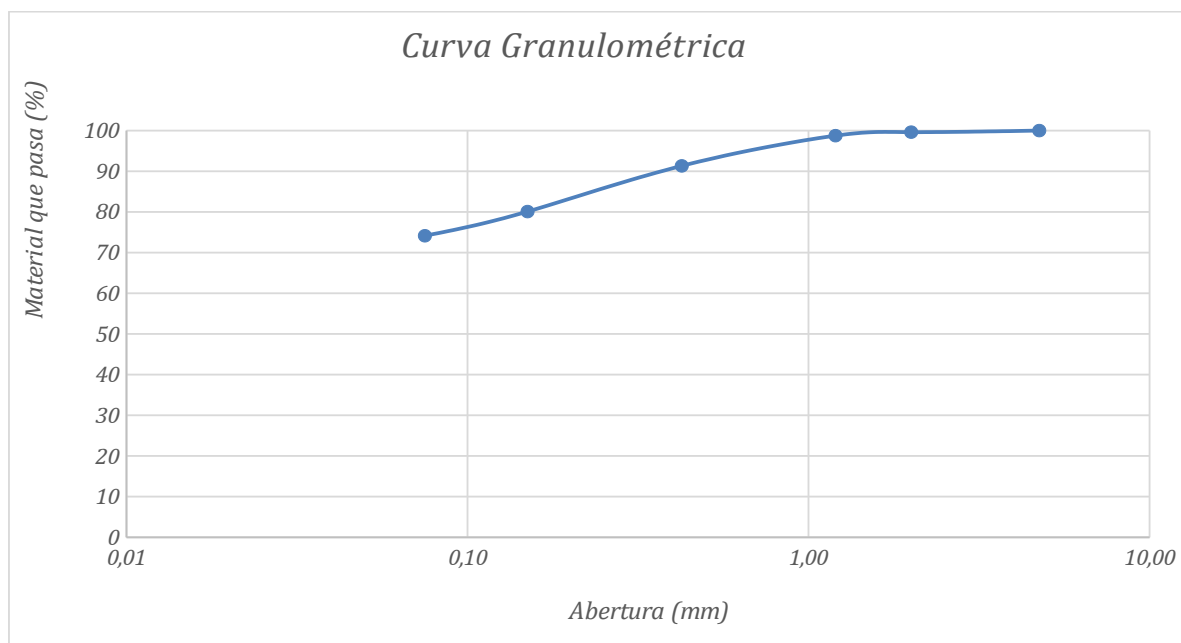
Para este ensaye, se tomó como muestra un peso de 575g y las mallas utilizadas fueron: (N°4, N°10, N16°, N°40, N°100, N°200).

Tabla 72. *Granulometría para el suelo más 15% mixto.*

| Descripción de las Fracciones | Tamaño del Tamiz |       | Peso Retenido | Peso Retenido corregido | Porcentaje Retenido | Retenido Acumulado | Materia I Pasante |
|-------------------------------|------------------|-------|---------------|-------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|
|                               | No.              | mm    | g             |                         | %                   | %                  | %                 |
| Grava Fina                    | No. 4            | 4.75  | 0.0           |                         | 0.0                 | 0.0                | <b>100.0</b>      |
| Arena Gruesa                  | No. 10           | 2.0   | 2.2           | 2.2                     | 0.4                 | 0.4                | <b>99.6</b>       |
|                               | No. 16           | 1.2   | 5.0           | 5.0                     | 0.9                 | 1.3                | <b>98.7</b>       |
| Arena Media                   | No. 40           | 0.43  | 42.7          | 42.7                    | 7.4                 | 8.7                | <b>91.3</b>       |
|                               | No. 100          | 0.15  | 64.6          | 64.6                    | 11.2                | 19.9               | <b>80.1</b>       |
| Arena Fina                    | No. 200          | 0.075 | 34.2          | 34.2                    | 5.9                 | 25.9               | <b>74.1</b>       |
| Limos y arcillas              | Pasa No. 200     |       | 426.3         | 426.3                   | 74.1                | 100.0              | <b>0.0</b>        |

