

Universidad de los Andes  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados  
**CIACUA**



**CÁTEDRA PAVCO**

**DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA  
ABRASIÓN DE TUBERÍAS DE REDES DE  
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE COMO  
CONSECUENCIA DE FUGAS EN CONEXIONES**

**Informe Final**

**Bogotá, Octubre de 2012**



## TABLA DE CONTENIDO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 OBJETIVOS.....   | 2         |
| 1.1.1 <i>Objetivo General</i> .....  | 2         |
| 1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....   | 2         |
| 1.2 CONTENIDO DEL INFORME .....  | 2         |
| 1.3 EQUIPO DE TRABAJO .....  | 3         |
| 1.3.1 PAVCO S.A. ....  | 3         |
| 1.3.2 <i>Universidad de los Andes</i> .....                                      | 3         |
| <b>2. GENERALIDADES DE LA ABRASIÓN .....</b>                                     | <b>5</b>  |
| 2.1 DEFINICIÓN DESGASTE .....  | 5         |
| 2.1.1 <i>Tipos de contacto que generan desgaste</i> .....                        | 5         |
| 2.1.2 <i>Tipos de mecanismos de abrasión</i> .....                               | 6         |
| 2.2 ABRASIÓN EN TUBERÍAS.....  | 8         |
| 2.2.1 <i>Abrasión en Tuberías de drenaje urbano</i> .....                        | 9         |
| 2.2.2 <i>Abrasión en Tuberías de redes de distribución de agua potable</i> ..... | 9         |
| <b>3. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE .....</b>  | <b>12</b> |
| 3.1 SISTEMA ESTRUCTURAL.....   | 12        |
| 3.1.1 <i>Base de soporte</i> .....   | 12        |
| 3.1.2 <i>Tanque</i> .....  | 12        |
| 3.1.3 <i>Tapas Laterales</i> .....   | 14        |
| 3.1.4 <i>Flauta</i> .....  | 16        |
| 3.2 SISTEMA HIDRÁULICO.....  | 17        |
| 3.2.1 <i>Bomba Hidráulica</i> .....  | 20        |
| 3.2.2 <i>Conexiones hidráulicas</i> .....  | 20        |
| 3.2.3 <i>Filtro</i> .....  | 22        |
| 3.3 EQUIPO DE MEDICIÓN .....   | 23        |
| 3.3.1 <i>Manómetro Digital</i> .....   | 24        |
| 3.3.2 <i>Manómetro Haenni</i> .....  | 25        |
| 3.3.3 <i>Cámara de Video</i> .....   | 25        |
| 3.3.4 <i>Micrómetro Ultrasónico</i> .....  | 26        |
| 3.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....   | 29        |
| <b>4. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO INICIAL.....</b>                                   | <b>32</b> |
| 4.1 PROCEDIMIENTO .....  | 34        |
| 4.2 RESULTADOS DE LAS GRANULOMETRÍAS .....                                       | 37        |
| 4.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL MATERIAL ABRASIVO.....                           | 40        |
| <b>5. RESULTADOS.....</b>  | <b>42</b> |
| 5.1 PRUEBA NÚMERO 1- TUBERÍA DE 4" EN PVC BIAxIAL .....                          | 45        |
| 5.2 PRUEBA NÚMERO 2- TUBERÍA DE 4" EN PVC BIAxIAL .....                          | 50        |
| 5.2.1 <i>Granulometría del material dentro de la tubería</i> .....               | 54        |
| 5.3 PRUEBA NÚMERO 3. TUBERÍA DE 4" EN PVC BIAxIAL .....                          | 58        |

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DE TUBERÍAS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE COMO CONSECUENCIA DE FUGAS EN CONEXIONES.



|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 5.4       | PRUEBA NÚMERO 4. TUBERÍA DE 4" EN PVC BIAXIAL .....   | 62         |
| 5.5       | PRUEBA NÚMERO 5. TUBERÍA DE 6" EN PVC BIAXIAL .....   | 67         |
| 5.5.1     | <i>Granulometría</i> .....                            | 70         |
| 5.6       | PRUEBA NÚMERO 6. TUBERÍA DE 6" EN PVC BIAXIAL .....   | 73         |
| 5.7       | PRUEBA NÚMERO 7. TUBERÍA DE 6" EN HIERRO DÚCTIL.....  | 78         |
| 5.7.1     | <i>Granulometría</i> .....                            | 81         |
| 5.8       | PRUEBA NÚMERO 8. TUBERÍA DE 6" EN HIERRO DÚCTIL.....  | 84         |
| 5.9       | PRUEBA NÚMERO 9. TUBERÍA DE 8" EN PVC BIAXIAL .....   | 88         |
| 5.9.1     | <i>Granulometría</i> .....                            | 91         |
| 5.10      | PRUEBA NÚMERO 10. TUBERÍA DE 8" EN PVC BIAXIAL.....   | 94         |
| 5.11      | PRUEBA NÚMERO 11. TUBERÍA DE 8" EN POLIETILENO.....   | 98         |
| 5.11.1    | <i>Granulometría</i> .....                            | 101        |
| 5.12      | PRUEBA NÚMERO 12. TUBERÍA DE 8" EN POLIETILENO.....   | 104        |
| 5.13      | PRUEBA NÚMERO 13. TUBERÍA DE 6" EN HIERRO DÚCTIL..... | 111        |
| 5.13.1    | <i>Granulometría</i> .....                            | 116        |
| <b>6.</b> | <b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....                   | <b>119</b> |
| <b>7.</b> | <b>CONCLUSIONES</b> .....                             | <b>125</b> |
| <b>6</b>  | <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....                             | <b>127</b> |



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2-1. Modelos de los tipos de perturbación en los enlaces de fricción. ....  | 6  |
| Figura 2-2. Abrasión de dos cuerpos. ....  | 6  |
| Figura 2-3. Abrasión de tres cuerpos. ....   | 7  |
| Figura 3-1. Tanque de abrasión y su base de soporte. ....  | 12 |
| Figura 3-2. Interior del tanque con una tubería de PVC de 4". ....   | 13 |
| Figura 3-3. Tapa lateral de entrada (vista frontal). ....  | 14 |
| Figura 3-4. Tapa lateral de entrada en funcionamiento. ....  | 15 |
| Figura 3-5. Tapa lateral de entrada (vista lateral). ....  | 15 |
| Figura 3-6. Tapa lateral de salida (vista frontal). ....   | 15 |
| Figura 3-7. Flauta vista lateral. ....   | 16 |
| Figura 3-8. Vista frontal de la flauta. ....   | 16 |
| Figura 3-9. Flauta en modo de operación. ....  | 17 |
| Figura 3-10. Esquema en 3D del montaje del modelo en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes. ....   | 18 |
| Figura 3-11. Esquema de la ubicación del montaje en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes (Vista en Planta). ....                          | 19 |
| Figura 3-12. Motobomba centrífuga usada en el montaje de laboratorio. ....   | 20 |
| Figura 3-13. Curvas características de la bomba usada en las pruebas. ....   | 21 |
| Figura 3-14. Conexión de salida del agua entre el tanque y la manguera de plástico. ....   | 22 |
| Figura 3-15. Entrega del caudal de salida a un vertedero del laboratorio. ....   | 22 |
| Figura 3-16. Malla metálica para albergar el material rocoso que sirve como filtro. ....   | 23 |
| Figura 3-17. Filtro ubicado en su posición de trabajo. ....  | 23 |
| Figura 3-18. Manómetro electrónico en funcionamiento. ....   | 24 |
| Figura 3-19. Manómetro analógico en funcionamiento. ....   | 25 |
| Figura 3-20. Cámara de Video usada en el laboratorio: vista frontal. ....  | 25 |
| Figura 3-21. Cámara de Video en funcionamiento: vista posterior. ....  | 26 |
| Figura 3-22. Micrómetro ultrasónico Electromatic y Gel ultraflux para realizar mediciones de espesor en tuberías de PVC. ....                                    | 26 |
| Figura 3-23. Detalle del área de falla (incluyendo los orificios y la zona desgastada) incluyendo las tres líneas de medición del espesor de la superficie. .... | 28 |
| Figura 3-24. Medición en laboratorio del espesor de la tubería de PVC en la zona desgastada. ....  | 29 |
| Figura 3-25. Proceso de llenado y compactación en una de sus primeras etapas. ....   | 30 |
| Figura 3-26. Proceso de llenado y compactación antes de cubrir la tubería. ....  | 30 |
| Figura 3-27. Proceso de llenado y compactación antes de cubrir totalmente la flauta. ....  | 31 |
| Figura 3-28. Proceso de llenado y compactación estado final. ....  | 31 |
| Figura 4-1. Fotografía de la arena de Subachoque. ....   | 32 |
| Figura 4-2. Fotografía de la arena proveniente del sur de Bogotá. ....   | 32 |
| Figura 4-3. Fotografía de la arena proveniente del Guamo. ....   | 33 |
| Figura 4-4. Fotografía de la arena proveniente de Cáqueza. ....  | 33 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 4-5. Tamices seleccionados para la granulometría. ....  | 34 |
| Figura 4-6. Ejemplo de una de las muestras separadas. ....   | 35 |
| Figura 4-7. Balanza electrónica usada para pesar las muestras. ....  | 35 |
| Figura 4-8. Mezcla dentro de los recipientes y lista para ser procesada en la tamizadora mecánica. ....  | 36 |
| Figura 5-1. Hundimiento de la arena o hundimiento del suelo después de haber puesto a prueba una tubería. ....   | 42 |
| Figura 5-2. Tendencia general de la forma del área de falla (incluye los orificios o perforaciones y la zona desgastada o erosionada). ....  | 43 |
| Figura 5-3. Medición del ancho del orificio (la flauta estaba localizada en la parte derecha de la imagen). ....   | 46 |
| Figura 5-4. Medición del ancho de la zona desgastada (la flauta estaba localizada en la parte derecha de la imagen). ....  | 47 |
| Figura 5-5. Vista del orificio y la zona desgastada de la prueba 1 con relación a una moneda de un centavo de dólar (la flauta estaba localizada en la parte izquierda de la imagen). ....                             | 48 |
| Figura 5-6. Vista del orificio de la prueba número 2 (la flauta estaba localizada en la parte izquierda de la imagen). ....  | 51 |
| Figura 5-7. Vista de la zona desgastada de la prueba número 2 (vista desde aguas abajo hacia la flauta). ....  | 52 |
| Figura 5-8. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 2. ....   | 54 |
| Figura 5-9. Material particulado encontrado dentro de la tubería de la prueba número 2. ...  | 54 |
| Figura 5-10. Imagen del tanque durante el proceso de desmonte de la tubería. (Revisar la parte central de la foto para evidenciar las diferencias del material, esta zona coincide con la posición de la flauta). .... | 56 |
| Figura 5-11. Imagen detallada del material en la zona cercana a la flauta. ....  | 57 |
| Figura 5-12. Vista de la zona desgastada de la prueba 3 (la línea en lápiz representa la posición que ocupaba la flauta). ....   | 60 |
| Figura 5-13. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 3. ....  | 61 |
| Figura 5-14. Vista del orificio de la prueba 4 (la línea en lápiz representa la ubicación de la flauta). ....  | 63 |
| Figura 5-15. Vista de la zona desgastada de la prueba 4 (la flauta se encontraba en la parte superior de la foto). ....  | 64 |
| Figura 5-16. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 4. ....  | 65 |
| Figura 5-17. Tipo de material encontrado en las zonas más cercanas a la flauta. ....   | 66 |
| Figura 5-18. Vista del orificio de la prueba 5 (la flauta se encontraba en la parte izquierda sobre la línea en lápiz). ....   | 68 |
| Figura 5-19. Vista de la zona desgastada de la prueba 5 (la flauta se encuentra en la parte superior izquierda de la imagen). ....   | 69 |
| Figura 5-20. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 5. ....  | 70 |
| Figura 5-21. Foto del material granular encontrado por encima de la tubería una vez terminada la prueba 5. ....  | 72 |
| Figura 5-22. Foto del material granular que ingresó a la tubería. ....   | 72 |



|   |     |
|---|-----|
| Figura 5-23. Vista del orificio de la prueba 6 (la flauta se encontraba en la parte izquierda sobre la línea en lápiz). .....   | 74  |
| Figura 5-24. Vista de la zona desgastada de la prueba 6 (la flauta se encontraba en la parte derecha). .....  | 74  |
| Figura 5-25. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 6. ....   | 76  |
| Figura 5-26. Suelo por encima de la tubería en el montaje de la prueba 6. ....  | 76  |
| Figura 5-27. Vista del orificio de la prueba 7 (la flauta se encontraba en la parte izquierda de la imagen). .....  | 79  |
| Figura 5-28. Vista de la zona desgastada de la prueba 7 (la flauta se encontraba en la parte superior de la imagen). .....  | 80  |
| Figura 5-29. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 7. ....   | 81  |
| Figura 5-30. La Figura A muestra el suelo que quedo por encima de la tubería una vez terminada la prueba 7. La Figura B muestra el suelo que entró a la tubería ensayada en la prueba 7. .... | 82  |
| Figura 5-31. Material por encima de la tubería en la prueba 7. ....   | 83  |
| Figura 5-32. Vista de la zona desgastada en la prueba 8 (la flauta se encontraba en la parte izquierda de la imagen). ....  | 85  |
| Figura 5-33. Oxidación en la pared de la tubería 9 (vista desde la zona superior derecho). ....   | 86  |
| Figura 5-34. Oxidación en la pared de la tubería 9 (vista desde la zona posterior). ....  | 86  |
| Figura 5-35. Vista del hundimiento del suelo en la prueba 8. ....   | 87  |
| Figura 5-36. Material por encima de la tubería en la prueba 8. ....   | 87  |
| Figura 5-37. Vista de la zona desgastada y el orificio de la prueba 9 (la flauta se encontraba en la parte izquierda de la imagen). ....  | 89  |
| Figura 5-38. Vista de la zona desgastada y el orificio de la prueba 9 (la flauta se encontraba en la parte superior de la imagen). ....   | 90  |
| Figura 5-39. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 9. ....   | 91  |
| Figura 5-40. Material encontrado al interior de la tubería de la prueba número 9. ....  | 93  |
| Figura 5-41. Vista del orificio de la prueba 10 (la flauta se encontraba en la parte izquierda de la imagen). .....   | 95  |
| Figura 5-42. Vista de la zona desgastada de la prueba 10 (la flauta se encontraba en la parte derecha de la imagen). .....  | 96  |
| Figura 5-43. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 10. ....  | 97  |
| Figura 5-44. Suelo dentro de la tubería en el montaje de la prueba 10. ....   | 97  |
| Figura 5-45. Vista del orificio y de la zona desgastada de la prueba 11 (la flauta se encontraba en la parte superior de la imagen). .....  | 99  |
| Figura 5-46. Vista de la zona desgastada de la prueba 11 (la flauta se encontraba en la parte izquierda de la imagen). ....   | 100 |
| Figura 5-47. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 11. ....  | 100 |
| Figura 5-48. Suelo cercano a la zona de falla de la prueba 11. ....   | 101 |
| Figura 5-49. Vista de la ubicación inicial de la boquilla de la flauta en las pruebas con tuberías de polietileno. ....   | 105 |



Figura 5-50. Vista de la zona desgastada y el orificio de la prueba 12. La medición del ancho de la región afectada se hace en la parte más angosta. (La flauta se encontraba en la parte superior de la imagen). ..... 106

Figura 5-51. Vista de la zona desgastada y el orificio de falla de la prueba 12 (La flauta se encontraba en la parte derecha de la imagen). ..... 107

Figura 5-52. Vista de la zona desgastada y el orificio de falla de la prueba 12 con relación a una moneda de centavo de dólar (La flauta se encontraba en la parte derecha de la imagen). ..... 107

Figura 5-53. Vista en planta del hundimiento del suelo de la prueba 12. .... 109

Figura 5-54. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 12 en dirección inversa al flujo del chorro de agua..... 110

Figura 5-55. Material encontrado dentro de la tubería de la prueba 12..... 110

Figura 5-56. Vista del orificio y de la zona desgastada de la tubería 13 con relación a una moneda de un centavo de dólar (la flauta estaba ubicada en la parte derecha de la imagen). ..... 112

Figura 5-57. Vista del orificio y de la zona desgastada de la tubería 13 (la flauta estaba ubicada en la parte derecha de la imagen). ..... 113

Figura 5-58. Hundimiento del suelo de la tubería 13. .... 113

Figura 5-59. Ubicación de la flauta en la prueba 13..... 114

Figura 5-60. Ubicación de la flauta en la prueba 8..... 115

Figura 5-61. Estado del hundimiento del suelo tras las primeras 26 horas de la prueba 13. .... 115

Figura 5-62. Material encontrado cerca de la zona de falla, durante el desmontaje de la tubería 13..... 116

Figura 5-64. Fotografía del material encontrado dentro de la tubería de la prueba 13. .... 118



## LISTA DE GRÁFICAS

|   |     |
|---|-----|
| Gráfica 4-1. Curva granulométrica de la arena proveniente de Subachoque. ....   | 37  |
| Gráfica 4-2. Curva granulométrica de la arena proveniente del Sur de Bogotá. ....   | 37  |
| Gráfica 4-3. Curva granulométrica de la arena proveniente del Guamo. ....   | 38  |
| Gráfica 4-4. Curva granulométrica de la arena proveniente de Cáqueza. ....  | 38  |
| Gráfica 4-5. Curva granulométrica de la arena mezclada. ....  | 38  |
| Gráfica 4-6. Curva granulométrica según las especificaciones entregadas por PAVCO<br>MEXICHEM. ....   | 39  |
| Gráfica 5-1. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 1 con áreas en tres<br>dimensiones (la flauta estaba ubicada en el punto 16). ....          | 49  |
| Gráfica 5-2. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 2 con áreas en tres<br>dimensiones (la flauta estaba ubicada en el punto 16). ....          | 52  |
| Gráfica 5-3. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 2 con superficie en tres<br>dimensiones (la flauta estaba ubicada en el punto 16). ....     | 53  |
| Gráfica 5-4. Curva granulométrica de la mezcla original. ....   | 55  |
| Gráfica 5-5. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 3 con áreas en tres<br>dimensiones (la flauta estaba ubicada en el punto 16). ....          | 59  |
| Gráfica 5-6. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 3 con superficie en tres<br>dimensiones (la flauta estaba ubicada en el punto 16). ....     | 59  |
| Gráfica 5-7. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 4 con áreas en tres<br>dimensiones (la flauta se encontraba en el punto 16). ....           | 64  |
| Gráfica 5-8. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 5 con áreas en tres<br>dimensiones (la flauta se encuentra en el punto 16). ....            | 69  |
| Gráfica 5-9. Curva granulométrica del material encontrado en la tubería de la prueba 5. ....  | 71  |
| Gráfica 5-10. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 6 con áreas en tres<br>dimensiones (la flauta estaba localizada en el punto 16). ....      | 75  |
| Gráfica 5-11. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 6 con superficie en tres<br>dimensiones (la flauta estaba localizada en el punto 16). .... | 75  |
| Gráfica 5-12. Curva granulométrica del material encontrado en la tubería de la prueba 7. ....   | 82  |
| Gráfica 5-13. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 9 con áreas en tres<br>dimensiones (la flauta estaba localizada en el punto 16). ....      | 90  |
| Gráfica 5-14. Curva granulométrica del material encontrado al interior de la tubería de la<br>prueba número 9 y de la mezcla original. ....                 | 92  |
| Gráfica 5-15. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 10 con áreas en tres<br>dimensiones (la flauta estaba localizada en el punto 1). ....      | 96  |
| Gráfica 5-16. Curva granulométrica de la mezcla original y de la muestra de la prueba 11.<br>.....  | 102 |
| Gráfica 5-17. Curva granulométrica de la prueba 13. ....  | 117 |



## LISTA DE TABLAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 4-1. Requerimientos de PAVCO para la arena que hará parte de la investigación de abrasión por fugas.....     | 34  |
| Tabla 4-2. Registro de los porcentajes que pasan por cada uno de los tamices para las distintas muestras.....      | 39  |
| Tabla 4-3. Coeficientes de las mezclas.....  | 39  |
| Tabla 4-4. Clasificación de materiales según su tamaño.....  | 40  |
| Tabla 5-1. Resumen de las pruebas. ....  | 44  |
| Tabla 5-2. Resumen de los resultados de la prueba número 1. ....   | 45  |
| Tabla 5-3. Resumen de los resultados de la prueba número 2. ....   | 50  |
| Tabla 5-4. Análisis Granulométrico de la mezcla encontrada.....  | 55  |
| Tabla 5-5. Resumen de los resultados de la prueba número 3. ....   | 58  |
| Tabla 5-6. Resumen de los resultados de la prueba número 4. ....   | 62  |
| Tabla 5-7. Resumen de los resultados de la prueba número 5. ....   | 67  |
| Tabla 5-8. Análisis granulométrico de la mezcla encontrada en la tubería usada en la prueba 5. ....                | 71  |
| Tabla 5-9. Resumen de los resultados de la prueba número 6. ....   | 73  |
| Tabla 5-10. Resumen de los resultados de la prueba número 7. ....  | 78  |
| Tabla 5-11 Análisis granulométrico de la mezcla encontrada en la tubería usada en la prueba 7. ....                | 81  |
| Tabla 5-12. Resumen de los resultados de la prueba número 8. ....  | 84  |
| Tabla 5-13. Resumen de los resultados de la prueba número 9. ....  | 88  |
| Tabla 5-14. Resumen de los resultados del análisis granulométrico de la prueba número 9. ....                      | 92  |
| Tabla 5-15. Resumen de los resultados de la prueba número 10. ....   | 94  |
| Tabla 5-16. Resumen de los resultados de la prueba número 11. ....   | 98  |
| Tabla 5-17. Análisis granulométrico del material encontrado al interior de la tubería de la prueba número 11. .... | 102 |
| Tabla 5-18. Resumen de los resultados de la prueba número 12. ....   | 104 |
| Tabla 5-19. Resumen de los resultados de la prueba número 13. ....   | 111 |
| Tabla 5-20. Dimensiones del hundimiento del suelo después de 26 horas de prueba.....                               | 116 |
| Tabla 5-21. Análisis granulométrico de la prueba 13.....   | 117 |



## 1. INTRODUCCIÓN

---

La abrasión puede ser definida como; “*la acción mecánica de rozamiento provocada por una partícula más dura, que ocasiona desgaste y erosión a la superficie en contacto*”. En pocas palabras, es el roce directo de uno o varios cuerpos con otro. Las tuberías que componen los sistemas de alcantarillado y las redes de distribución de agua potable no son ajenas a este problema. Se sabe que las primeras sufren desgaste debido a los sedimentos que transportan junto con el agua, y de las segundas, aunque no se tenía certeza se creía que estaba relacionado, entre otras, con las fugas en las conexiones, la presencia de roedores y también con las partículas sólidas transportadas en su interior.

Independientemente de cuáles sean las causas del fenómeno, las consecuencias pueden alejar la red de su funcionamiento óptimo. En primer lugar, es evidente que el caudal que se fuga a través de estas fallas representa una pérdida monetaria y ambiental para el operador, pues no sólo está dejando de facturar parte de su producción sino que está desperdiciando un recurso escaso. Por otro lado, la presión interna de la red podría interactuar con la falla haciéndola crecer, debilitando así la resistencia estructural del tubo hasta el punto de ponerla en riesgo de estallar. Por último, la interacción entre el agua fugada y el material a su alrededor puede afectar la resistencia del suelo, poniendo en peligro la estabilidad de las estructuras en la superficie.

Investigaciones previas han demostrado que materiales como el PVC no son fuente de nutrientes para animales; por ende éstos últimos no representan una amenaza a la integridad de las tuberías. Asimismo, en sistemas de distribución de agua potable la presencia de partículas sólidas es mucho menor que en sistemas de drenaje; por ende éstas no representan una amenaza evidente para la superficie interior. La última posibilidad, que para muchos es la principal y única responsable, se da cuando una mala instalación de los tubos no garantiza hermetismo en la conexión, permitiendo que a través de ella se fugue parte del caudal transportado.

Este chorro de agua, que evidentemente sale expulsado a altas presiones, se mezcla con el material que recubre la tubería y se convierte en un poderoso agente abrasivo que al desplazarse paralelamente a la pared, consigue desgastarla y hasta puede llegar a romperla. El orificio inicial puede crecer con el tiempo debido al mismo fenómeno, gracias a la presión interna, o también como consecuencia de movimientos de tierra alrededor del tubo. Esta hipótesis parecía tener bastante lógica, pero a la fecha no había habido un estudio que mostrara evidencia empírica de este evento.

Con el objetivo de suplir esta falencia, la presente investigación construyó un modelo en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes (Bogotá, Colombia), que recreó las condiciones reales de una tubería enterrada in situ. Éste constaba de un tanque que albergaba en su interior el prototipo a probar recubierto de material granular, y también un accesorio en acero conectado a la red interna del laboratorio, que transformaba el flujo en una pequeña lámina de agua que salía a grandes presiones de forma paralela a la superficie del tubo. El estudio encontró que los chorros con determinadas condiciones de entrada,



pueden erosionar considerablemente estas paredes hasta el punto de romperlas completamente, formando así pequeños orificios en la tubería.

Las pruebas se llevaron a cabo usando material granular comúnmente utilizado para la instalación de tuberías en Bogotá (Colombia), pero seguramente cualquier mezcla usada en otro lugar conllevará resultados similares. Esto se debe a que aún cuando la granulometría de las partículas sólidas es una variable de entrada que afecta algunos de los resultados finales, como el tiempo de falla y las características del orificio, difícilmente influye en el hecho de que se rompa o no la pared. El material de la tubería tampoco parece ser una limitante; en la presente investigación se probaron prototipos de PVC, hierro dúctil y polietileno, y los 3 fallaron después de un tiempo determinado. Las condiciones del experimento variaban para cada uno de los casos, pero ninguno de ellos estuvo por fuera de los rangos de trabajo de una red de distribución real.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo General

Evaluar la posibilidad de que fugas en acometidas domiciliarias y conexiones entre tuberías de distribución de agua potable, permitan el escape de un chorro a alta presión, que al mezclarse con el material de recubrimiento pueda afectar la superficie del tubo y hasta llegue a crear orificios en la misma.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar la resistencia a la abrasión externa del PVC, el polietileno y el hierro dúctil, como función del diámetro de la tubería y la presión del chorro de agua.
- Estudiar las características del proceso de falla y las propiedades de los orificios generados, como función del material, el diámetro de la tubería y la presión del chorro.
- Describir los efectos de la interacción entre el agua a altas presiones y el material de recubrimiento, en los lugares cercanos a la tubería y en puntos mucho más alejados de ella.

## 1.2 Contenido del Informe

Este informe consta de varias secciones en las que se describen las distintas etapas que conformaron la presente investigación. Para comenzar se introduce el tema de estudio, se hace una breve descripción del mismo y se mencionan las consecuencias negativas que tiene este fenómeno. Posteriormente, se mencionan algunos aspectos fundamentales de la abrasión que son necesarios para entender el experimento realizado. A continuación se



describe el material granular utilizado en las pruebas, y el modelo físico construido para recrear los eventos que se presentan en las redes reales.

Una vez se ha presentado esta información, se muestran los principales resultados hallados en el laboratorio. En la siguiente sección se analizan estos datos, se presentan las principales conclusiones de la investigación, y se mencionan algunas recomendaciones que sirven para que estudios posteriores profundicen el análisis y permitan entender mucho mejor el fenómeno. Posteriormente se presentan las fuentes bibliográficas referenciadas a lo largo del informe, las cuales fueron esenciales para el desarrollo del proyecto. En último lugar, se presenta la sección de anexos en la que se puede revisar la totalidad de los datos medidos en las distintas pruebas, así como distintas gráficas que sirven para entender esta información.

### **1.3 Equipo de Trabajo**

El equipo de trabajo del proyecto “Determinación de la resistencia a la abrasión en tuberías de redes de distribución de agua potable como consecuencia de fugas en conexiones”; estuvo conformado por personal de PAVCO S.A. y un equipo académico de la Universidad de los Andes. Las personas vinculadas al proyecto se mencionan a continuación.

#### **1.3.1 PAVCO S.A.**

##### **Presidente Tubosistemas MEXICHEM de Colombia**

Carlos M. González Vega

##### **Vicepresidente Comercial**

Ernesto Guerrero Molina

##### **Gerente Técnico**

Enrique González.

##### **Gerente Técnico de Infraestructura**

Inés Elvira Wills.

#### **1.3.2 Universidad de los Andes**

##### **Director del Proyecto**

Ing. Juan G. Saldarriaga Valderrama.



**Asistentes Graduados**

Ing. Juan Sebastián Ossa Moreno

**Monitores de Investigación**

Juan Pablo París Valencia

Luisa Fernanda Torres Dueñas

Camilo Salcedo

Santiago Botía

Juan Pablo Duarte

**Técnico de Laboratorio**

John Adalberto Calvo Ovalle



## 2. GENERALIDADES DE LA ABRASIÓN

---

### 2.1 Definición desgaste

El desgaste está definido como el daño a una superficie sólida. Generalmente, este proceso se produce gracias al movimiento relativo entre una superficie y un cuerpo en contacto, y puede llegar a generar pérdidas progresivas de material. Existen 4 tipos de desgaste: abrasivo, adhesivo, corrosivo y por fatiga (Bayer, 1994). De estos, el más común es el desgaste debido a la abrasión, ya que en el 63% de los casos en los que se presenta daño en un material, este es el responsable (Harsha & Tewari, 2003).

#### 2.1.1 Tipos de contacto que generan desgaste

Existen 5 tipos de contacto que pueden generar cualquiera de las 4 formas de desgaste; abrasión, adhesión, corrosión o fatiga. A continuación se profundizará en ellos para entender cuáles de éstos son los más relevantes para la presente investigación.

- **Contacto Elástico:**  
Este tipo de contacto genera desplazamiento elástico del material, debido a que no existen esfuerzos lo suficientemente grandes para superar el límite de fluencia en el área de contacto.
- **Contacto Plástico:**  
Se da cuando el esfuerzo inducido supera el límite de fluencia del material base (la superficie), y gracias a esto, la zona del material donde se da el impacto se plastifica. No hay pérdida de material por desprendimiento ni fractura.
- **Micro-corte:**  
Se produce cuando el esfuerzo de contacto es lo suficientemente grande para producir una falla en la superficie, depende en gran medida de la velocidad y del medio en el que se encuentre la partícula abrasiva.
- **Perturbación de la adhesión:**  
Este tipo de contacto no causa un daño físico directo, pero contribuye a la deformación y al aumento de los esfuerzos de contacto del material base. Esto suele ser despreciable en desgaste por abrasión, pero produce efectos notorios cuando se habla de desgaste por fatiga.
- **Ruptura Cohesional:**  
Este tipo de contacto provoca rasgaduras a profundidad en el material base, generando así una variación en el relieve superficial y provocando desprendimiento de la pared.

Para el caso de desgaste por abrasión, los tipos de contacto de mayor relevancia son la ruptura cohesional y el micro-corte. A continuación, en la **Figura 2-1** se ilustran los tipos de contacto citados anteriormente.

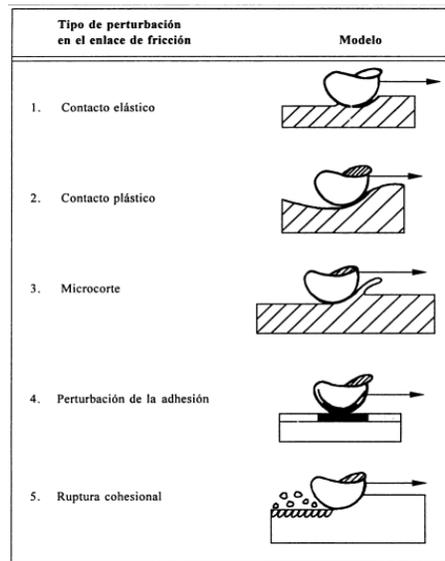


Figura 2-1. Modelos de los tipos de perturbación en los enlaces de fricción. Tomado de: (Martínez Pérez, 2002).

### 2.1.2 Tipos de mecanismos de abrasión

El desgaste abrasivo está definido por la ASTM G40-10b como el desgaste debido a partículas o protuberancias de alta dureza, las cuales son forzadas a desplazarse en contra de una superficie sólida (ASTM, 2012). Este deslizamiento o rodamiento de las partículas sobre la superficie causa distintos tipos de daño según el contacto que se dé (Martínez Pérez, 2002). Existen distintos mecanismos para generar la abrasión; sin embargo, los principales son abrasión de dos cuerpos y de tres cuerpos.

En la *abrasión de dos cuerpos*, el desgaste es causado por protuberancias o partículas en una superficie que se deslizan sobre otra, siendo la segunda menos resistente que la primera. Este tipo de abrasión se puede dar en tuberías, en maquinarias de uso agrícola, en bombas manuales de aguas residuales, entre otras. Este tipo de comportamiento es el más común, y por tanto el más conocido y modelado. A continuación se ilustra un ejemplo de este tipo de abrasión, en el cual se puede apreciar el daño provocado en un material.

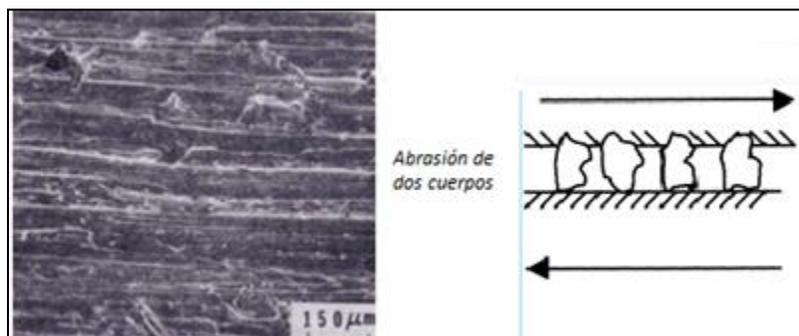


Figura 2-2. Abrasión de dos cuerpos. Tomado de : (Misra & Finnie, 1979).



Dentro de este mecanismo existe un subgrupo que se denomina *abrasión de bajo esfuerzo*. Éste está definido como el desgaste que ocurre cuando las partículas sólidas impactan ligeramente el material, es decir con un ángulo de incidencia pequeño (menor a 15 grados). En este caso, las partículas abrasivas no suelen fragmentarse durante su interacción con la superficie, y el tipo de daño que generan son ralladuras y micro-cortes a lo largo del material. Los factores que determinan la magnitud de este tipo de abrasión son: la velocidad, las características de las partículas y la resistencia de la superficie sólida (Steels founder's of america ans ASM international, 1955).

A este tipo de mecanismo abrasivo también se le conoce como abrasión de rayado y es el mecanismo primario de daño en el 80 y 90% de todos los desgaste tribológicos<sup>1</sup>. Este es el tipo de abrasión que se espera encontrar en tuberías de redes de distribución de agua potable como consecuencia de fugas en conexiones. Es importante mencionar que para el caso de metales, estas tasas de desgaste también se ven afectadas por la micro estructura del material (contenido de carbón, carburos, fases de dureza, entre otros) (Viswanath & Vijayarangan, 2010).

Adicionalmente al mecanismo de abrasión descrito anteriormente, existe también otro subgrupo al cual se le conoce como abrasión por alto esfuerzo. Su principal diferencia con el anterior, es el ángulo de incidencia con el cual impacta la partícula abrasiva a la superficie. Sin embargo, en este no se profundizará ya que no se espera esté presente en los ensayos realizados durante esta investigación.

La *abrasión de tres cuerpos*, en cambio, es la situación en la cual las partículas están parcialmente aprisionadas entre dos superficies sólidas. Y de esta forma, en algunos momentos están libres para rodar y deslizarse, y en otros transmiten los esfuerzos desgastando la superficie más débil. Esto es común en bombas verticales de aguas residuales y en situaciones de pulido de superficies (Harsha & Tewari, 2003).

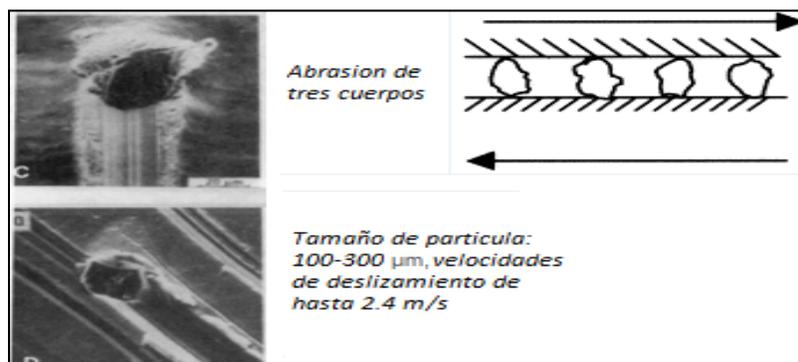


Figura 2-3. Abrasión de tres cuerpos. Tomado de: (Zum Gahr, 1981).

<sup>1</sup> La tribología es la ciencia que estudia el rozamiento entre los cuerpos sólidos, el desgaste y la lubricación.



Es importante mencionar que la tasa de remoción de material de la abrasión de 3 cuerpos esta un orden de magnitud por debajo a la abrasión de dos cuerpos. Esto se debe a que en la primera, las partículas abrasivas permanecen rodando y deslizándose libremente entre las superficies sólidas durante un 90% del tiempo. Teniendo en cuenta esta información, y las características de las tuberías de alcantarillado y de redes de distribución de agua potable, el tipo de abrasión esperada será, por lo general, la de dos cuerpos (Harsha & Tewari, 2003).

## 2.2 Abrasión en Tuberías.

La abrasión en tuberías se puede clasificar en dos grupos: abrasión interna y abrasión externa. Para saber cuándo se da una u otra, se debe revisar el tipo de sistema de tuberías en el que se esté trabajando, ya sea una red de alcantarillado o una red de distribución de agua potable, pues dependiendo de su función puede variar la relación que se tiene con distintos tipos de partículas sólidas. Otros de los factores que determinan las características del fenómeno en tuberías son: el tipo de abrasivo que se esté manejando, la velocidad del flujo que está causando el movimiento de las partículas, y el material de la tubería.

Para el caso de tuberías en materiales metálicos, es importante mencionar que la abrasión está altamente relacionada con la corrosión. Esto se debe a que el primer fenómeno es un precursor del segundo, sobre todo en tuberías donde hay un flujo constante de agua y otros residuos. Para este caso específico, la corrosión se da debido a que en el interior o alrededor de los tubos, hay presencia de partículas, suelos y agua con contenidos ácidos y algunos químicos, (Lester, 1998).

Para el caso de los polímeros, *a priori* se piensa que tienen una alta resistencia a la abrasión y a la corrosión. Esto se debe a que su estructura molecular se asemeja bastante a un trampolín, en el que la mayoría de las partículas abrasivas rebotan en vez de incrustarse; de esta forma se convierten en un material predilecto para el transporte de material abrasivo. De todos modos, es importante tener en cuenta que un óptimo desempeño a largo plazo depende también de un buen diseño de la red, y de un proceso de instalación adecuado. De otros materiales, como el PVC bi-orientado, se espera un comportamiento sobresaliente teniendo en cuenta que el reordenamiento de sus partículas, busca aumentar la resistencia ante los efectos de cualquier agente externo.

En cuanto al tipo de materiales que se pueden encontrar en las mezclas abrasivas, la arena (compuesta en su mayoría por cuarzo  $\text{SiO}_2$ ) es el componente más común, y al mismo tiempo es la principal causante de abrasión debido a su alta dureza (7 en la escala de Mohs). Esta última característica le permite causar daño a todos aquellos materiales con menor dureza, entre los cuales se incluye gres, PVC, polietileno y acero (Houben, 2007). No obstante, es importante tener en cuenta que esta información está basada en estudios internacionales, y es posible que las características del medio local hagan variar estas condiciones.



### 2.2.1 Abrasión en Tuberías de drenaje urbano.

La abrasión en tuberías de drenaje urbano se presenta dentro de las mismas y se clasifica como abrasión interna. Las causas del fenómeno en este medio, están relacionadas con la presencia de los sedimentos que se transportan normalmente junto con las aguas residuales o pluviales. Las consecuencias del mismo son: la disminución en el grosor de las paredes y eventualmente su fractura, lo que se traduce en pérdidas de resistencia y de calidad en las características hidráulicas del ducto.

La vulnerabilidad de esta clase de tuberías frente a la abrasión depende de las propiedades del material del cual están hechas, las características del flujo interno y las características de los sedimentos que transporta. Dentro de este último grupo, las propiedades más importantes son: la masa, la velocidad de desplazamiento, la forma (puntas afiladas incurren en más daño que partículas de forma circular debido a que la fuerza es transmitida en una menor área), el número de partículas por unidad de tiempo y la diferencia entre su dureza y la de la superficie.

En estos casos la abrasión suele ser un problema considerable, y más aun si se tienen sistemas de saneamiento urbano con tiempos de operación prolongados y con flujo a grandes velocidades<sup>2</sup>. Debido a la gran complejidad del problema, existen distintos métodos para medir este fenómeno en tuberías de drenaje urbano. El más conocido es el método Darmstadt<sup>3</sup>; sin embargo, existen algunos otros como la prueba con Disco Bohn y la prueba realizada por la universidad de Texas en Arlington<sup>4</sup>. Todos estos ensayos simulan tuberías de sistemas de alcantarillados, y son la base para estudios de abrasión en distintos tipos de materiales<sup>5</sup>.

### 2.2.2 Abrasión en Tuberías de redes de distribución de agua potable.

Para el caso de tuberías en redes de distribución de agua potable, el problema de abrasión interna es poco frecuente debido a que las plantas de potabilización tienen estrictos códigos para el saneamiento del recurso hídrico. Por esta razón, es bastante difícil encontrar partículas de gran tamaño fluyendo por la tubería, y por lo tanto, los daños en estos sistemas tienden a provenir de otros mecanismos. Uno de ellos se denomina *abrasión externa*; ésta se da en la parte exterior de la superficie de las tuberías y se relaciona con el

<sup>2</sup> En sistemas de saneamiento y agua potable el RAS 2012 reglamenta la velocidad máxima de estos sistemas para reducir el riesgo de abrasión. El valor máximo estipulado está en 6 m/s. (Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, 2012)

<sup>3</sup> Método el cual consiste en simular el paso de flujo a través de una tubería de alcantarillado. Este método está regulado por la Norma EN-295-3 de 1991.

<sup>4</sup> Prueba mandada hacer por la Asociación Americana de Tubos de Concreto para probar la resistencia a la abrasión de un nuevo tubo de concreto que contenía fibra celulosa (American Concrete Pipe Association, 2005).

<sup>5</sup> La Cátedra PAVCO ha realizado distintos estudios de la resistencia a la abrasión en tuberías de PVC NOVAFORT y NOVALOC, concreto, acero y gres vitrificado.



suelo que está en contacto con ella, y con posibles fugas de agua a lo largo de la red. Debido a esto, la naturaleza del fenómeno cambia drásticamente en comparación con la que se presenta en sistemas de alcantarillado. Por ende, a la hora de estudiar este tipo de redes se deben utilizar otro tipo de métodos, que entre otras, tengan en cuenta las diferentes características granulométricas de cada caso<sup>6</sup>.

Centrando el análisis en los materiales usados para construir este tipo de redes, se podría pensar en primer lugar que gracias a que las conexiones de tuberías de polietileno se hacen por termofusión o electrofusión, las posibilidades de que éstas presenten fugas son bajas, y por ende las probabilidades de presentar abrasión externa son reducidas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que estos procesos son bastante complejos, por lo tanto puede darse un descuido en el proceso constructivo. En consecuencia, puede suceder que debido a instalaciones inadecuadas se den fugas que faciliten la abrasión en la parte externa de la tubería. De esta forma, la pared se desgastaría como cualquier otra y podría llegar a fracturarse, esto permitiría que parte del caudal se pierda en estos orificios, o que a través de ellos entre agua del suelo circundante contaminando el interior (Zlokovitz & Juran, 2005).

Adicional a la abrasión externa, algunos investigadores han propuesto la hipótesis de que el ataque de roedores a las tuberías (especialmente a las de PVC), puede representar una amenaza considerable para el estado de este tipo de redes. Sin embargo, esta posibilidad se puede descartar gracias un estudio realizado en 1955 en la ciudad de Ann Harbor (Michigan, Estados Unidos), por la National Sanitation Foundation de Estados Unidos (NSF).

Esta investigación buscaba, en general, determinar la susceptibilidad de este tipo de tuberías frente a ambientes agresivos. En una de las pruebas, se instalaron secciones de PVC en las aberturas de las guaridas de los roedores, separándolos así de sus fuentes de agua y comida. Las ratas fueron alimentadas con raciones limitadas para mantenerlas vivas pero con apetito, y de esta forma fueron presionadas a permanecer en busca de nutrientes durante el periodo que duró el experimento (1 mes).

Al final del estudio, se encontró que las ratas intentaron atravesar las secciones de PVC únicamente en los lugares donde éstas interferían con el alimento, sin embargo, nunca hubo una penetración total en el material. De otro lado, en los lugares donde la tubería no obstruía el acceso a la comida, ésta no sufrió ningún tipo de ataque. Con base en estos resultados, el estudio concluyó que el PVC no es una fuente de nutrientes para los animales, y en consecuencia ellos nunca la atacarán prolongadamente (National Sanitation Foundation, 1955).

---

<sup>6</sup> La granulometría detallada de los suelos usados para este estudio se presentará en otra sección del presente documento.



Habiendo descartado la posibilidad de que el PVC sea atacado por roedores, sólo resta analizar el efecto de la abrasión externa. Éste es precisamente el objetivo de la presente investigación, a cargo de la Universidad de los Andes en conjunto con PAVCO S.A. A lo largo de este estudio se evalúa la posibilidad de que fugas en conexiones entre tuberías, permitan el escape de chorros de agua a alta presión que al mezclarse con el material de recubrimiento, puedan erosionar la superficie del tubo (abrasión externa), lo suficiente para llegar a crear orificios en el mismo.