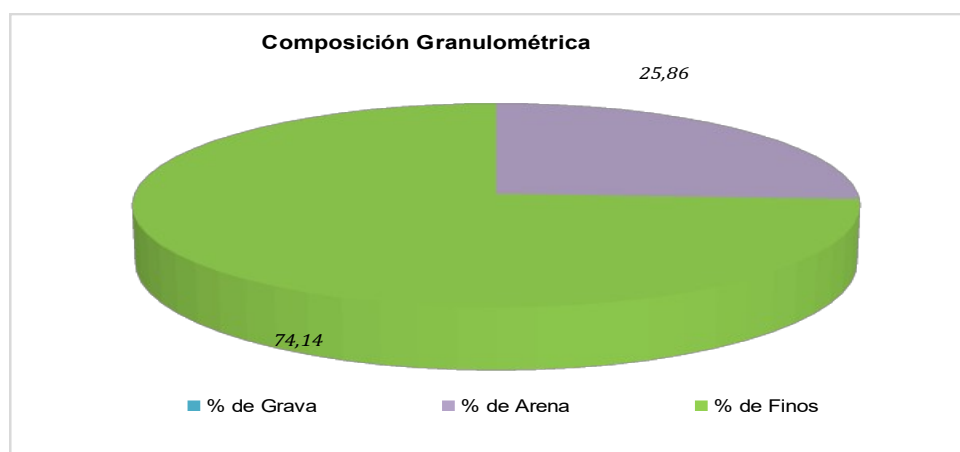
*Fuente: Propia.*

**Gráfica 47. Curva Granulométrica del 15% de Cáscara de Huevo Pulverizado y Cáscara de Cenizas de Cáscara de Arroz.**



**Fuente: Propia.**

**Diagrama de Pastel 10. Composición Granulométrica del 15% de Cáscara de Huevo Pulverizada y Cenizas de Cáscara de Arroz.**



*Fuente: Propia.*

En el ensayo se observa en los resultados que en su composición granulométrica en el porcentaje de arenas es de 25.86% y de limos y arcillas es de 74.14%, la curva tiene un comportamiento uniforme.

- Límites de Atterberg.

Para la realización de los límites, se pesó una muestra de 150g ya tamizada por la N°40 y se le agregó el 15% de estabilizante mixto tamizado también; Para proceder a encontrar el límite líquido y límite plástico para el suelo.

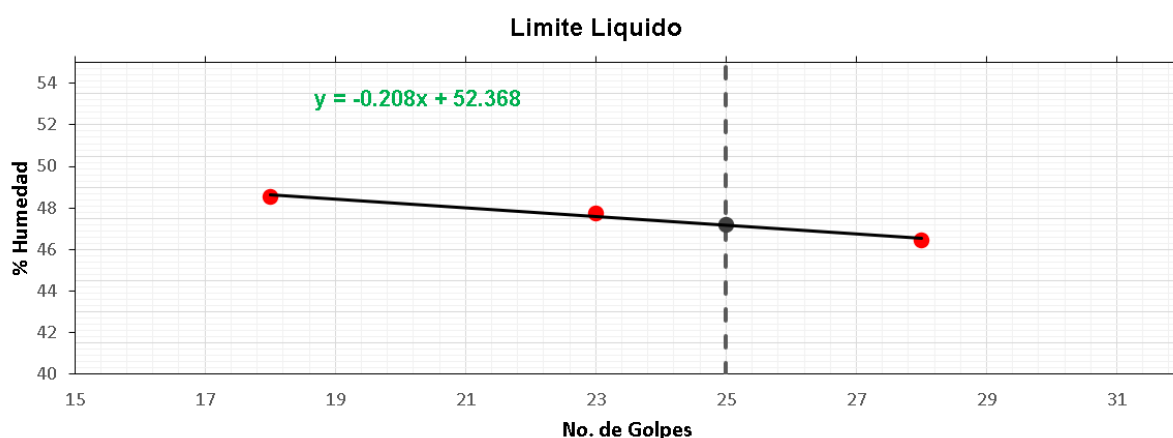
Para el límite líquido se usaron los intervalos de: 15-20 golpes, 20-25 golpes, 25-30 golpes y para el límite plástico, se realizaron cilindros fracturados de 3mm de diámetro aproximadamente.

Tabla 73. *Límite Líquido del suelo más 15% mixto.*

| <b>Límite Líquido (ASTM D4318-17)</b> |          |                       |                                        |                                   |                                  |                     |                             |
|---------------------------------------|----------|-----------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| No.                                   | Tar<br>a | Peso<br>de la<br>tara | Peso de<br>tara +<br>muestra<br>húmeda | Peso de tara<br>+ muestra<br>seca | Peso de<br>la<br>muestra<br>seca | Peso<br>del<br>agua | Contenid<br>o de<br>Humedad |
| Golpe<br>s                            | No.      | (g)                   | (g)                                    | (g)                               | (g)                              | (g)                 | ( % )                       |
| 18                                    | K-<br>30 | 18.16                 | 25.81                                  | 23.31                             | 5.15                             | 2.50                | 48.5                        |
| 23                                    | A-<br>36 | 18.29                 | 27.45                                  | 24.49                             | 6.20                             | 2.96                | 47.7                        |
| 28                                    | Z-<br>01 | 18.55                 | 29.11                                  | 25.76                             | 7.21                             | 3.35                | 46.5                        |

*Fuente: Propia*

Gráfica 48. Límite Líquido del suelo más 15% mixto.



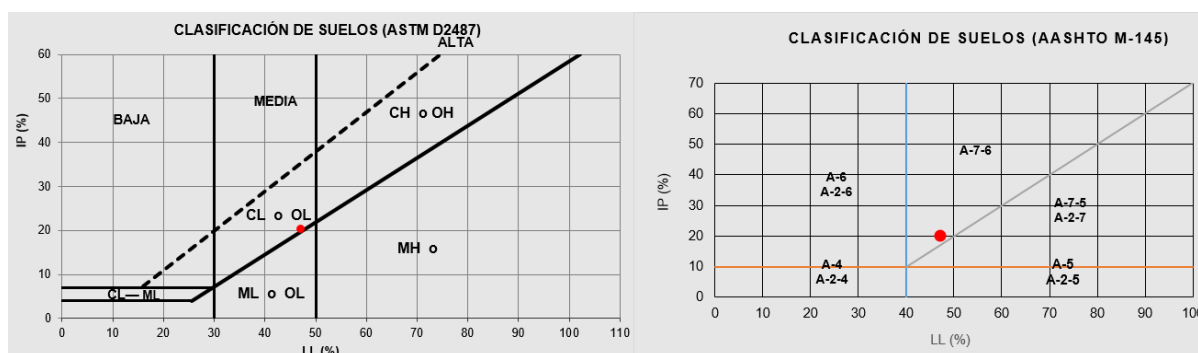
Fuente: Propia.

Tabla 74. Límite plástico para el suelo más 15% mixto.

| Límite Plástico (ASTM D4318-17) |                 |                               |                             |                         |               |                      |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|
| Envase                          | Peso de la tara | Peso de tara + muestra húmeda | Peso de tara + muestra seca | Peso de la muestra seca | Peso del agua | Contenido de humedad |
| No.                             | (g)             | (g)                           | (g)                         | (g)                     | (g)           | ( % )                |
| T-13                            | 20.89           | 28.33                         | 26.75                       | 5.86                    | 1.58          | 27.0                 |
| T-27                            | 20.33           | 27.71                         | 26.12                       | 5.79                    | 1.59          | 27.5                 |

Fuente: Propia.

Gráfica 49. Clasificación del suelo natural más el 15% mixto por las normas ASTM D2487 Y AASHTO M-145.



Fuente: Propia.

Tabla 75. Resultados de límites de Atterberg del suelo más 15% mixto.

| Límite Líquido | Límite Plástico | Índice de Plasticidad | Índice de Grupo | Clasificación SUCS/ AASHTO |
|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|----------------------------|
| 47             | 27              | 20                    | 15              | CL/ A-7-6                  |

Fuente: Propia.

El suelo tiene un límite líquido de 47 y un límite plástico de 27, con un índice de plasticidad de 20 y un índice de grupo de 15; Además se clasifica como un suelo Arcilloso de mediana plasticidad.

- Proctor modificado.

Se realizó proctor modificado para el suelo en estado natural más 15% de cáscara de huevo pulverizado y cenizas de cáscara de arroz, los resultados de densidad seca máxima y humedad óptima de cada muestra serán utilizados para la realización de los CBR, todos los ensayos Proctor realizados se hicieron con el método A, todo el material pasa el tamiz No 4.

Para el ensaye se le agregaron al molde 5 capas con 25 golpes por cada capa, la curva graficada de este ensaye es una curva polinómica que toma la mayor cantidad de puntos obtenidos en el ensaye, ya que puede haber errores humanos cometidos, y esta curva nos dio los valores más acertados y una variación constante de los resultados.

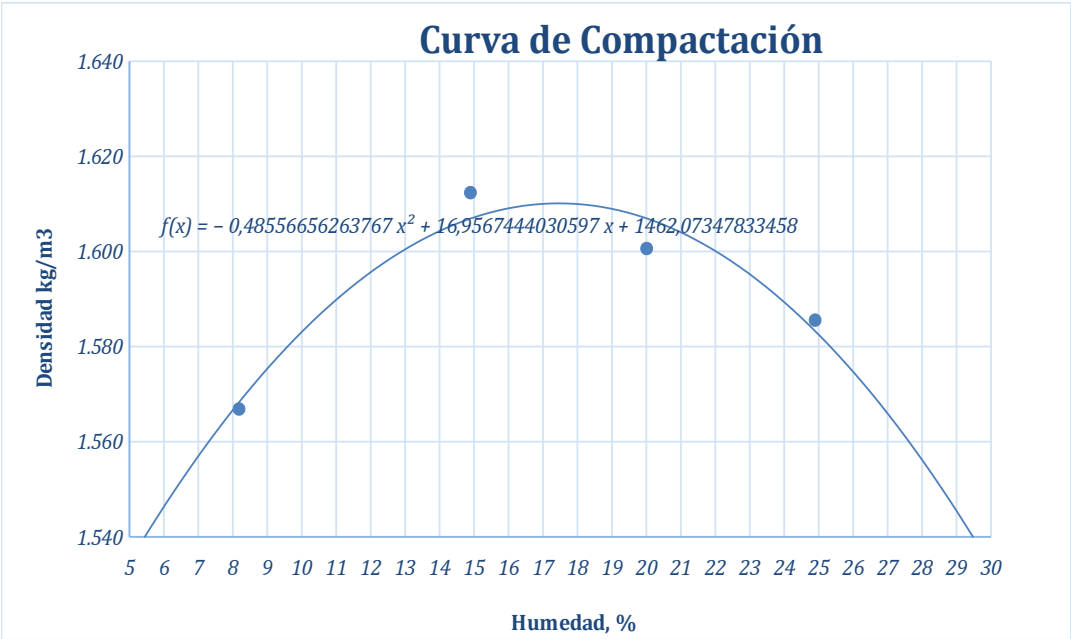
Tabla 76. Datos del proctor para el suelo más 15% mixto.