Para cumplir este objetivo se construyó un modelo en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes (Bogotá, Colombia), que recreó las condiciones reales de una tubería enterrada in situ. En éste se simuló la presencia de una fuga por medio de un accesorio en acero (denominado flauta durante la investigación), que estaba conectado a la red interna de laboratorio. Esta flauta transformaba el flujo de entrada en una pequeña lámina de agua que salía a grandes presiones de forma paralela a la superficie del tubo; pero que en ningún momento llegaba a tocar directamente la tubería, tal como sucede en el caso real. De esta forma, el desgaste no es causado por el impacto del chorro sino por el movimiento que éste genera en el material que rodea al tubo.

Las pruebas se realizaron en tuberías de distintos materiales como: PVC, hierro dúctil y polietileno. El rango de las presiones de entrada iba desde 0.5 hasta 2 Bar, y variaba dependiendo del tipo de material que se estaba probando. Asimismo, a la hora de confinar el tubo simulando una posición bajo tierra, se usó una mezcla granular comúnmente utilizada en Bogotá (Colombia) para este tipo de trabajos; en una sección posterior se dará más información de la misma.



### 3. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE

En este capítulo se describe en forma detallada el montaje instalado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes, en el que se llevaron a cabo los ensayos de abrasión externa en tuberías de PVC, Hierro Dúctil y Polietileno. Se describen los componentes estructurales, hidráulicos, los equipos de medición y también el procedimiento experimental.

#### 3.1 Sistema Estructural

El sistema estructural consta de una base que soporta el montaje, un tanque, una tapa superior y dos laterales, todas ellas removibles. Las dimensiones externas del modelo son 0.75 m de alto, 2,50 m de largo y 0,70 m de ancho.

##### 3.1.1 Base de soporte

La base está construida con ángulos de 2" x 1/4" con sus respectivos refuerzos, anclajes para fijar al piso y pintura anticorrosiva que la protege del agua. La base soporta y eleva al tanque 0,75 m desde el suelo aproximadamente. En la **Figura 3-1** se tiene una vista general, tanto del soporte como de la parte externa del tanque.



Figura 3-1. Tanque de abrasión y su base de soporte.

##### 3.1.2 Tanque

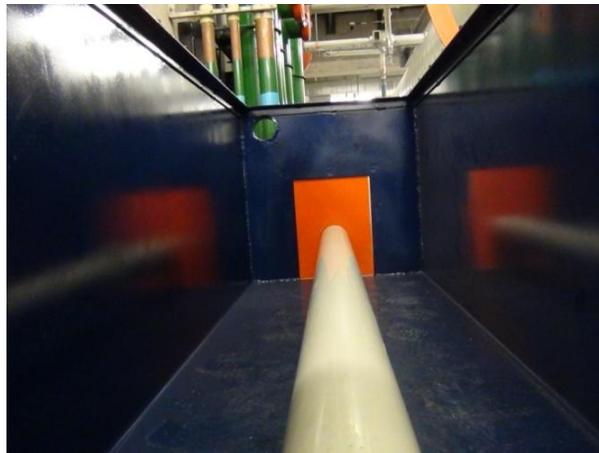
El tanque está construido con láminas de acero Hot Rolled (Lámina en Caliente) de 6.5 mm de espesor. En la parte superior hay una sección horizontal de 3 cm aproximadamente, donde se encuentran los orificios para ubicar los tornillos que permiten asegurar la tapa superior. En cada una de las caras verticales de 0.70 m de ancho, el tanque tiene aberturas de 30 cm de ancho por 40 cm de alto con 10 huecos para ubicar tornillos de 5/8", los cuales



dan el soporte para ubicar las tapas laterales. Éstas pueden ser de entrada o de salida; la descripción de éstas y las diferencias entre unas y otras se especificarán más adelante.

En la parte superior de una de las caras verticales de 0.7 m de ancho, específicamente en la que está al lado contrario de la entrada de agua, se tiene una boquilla de conexión lisa en tubería galvanizada de 3" por donde sale el agua del tanque. En la parte superior del mismo, existe una tapa de 6.5 mm de espesor hecha en el mismo material, que tiene 30 agujeros para fijar los tornillos de 5/8" y lograr así asegurarla al tanque. Debido a su peso, este último accesorio tiene 4 agarraderas en la parte central que permiten fijarlo a un montacargas, para levantarlo y desplazarlo cuando sea necesario. Asimismo, para lograr una impermeabilización óptima se hace uso de cinta de neopreno para las distintas conexiones del tanque con las tapas exteriores. Este material se pone sobre la línea de contacto, se abren orificios para que los tornillos puedan pasar y con la fuerza de estos últimos, la unión se vuelve hermética.

Conforme avanzaron las pruebas se requirió aumentar la presión de entrada del agua, razón por la cual fue necesario reforzar el tanque y la tapa superior para que resistieran los esfuerzos generados por las nuevas condiciones internas. Para el primer objeto, las modificaciones consistieron en soldar ángulos de 1 1/2" x 3/16" en dos partes de sus paredes verticales para aumentar su rigidez. En el segundo caso se colocaron 2 ángulos de 1 1/2" x 3/16" en los extremos de mayor longitud, y luego 4 más, distribuidos equitativamente de forma perpendicular a los anteriores. En la **Figura 3-2** se tiene una vista interna del tanque destapado antes de instalar los refuerzos, en ella se pueden ver las distintas partes mencionadas anteriormente. En la **Figura 3-1** se tiene una vista general de la tapa superior.



**Figura 3-2.** Interior del tanque con una tubería de PVC de 4".



### 3.1.3 Tapas Laterales

Se construyeron 6 tapas removibles de 40 cm de ancho por 50 de alto, construidas en lámina H.R de ¼", y con pintura anticorrosiva para protegerlas del agua. Existen 2 tipos de tapas, las de entrada y las de salida. Cada una de las primeras, tiene soldado un pequeño tubo que conecta el interior del tanque con el exterior, y gracias a él entra el agua al tanque desde el sistema de recirculación del laboratorio (Ver **Figura 3-3** y **Figura 3-4**). En su otro extremo, se tiene una superficie corrugada donde se ubicará un accesorio denominado *flauta*, la cual será descrita a profundidad más adelante. Además de esto, estas tapas también tienen un tubo de mayor diámetro (4", 6", 8") en la cara interior, donde se conectará la tubería a probar.

La forma en que se conectan estas tapas con los tubos de PVC es por unión mecánica espigo por campana, con los tubos en hierro dúctil se usaron uniones Dresser, y los de polietileno simplemente se introdujeron y se sellaron las uniones con silicona fría (Ver **Figura 3-5**). Las 3 tapas restantes tienen únicamente un tubo hacia la cara exterior que sirve como el segundo apoyo de la tubería, y como se mencionó anteriormente tiene un tamaño determinado para servir a los tres tipos de tubería que se probarán. Éstas últimas no se deben conectar al tubo, sino que éstos pasan por el interior de las primeras y las uniones se sellan con silicona fría (ver **Figura 3-6**).

Es importante mencionar que el diseño de las tapas laterales se hizo de esta forma para poder tener una visión del interior de la tubería en todo momento, y así poder saber fácilmente en qué momento falla.



**Figura 3-3.** Tapa lateral de entrada (vista frontal).



**Figura 3-4. Tapa lateral de entrada en funcionamiento.**



**Figura 3-5. Tapa lateral de entrada (vista lateral).**



**Figura 3-6. Tapa lateral de salida (vista frontal).**

### 3.1.4 Flauta.

El objeto que a lo largo de esta investigación se denomina *La Flauta*, es una conexión final de la tubería de alimentación del montaje. Como se ha mencionado anteriormente, la tapa lateral de entrada tiene un tubo de 3", en el mismo material, que se encarga de recibir el agua del sistema del laboratorio, y en el lado opuesto tiene una superficie roscada que permite conectar la flauta. Este accesorio está hecho en acero y genera un cambio del área de flujo en el conducto; inicialmente se tiene un área circular de 3 pulgadas de diámetro y luego de esta estructura se pasa a una cuadrada, cuyas dimensiones son de 2.30 mm alto x 40.91 mm de ancho. A continuación se presentan dos figuras que buscan ilustrar la forma de la flauta.



**Figura 3-7. Flauta vista lateral.**



**Figura 3-8. Vista frontal de la flauta.**

Es importante mencionar que el diseño de las tapas laterales, las conexiones hidráulicas y la flauta, garantiza que esta última se acerque de manera paralela a la superficie de la tubería para así generar la abrasión en la superficie externa. Es decir que la lámina de agua que sale expulsada por ella no tiene un ángulo de incidencia directo en la superficie del tubo, de esta



forma se recrea de manera más precisa el fenómeno real. Esto último se puede evidenciar en la **Figura 3-9**.

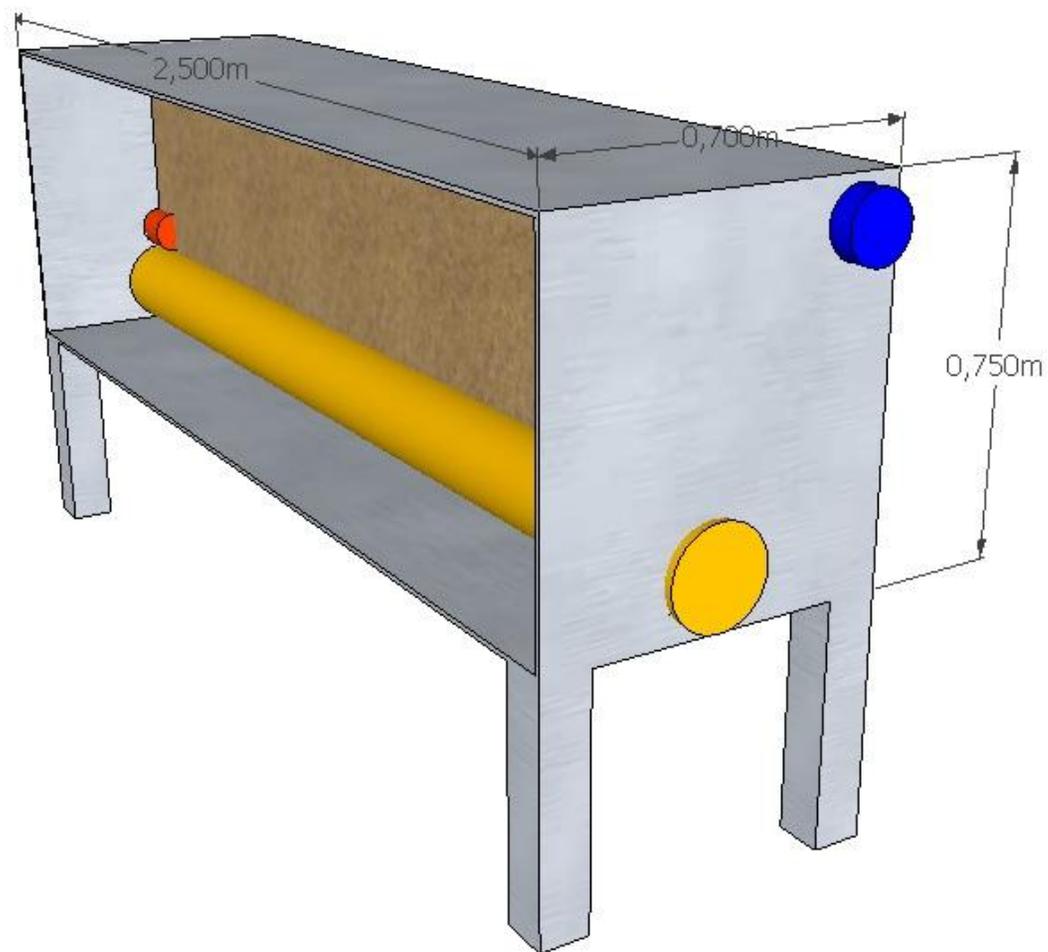


**Figura 3-9. Flauta en modo de operación.**

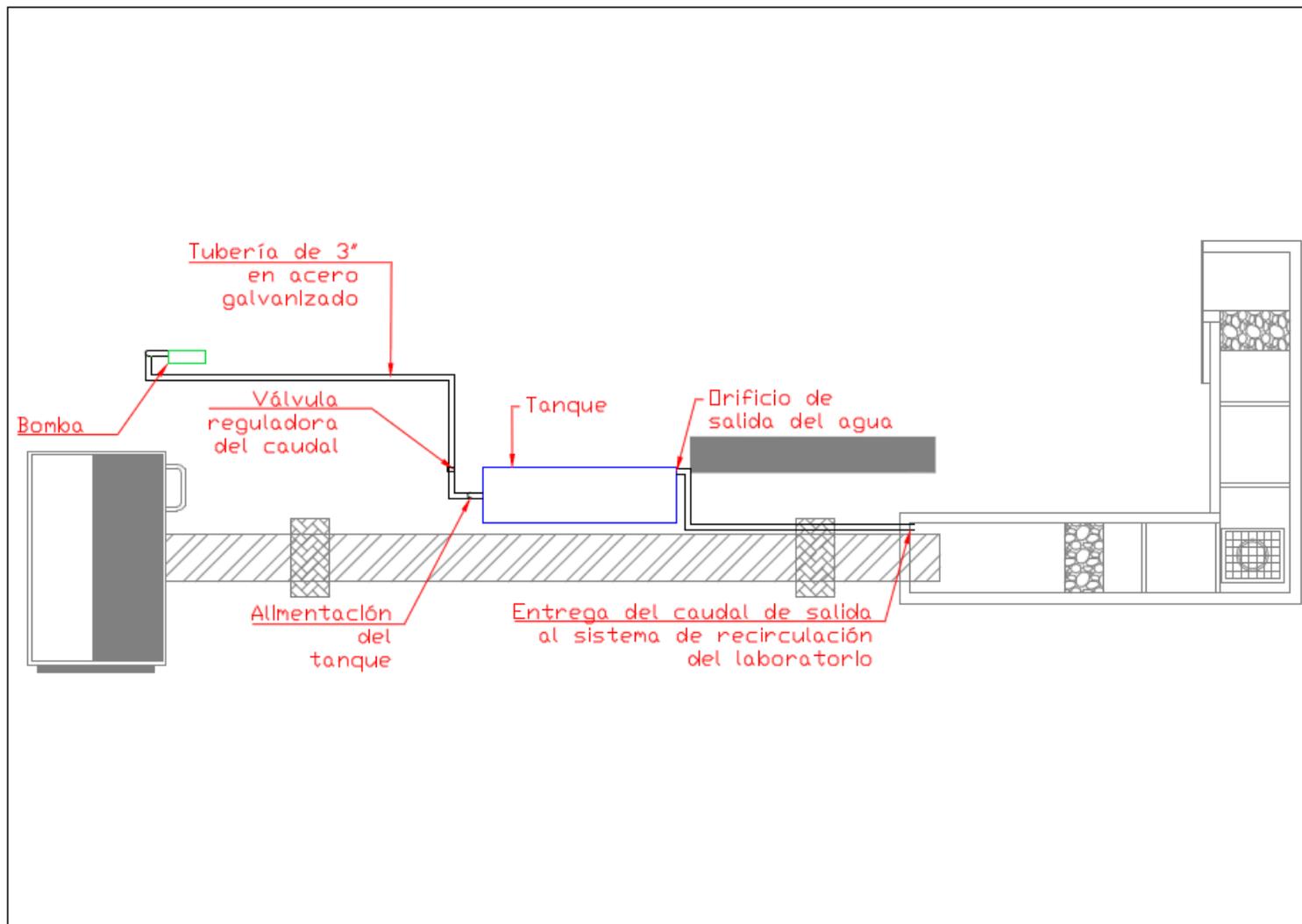
En la **Figura 3-10** se muestra un esquema de las distintas estructuras mencionadas anteriormente. En él, la tubería amarilla corresponde al prototipo que se está probando, la roja muestra la posición en la que se ubica la flauta (la forma que aparece en este esquema no corresponde con la verdadera) y la azul es el tubo donde se conecta la manguera plástica para evacuar el caudal de salida. En la imagen se puede ver que la arena cubre toda la zona alrededor del tubo hasta la superficie donde se encuentra la tapa superior, tal cual sucedió en cada una de las pruebas llevadas a cabo.

## 3.2 Sistema Hidráulico

El sistema hidráulico consta de un conjunto de tuberías galvanizadas de 3 pulgadas de diámetro con sus respectivos accesorios, una motobomba centrífuga y una manguera plástica de 3 pulgadas de diámetro. Asimismo, cuenta con las distintas conexiones y accesorios del sistema de recirculación de agua del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes. Este sistema entrega el fluido a la bomba, y luego recibe el caudal de salida de la manguera plástica en uno de sus vertederos. En la **Figura 3-11** se puede ver un esquema de la ubicación de las distintas partes en el laboratorio (no se incluyen las conexiones previas a la bomba). A continuación se profundizará más en cada una de ellas.



**Figura 3-10. Esquema en 3D del montaje del modelo en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes.**



**Figura 3-11. Esquema de la ubicación del montaje en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes (Vista en Planta).**



### 3.2.1 Bomba Hidráulica

Para esta investigación se usó una bomba marca IHM fabricada en el año 2010; su motor tiene una potencia de 7.5 Kilovatios y una eficiencia de 75% (en la **Figura 3-13** se puede revisar las curvas características de la bomba). A un extremo de ella llega la conexión del sistema de recirculación del laboratorio, mientras que por el otro sale el agua hacia el montaje.

En este punto es muy importante mencionar que para regular la presión, el tramo posterior a la bomba tiene una válvula que divide el flujo en dos. Cuando ésta se encuentra totalmente cerrada, el agua sale impulsada con toda la potencia de la bomba hacia un rebose en otro vertedero del laboratorio. A medida que se va abriendo, parte del caudal comienza a dirigirse hacia el montaje experimental y poco a poco se obtiene la presión deseada. La razón para haber configurado el montaje de esta forma, es que se deseaba evitar que la bomba trabajara con un amperaje superior al sugerido por el fabricante. Y la forma más simple de lograrlo era garantizando que siempre bombeara la misma cantidad de agua, pero que sólo una parte de esta se dirigiera hacia el montaje.



Figura 3-12. Motobomba centrífuga usada en el montaje de laboratorio.

### 3.2.2 Conexiones hidráulicas

Una vez el agua ha pasado por la bomba y ha tomado la ruta hacia el montaje debe atravesar un grupo de conexiones que la llevarán al tanque. En total son aproximadamente 7.5 m de tuberías en acero galvanizado de 3" de diámetro. Éstas están ubicadas en ambas direcciones en el plano horizontal y algunas de ellas están en sentido vertical. En total hay 6 codos en el mismo material, y antes de llegar al tanque se encuentra otra válvula que también se puede usar para regular la presión de entrada. En la **Figura 3-11** se puede revisar con detalle la ubicación y dirección de estas conexiones.



Una vez el agua ha atravesado el tanque, sale por el orificio mencionado anteriormente y en este punto se conecta una manguera de plástico de 3" de diámetro que transporta este caudal hasta el vertedero más cercano para entregarlo de nuevo al sistema del laboratorio. Para evitar que una gran cantidad de arena se fugara por este lugar, se ubicó una trampa de sedimentos que atrapa las partículas en una malla metálica. Más adelante se profundizará la descripción de esto. En la **Figuras 3-14** y la **Figura 3-15** se ilustra este último accesorio y su conexión con el tanque.

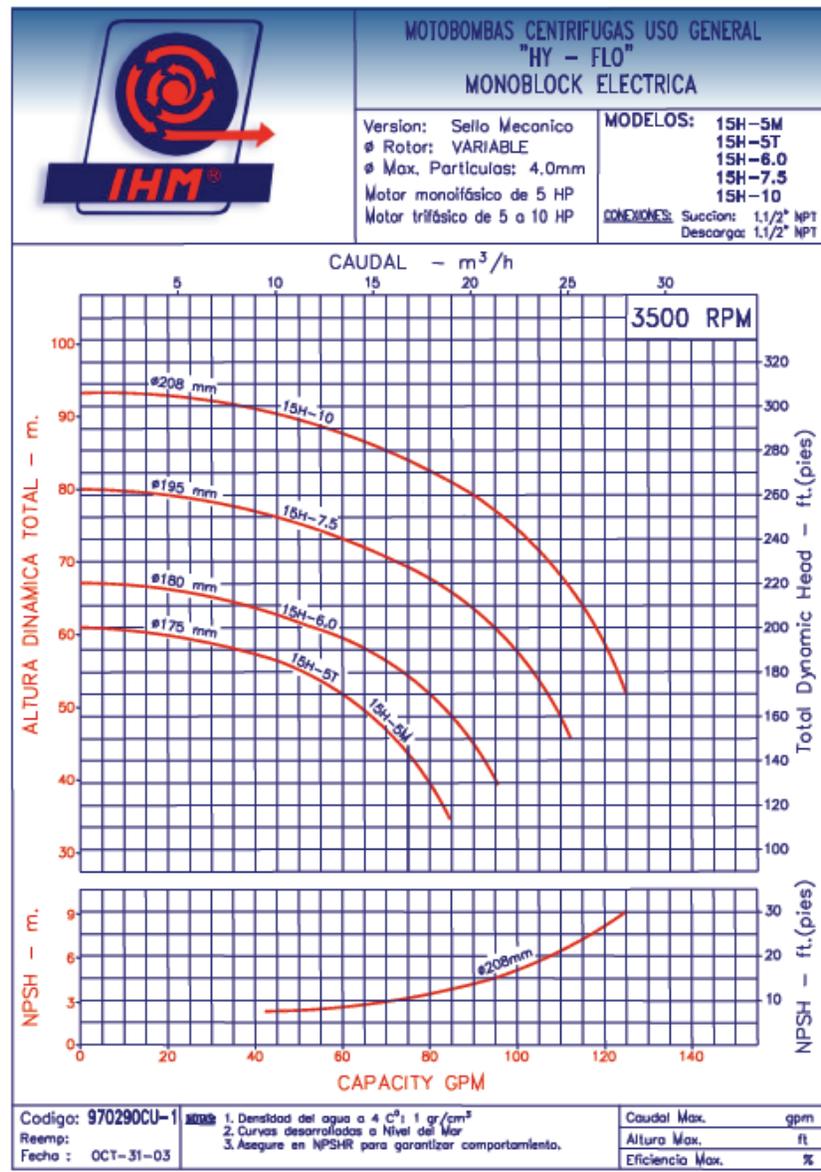


Figura 3-13. Curvas características de la bomba usada en las pruebas.