|                                                                      |        |   |   |   |   |
|----------------------------------------------------------------------|--------|---|---|---|---|
| Método Utilizado                                                     | A      |   |   |   |   |
| Determinación de Densidad Seca Máxima, (kg/m³) y Humedad Óptima, (%) |        |   |   |   |   |
|                                                                      |        |   |   |   |   |
| Ensayo No.                                                           | 1      | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Peso del Molde, (g)                                                  | 4141.0 |   |   |   |   |

|                                           |        |        |        |        |  |
|-------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--|
| Volumen del Molde, (cm <sup>3</sup> )     | 929    |        |        |        |  |
| Peso del Molde + Material Compactado, (g) | 5715.7 | 5862.0 | 5925.5 | 5980.7 |  |
| Peso Húmedo (g)                           | 211.6  | 382.6  | 295.1  | 419.9  |  |
| Peso Seco (g)                             | 195.6  | 333.0  | 245.9  | 336.2  |  |
| Densidad Húmeda (g/cm <sup>3</sup> )      | 1.695  | 1.853  | 1.921  | 1.980  |  |
| Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )        | 1.567  | 1.612  | 1.601  | 1.586  |  |
| Densidad Seca (kg/m <sup>3</sup> )        | 1,567  | 1,612  | 1,601  | 1,586  |  |
| Contenido de Humedad, (%)                 | 8.2    | 14.9   | 20.0   | 24.9   |  |

Fuente: Propia.

Gráfica 50. Curva de Compactación del suelo más 15% mixto.



|                                          |              |
|------------------------------------------|--------------|
| <b>Densidad Seca Máxima,<br/>(kg/m3)</b> | <b>1,610</b> |
| <b>Humedad Óptima, (%)</b>               | <b>17.0</b>  |

Fuente: Propia.

Se obtuvo una densidad Seca Máxima seca de 1,610 kg/m<sup>3</sup> con una humedad óptima de 17% para el suelo aplicando el 15% polvo de cáscara de huevo y de cenizas de cáscara de arroz.

- Valor relativo de soporte CBR.

Para la preparación del ensayo, se trabajó con 3 kg de suelo en estado natural y a eso se le agregó el 15% de estabilizante mixto.

Tabla 77. *Datos del ensayo CBR para el suelo más 15% mixto.*

| Ensayo de Relación Soporte C.B.R.           |          | Ensayos de Expansión de los suelos |                         |                          |
|---------------------------------------------|----------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Peso del molde (g)                          | 7,095.0  | Hora y Fecha                       | Tiempo transcurrido (h) | Lectura del Deformímetro |
| Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )        | 2,105.0  | 19-10-23 11:39 a.m.                | 0                       | 7.62                     |
| Numero de golpes por capa                   | 56.0     | 23-10-23 11:30 a.m.                | 96                      | 13.34                    |
| No. de Capas                                | 5.0      | Altura del molde (mm)              |                         | 116.43                   |
| Peso del molde +material (g)                | 11,119.0 | Expansión (%)                      |                         | 4.91                     |
| Peso del material húmedo                    | 141.7    |                                    |                         |                          |
| Peso del material seco (g)                  | 120.2    |                                    |                         |                          |
| peso del agua                               | 17.9     |                                    |                         |                          |
| Densidad Máxima Húmeda (kg/m <sup>3</sup> ) | 1,911.6  |                                    |                         |                          |
| Densidad Máxima Seca (kg/m <sup>3</sup> )   | 1,621.6  |                                    |                         |                          |
| Compactación Reproducida (%)                | 100.7    |                                    |                         |                          |

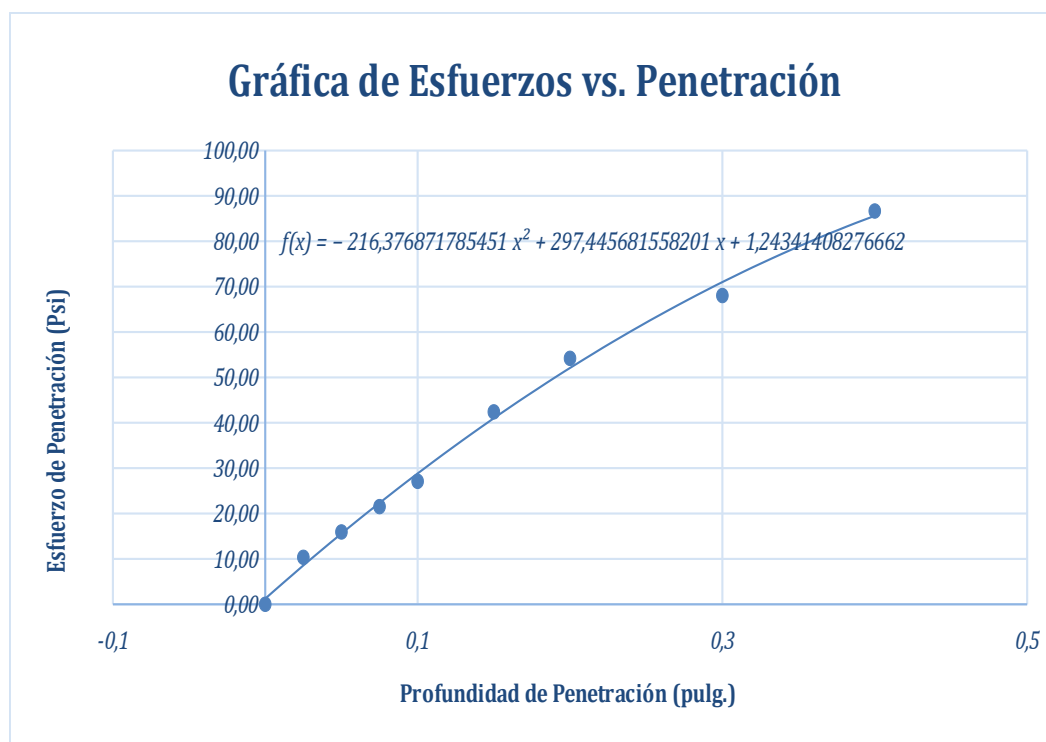
Fuente: Propia.

Tabla 78. Resultados del ensayo de penetración del suelo más 15% mixto.

| Ensayo de Penetración de Cargas |       |                              |             |                               |            |                                                    |                       |
|---------------------------------|-------|------------------------------|-------------|-------------------------------|------------|----------------------------------------------------|-----------------------|
| Penetración                     |       | Resistencia a la penetración |             |                               |            |                                                    |                       |
| mm                              | pulg  | Lectura Deformímetro         | Carga (Lbs) | Esfuerzo de Penetración (Psi) | C.B.R. (%) | Esfuerzo de Penetración dado por la ecuación (Psi) | C.B.R. de la ecuación |
| 0                               | 0     | 0                            | 0           | 0.00                          |            |                                                    |                       |
| 0.635                           | 0.025 | 21.87                        | 31          | 10.35                         |            |                                                    |                       |
| 1.27                            | 0.05  | 29.82                        | 48          | 15.93                         |            |                                                    |                       |
| 1.91                            | 0.075 | 37.78                        | 65          | 21.52                         |            |                                                    |                       |
| 2.54                            | 0.1   | 45.73                        | 81          | 27.09                         | 3          | 28.8                                               | 3                     |
| 3.81                            | 0.15  | 67.6                         | 127         | 42.40                         |            |                                                    |                       |
| 5.08                            | 0.2   | 84.5                         | 163         | 54.20                         | 4          | 52.1                                               | 3                     |
| 7.62                            | 0.3   | 104.38                       | 204         | 68.04                         |            |                                                    |                       |
| 10.16                           | 0.4   | 131.22                       | 260         | 86.67                         |            |                                                    |                       |

Fuente: Propia.

Gráfica 51. Esfuerzo Vs Penetración para el 15% de Cáscara de Huevo y Cenizas de Cáscara de Arroz.



El CBR para el suelo natural más 15 % de Cáscara de Huevo Pulverizada y Cenizas de cáscara de arroz al 100% de compactación a una penetración de 0.1" es de 3 y 0.2" de 3, teniendo una densidad máxima seca de 1,621.6 kg/m<sup>3</sup> a una compactación producida de 100.7% y una expansión de 4.91%.

## CAPITULO V: Interpretación de resultados.

- Análisis Granulométrico

Se puede apreciar en el análisis granulométrico, que la presencia de gravas en este suelo es casi nula, y que predominan las arcillas y los limos. Al añadirle el porcentaje de cada aditivo, al material en estado natural, aumenta el porcentaje de arenas y disminuye el porcentaje de finos, pero esto sólo afecta ligeramente la estructura del suelo.

- Límite de Atterberg

El suelo en estado natural tiene un límite líquido de 53% y un índice plástico de 28%, con un índice de grupo 23, su clasificación SUCS es CL (Arcilla de alta plasticidad) y AASHTO A-7-6(23). Comparando este valor con el resultado obtenido de las diferentes mezclas de aditivo más suelo, se observa que a medida que se le agrega un mayor porcentaje de estabilizante, disminuye el límite líquido, el índice plástico y el índice de grupo, obteniendo como el mejor resultado de esta prueba a

la mezcla del suelo más 15% de CH, con límite líquido de 44%, índice plástico de 21% y índice de grupo 16; Siendo su clasificación SUCS un CH (Arcilla de mediana plasticidad) y su clasificación AASHTO un A-7-6(16) (Suelo Arcilloso Malo). Se logró bajar un poco la plasticidad del suelo, debido a que los aditivos se comportan como una arena liviana.