**Figura 3-14. Conexión de salida del agua entre el tanque y la manguera de plástico.**



**Figura 3-15. Entrega del caudal de salida a un vertedero del laboratorio.**

### 3.2.3 Filtro

Dentro del montaje, es de vital importancia colocar un filtro antes de la manguera que permite extraer el caudal de salida. Esto con el objetivo de evitar que el agua represada comience a fugarse por otros puntos, al no poder moverse fácilmente por el medio arenoso, hacia un punto de salida de únicamente 3 pulgadas de diámetro. Este filtro consta de un cubo de 30 cm de alto, y 27 cm tanto de largo como ancho. El filtro está hecho en una malla de acero inoxidable, y en su interior está lleno de material rocoso de tamaño muy superior a la arena. De esta forma, este funciona como un cuerpo que permite la filtración del agua a través de un área de flujo mucho más grande, y al mismo tiempo evita que partículas de un diámetro considerable se muevan hacia la salida. De esta manera se asegura que sólo salga material líquido y que no se pierda material sólido.

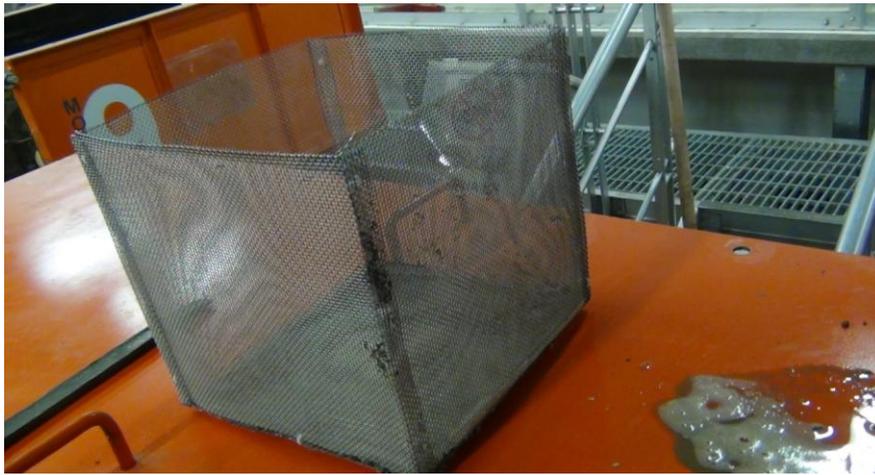


Figura 3-16. Malla metálica para albergar el material rocoso que sirve como filtro.



Figura 3-17. Filtro ubicado en su posición de trabajo.

### 3.3 Equipo de Medición

El equipo de medición del montaje consta únicamente de 2 manómetros; uno electrónico y otro tipo Bourdon, una cámara de video y un micrómetro ultrasónico. El primero de ellos se coloca justo antes que el agua entre al montaje, y por lo tanto, a partir de éste se obtiene la presión a la que sale la lámina del agua desde la flauta. Por otra parte, el manómetro tipo Bourdon está localizado algunos centímetros después de la división de la tubería conectada a la bomba, sin embargo, a pesar de la distancia que los separa la medición de ambos equipos es muy similar. Esto último se puede explicar teniendo en cuenta que los caudales transportados no son muy grandes, y debido a esto, en este pequeño tramo las pérdidas por fricción y las pérdidas menores no son muy relevantes. De esta forma la caída de presión asociada con éstas tampoco es considerable.



Otro de los equipos que se requieren para llevar a cabo las mediciones, es una cámara de video con la cual se puede conocer el tiempo exacto que se demora la tubería para fallar. La forma de uso es simple; en uno de los extremos del tanque se ubica el equipo y se pone a grabar el interior de la tubería. Teniendo en cuenta que la capacidad de almacenar video es limitada, se debe revisar el estado de la misma cada dos horas. Si se ve que la tubería no ha fallado, la grabación se borra y comienza de nuevo, y en caso de que falle, se revisa el archivo para calcular el momento preciso en el que se perforó la superficie. Es importante mencionar que se debe realizar la revisión en periodos de tiempo no superiores a una hora y media, pues de lo contrario se corre el riesgo de que la cámara deje de trabajar y no se sepa cuándo se forma el orificio en la tubería.

El micrómetro ultrasónico, por su parte, se usa para medir el espesor de las tuberías de PVC en la zona desgastada y en los puntos cercanos a las perforaciones. Este equipo realiza las lecturas con una precisión de  $\pm 0.001$  mm, por ende es bastante práctico para tener una idea aproximada del desgaste abrasivo provocado por el chorro de agua. A continuación se profundiza la descripción de cada uno de los instrumentos mencionados.

### 3.3.1 Manómetro Digital

Es un manómetro digital marca Kobold, con las siguientes características:

|   |
|---|
| <i>Display LCD de 4 dígitos.</i>            |
| <i>Rango de medición desde -0 a 1 Bar *</i> |
| <i>Clase 0.5</i>                            |
| <i>Conexión de ¼ NPT</i>                    |
| <i>Precisión de <math>\pm 0.1\%</math></i>  |

- \* El fabricante recomienda este rango. Sin embargo, se probó con presiones de hasta 3.5 Bar, comparando las lecturas con las del manómetro analógico y funcionó correctamente.



Figura 3-18. Manómetro electrónico en funcionamiento.



### 3.3.2 Manómetro Haenni

Es un manómetro analógico con glicerina tipo Bourdon que tiene un rango de medición de 0 a 160 psi. Este instrumento se localiza justo después de la bomba, pero teniendo en cuenta las características de las conexiones hidráulicas, la lectura que se obtiene es muy cercana a la presión que se lee en el manómetro digital, que está ubicado justo antes de entrar al montaje. La razón para usar este equipo es que brinda una medición de la presión que sirve como punto de comparación para la lectura del equipo electrónico, y de esta forma se tiene más certeza de la precisión de los valores medidos.



Figura 3-19. Manómetro analógico en funcionamiento.

### 3.3.3 Cámara de Video

La cámara de video que se utilizó es una Sony HDR-PJ580V, con una memoria flash de 32GB. El equipo se ubica sobre un trípode, el cual brinda el soporte y la estabilidad a la misma en todo momento de la grabación.



Figura 3-20. Cámara de Video usada en el laboratorio: vista frontal.



Figura 3-21. Cámara de Video en funcionamiento: vista posterior.

### 3.3.4 Micrómetro Ultrasónico.

El micrómetro Ultrasónico es un equipo que mide el espesor de la pared de una superficie determinada. Éste se compone de: un cable con un sensor que emite señales electrónicas al material y contabiliza el tiempo que éstas requieren para regresar, y un dispositivo que recibe la información leída y la asocia a un espesor de pared, como función de la velocidad de onda del material probado. Para reducir la cantidad de vacíos que puedan haber entre el sensor y la superficie, se usa un gel acoplante (*referencia: GEL-BT, de ultraflux*), de esta forma se aumenta la precisión de los valores medidos. En la **Figura 3-22** se puede apreciar una fotografía del micrómetro y del gel usado en el laboratorio.



Figura 3-22. Micrómetro ultrasónico Electromatic y Gel ultraflux para realizar mediciones de espesor en tuberías de PVC.

Para tener una mejor idea de las referencias del micrómetro ultrasónico, se muestra a continuación información detallada del equipo.



|  |
|--|
| <i>Modelo- TI-007 check-line. By electromatic</i>                  |
| <i>Peso-10 onzas</i>   |
| <i>Rangos de temperatura para medir- De - 30 a 50° C</i>           |
| <i>Fuente energía: 2 pilas "AA"</i>                                |
| <i>Display- pantalla liquido-cristal con 4.5 dígitos y luz LED</i> |
| <i>Rangos de medición- 0.15 mm a 25.40 mm</i>                      |
| <i>Precisión <math>\pm 0.001</math> mm</i>                         |
| <i>Valor mínimo de medición: 0.15 mm</i>                           |

En esta investigación, el equipo se usó para dar una idea aproximada del relieve de aquellas zonas que sufrieron los efectos abrasivos del chorro de agua, únicamente para las tuberías de PVC (más adelante se explica el por qué de esta decisión). Es importante mencionar que teniendo en cuenta la forma de la región afectada, es difícil garantizar que la calidad de los datos medidos sea excelente, sin embargo, para contrarrestar esto se tuvieron en cuenta las siguientes recomendaciones a la hora de realizar las lecturas:

- No se tomaron lecturas con menos de 6 barras de calidad de la señal (las barras en la pantalla del dispositivo son una medida de qué tan buena es la emisión y la recepción de la señal).
- No se tuvieron en cuenta mediciones menores a los 0.15 mm (este valor representa el umbral del equipo, cualquier dato inferior a él está errado).
- Se midieron en total de 51 puntos en cada tubería de PVC y cada uno de ellos era leído en al menos tres oportunidades. De esta forma se tuvo suficientes datos para modelar la superficie desgastada, y el proceso repetitivo disminuía la incertidumbre del proceso de medición.

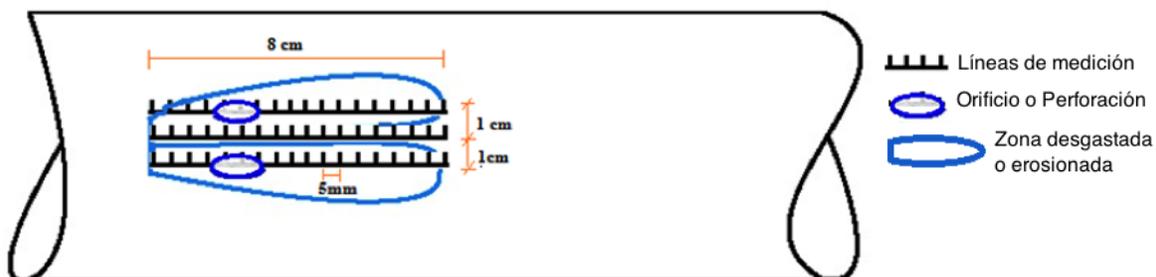
No obstante, a pesar de las recomendaciones para contrarrestar los errores, muchas mediciones no coincidieron con los valores del manual técnico de las tuberías, la mayoría de éstas se encontraban en la frontera de la zona afectada. Se decidió repetir el proceso pero seguían apareciendo los mismos valores, por ende, se determinó dejarlos así porque lo que se buscaba con estas lecturas era ilustrar a grandes rasgos cómo es esta región, y no necesariamente dar los valores exactos.

Como se mencionó previamente, los datos se tomaron en el área de falla de las tuberías de PVC. Estas regiones tenían, por lo general, longitudes cercanas a los 8 cm y anchos de 4 cm en promedio; la mayor parte de su área correspondía a la zona desgastada y sólo una pequeña porción evidenciaba los orificios. Para describir el perfil se trazaron tres líneas imaginarias paralelas a la dirección de la lámina de agua separadas 1 cm una de otra. En ellas se ubicaron puntos de medición cada 5 mm a lo largo de 8 cm, es decir, en total se definieron 17 puntos en cada

Las mediciones se comenzaron a realizar justo en el lugar donde estaba ubicada la flauta, y en todos los casos abarcaron toda la zona desgastada. Las líneas superior e inferior se ubicaron de tal forma que atravesaran las perforaciones en la superficie (en los casos en los que había 2 orificios), para así poder registrar completamente la pérdida de material.

La línea de la mitad, por su parte, estaba situada equidistante de las otras dos, y casi siempre concordaba con puntos altos (en los casos en los que solamente se formó un orificio esta línea lo atravesaba). Gracias a estas mediciones, se ilustra un aspecto del área de falla que no es fácilmente perceptible en las fotografías, y es que en la mayoría de los casos la zona erosionada se divide en dos, y la línea que las separa permanece con un espesor similar al inicial.

En cada una de las líneas se ubicaron 17 puntos, en la **Figura 3-23** se muestra un esquema del área de falla (incluyendo las perforaciones y la zona desgastada) y se presenta un esquema de la distribución las lecturas a lo largo de la misma.



**Figura 3-23. Detalle del área de falla (incluyendo los orificios y la zona desgastada) incluyendo las tres líneas de medición del espesor de la superficie.**

En la **Figura 3-24** se presenta una fotografía del proceso de medición de la zona desgastada de una de las tuberías probadas. En ella se pueden apreciar las tres líneas de gel marcadas en la superficie, y de igual forma, se observa al micrómetro ultrasónico en funcionamiento.

Es muy importante mencionar que este procedimiento se hizo únicamente en superficies de PVC, debido a que la metodología de operación del micrómetro no es aplicable en tuberías de hierro dúctil o polietileno. La limitante de las primeras es que están compuestas por dos materiales (hierro dúctil y una capa de mortero), y de ésta forma el tiempo de viaje de la señal no puede ser asociado con una única velocidad de onda, y de esta forma es imposible conocer el grosor. Para el caso de las segundas, el problema es un poco más complejo porque en esta superficie las ondas simplemente no se reflejan; en estas condiciones no se puede conocer el tiempo de viaje de las mismas, y mucho menos el espesor de la superficie.

Buscando contrarrestar esta falencia, en las tuberías de hierro dúctil y polietileno, se intentó llevar a cabo mediciones con otro tipo de equipos en estas superficies. No obstante, los resultados fueron poco satisfactorios una vez más, y se debió trabajar únicamente con las mediciones en PVC.



Figura 3-24. Medición en laboratorio del espesor de la tubería de PVC en la zona desgastada.

### 3.4 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental para llevar a cabo una prueba comienza instalando el prototipo a fallar. Como se ha mencionado, se probaran en total 3 tipos de materiales: PVC, Hierro Dúctil y Polietileno, de 4,6 y 8 pulgadas de diámetro (no todos los materiales se prueban en todo el rango de diámetros). Una vez se han definido las características de la tubería, se corta un tramo de 2.5 m de largo y se procede a instalarlo en el interior del tanque. Previamente se deben haber instalado las tapas laterales de entrada correspondientes al tamaño del prototipo, para de esta forma conectar uno de los extremos de este último a la estructura general. El lado opuesto se une con las tapas laterales de salida, y de esta forma se definen los dos apoyos.

Una vez se tiene el tubo instalado, se deben impermeabilizar las distintas uniones usando neopreno y silicona fría. Cuando se ha garantizado la hermeticidad del sistema se comienza a agregar y compactar la arena. El procedimiento de llenado se hace por etapas; primero se introduce cierta cantidad de material y posteriormente se apisona; de esta forma se simula correctamente la situación real de una tubería enterrada. Una vez se ha completado esta etapa, se impermeabiliza la parte superior del tanque usando tiras de neopreno, se coloca la tapa superior, y se asegura con 30 tornillos de 5/8".

Posteriormente, se instala el manómetro electrónico, se prenden las bombas y se calibra la válvula para obtener la presión deseada. En este punto vale la pena mencionar que el rango de presiones de prueba varía según el material; a priori se estipuló trabajar con 0.5, 0.9, 1.2 y 1.5 Bar para PVC y polietileno, mientras que con el hierro dúctil se pensó trabajar con 1.5 y 2.0 Bar.



El último paso consiste en instalar la cámara de video y comenzar la grabación. Es importante resaltar que se debe anotar la hora exacta en la que se realizan estas dos actividades, para poder llevar registro de la duración de la prueba. Asimismo, cada vez que se elimine un video y comience uno nuevo se debe escribir la hora del cambio. A continuación se muestran varias imágenes que ilustran el proceso de llenado y compactación del material granular alrededor de la tubería.



**Figura 3-25. Proceso de llenado y compactación en una de sus primeras etapas.**



**Figura 3-26. Proceso de llenado y compactación antes de cubrir la tubería.**



**Figura 3-27. Proceso de llenado y compactación antes de cubrir totalmente la flauta.**



**Figura 3-28. Proceso de llenado y compactación estado final.**



## 4. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO INICIAL

Para la realización de las pruebas de abrasión por fugas en tuberías, se adquirió material procedente de 4 lugares; Guamo (Tolima), Cáqueza, Subachoque y el sur de Bogotá (Cundinamarca). La totalidad del material fue adquirido a través de Pedro Ignacio Torres, proveedor de todo tipo de material para actividades de construcción. A continuación se muestra el registro fotográfico de 4 muestras, cada una corresponde a una de las fuentes de donde fue traído el material.



Figura 4-1. Fotografía de la arena de Subachoque.



Figura 4-2. Fotografía de la arena proveniente del sur de Bogotá.



**Figura 4-3. Fotografía de la arena proveniente del Guamo.**



**Figura 4-4. Fotografía de la arena proveniente de Cáqueza.**

El material llegó a la Universidad de los Andes y se almacenó en el Laboratorio de Hidráulica; éste estaba separado en costales, y estos se agrupaban dependiendo del lugar de proveniencia. Para la elaboración de las muestras se tomó arena de por lo menos 6 costales del mismo lugar, se combinó todo hasta tener una mezcla representativa, se separó una pequeña parte para al registro fotográfico, y el resto fue llevado al Laboratorio de Materiales de la universidad para realizar las pruebas granulométricas.



## 4.1 Procedimiento

Durante todo el procedimiento se siguieron las recomendaciones de la Norma Técnica Colombiana NTC-77, que explica los lineamientos para los *Métodos de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos*. El primer paso para llevar a cabo la granulometría fue preparar la arena para el proceso. Cada una de las muestras fue llevada a un horno donde se secó completamente, evitando así que la humedad facilitara la agrupación de partículas de distintos tamaños y las hiciera pasar como una de mayores dimensiones. El horno permanecía a 110° C hasta que la masa alcanzaba un valor constante por un periodo determinado, tal cual recomienda la norma. Posteriormente se seleccionaron los tamices sugeridos por PAVCO MEXICHEM (Ver **Tabla 4-1**), y se organizaron en función de las dimensiones de las aberturas tal cual se hace normalmente en estos casos.

| # TAMIZ | % Que pasa |
|---------|------------|
| 10      | 100        |
| 20      | 80         |
| 30      | 62         |
| 40      | 47         |
| 60      | 32         |
| 100     | 22         |
| 200     | 12         |
| Fondo   | 0          |

**Tabla 4-1. Requerimientos de PAVCO para la arena que hará parte de la investigación de abrasión por fugas.**



**Figura 4-5. Tamices seleccionados para la granulometría.**

El siguiente paso fue tomar 600 g de cada una de las muestras para hacerlas pasar por los tamices; la medición del peso se hizo a través de una balanza electrónica y un recipiente

plástico. Se tomaba como referencia el peso de este último, y una vez la arena se encontraba en él se medía el peso de ambas cosas. La diferencia entre ambas medidas debía corresponder al peso deseado; esta medida se definió con base en los valores mínimos especificados en la norma, y las sugerencias del equipo del Laboratorio de Materiales de la Universidad de los Andes.



**Figura 4-6.**Ejemplo de una de las muestras separadas.



**Figura 4-7.**Balanza electrónica usada para pesar las muestras.

Cuando se tenían los 600 gramos se introducían en el primer tamiz, se cerraba la parte superior de este, y se llevaba a la tamizadora mecánica durante 9 minutos. Los movimientos horizontales y verticales de esta permiten que las partículas de distintos tamaños se separen, y que lleguen al lugar que les corresponde según sus dimensiones. Después de este periodo de tiempo se separaban los distintos tamices, se pesaba cada una de las muestras en la balanza electrónica, y se hacía una suma para verificar la diferencia entre el peso inicial y la sumatoria final. Este error no podía llegar a ser más grande del 1% pues de lo contrario se debía repetir el ensayo; afortunadamente, en ninguno de los casos del presente análisis se llegó a este valor.



**Figura 4-8. Mezcla dentro de los recipientes y lista para ser procesada en la tamizadora mecánica.**

Por último, se realizaban los distintos cálculos y gráficas para hallar los valores que describen la distribución de tamaños de la muestra. En primer lugar se grafica la curva granulométrica, en cuyas ordenadas se ubican los porcentajes que atraviesan cada tamiz en escala natural, y en las abscisas los tamaños de las aberturas de cada uno en escala logarítmica. Asimismo, se hallan valores relevantes como el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura que dan una idea de la distribución. Este proceso se realizó en una oportunidad para cada una de las muestras, y una vez más para la mezcla que contenía arena de las 4 fuentes. Esta última no era de 600 g como el resto sino de 800 g; para realizarla se mezcló una misma cantidad de material de los 4 recipientes hasta tener una muestra homogénea y se tomó un volumen equivalente al peso deseado.

$D_{10} =$  *Tamaño por el cual pasa el 10% del material*

$D_{30} =$  *Tamaño por el cual pasa el 30% del material*

$D_{60} =$  *Tamaño por el cual pasa el 60% del material*

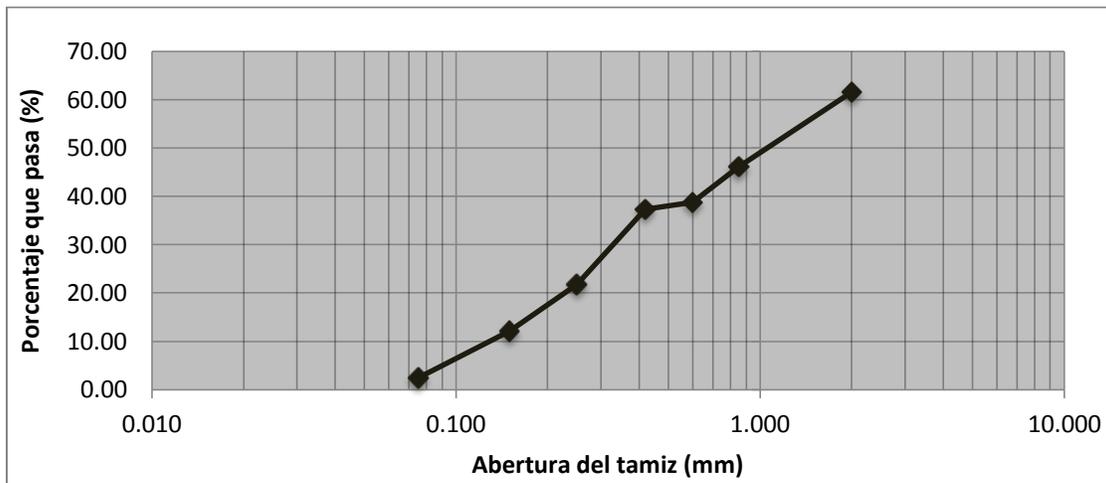
$$\text{Coeficiente de uniformidad} = C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$\text{Coeficiente de curvatura} = C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}}$$

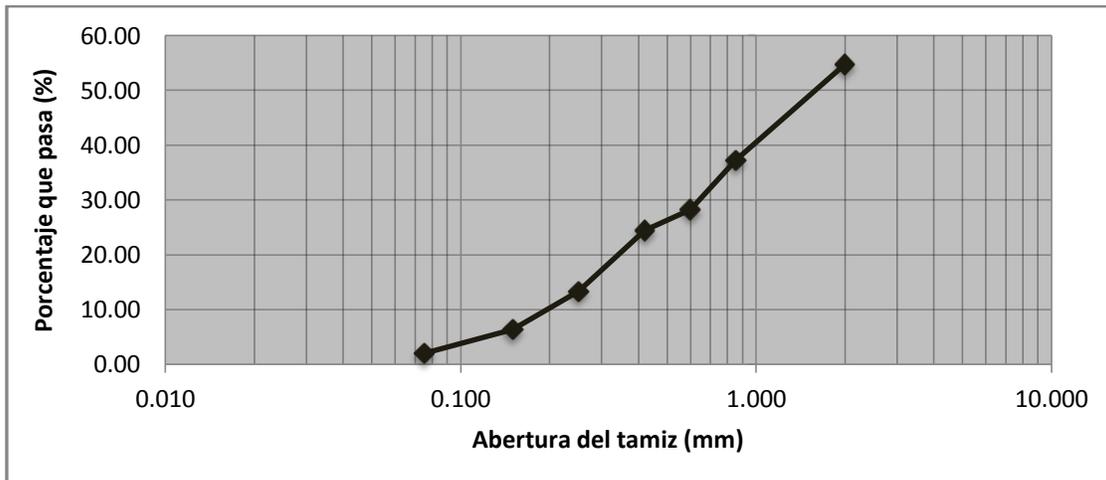


## 4.2 Resultados de las granulometrías

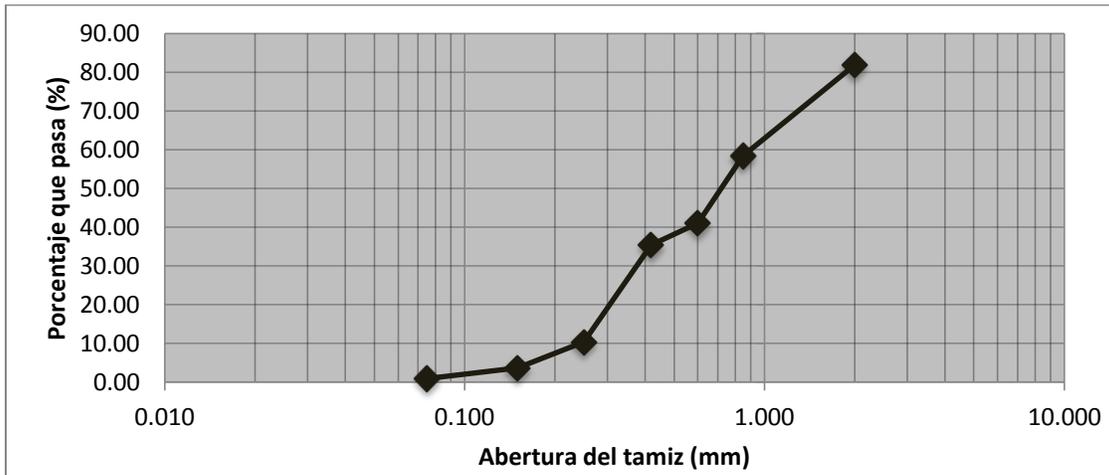
Después de haber llevado a cabo el proceso para las 5 muestras, estos fueron los resultados hallados. Se muestran las curvas granulométricas para cada uno de los casos, y tablas donde aparecen el porcentaje de peso que quedó en cada tamiz, lo que pasó, el acumulado y también los distintos coeficientes explicados anteriormente. Todo esto se muestra para cada una de las fuentes y adicionalmente se presentan los resultados esperados, según los porcentajes pedidos por PAVCO MEXICHEM.



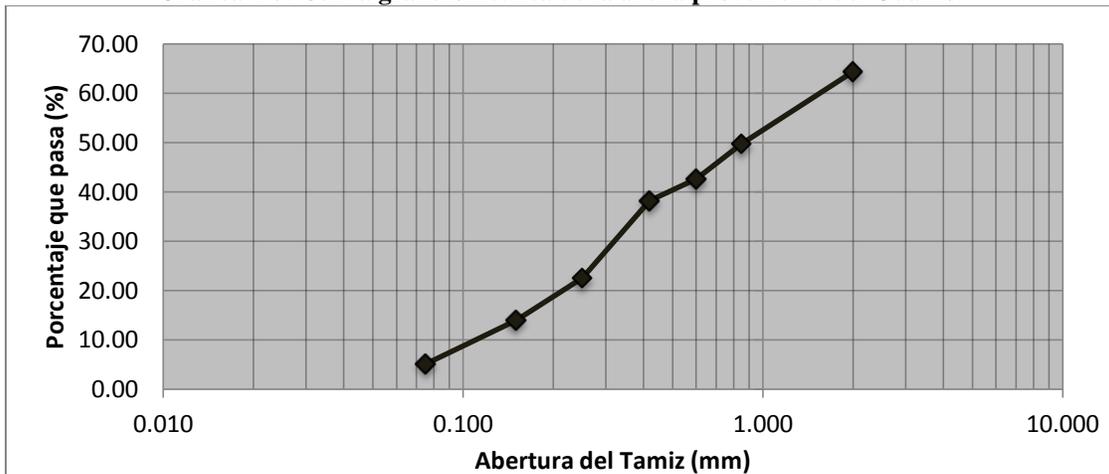
Gráfica 4-1. Curva granulométrica de la arena proveniente de Subachoque.



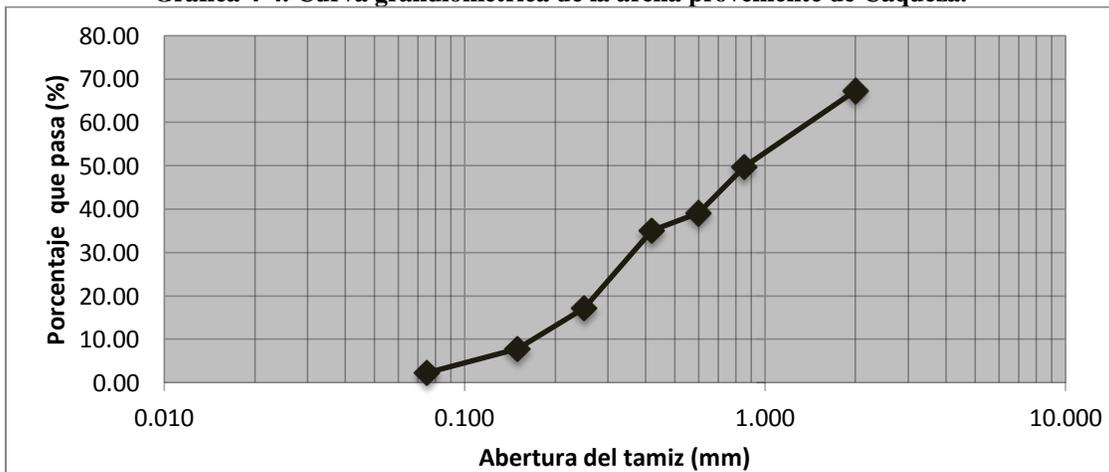
Gráfica 4-2. Curva granulométrica de la arena proveniente del Sur de Bogotá.



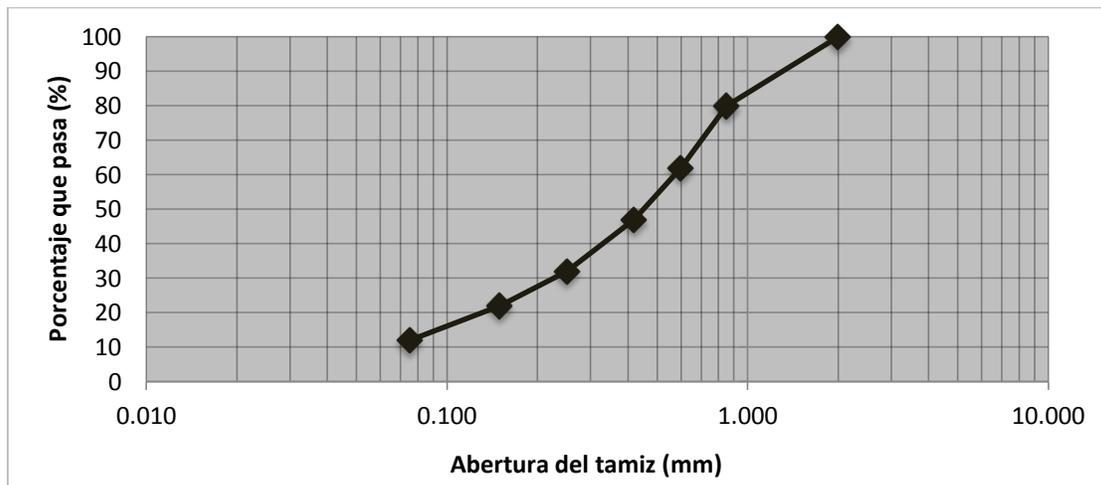
Gráfica 4-3. Curva granulométrica de la arena proveniente del Guamo.



Gráfica 4-4. Curva granulométrica de la arena proveniente de Cárquez.



Gráfica 4-5. Curva granulométrica de la arena mezclada.



Gráfica 4-6. Curva granulométrica según las especificaciones entregadas por PAVCO MEXICHEM.

| Abertura (mm) | # TAMIZ | % Que pasa |            |       |       |        |        |
|---------------|---------|------------|------------|-------|-------|--------|--------|
|               |         | CÁQUEZA    | SUBACHOQUE | GUAMO | SUR   | MEZCLA | PAVCO  |
| 2,000         | 10      | 64,40      | 61,57      | 81,89 | 54,76 | 67,32  | 100,00 |
| 0,850         | 20      | 49,75      | 46,13      | 58,45 | 37,23 | 49,68  | 80,00  |
| 0,600         | 30      | 42,68      | 38,75      | 41,11 | 28,19 | 39,12  | 62,00  |
| 0,420         | 40      | 38,26      | 37,32      | 35,46 | 24,50 | 35,01  | 47,00  |
| 0,250         | 60      | 22,52      | 21,77      | 10,39 | 13,36 | 17,24  | 32,00  |
| 0,150         | 100     | 13,92      | 12,11      | 3,72  | 6,41  | 7,79   | 22,00  |
| 0,075         | 200     | 5,06       | 2,42       | 0,90  | 1,97  | 2,31   | 12,00  |
|               | Fondo   | 0,000      | 0,000      | 0,000 | 0,000 | 0,000  | 0,000  |

Tabla 4-2. Registro de los porcentajes que pasan por cada uno de los tamices para las distintas muestras.

|            | CÁQUEZA | SUBACHOQUE | GUAMO | SUR    | MEZCLA | PAVCO |
|------------|---------|------------|-------|--------|--------|-------|
| <b>D10</b> | 0,117   | 0,134      | 0,244 | 0,202  | 0,173  | 0,060 |
| <b>D30</b> | 0,331   | 0,383      | 0,383 | 0,650  | 0,372  | 0,230 |
| <b>D60</b> | 1,654   | 1,883      | 0,926 | 2,344  | 1,523  | 0,576 |
| <b>Cu</b>  | 14,160  | 14,087     | 3,793 | 11,622 | 8,784  | 9,600 |
| <b>Cc</b>  | 0,566   | 0,583      | 0,649 | 0,894  | 0,524  | 1,531 |

Tabla 4-3. Coeficientes de las mezclas.



Finalmente, para dar una idea del tipo de material que representan los valores mostrados en las distintas gráficas y tablas, se presenta a continuación una clasificación del material según los tamaños.

| <b>Distribución de tamaños</b> |               |
|--------------------------------|---------------|
| <b>Partícula</b>               | <b>Tamaño</b> |
| Arcillas                       | < 0,0039      |
| Limos                          | 0,0039-0,0625 |
| Arenas                         | 0,0625-2      |
| Gravas                         | 2,0-64        |
| Cantos Rodados                 | 64-256        |
| Bloques                        | >256          |

Tabla 4-4. Clasificación de materiales según su tamaño.

### 4.3 Análisis granulométrico del material abrasivo

Teniendo en cuenta la distribución de los tamaños de las mezclas, se confirma que el material predominante es la arena, junto con las gravas y el material limoso. Para el caso del Guamo, la Tabla 3 permite ver que el contenido de gravas es menor al 20%, y predominan las arenas medias y finas. Para Cáqueza y Subachoque la presencia de gravas es mucho mayor (casi 40%), mientras que los limos siguen siendo bastante escasos (poco menos del 5%). En cuanto a las arenas finas se puede decir que aunque siguen siendo importantes, no son predominantes como en otros casos. En la arena proveniente del Sur de Bogotá se ve que la presencia de gravas es aun más importante, y corresponde a casi el 50% del peso. Los limos son casi inexistentes y el resto está distribuido en el rango de las arenas.

Al revisar los resultados de la mezcla de las 4 fuentes, se ve que esta se encuentra en un punto medio entre los datos anteriores. La presencia de gravas es considerable más no relevante (casi 23%), los limos son casi inexistentes y predominan las arenas medias y finas. Haciendo un ejercicio similar con los resultados esperados por PAVCO MEXICHEM, se ve que existen diferencias considerables y que es el Guamo la fuente que más se asemeja. En esta última no hay espacio para las gravas, en cambio los limos tienen un espacio pequeño pero mucho mayor que el de las mezclas. Por último las arenas están mejor distribuidas aunque de nuevo sobresalen las medias y finas.

Adicionalmente, para definir el grado de uniformidad de cada muestra se calculó el diámetro efectivo (D10), el coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de curvatura (Cc). En la Tabla 3 se muestran estos datos para todas las pruebas realizadas, incluyendo la distribución granulométrica sugerida por PAVCO MEXICHEM. Teniendo en cuenta que el Cu decrece cuando la uniformidad aumenta, y que los suelos con  $Cu < 3$  se consideran muy uniformes, la arena proveniente del Guamo es la más uniforme con un Cu de 3,793. Por otro lado, las de Subachoque, Sur de Bogotá y Cáqueza presentan el comportamiento opuesto y registraron valores mayores a 10. En cuanto a la distribución sugerida por



PAVCO MEXICHEM, el cálculo arrojó un Cu de 9,600 y por ende una baja uniformidad del material.

El coeficiente de curvatura (Cc) por su parte, es un dato complementario para definir la homogeneidad de la curva granulométrica. Coeficientes entre 1 y 3 corresponden a suelos bien gradados, y el resto de valores están asociados con distribuciones deficientes. La muestra que registró el mejor Cc fue la del sur de Bogotá con 0,894, mientras que Cáqueza, Subachoque, Guamo y la mezcla de las 4, tuvieron los siguientes valores respectivamente; 0,566, 0,583, 0,649 y 0.524. Para la distribución recomendada por PAVCO MEXICHEM se obtuvo un valor de 1,531.

## 5. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados más relevantes encontrados en la investigación. Sin embargo, antes de mencionarlos, es importante hacer una descripción general del estado del montaje después de haber puesto a prueba una tubería. En total, existen 3 aspectos relevantes en cada uno de los experimentos que vale la pena medir y comparar. El primero será denominado de ahora en adelante como “Hundimiento de la arena” o “hundimiento del suelo”; y representa el espacio vacío encontrado en la parte superior del volumen de arena, en la zona cercana al lugar donde estuvo enterrada la flauta (Ver **Figura 5-1**).



**Figura 5-1. Hundimiento de la arena o hundimiento del suelo después de haber puesto a prueba una tubería.**

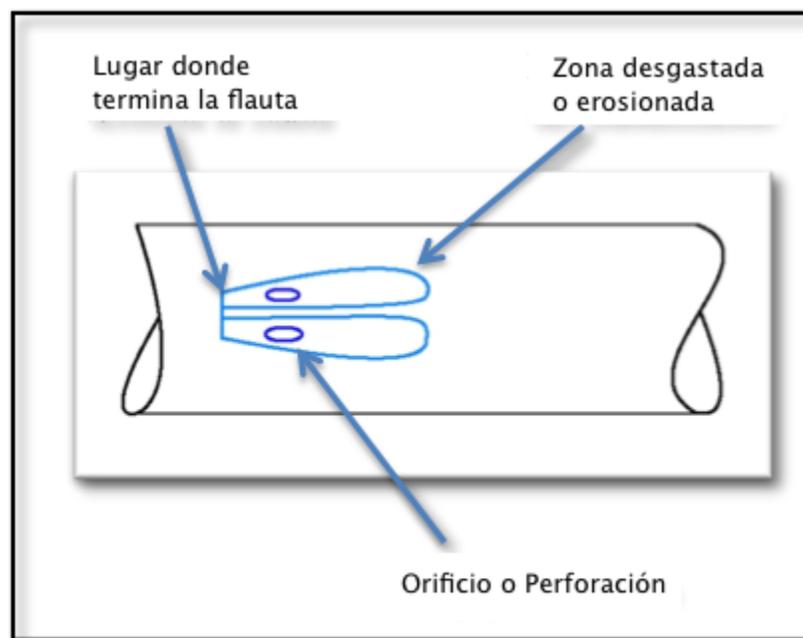
El segundo aspecto será denominado de ahora en adelante como “Zona desgastada” o “Región erosionada”, y representa la porción de superficie de la tubería en donde se evidencian los efectos de la abrasión. Siendo más específicos, esta región comprende todas las partes del tubo que han sido afectadas, así sea poco, por el movimiento del material particulado, pero que no han roto totalmente la pared (Ver **Figura 5-2**).

En tercer lugar, los orificios o perforaciones totales de la pared representan el último aspecto a comparar entre los distintos experimentos. Es importante explicar que la diferencia entre la segunda y la tercera característica, es que la última representa un rompimiento completo de la superficie del prototipo, la cual permite la entrada de agua y partículas sólidas a la tubería. La otra, por su parte, incluye aquellas porciones de la pared que evidencian daños, así estos sean muy pequeños (Ver **Figura 5-2**). Vale la pena mencionar que la aparición de los orificios o perforaciones marca el instante de tiempo denominado como momento de falla.

Conforme iban avanzando las distintas pruebas, se encontraron algunas tendencias a la hora de describir la zona desgastada y las perforaciones en las tuberías. Para las primeras, se

encontró que tenían una forma ovalada que rara vez superó los 10 cm de longitud y los 6 cm de ancho. Los orificios, por su parte, tienden a variar un poco más. Esto se explica teniendo en cuenta que en comparación con las zonas erosionadas, las características de las perforaciones son más susceptibles a variar como función del tiempo entre el momento de falla y el punto en el que se detiene la prueba.

Es importante mencionar que la combinación de la zona erosionada y las perforaciones, se denomina área de falla. Este concepto incluye las partes de la tubería que han sido afectadas, tanto levemente como drásticamente (fracturas de la pared). Para entender mejor lo explicado anteriormente se puede revisar la **Figura 5-2**.



**Figura 5-2. Tendencia general de la forma del área de falla (incluye los orificios o perforaciones y la zona desgastada o erosionada).**

En esta sección se resumen los principales resultados que se encontraron en la investigación. Se presentan tablas en las que se muestra la información más relevante de cada una de las pruebas, figuras que ilustran el estado de las tuberías después de los experimentos, y gráficas en las que se describen las mediciones del micrómetro o los resultados de las granulometrías. Habrá un subcapítulo para cada una de los ensayos que se llevaron a cabo.

En total son 13 las pruebas que se desarrollaron en la presente investigación. Se trabajó con PVC, Hierro Dúctil y Polietileno, con diámetros de 4", 6" y 8". Asimismo, el rango de las presiones de prueba variaba entre los 0.5 Bar y los 2 Bar. No obstante, debido a que el equipo de medición manejaba cierto rango de incertidumbre, en cada experimento se



menciona un pequeño rango de valores y no una magnitud exacta a la hora de describir esta variable. A continuación se muestra una tabla donde se resumen las características fundamentales de cada ensayo.

| Número de la Prueba | Material      | Diámetro Nominal (pulg) | Presión (Valor promedio en Bar) |
|---------------------|---------------|-------------------------|---------------------------------|
| 1                   | PVC           | 4                       | 0.92                            |
| 2                   |               |                         | 1.17                            |
| 3                   |               |                         | 0.57                            |
| 4                   |               |                         | 0.57                            |
| 5                   |               | 6                       | 1.17                            |
| 6                   |               |                         | 0.92                            |
| 7                   | Hierro Dúctil | 6                       | 2.00                            |
| 8                   |               |                         | 1.55                            |
| 9                   | PVC           | 8                       | 1.55                            |
| 10                  |               |                         | 1.17                            |
| 11                  | Polietileno   | 8                       | 1.55                            |
| 12                  |               |                         | 2.00                            |
| 13                  | Hierro Dúctil | 6                       | 1.55                            |

Tabla 5-1. Resumen de las pruebas.



## 5.1 Prueba número 1- Tubería de 4” en PVC Biaxial.

| <b>PRUEBA NÚMERO 1</b>  |             |
|---|-------------|
| <b>Diámetro Nominal (Pulg)</b>  | 4           |
| <b>Diámetro Interior (mm)</b>   | 108.06      |
| <b>PR (psi)</b>   | 200         |
| <b>RDE</b>  | 37          |
| <b>Fecha de Prueba (dd/mm/aa)</b>                                       | 14/05/12    |
| <b>Duración de la Prueba</b>  | 4h 10 min   |
| <b>Presión de Prueba (Bar)</b>  | 0.90 - 0.95 |
| <b>Tiempo desde que falló la tubería hasta que se detiene la prueba</b> | N/A*        |
| <b>Promedio de Caudales (L/s)</b>                                       | 0.8782      |
| <b>Peso del material dentro de la tubería (g)</b>                       | N/A**       |
| <b>Dimensiones del orificio o perforación</b>                           |             |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 5.7         |
| <b>Largo (mm)</b>   | 12.79       |
| <b>Dimensiones de la zona desgastada</b>                                |             |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 38.74       |
| <b>Largo (mm)</b>   | 62.33       |
| <b>Caracterización del hundimiento del suelo</b>                        |             |
| <b>Ancho (mm)</b>   | N/A***      |
| <b>Largo (mm)</b>   | N/A***      |
| <b>Profundidad (mm)</b>   | N/A***      |

Tabla 5-2. Resumen de los resultados de la prueba número 1.

\*Es importante aclarar que la medición exacta del tiempo desde el momento en el que falla la tubería y el momento en el que se detiene el experimento no se hizo para todos los casos.

\*\*En algunas pruebas no se tiene registro del material que quedó dentro de la tubería luego de la prueba. En algunos casos esto se debe a que el tubo no falló, en otros a que no se llevó registro de sus características, y en otros a que el tamaño de la falla era tan pequeño que fue muy poco el material sólido que llegó al interior del tubo.

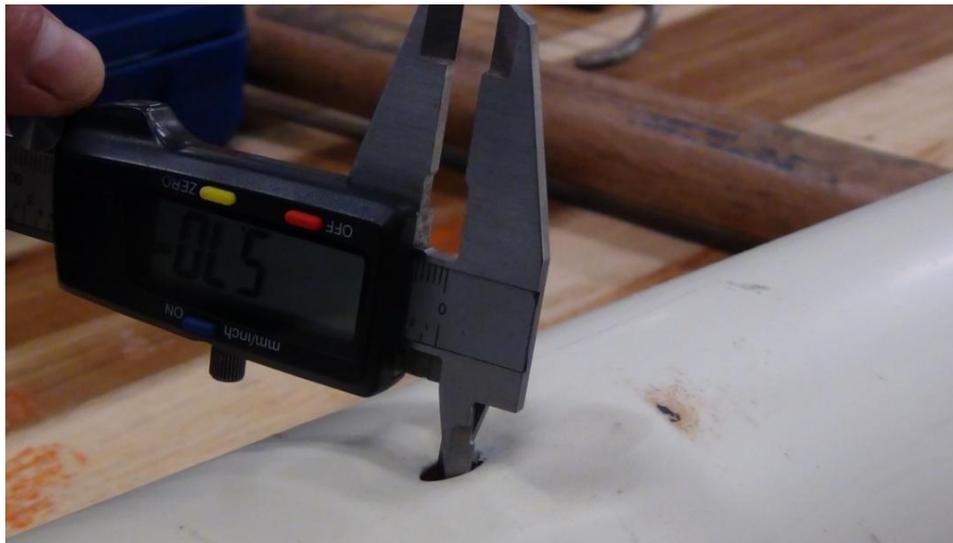
\*\*\* La idea de medir las características del hundimiento del suelo que aparece en la parte superior de la arena después de un experimento, surgió desde la segunda prueba, por ende, no se tiene registro para este primer caso.