- Proctor Modificado

En el ensayo del suelo en estado natural se obtuvo una densidad seca máxima de  $1763\text{kg/m}^3$  con una humedad óptima de 15%. Al adicionar los diferentes porcentajes de estabilizante, se aprecia que las densidades secas máximas disminuyen a medida que aumenta la dosificación de estabilizante, esto es debido a que el material es ligero y su densidad es mucho menor que la del suelo natural.

La menor densidad seca alcanzada corresponde a la adición de 15% mixto (7.5% de CH y 7.5% de CCA) con  $1610\text{kg/m}^3$  y una humedad óptima de 17%. Donde se observa un aumento en la cantidad de agua necesaria para llegar a su densidad seca máxima.

Analizando los demás resultados, se observa que no hay un aumento constante de la humedad óptima a medida que se agrega una dosificación mayor de estabilizante, no existe la tendencia a aumentar, sino que es variable y la densidad seca máxima se logra a diferentes humedades, sin importar que porcentaje de adición se agregue al suelo.

La máxima densidad seca alcanzada mezclado el suelo dosificado, se da con la adición de 5% de CH y es de  $1755\text{kg/m}^3$ , con una humedad óptima de 15. Pero no representa ninguna mejora para el suelo en estado natural, ya que no logra alcanzar, ni superar su densidad seca máxima.

- Ensayo de California Bearing Ratio C.B.R.

Al analizar los resultados obtenidos de la prueba C.B.R. se puede observar un aumento de la curva del C.B.R. al adicionar los aditivos. Se mantiene un C.B.R. constante para todas las mezclas con 5% de aditivo, con un valor de 1 y 2 para la 0.1" y 0.2" de penetración respectivamente. Y se ve un ligero aumento en el C.B.R., con la adición de 10% de los aditivos, que igualmente, se mantienen constantes; los valores del C.B.R. son de 2 y 3, en 0.1" y 0.2" de penetración, respectivamente.

En el caso de la adición del 15% de los aditivos, se nota una mejoría con respecto a las mezclas anteriores, ya que presentan valores de C.B.R. de 3 a 0.1" y 0.2" de penetración, y en el caso del 15% de adición de CH, en la segunda vuelta, el C.B.R. aumenta a 4; Siendo este valor, el máximo alcanzado entre todos los demás ensayos.

Teniendo estos valores, se puede clasificar de manera más clara en qué categoría podría ser utilizado este suelo. El suelo en estado natural no entra en la clasificación, ya que tiene un valor de C.B.R. de 1, y el rango menor para entrar en la clasificación es entre 2-5, por que se interpreta que es un suelo que no tiene ninguna utilidad para la construcción y que es preferible que sea descartado.

En el caso de los ensayos realizados añadiendo diferentes porcentajes de aditivos, todos entran en el primer rango entre 2-5, que corresponde a un suelo muy malo que podría ser utilizado para subrasante.

A pesar de que los valores del C.B.R. aumentaron, estos representan un cambio poco significativo para que poder mejorar las características del suelo natural y que tenga un mejor uso.

Con respecto al porcentaje de expansión, se observa ligeramente una disminución al adicionar el porcentaje de cada aditivo, se ve un cambio poco significativo al agregar el 15% de cada aditivo, especialmente con la adición de 15% de CH, que obtuvo una expansión de 4.72%, comparándola con la expansión del suelo natural que fue de 5.98%. Este estabilizante tiene propiedades que impermeabilizan el suelo, no permitiendo el paso del agua, mejorando así la capacidad de expansión del suelo, lo que nos hace pensar que esta capacidad podría mejorar con un porcentaje de aditivo mayor.

## CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Se llevó a cabo la evaluación de las propiedades del suelo en su estado natural, y se determinó que se trata de un suelo CL, según la SUCS y un suelo A-7-6 según la AASHTO, con un índice de grupo 23. Además, se determinó su densidad seca máxima que es de  $1763 \text{ kg/m}^3$  y su humedad óptima es del 15%. El C.B.R. arrojó un valor de 1, lo que indica que el suelo en su estado natural no es adecuado para aplicaciones en construcción.

Se realizaron nueve mezclas diferentes con el suelo y los aditivos, con porcentajes de 5%, 10% y 15% de polvo de cáscara de huevo, ceniza de cáscara de arroz, y una mezcla al 50% de ambos. Estas mezclas fueron sometidas a ensayos para determinar sus propiedades físico-mecánicas.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la incorporación de ceniza de cáscara de arroz y polvo de cáscara de huevo en diversas proporciones no generó mejoras significativas en las propiedades del suelo estudiado.

Sin embargo, se observó que el porcentaje de adición del 15% de polvo de cáscara de huevo mostró los mejores resultados al reducir el índice plástico en un 33%. Esto sugiere que este porcentaje podría ser efectivo como estabilizante. Lamentablemente, debido a la ligereza de los aditivos, no se lograron mejoras significativas en las densidades secas máximas. A medida que se aumentaba la cantidad de aditivo, la densidad seca máxima disminuía, lo que indica que el porcentaje del 15% de polvo de cáscara de huevo no cumplió con mejorar esta característica del suelo.

En el ensayo de C.B.R., se obtuvieron resultados positivos al adicionar el 15% de polvo de cáscara de huevo, alcanzando un CBR de 3 a 0.1" de penetración y 4 a 0.2" de penetración. Además, este porcentaje de aditivo mostró la menor expansión.

En conclusión, el porcentaje del 15% de polvo de cáscara de huevo fue el que obtuvo los mejores resultados en la mayoría de las pruebas realizadas. Aunque no se lograron mejoras óptimas en la estructura del suelo, este porcentaje podría funcionar como un estabilizante adecuado al agregarlo al suelo en mayor proporción. La adición de polvo de cáscara de huevo en un 15% al suelo arcilloso puede ser una opción viable para mejorar algunas de sus propiedades físico-mecánicas, especialmente en términos de reducción del índice plástico y aumento de la resistencia C.B.R. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las densidades secas máximas no se vieron significativamente mejoradas por la adición de este aditivo.

Estos resultados proporcionan una base para considerar el uso de polvo de cáscara de huevo como un estabilizante en aplicaciones de construcción, aunque se requieren realizar más investigaciones para verificar su efectividad.

## Recomendaciones

Dado que los resultados indican que el suelo arcilloso no experimenta mejoras significativas en resistencia con los porcentajes de aditivos aplicados (ver tabla resumen en anexo A), se recomienda buscar otras alternativas para estabilizarlo. Se sugiere considerar otros tipos de materiales, ya sean fibras naturales o sintéticas, para mejorar las propiedades mecánicas de este tipo de suelo.

Debido a que la adición del 15% de polvo de cáscara de huevo, fue la que obtuvo mejores resultados, se sugiere continuar investigando con dosificaciones más elevadas. Estos estudios adicionales podrían revelar si dosis más altas de este aditivo resultarían en una mejora significativa en las propiedades del suelo.

Dado que las dosificaciones de cenizas de cáscara de arroz mostraron una mayor absorción de humedad y debilitamiento de la estructura del suelo, se recomienda llevar a cabo investigaciones adicionales en diferentes tipos de suelos para determinar su comportamiento. Esto permitirá evaluar si los aditivos son aplicables en suelos específicos.

## Bibliografía

1. Alvarado, C., & Guerra, A. (2018). Influencia de la adición de ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente sobre la estabilización ecológica de la mezcla suelo - sedimento en la provincia de Virú. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú
2. BRAJA, D. M. (2015). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. México: Cengage Learning Editores, S.A.
3. Díaz, F. (2018). Mejoramiento de la subrasante mediante ceniza de cáscara de arroz en la carretera Dv San Martín - Lonya Grande, Amazonas 2018. (Tesis de pregrado, Lima, Perú).
4. Enciclopedia Humanidades (2006-2022). Importancia del suelo y sus propiedades.

5. García Araujo B. J., Morales Delgado D. M. (2021). Análisis de la estabilidad de un suelo arcilloso con cáscaras de huevo pulverizadas añadidas. (Tesis de pregrado, Bogotá Colombia).
6. Matus Lazo, Iván y Lindo O'Connor, Guía de laboratorio de materiales y suelos, Universidad Nacional de Ingeniería.
7. MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES (2016). Manual de Ensayo de Materiales.
8. Navarro Sergio H.(2012). Tipos de suelos en Nicaragua, química y formación de suelos (Universidad Nacional de Ingeniería, Estelí- Nicaragua).
9. Pollo y Huevo: Avance Plan Nacional de Producción 2020-2021 en Nicaragua.\_
10. Prasanth S. Potencial del polvo de cáscara de huevo como sustitución de la cal en la estabilización de suelos-IJAERS-Vol4, Número-8, Aug- 2017. \_
11. Rodríguez Herrera L.F. (2016). La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación.
12. Sinclair López, Stephanie de los Ángeles, Pacheco Sánchez, Anielka Patricia (2016); Trabajo monográfico; Evaluación de Propiedades Físico-Mecánicas y Durabilidad de Morteros Geopoliméricos sintetizados a partir de cenizas de cascarillas de Arroz provenientes del trillo Santa Rosa.
13. Valdés, M. (2007). La cáscara del huevo: ¿desecho o valor agregado para la salud humana y la producción avícola? una experiencia cubana. La Habana, Centro de Investigaciones de Bioelementos Naturales BIONAT.

## Webgrafía

1. <http://revalnutricion.sld.cu/index.php/rcan/article/view/848>.
2. <https://www.el19digital.com/articulos/ver/titulo:115677-pollo-y-huevo-avance-plan-nacional-de-produccion-2020-2021-en-nicaragua>
3. <https://ijaers.com/detail/potential-of-egg-shell-powder-as-replacement-of-lime-in-soil-stabilization/>
4. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/25951>
5. [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1964&context=ing\\_civil](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1964&context=ing_civil)
6. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-04552016000200013#:~:text=La%20cascarilla%20de%20arroz%20es,Subrahmanyam%20y%20Kumar%2C%202001](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552016000200013#:~:text=La%20cascarilla%20de%20arroz%20es,Subrahmanyam%20y%20Kumar%2C%202001)).
7. <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/11041>

8. <https://humanidades.com/suelo/>
9. [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf)
10. <https://ribuni.uni.edu.ni/1927/1/80660.pdf>

Anexos.