Para este primer caso se explicará detalladamente la información en la tabla; de este punto en adelante, las casillas se repiten para los distintos experimentos y contienen la misma información. Los cuatro primeros valores corresponden a información general de la tubería, tanto de su geometría como de su resistencia a la presión. Posteriormente, se encuentran las



fechas en las que se realizó la prueba, el tiempo que demoró la tubería en romperse, la presión de prueba, el tiempo desde que se rompe hasta que se cierra totalmente la válvula de entrada; es decir el momento en el que se da por terminada la prueba (este valor sólo se muestra en algunos casos), el caudal que fluye a través del sistema y el peso del material dentro de la tubería que falló (este valor también sólo se muestra en algunos casos).

A continuación, se encuentran las medidas de los tres aspectos relevantes de cada prueba. Como se explicó anteriormente, el orificio o perforación es la parte de la tubería que falló completamente, es decir, representa el rompimiento total de la pared (Ver **Figura 5-3**). La zona desgastada, en cambio, corresponde a la parte de la superficie donde se perdió parte del espesor total de la tubería, pero que no necesariamente presentó fractura. En otras palabras es toda la zona que sufrió los efectos de abrasión (ver **Figura 5-4**). A pesar que en ambas imágenes se muestra la lectura del ancho, para la medición del largo se usó el mismo equipo y el mismo procedimiento.



**Figura 5-3. Medición del ancho del orificio (la flauta estaba localizada en la parte derecha de la imagen).**

Para esta prueba no se midieron las dimensiones del hundimiento del suelo, debido a que en un principio no se consideró relevante; se pensó que había habido un error a la hora de compactar la arena y por ende se trataba de un caso aislado que no valía la pena reportar. A partir de la segunda tubería se tuvo más cuidado en los procesos previos a la experimentación, y se dejó evidencia gráfica del nivel del material sólido antes de poner la compuerta superior. Cuando se abrió el tanque por segunda vez, volvió aparecer este espacio vacío y fue evidente que la múltiple ocurrencia del fenómeno correspondía a una consecuencia no esperada del chorro de agua, y no a un error del procedimiento. Por esta razón, a partir de ese punto se tomó la decisión de empezar a registrar sus dimensiones geométricas.

De igual forma, para este primer experimento no se registró el tiempo exacto que pasó entre el instante en que falló el tubo, y el momento en el que se cerró completamente la entrada de agua, es decir el punto donde se da por terminada la prueba. Una vez más, la información no parecía relevante en un principio, y se requirió fallar el segundo prototipo para evidenciar la influencia de este valor en las dimensiones del orificio, y en las características del material que se encontraba al interior de la tubería después de la falla.



Figura 5-4. Medición del ancho de la zona desgastada (la flauta estaba localizada en la parte derecha de la imagen).

Para contextualizar los otros resultados, es relevante mencionar que la presión a la que fue sometida la tubería, 0.90-0.95 bares (equivalente a 13 psi o entre 9.0-9.7 metros de columna de agua), es un valor inferior al mínimo de 15 mH<sub>2</sub>O permitido por la normativa colombiana (RAS 2012). Por ende, las variables de entrada de la prueba no están exagerando las condiciones esperadas en una red real, sino que por el contrario, están presentando un escenario bastante conservador.

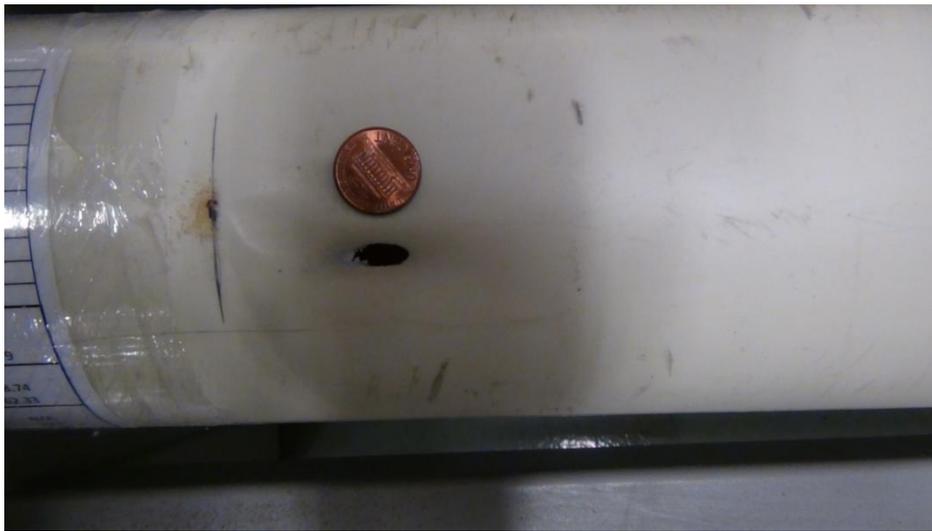
En cuanto a la forma de la región erosionada, se puede ver que ésta se divide en tres zonas (ver **Figura 5-4**). La más pequeña entre ellas se encuentra en la parte más cercana a la boca de la flauta (en la imagen se encuentra en la parte derecha). Las otras dos se encuentran aguas abajo de la primera, están separadas por una línea de mayor altura que resistió el efecto del material granular, y a pesar que ambas regiones son bastante similares, sólo una de ellas tiene orificios.

En la **Gráfica 5-1** se puede revisar el esquema de las mediciones con el micrómetro, en ella es mucho más claro que la línea central tiene espesores mucho mayores a las de los costados, y que la de la derecha (viendo la tubería desde la flauta hacia aguas abajo) fue la más afectada. Es importante mencionar que tal como se comentó anteriormente, algunas de las mediciones no coinciden con los valores del manual técnico de la tubería. Este último es de 3.12 mm para el caso de 4", no obstante, en las fronteras de la zona desgastada los

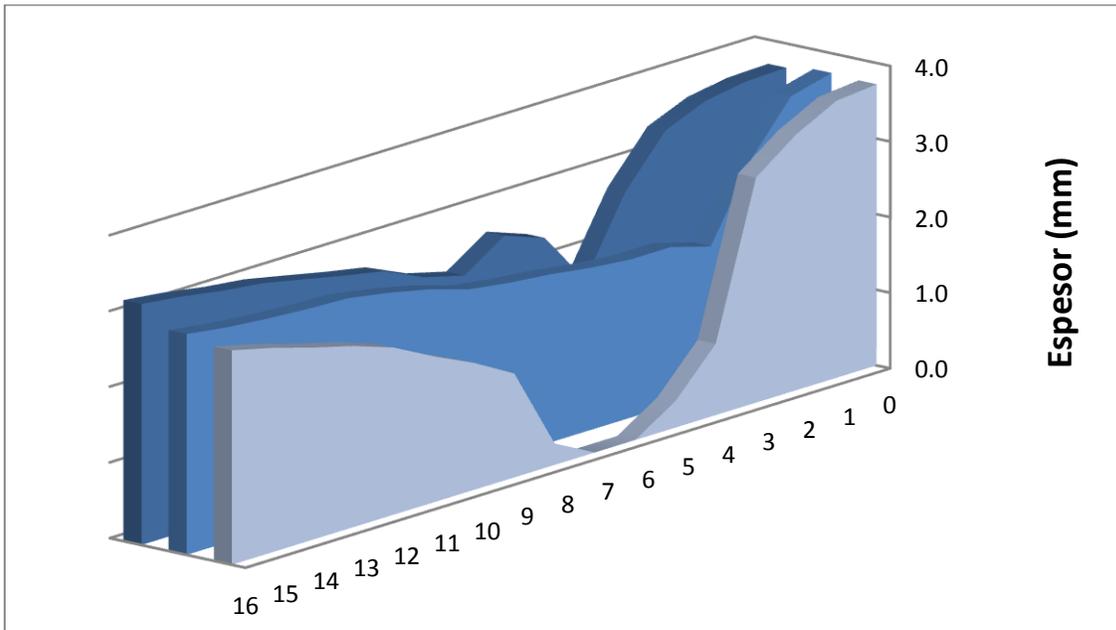


valores llegan a ser de 3.6 mm. Como se explicó en ese momento, se decidió continuar con estas mediciones porque con ellas lo que se busca es mostrar a grandes rasgos el perfil.

En cuanto al tamaño del orificio, en la **Figura 5-5** se pueden evidenciar las dimensiones con relación a una moneda de un centavo de dólar americano. Al ver la tubería por fuera del montaje se podría pensar que este tamaño no es tan grande como para poner en riesgo la tubería. Sin embargo, teniendo en cuenta que las condiciones internas reales incluyen flujo a altas presiones, se puede suponer que en una verdadera red pueden llegar a generarse consecuencias no deseadas para el sistema.



**Figura 5-5.** Vista del orificio y la zona desgastada de la prueba 1 con relación a una moneda de un centavo de dólar (la flauta estaba localizada en la parte izquierda de la imagen).



Gráfica 5-1. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 1 con áreas en tres dimensiones (la flauta estaba ubicada en el punto 16).



## 5.2 Prueba número 2- Tubería de 4” en PVC Biaxial.

| <b>PRUEBA NÚMERO 2</b>  |                  |
|---|------------------|
| <b>Diámetro Nominal (Pulg)</b>  | 4                |
| <b>Diámetro Interior (mm)</b>   | 108.06           |
| <b>PR (psi)</b>   | 200              |
| <b>RDE</b>  | 37               |
| <b>Fecha de Prueba (dd/mm/aa)</b>                                       | 30/05/12         |
| <b>Duración de la Prueba</b>  | 3h 4 min         |
| <b>Presión de Prueba (Bar)</b>  | 1.15 - 1.2       |
| <b>Tiempo desde que falló la tubería hasta que se detiene la prueba</b> | 0h 11 min 45 seg |
| <b>Promedio de Caudales (L/s)</b>                                       | 0.9368           |
| <b>Peso del material dentro de la tubería (g)</b>                       | 9200.47          |
| <b>Dimensiones del orificio o perforación</b>                           |                  |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 7.4              |
| <b>Largo (mm)</b>   | 20.9             |
| <b>Dimensiones de la zona desgastada</b>                                |                  |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 45.8             |
| <b>Largo (mm)</b>   | 66.29            |
| <b>Caracterización del hundimiento del suelo</b>                        |                  |
| <b>Ancho (cm)</b>   | 53               |
| <b>Largo (cm)</b>   | 70               |
| <b>Profundidad (cm)</b>   | 11               |

Tabla 5-3. Resumen de los resultados de la prueba número 2.

Para la segunda tubería de 4 pulgadas de PVC se realizaron todas las mediciones que se consideraron relevantes en el proceso. La presión a la que fue sometido el tubo oscila entre los 1.15 y los 1.2 bares (equivalentes a 16.7-17.4 psi o 11.7-12.2 metros de columna de agua). De nuevo, son valores que se pueden encontrar fácilmente en una red real. El tiempo que tardó este prototipo en fallar fue de 3 horas y 4 minutos; esto quiere decir que aunque no se tiene el tiempo exacto que duró la primera prueba, se puede suponer que el tiempo disminuyó alrededor de un 25% con el aumento de la presión.

Respecto a las dimensiones de los orificios, a lo ancho se tuvo un crecimiento cercano al 30% y a lo largo de un 60%, respecto al caso anterior. Estos incrementos no fueron proporcionales a la variación de la zona desgastada, la cual presentó un aumento cercano al 3% a lo ancho y una disminución del 6% a lo largo. Es importante tener en mente que estos valores también dependen del tiempo entre la falla y el instante en el que se detiene la prueba de la tubería. Para este caso este tiempo fue de 11 minutos; sin embargo, de la



prueba anterior no se tiene el registro. Por ende, sería de suponer que el valor faltante es muy superior a los 11 minutos; de esta forma se explicaría en parte, el por qué de que la región erosionada haya sido más larga en el primer experimento, aún cuando la presión con la que trabajó era menor.

En la **Figura 5-6** y la **Figura 5-7** se puede observar el tamaño del orificio y de la zona desgastada, esta vez teniendo como referencia una moneda de un centavo de dólar. Si se observa con detenimiento se puede detallar la forma como se desgasta este material. Se puede ver que la falla no se produce súbitamente, sino que el chorro destruye poco a poco cada capa, hasta convertirlas en pequeñas fibras reconocibles aún después de desenterrar el tubo.

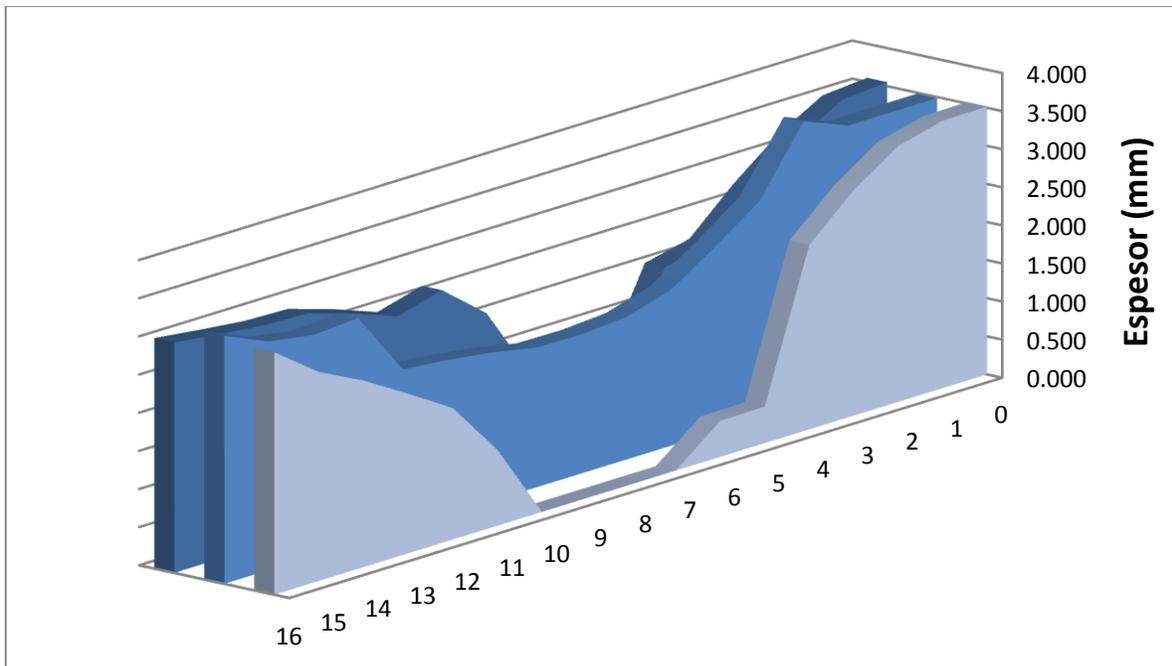
En las figuras también se puede apreciar que aunque el rompimiento de la superficie se da en la región de la derecha (mirando desde la flauta hacia aguas abajo), el lado contrario también presenta gran deterioro del material. Es factible pensar que si se mantenía durante un tiempo más prolongado la prueba, también se habría formado un orificio en esta zona.



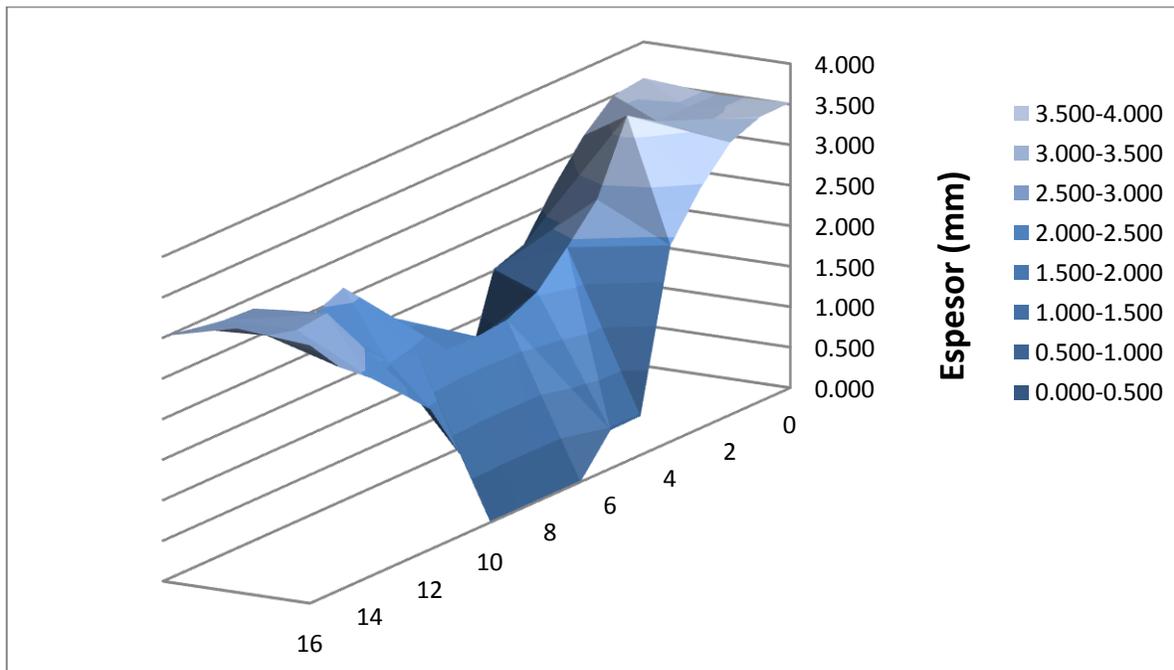
**Figura 5-6.** Vista del orificio de la prueba número 2 (la flauta estaba localizada en la parte izquierda de la imagen).



Figura 5-7. Vista de la zona desgastada de la prueba número 2 (vista desde aguas abajo hacia la flauta).



Gráfica 5-2. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 2 con áreas en tres dimensiones (la flauta estaba ubicada en el punto 16).



**Gráfica 5-3. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 2 con superficie en tres dimensiones (la flauta estaba ubicada en el punto 16).**

Con base en los gráficos obtenidos a partir de las mediciones del micrómetro, se puede ver que a diferencia de la prueba anterior, la zona desgastada de esta tubería sólo presentó 2 regiones, separadas por una pared de mayor altura. Es decir, se tiene que las mayores pérdidas de espesor se dieron a los costados y no en la zona central. Asimismo, en ellas se puede ver que a diferencia de la longitud, el desgaste del espesor de la tubería si es mucho mayor al del caso anterior.

En cuanto al hundimiento del suelo (Ver **Figura 5-8**), esta prueba confirmó que este fenómeno no era un caso aislado sino que era una consecuencia del chorro de agua, pues por más que se compactara la arena, después del experimento aparecía un espacio vacío en la superficie en la misma zona en la que estaba enterrada la flauta. Teniendo en cuenta que esta información puede llegar a ser bastante relevante a la hora de analizar otros efectos de las fugas, se decidió medir sus dimensiones desde esta prueba en adelante.

Las mediciones para este caso fueron de 53 cm de ancho, 70 cm de largo y una profundidad de 11 cm. En la **Figura 5-8** se pueden revisar los detalles; en ella se puede observar que existe una base plana, y a partir de ella las paredes crecen con una inclinación similar a lo largo de todo el perímetro. De igual forma, al detallar minuciosamente la fotografía, se puede deducir que el centro del hundimiento del suelo se encuentra cercano al punto donde termina la flauta.



Figura 5-8. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 2.

### 5.2.1 Granulometría del material dentro de la tubería.

Gracias a las dimensiones que alcanzó el orificio en esta prueba, y también al prolongado tiempo entre el momento de falla y el final del experimento, se encontró una gran cantidad de material sólido dentro de la tubería (Ver **Figura 5-9**).



Figura 5-9. Material particulado encontrado dentro de la tubería de la prueba número 2.

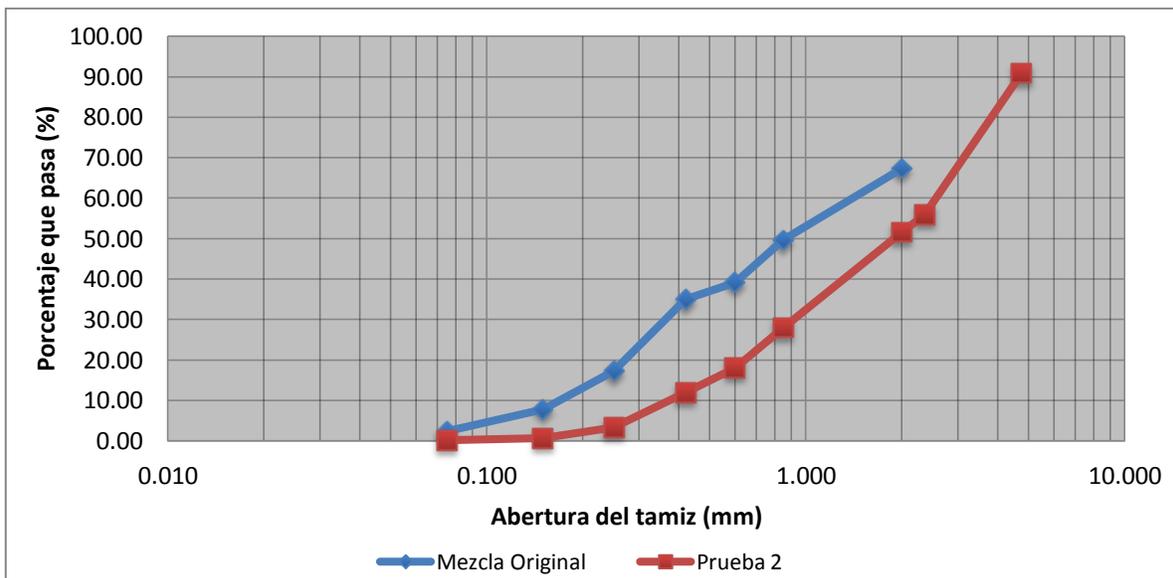
Al ver esto, se decidió hacer un análisis granulométrico de esta muestra para comparar sus propiedades con los valores iniciales. En la **Tabla 5-4** se muestran los resultados de este procedimiento; se presentan el porcentaje retenido en cada uno de los tamices y algunas



estadísticas de la gradación como: el D10, D30, D60, Cu y Cc. Es importante mencionar que a pesar que en un principio se utilizaron los mismos tamices con los que se venía trabajando, al final se tuvo que incluir algunos más grandes para diferenciar las partículas de mayor tamaño, cuya presencia en la nueva mezcla aumentó considerablemente respecto a la estándar.

| Abertura (mm) | # Tamiz | % Parcial Retenido | Peso Retenido (g) | % Acumulado Retenido | % Acumulado que pasa | Coeficientes de la muestra |       |
|---------------|---------|--------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|-------|
| 4.750         | 4       | 9.10               | 837.42            | 9.10                 | 90.90                | D10                        | 0.382 |
| 2.360         | 8       | 34.99              | 3219.09           | 44.09                | 55.91                |                            |       |
| 2.000         | 10      | 4.37               | 401.83            | 48.46                | 51.54                | D30                        | 0.949 |
| 0.850         | 20      | 23.56              | 2167.80           | 72.02                | 27.98                |                            |       |
| 0.600         | 30      | 9.99               | 919.17            | 82.01                | 17.99                | D60                        | 2.639 |
| 0.420         | 40      | 6.04               | 556.07            | 88.05                | 11.95                |                            |       |
| 0.250         | 60      | 8.61               | 792.25            | 96.67                | 3.33                 | Cu                         | 6.917 |
| 0.150         | 100     | 2.68               | 246.66            | 99.35                | 0.65                 |                            |       |
| 0.075         | 200     | 0.57               | 52.04             | 99.91                | 0.09                 | Cc                         | 0.893 |
| 0.000         | Fondo   | 0.09               | 8.13              | 100                  | 0.00                 |                            |       |

Tabla 5-4. Análisis Granulométrico de la mezcla encontrada.



Gráfica 5-4. Curva granulométrica de la mezcla original.

A partir de la información presentada anteriormente, se puede concluir que el material que entró en la tubería tiende a ser, en su mayoría, más grueso que la mezcla original. En la **Gráfica 5-4** se puede ver que la curva azul se eleva desde el primer punto, evidenciando la presencia de partículas de estos tamaños en la muestra, y llega al 50% cuando la abertura del tamiz corresponde a 0.850 mm. Esto último quiere decir que la mitad del peso del material corresponde a partículas cuyo diámetro medio es inferior a este valor.



La curva roja, en cambio, presenta una inclinación considerable únicamente después del tercer tamaño, es decir que antes de él no hay presencia relevante de material. El 50% del peso de esta muestra corresponde a partículas con tamaño mayor a los 2 mm, y el 30% maneja diámetros superiores a los 3 mm. A partir de estos resultados, se puede suponer que en la zona cercana a la flauta, el chorro lava las partículas más finas y deja únicamente las más grandes, y gracias a esto, el material que entra por el orificio es sustancialmente diferente al que se encuentra en el resto del tanque. Por otro lado, este fenómeno también podría estar vinculado con el hundimiento del suelo en la parte superior del tanque.

En la **Figura 5-10** y la **Figura 5-11** se puede confirmar gráficamente lo mencionado en el párrafo anterior. En ellas es evidente que el material de la zona que coincide con la posición de la flauta, contiene un porcentaje de partículas gruesas mucho mayor que las zonas que lo rodean. Por ende, el lavado tuvo que haberse dado en esta zona, la cual debe coincidir con el lugar donde se encontraba el orificio.



**Figura 5-10.** Imagen del tanque durante el proceso de desmonte de la tubería. (Revisar la parte central de la foto para evidenciar las diferencias del material, esta zona coincide con la posición de la flauta).



**Figura 5-11. Imagen detallada del material en la zona cercana a la flauta.**



### 5.3 Prueba número 3. Tubería de 4” en PVC Biaxial.

| <b>PRUEBA NÚMERO 3</b>  |             |
|---|-------------|
| <b>Diámetro Nominal (Pulg)</b>  | 4           |
| <b>Diámetro Interior (mm)</b>   | 108.06      |
| <b>PR (psi)</b>   | 200         |
| <b>RDE</b>  | 37          |
| <b>Fecha de Prueba (dd/mm/aa)</b>                                       | 4-5-6/06/12 |
| <b>Duración de la Prueba</b>  | 26 h 22min  |
| <b>Presión de Prueba (Bar)</b>  | 0.55 - 0.6  |
| <b>Tiempo desde que falló la tubería hasta que se detiene la prueba</b> | N/A*        |
| <b>Promedio de Caudales (L/s)</b>                                       | 0.6577      |
| <b>Peso del material dentro de la tubería (g)</b>                       | N/A*        |
| <b>Dimensiones del orificio o perforación</b>                           |             |
| <b>Ancho (mm)</b>   | N/A*        |
| <b>Largo (mm)</b>   | N/A*        |
| <b>Dimensiones de la zona desgastada</b>                                |             |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 42.08       |
| <b>Largo (mm)</b>   | 49.20       |
| <b>Caracterización del hundimiento del suelo</b>                        |             |
| <b>Ancho (cm)</b>   | 34          |
| <b>Largo (cm)</b>   | 47          |
| <b>Profundidad (cm)</b>   | 4           |

Tabla 5-5. Resumen de los resultados de la prueba número 3.

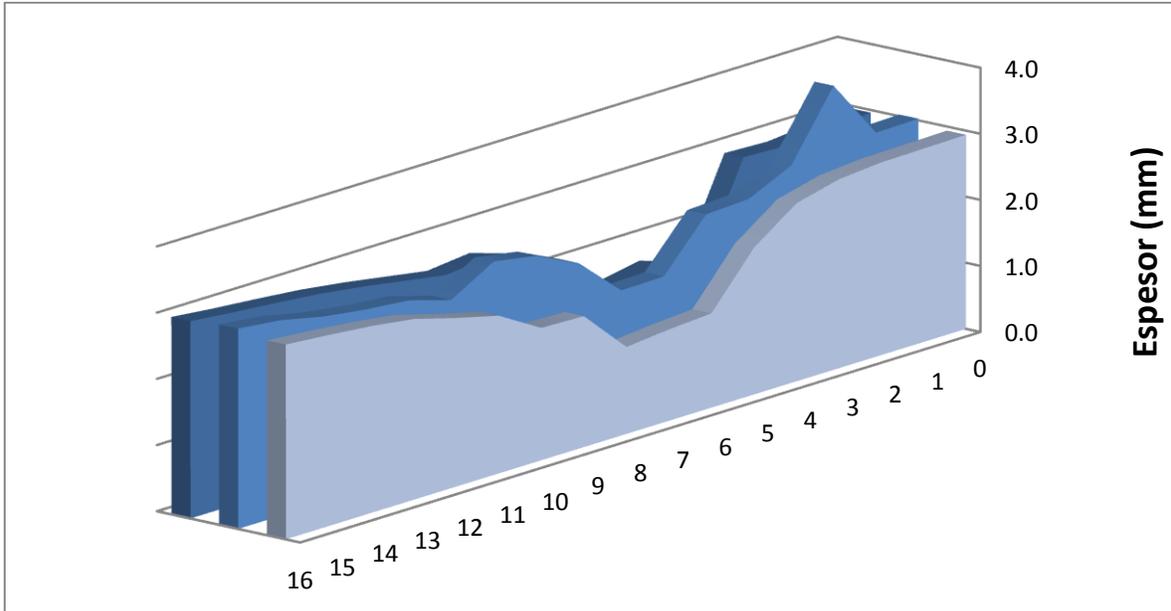
\*Esta prueba se detuvo antes de que presentara fugas, por ende no hay tiempo entre la falla y el fin de la prueba, de igual forma, tampoco hay material dentro de la misma ni dimensiones de orificios.

En primer lugar, vale la pena aclarar que la tercera prueba se detuvo antes de que fallara la tubería, pues se pensó que la razón para haber resistido más de 26 horas era que alguna parte del montaje había quedado mal instalada. Después de desmontarla se constató que no había ningún error, el material sí estaba afectando la superficie y era cuestión de tiempo para que se rompiera.

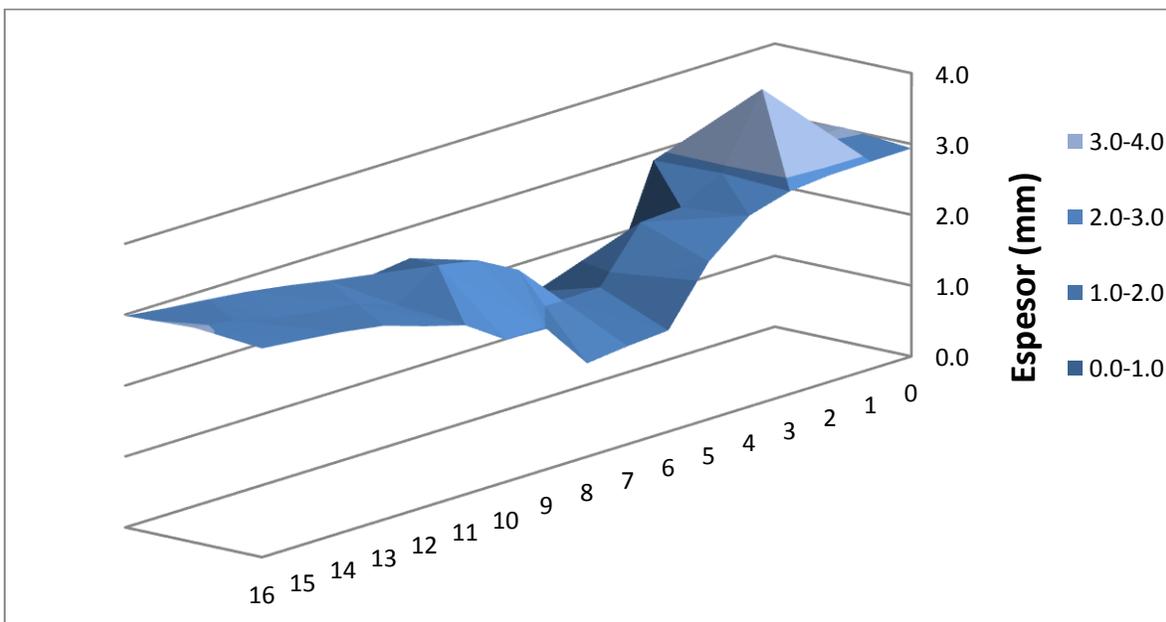
A pesar de que la prueba se sale del comportamiento esperado, se considera importante mencionar sus resultados para resaltar las posibles diferencias con el resto de experimentos. La presión a la que fue sometida la tubería oscilaba entre los 0.55 y los 0.60 bares, es decir entre 8 y 8.7 psi o entre 5.5 y 6.1 metros de columna de agua. Las medidas de la zona desgastada, por su parte, fueron 42,08 mm de ancho y 49,20 mm de largo, lo que



corresponde a un crecimiento del 4,7% y una disminución del 16.2% respectivamente, en comparación con la prueba anterior.



**Gráfica 5-5. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 3 con áreas en tres dimensiones (la flauta estaba ubicada en el punto 16).**



**Gráfica 5-6. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 3 con superficie en tres dimensiones (la flauta estaba ubicada en el punto 16).**



En la **Gráfica 5-5** y la **Gráfica 5-6** se puede observar la ligera disminución del espesor en la superficie de la tubería. Al revisar detalladamente las gráficas, se puede ver que a pesar que el desgaste es menor a los presentados anteriormente, la forma de la zona desgastada coincide con las encontradas anteriormente. A partir de esta información se puede concluir que no hay evidencia alguna de que haya existido un error en el montaje; sin embargo, dado el resultado se decidió realizar el ensayo una vez más bajo las mismas condiciones.

Los resultados de esta prueba se encuentran en la siguiente sección; no obstante, vale la pena anticipar que en ese caso el tubo si falló, es más, lo hizo en un tiempo menor al de este experimento. Con base en estos resultados se puede suponer que el proceso de abrasión por fugas está rodeado de bastante incertidumbre, y es factible que dependa de factores que no se están teniendo en cuenta en este momento.



**Figura 5-12.** Vista de la zona desgastada de la prueba 3 (la línea en lápiz representa la posición que ocupaba la flauta).

En la **Figura 5-12** se puede ver la zona desgastada generada en la prueba 3, relativa al tamaño de una moneda de un centavo de dólar. Al observar las sombras que se generan en la zona de falla, se puede evidenciar la diferencia entre el desgaste generado en esta prueba y las precedentes. Vale la pena resaltar que no parece ser coherente que para un tiempo de 26 horas se tengan medidas de la región erosionada menores a las de las pruebas anteriores, que fueron sometidas a un máximo de 21 horas. Esto vuelve a confirmar que detrás de estos procedimientos existe un factor que le da aleatoriedad al proyecto, y que hasta ahora se desconoce.

En último lugar, la **Figura 5-13** muestra el hundimiento del suelo en la parte superior del tanque. Las dimensiones del mismo fueron de 34 cm de ancho, 47 cm de largo y 4 cm de profundo, lo cual equivale a disminuciones de 35.9%, 32.9% y 63.6% respectivamente. En comparación con la prueba anterior, en este caso se disminuyeron drásticamente todas las



medidas, pero en especial la profundidad. A partir de esta información, se empieza a suponer que la presión y el tiempo de prueba son factores que afectan el tamaño de este espacio, y que la primera parece ser mucho más relevante que la segunda.



**Figura 5-13. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 3.**



#### 5.4 Prueba número 4. Tubería de 4” en PVC Biaxial.

Habiendo constatado que era cuestión de tiempo para acabar la anterior prueba, se repitió el experimento en una superficie intacta con las mismas condiciones con las que se trabajó en la Sección 5.3.

| <b>PRUEBA NÚMERO 4</b>  |                |
|---|----------------|
| <b>Diámetro Nominal (Pulg)</b>  | 4              |
| <b>Diámetro Interior (mm)</b>   | 108.06         |
| <b>PR (psi)</b>   | 200            |
| <b>RDE</b>  | 37             |
| <b>Fecha de Prueba (dd/mm/aa)</b>                                       | 12-13-14/06/12 |
| <b>Duración de la Prueba</b>  | 17 h 44 min    |
| <b>Presión de Prueba (Bar)</b>  | 0.55 - 0.6     |
| <b>Tiempo desde que falló la tubería hasta que se detiene la prueba</b> | 1h 9 min       |
| <b>Promedio de Caudales (L/s)</b>                                       | 0.6982         |
| <b>Peso del material dentro de la tubería (g)</b>                       | N/A*           |
| <b>Dimensiones del orificio o perforación</b>                           |                |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 4.66           |
| <b>Largo (mm)</b>   | 10.03          |
| <b>Dimensiones de la zona desgastada</b>                                |                |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 35.51          |
| <b>Largo (mm)</b>   | 49.73          |
| <b>Caracterización del hundimiento del suelo</b>                        |                |
| <b>Ancho (cm)</b>   | 32             |
| <b>Largo (cm)</b>   | 34             |
| <b>Profundidad (cm)</b>   | 2              |

Tabla 5-6. Resumen de los resultados de la prueba número 4.

\* Debido a las muy reducidas dimensiones del orificio, no hubo una cantidad representativa de material al interior de la tubería que ameritara realizar un análisis granulométrico.

La tubería de la prueba 4 sí falló, bajo las mismas condiciones a las que se estaba sometiendo la número 3 (0.55-0.60 bares que corresponden a 8-8.7 psi o entre 5.5 y 6.1 metros de columna de agua). El tiempo que requirió el material para desgastar completamente la superficie fue de 17 horas y 44 minutos, lo cual significa que este experimento no sólo logró formar el orificio, sino que lo hizo en un periodo de exposición 32% más corto que el anterior.



Las medidas del orificio fueron de 4,66 mm de ancho y 10,03 mm de largo, lo que equivale a una disminución del 37% y 52% respectivamente, en comparación con la prueba 2. Por su parte, las dimensiones de la zona desgastada fueron de 35,51 mm de ancho y 49,73 mm de largo, que al comparar con la prueba 3, representan una disminución del 15.6% e incremento del 1.1% respectivamente. Asimismo, al compararlos con la prueba 2 se obtiene una disminución de 11.66% en el ancho y de 15.28% en el largo.

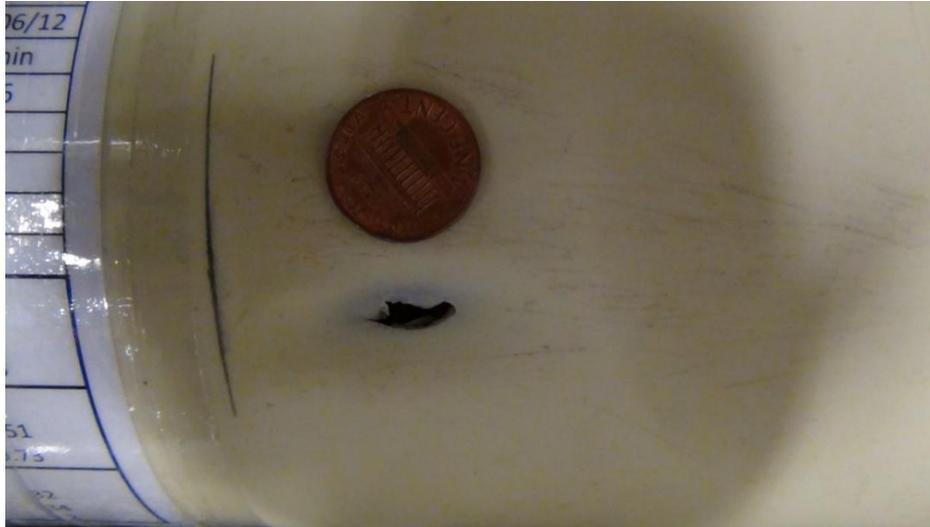
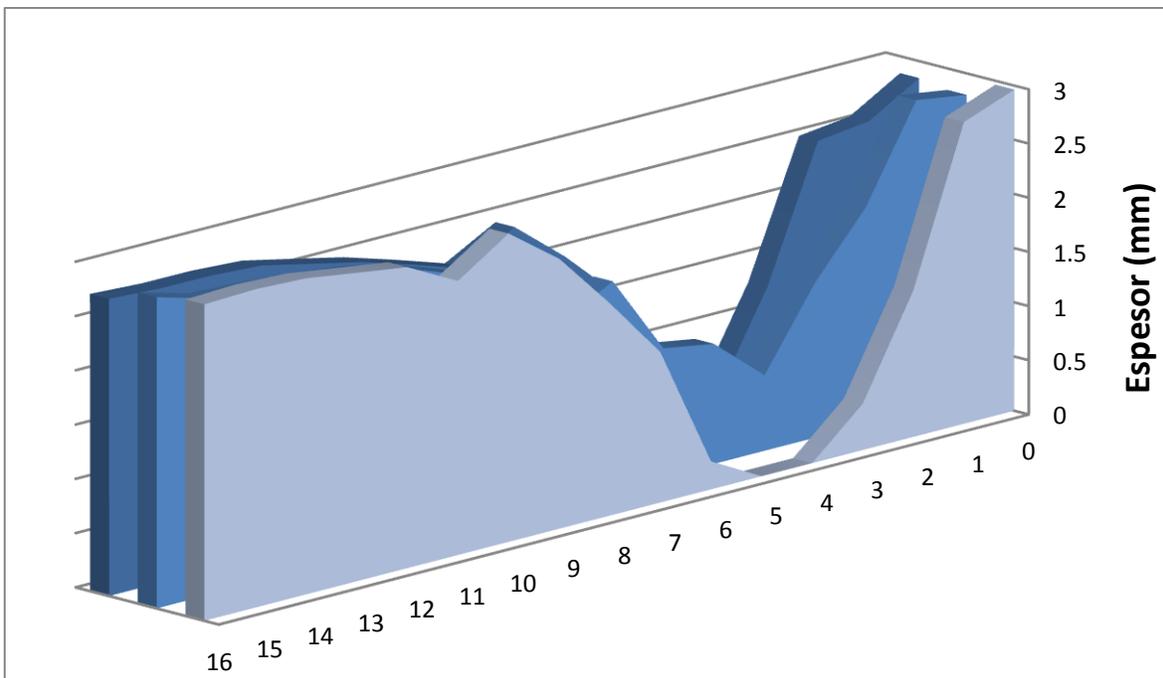


Figura 5-14. Vista del orificio de la prueba 4 (la línea en lápiz representa la ubicación de la flauta).

En la **Figura 5-14** se puede ver la magnitud del orificio relativa al tamaño de 1 centavo de dólar de Estados Unidos, mientras que en la **Figura 5-15** se puede detallar la zona desgastada. Es relevante mencionar que a pesar de que la prueba se detuvo 1 hora después del momento de falla, el orificio no llegó a ser tan grande como el de la segunda prueba (cuyo tiempo desde la falla hasta que se detuvo la prueba fue de tan solo 11 min). Con esta información, se vuelve a evidenciar que la presión tiene un rol importante en la evolución de la perforación, y que ésta parece ser mucho más importante que el tiempo.



Figura 5-15. Vista de la zona desgastada de la prueba 4 (la flauta se encontraba en la parte superior de la foto).



Gráfica 5-7. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 4 con áreas en tres dimensiones (la flauta se encontraba en el punto 16).

A partir de la **Gráfica 5-7** se puede observar que la zona desgastada presenta deterioro excesivo en los extremos y en menor medida en la parte central, de la misma forma que se viene presentando para las distintas pruebas. Respecto al hundimiento del suelo (Ver **Figura 5-16**), se obtuvieron dimensiones de 32 cm de ancho, 34 cm de largo y 2 cm de

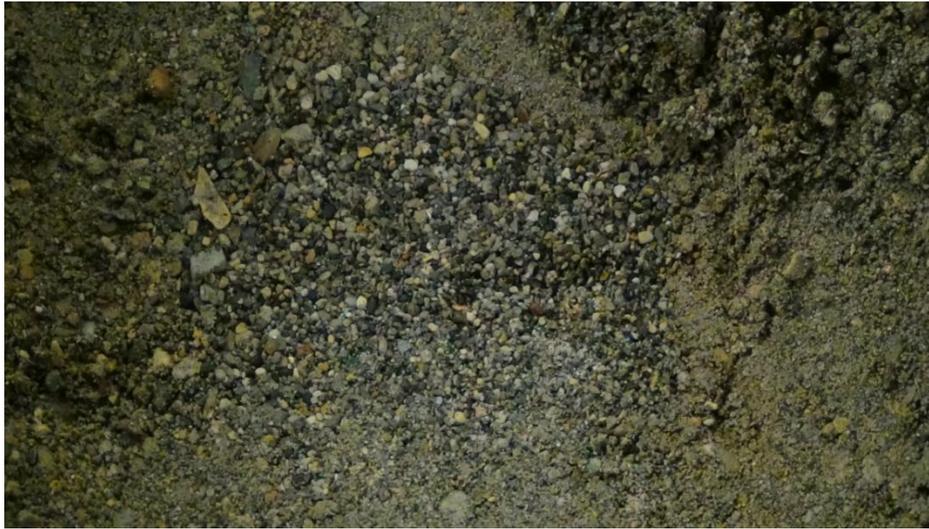


profundidad, valores que son similares a los obtenidos en la prueba número 3, pero mucho más pequeños que los encontrados en el segundo experimento.