Anexos A

Tabla 79. *Tabla Resumen total de los resultados de laboratorio.*

| TABLA RESUMEN DE CARÁCTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS DE LOS SUELOS |                         |          |         |                      |    |    |    |                    |                 |                                 |                   |                                 |                               |                  |                |                |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------|----------|---------|----------------------|----|----|----|--------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------|----------------|----------------|
| Muestra                                                         | Clasificación de Suelos |          |         |                      |    |    |    | Proctor Modificado |                 |                                 |                   | C.B.R.                          |                               |                  |                |                |
|                                                                 | Granulometría           |          |         | Límites de Atterberg |    |    | IG | ASTM<br>D2487      | AASHTO<br>M-145 | Densidad seca<br>máxima (kg/m3) | Humedad<br>Óptima | Densidad seca<br>máxima (kg/m3) | Compactación<br>Producida (%) | Expansión<br>(%) | C.B.R.<br>0.1" | C.B.R.<br>0.2" |
|                                                                 | % Gravas                | % Arenas | % Finos | LL                   | LP | IP |    |                    |                 |                                 |                   |                                 |                               |                  |                |                |
| Suelo Natural                                                   | 1.8                     | 20.4     | 77.8    | 53                   | 25 | 28 | 23 | CH                 | A-7-6           | 1763                            | 15                | 1778.1                          | 100.8                         | 5.98             | 1              | 1              |
| Suelo+5% CH                                                     | 0.3                     | 24.9     | 74.8    | 49                   | 25 | 24 | 18 | CL                 | A-7-6           | 1755                            | 17                | 1749.4                          | 99.7                          | 5.95             | 1              | 2              |
| Suelo +5% CCA                                                   | 0                       | 24       | 76      | 50                   | 25 | 25 | 19 | CL                 | A-7-6           | 1666                            | 15.2              | 1645.2                          | 99                            | 5.55             | 1              | 2              |
| Suelo+5% Mixto                                                  | 0.3                     | 24.5     | 75.3    | 50                   | 25 | 25 | 19 | CL                 | A-7-6           | 1706                            | 17.3              | 1686                            | 99                            | 5.78             | 1              | 2              |
| Suelo +10%CH                                                    | 0                       | 23.9     | 76.1    | 47                   | 23 | 24 | 18 | CL                 | A-7-6           | 1746                            | 14.5              | 1752.3                          | 100                           | 5.82             | 2              | 3              |
| Suelo +10%CCA                                                   | 0                       | 26.5     | 73.5    | 48                   | 25 | 23 | 17 | CL                 | A-7-6           | 1637                            | 17.5              | 1627.2                          | 99                            | 6.24             | 2              | 3              |
| Suelo +10%Mixto                                                 | 0                       | 26.5     | 73.5    | 46                   | 23 | 23 | 16 | CL                 | A-7-6           | 1690                            | 16.3              | 1664.1                          | 98                            | 5.71             | 2              | 3              |
| Suelo + 15%CH                                                   | 0                       | 24.2     | 75.8    | 44                   | 23 | 21 | 16 | CL                 | A-7-6           | 1730                            | 15.2              | 1706                            | 99                            | 4.72             | 3              | 4              |
| Suelo +15%CCA                                                   | 0                       | 27.3     | 72.7    | 46                   | 26 | 20 | 15 | CL                 | A-7-6           | 1684                            | 15.8              | 1652.7                          | 98                            | 4.9              | 3              | 3              |
| Suelo + 15% Mixto                                               | 0                       | 25.9     | 74.1    | 47                   | 27 | 20 | 15 | CL                 | A-7-6           | 1610                            | 17                | 1621.6                          | 100.7                         | 4.91             | 3              | 3              |

Fuente: Propia.

## Anexo B

Calicata de 1.20 m de profundidad de un material Arcilloso.



Fuente: Propia

Pulverización de la Cáscara de Huevo

Limpiando impurezas de la ceniza de cáscara de arroz por tamiz N°16.



Fuente: Propia.

Fuente: Propia

Gravedad Específica.

Desairando en el frasco de calibración

Frasco + agua + material ya desairado.



Fuente: Propia.



Límites de Atterberg

Límites con dosificación de CH y CCA



Fuente: Propia.

Fuente: Propia.

Proctor Estandar Modificado.

Cilindro Compactado



Fuente: Propia.

Límites líquidos y Plásticos secos en  
Horno a 110°C



Herramientas de trabajo.



Fuente: Propia.

## Ensayos de CBR

Preparación de muestras con cada uno de los aditivos con sus dosificaciones.



Fuente: Propia.

Preparando la pila donde se van a sumergir los CBR Primer toma de datos del hinchamiento.



Fuente: Propia.

CBR ya prensados, listos para sumergirse en la pila por 96 horas.



Fuente: Propia.

Primer toma de datos del hinchamiento



Fuente: Propia.