**Figura 5-16. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 4.**

Vale la pena mencionar de nuevo, que la razón para no haberle realizado un análisis granulométrico al material dentro de la tubería, es que la cantidad encontrada fue demasiado pequeña. Las dimensiones del orificio fueron bastante reducidas, y de esta forma no permitieron el desplazamiento de una muestra representativa al interior del tubo. No obstante, en la **Figura 5-17** se presenta una imagen del tipo de partículas que se encontraban en la zona cercana a la flauta durante el proceso de desmonte. En ella es evidente que el porcentaje de arenas gruesas y gravas finas o medias, es mucho mayor que el de la mezcla inicial, la cual está presente en otras zonas del tanque (Ver por ejemplo la **Figura 5-16**).



**Figura 5-17. Tipo de material encontrado en las zonas más cercanas a la flauta.**



## 5.5 Prueba número 5. Tubería de 6” en PVC Biaxial.

En la prueba 5 se empezó a experimentar con tuberías de 6 pulgadas para evaluar la sensibilidad del resultado final frente esta variable. Los resultados del primer prototipo de este tamaño se muestran a continuación.

| <b>PRUEBA NÚMERO 5</b>  |            |            |
|---|------------|------------|
| <b>Diámetro Nominal (Pulg)</b>  | 6          |            |
| <b>Diámetro Interior (mm)</b>   | 159.04     |            |
| <b>PR (psi)</b>   | 200        |            |
| <b>RDE</b>  | 37         |            |
| <b>Fecha de Prueba (dd/mm/aa)</b>                                       | 27/06/12   |            |
| <b>Duración de la Prueba</b>  | 7h 51min   |            |
| <b>Presión de Prueba (Bar)</b>  | 1.15 - 1.2 |            |
| <b>Tiempo desde que falló la tubería hasta que se detiene la prueba</b> | 1h 49 min  |            |
| <b>Promedio de Caudales (L/s)</b>                                       | 1.0174     |            |
| <b>Peso del material dentro de la tubería (g)</b>                       | 20980.75   |            |
| <b>Dimensiones de los orificios o perforaciones</b>                     | Orificio 1 | Orificio 2 |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 9.34       | 7.94       |
| <b>Largo (mm)</b>   | 14.46      | 15.91      |
| <b>Dimensiones de la zona desgastada</b>                                |            |            |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 43.37      |            |
| <b>Largo (mm)</b>   | 71.5       |            |
| <b>Caracterización del hundimiento del suelo</b>                        |            |            |
| <b>Ancho (cm)</b>   | 61         |            |
| <b>Largo (cm)</b>   | 83         |            |
| <b>Profundidad (cm)</b>   | 14         |            |

Tabla 5-7. Resumen de los resultados de la prueba número 5.

La primera tubería de 6 pulgadas en PVC fue sometida a una presión que oscilaba entre los 1.15 y los 1.2 bares, es decir entre 16.7 y 17.4 psi o entre 11.7 y 12.2 metros de columna de agua. El tiempo total del experimento fue de 7 horas y 51 minutos, y el tiempo hasta la falla fue de más o menos 6 horas, es decir casi el doble del valor para la prueba 2 (la cual trabajaba con la misma presión pero con un diámetro de 4 pulgadas). Es de resaltar que para este caso, el tiempo entre la falla y el momento en que se detiene el ensayo fue mucho mayor a los que se habían tenido antes. Por lo tanto, otros resultados se verán influenciados por esto y presentarán valores sustancialmente diferentes a los ya vistos.



La primera diferencia se encuentra en las dimensiones de los orificios, pues en esta oportunidad se presentaron en total 2 perforaciones a lo largo de la superficie, ambas de características similares a las anteriores. En primera instancia se podría considerar una posible relación entre este fenómeno y el diámetro de la tubería, sin embargo, posteriores pruebas con el mismo tamaño refutarán esto. De esta forma, la explicación a este suceso es la exposición a una presión considerable durante una ventana de tiempo prolongada.

En la **Figura 5-18 y 5-19** se puede observar detalladamente la forma de los orificios y las características de la zona desgastada. En ambas imágenes es evidente que las pérdidas de espesor fueron mucho más grandes en comparación con otras pruebas, y no solo se presentaron dos fallas sino que la parte central se rompió y permitió conectarlas, algo que no había sucedido antes. No obstante, esta conexión no es muy grande y no contradice del todo la tendencia que se venía presentando, en la que el centro de la zona erosionada pierde menos material que las regiones laterales. Eso sí, aparentemente, con el paso del tiempo el chorro de agua tiende a homogeneizar la superficie desgastada. De esta forma, se podría suponer que si las anteriores pruebas se hubieran prolongado más tiempo, también habrían presentado dos fallas y una conexión entre ellas.

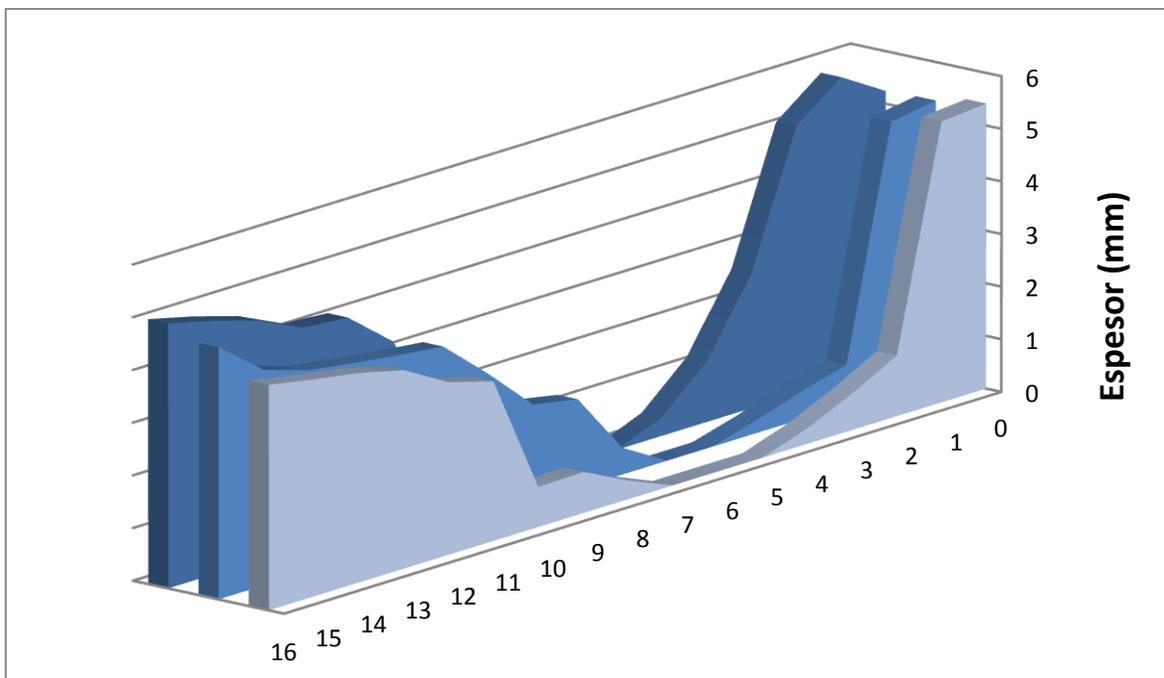


**Figura 5-18.** Vista del orificio de la prueba 5 (la flauta se encontraba en la parte izquierda sobre la línea en lápiz).

En la **Gráfica 5-8** se ilustra la superficie desgastada a partir de las mediciones del micrómetro. En ella se puede confirmar lo que ya se había mencionado, las partes laterales de la zona afectada perdieron mucho más material que la central, sin embargo, ésta fue la primera tubería que presentó rompimientos totales en la línea de medición de la mitad. Asimismo, las lecturas del equipo evidencian que las diferencias entre las distintas regiones se redujeron en comparación a las que se habían presentado anteriormente.



Figura 5-19. Vista de la zona desgastada de la prueba 5 (la flauta se encuentra en la parte superior izquierda de la imagen).



Gráfica 5-8. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 5 con áreas en tres dimensiones (la flauta se encuentra en el punto 16).

En cuanto a las características del hundimiento del suelo de esta prueba, en la **Figura 5-20** se puede ver que de nuevo, las dimensiones de éste fueron afectadas de gran manera por los 1.2 Bar de presión, y el tiempo prolongado entre la falla y el punto en el que se detiene la prueba. El primer factor permitió que el lavado de las partículas finas fuera más efectivo y retirara una mayor cantidad de material. El segundo por su parte, facilitó el paso de arena



desde el tanque hacia el tubo, logrando así que el volumen total para este experimento fuera más del doble que el de la prueba 2.

De esta forma, las dimensiones del hundimiento del suelo fueron de 14 cm de profundidad, 61 cm de ancho y 83 cm de largo, sobra decir que entre todas las pruebas realizadas hasta el momento, este es el más grande. El resto de características de la en la zona afectada parecen ser las mismas que las de los casos anteriores, el centro aparentemente está ubicado en una zona cercana a donde está enterrada la flauta, y las pendientes de los distintos taludes tienden a ser similares.



Figura 5-20. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 5.

### 5.5.1 Granulometría

Tras haber encontrado una gran cantidad de material en el interior de la tubería de la quinta prueba, se decidió realizar un análisis granulométrico de la mezcla para comparar sus propiedades con la muestra original, y también con los resultados de la prueba 2. Esto último se hizo con el objetivo de evaluar la influencia del tiempo que transcurrió, desde la falla hasta el final de la prueba, en la distribución de tamaños de las partículas que pasaron del tanque al tubo.

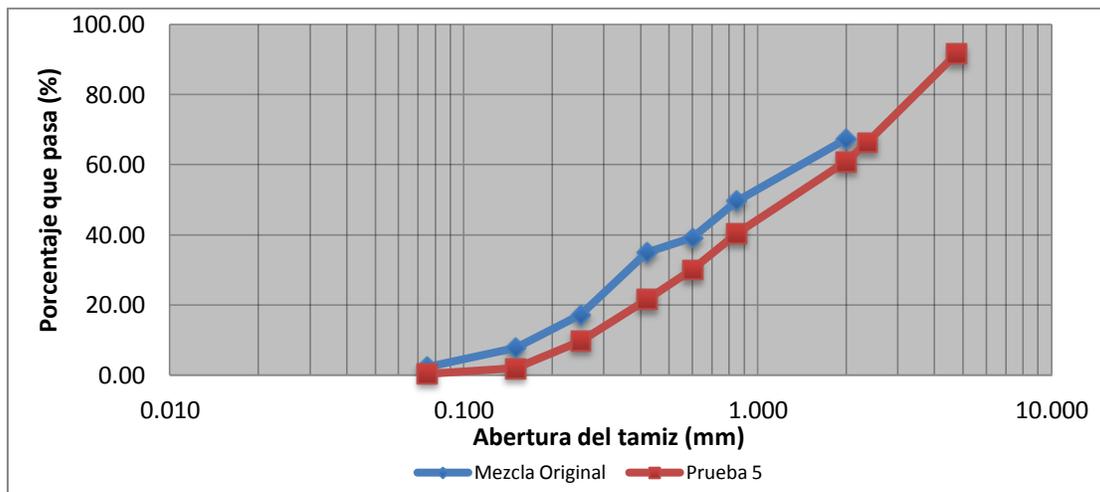
Los resultados encontrados se muestran en la **Tabla 5-8**; en ella se presentan los porcentajes de peso retenidos en cada tamiz, los valores acumulados hasta cierto tamaño y también algunos índices que describen la muestra, entre ellos el: D10, D30, D60, Cu y Cc. En este análisis granulométrico se usaron los mismos tamices que en la prueba 2, es decir 2 más que en el proceso original.



| Abertura (mm) | # Tamiz | % Parcial Retenido | Peso Retenido (g) | % Acumulado Retenido | % Acumulado que pasa | Coeficientes de la muestra |       |
|---------------|---------|--------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|-------|
| 4.750         | 4       | 8.38               | 1757.18           | 8.38                 | 91.62                | D10                        | 0.254 |
| 2.360         | 8       | 25.25              | 5298.33           | 33.63                | 66.37                |                            |       |
| 2.000         | 10      | 5.43               | 1140.19           | 39.06                | 60.94                | D30                        | 0.598 |
| 0.850         | 20      | 20.59              | 4319.16           | 59.65                | 40.35                |                            |       |
| 0.600         | 30      | 10.25              | 2150.84           | 69.90                | 30.10                | D60                        | 1.948 |
| 0.420         | 40      | 8.58               | 1801.00           | 78.48                | 21.52                |                            |       |
| 0.250         | 60      | 11.78              | 2472.57           | 90.27                | 9.73                 | Cu                         | 7.671 |
| 0.150         | 100     | 7.77               | 1629.30           | 98.04                | 1.96                 |                            |       |
| 0.075         | 200     | 1.57               | 330.12            | 99.61                | 0.39                 | Cc                         | 0.722 |
| 0.000         | Fondo   | 0.39               | 82.05             | 100                  | 0.00                 |                            |       |

Tabla 5-8. Análisis granulométrico de la mezcla encontrada en la tubería usada en la prueba 5.

Con los resultados obtenidos se encontró que el material no es muy uniforme, a causa de que su Cu es bastante mayor a 3. De igual forma, teniendo en cuenta que el Cc no está entre 1 a 3 se podría decir que la gradación no es la ideal. A partir de ambos datos se podría pensar que aunque existen partículas de distintos tamaños, pareciera que no están divididas equitativamente en los distintos tamices.



Gráfica 5-9. Curva granulométrica del material encontrado en la tubería de la prueba 5.

A partir de la **Gráfica 5-9** se puede concluir que la mezcla que pasó a la tubería es más gruesa que aquella que permaneció en el tanque. La curva roja no se levanta hasta el segundo tamiz (tercer punto de izquierda a derecha), mientras que la mezcla original (curva azul) presenta cambios desde el primer punto. Esto quiere decir que en la muestra de la prueba 5, la cantidad de partículas menores a este tamaño es bastante reducida.

De igual forma, el porcentaje que pasa los distintos tamices en el análisis granulométrico original siempre es mayor que los de la muestra de la prueba 5. Esto quiere decir que el material que se queda en el tanque siempre tiene más partículas pequeñas que un



determinado tamaño, en comparación con la de este experimento. Finalmente, es importante mencionar que al comparar los resultados de la **Sección 5.2.1** con los que se obtuvieron en este caso, se puede ver que en esa oportunidad las partículas eran en general un poco más gruesas (ver curvas granulométricas y coeficientes D10, D30 y D60).

A partir de la **Figura 5-21** y la **Figura 5-22** se puede hacer un análisis gráfico de ambas muestras. En la primera es evidente que el centro de la foto (zona cercana a la flauta y al orificio), tiene partículas mucho más gruesas que sus alrededores. Esto se confirma en la segunda fotografía, que corresponde a las partículas que al estar en la región mencionada anteriormente, pudieron atravesar la falla.



**Figura 5-21.** Foto del material granular encontrado por encima de la tubería una vez terminada la prueba 5.



**Figura 5-22.** Foto del material granular que ingresó a la tubería.



## 5.6 Prueba número 6. Tubería de 6” en PVC Biaxial.

| <b>PRUEBA NÚMERO 6</b>  |                       |
|---|-----------------------|
| <b>Diámetro Nominal (Pulg)</b>  | 6                     |
| <b>Diámetro Interior (mm)</b>   | 159.04                |
| <b>PR (psi)</b>   | 200                   |
| <b>RDE</b>  | 37                    |
| <b>Fecha de Prueba (dd/mm/aa)</b>                                       | 6-9-10-12-19-23/07/12 |
| <b>Duración de la Prueba</b>  | 26h 38min             |
| <b>Presión de Prueba (Bar)</b>  | 0.90 - 0.95           |
| <b>Tiempo desde que falló la tubería hasta que se detiene la prueba</b> | 4 min                 |
| <b>Promedio de Caudales (L/s)</b>                                       | 0.8772                |
| <b>Peso del material dentro de la tubería (g)</b>                       | N/A                   |
| <b>Dimensiones del orificio o perforación</b>                           |                       |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 3.34                  |
| <b>Largo (mm)</b>   | 8.48                  |
| <b>Dimensiones de la zona desgastada</b>                                |                       |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 44.11                 |
| <b>Largo (mm)</b>   | 62.42                 |
| <b>Caracterización del hundimiento del suelo</b>                        |                       |
| <b>Ancho (cm)</b>   | 43                    |
| <b>Largo (cm)</b>   | 62                    |
| <b>Profundidad (cm)</b>   | 9                     |

Tabla 5-9. Resumen de los resultados de la prueba número 6.

Para la segunda tubería de 6 pulgadas de PVC, la presión del experimento oscilaba entre los 0.90 y los 0.95 bares, equivalentes a aproximadamente 13 psi o 9.0 metros de columna de agua. El tiempo total del ensayo fue de 26 horas y 38 minutos, lo cual equivale a casi 4 veces el tiempo de la prueba 5 (la cual tenía un tubo del mismo tamaño pero con una presión de 1.2 Bar), y casi 7 veces el de la 1 (la cual tenía la misma presión pero un diámetro de 4”). Se debe tener en cuenta que el tiempo entre la falla y el punto en el que se detuvo este experimento fue de tan solo 4 minutos; por ende, en comparación con la prueba 5, los efectos abrasivos sobre la superficie del material una vez se ha formado el orificio no son tan grandes.

Respecto a la perforación de la pared, en la **Figura 5-23** se puede ver que el orificio es bastante pequeño en comparación con los de la prueba 5. Esta variación evidencia una vez más la fuerte influencia de la presión de prueba, y del tiempo extra que se deja encendido el experimento después de que se rompe la superficie. Por otro lado, si se comparan estas

dimensiones con las de la prueba 1, la cual manejaba un tubo de 4" de diámetro, se tiene que las últimas son superiores a las primeras. Sin embargo, resulta bastante difícil hablar de la causalidad de la variación del diámetro de la tubería de prueba, cuando no se tiene certeza de los tiempos de ensayo de la primera.

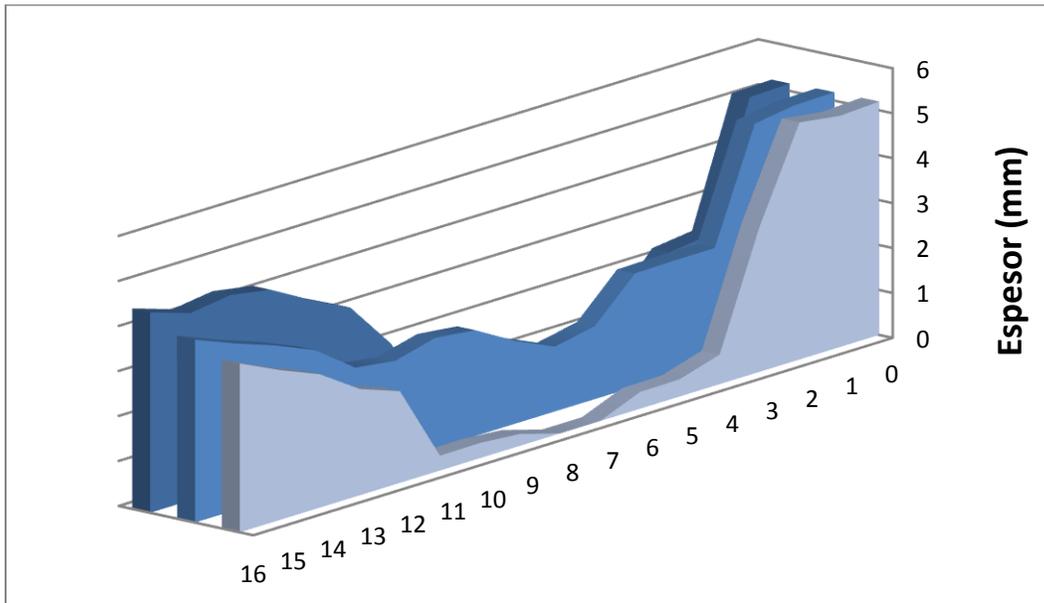


Figura 5-23. Vista del orificio de la prueba 6 (la flauta se encontraba en la parte izquierda sobre la línea en lápiz).

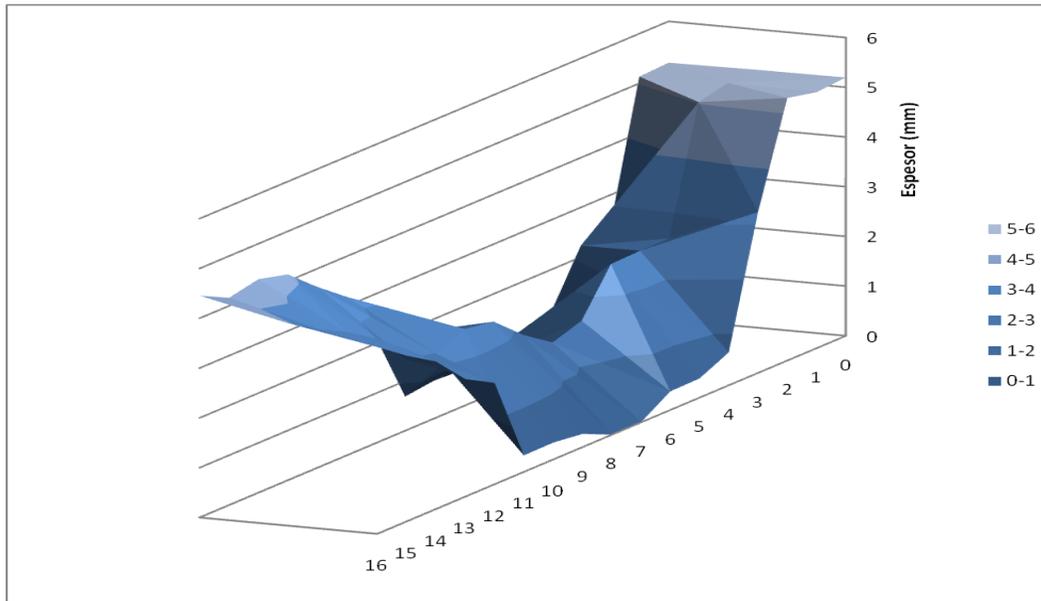
En la **Figura 5-23** se aprecian las dimensiones del orificio con relación a un centavo de dólar de Estados Unidos. Al detallar la imagen se puede constatar que en esta prueba, la superficie de la pared que se rompió totalmente, no es tan grande como en los casos previos. No obstante, a pesar que la perforación no fue de tamaño considerable, era cuestión de tiempo para hacerla crecer y hasta para generar otro orificio en el lado opuesto de la zona desgastada, tal cual evidencia la **Figura 5-24**. Gracias a esta última fotografía también se puede ver que la forma general de la región erosionada coincide con lo encontrado anteriormente, dos zonas en lados opuestos donde se da el mayor deterioro y una línea central en mejor estado.



Figura 5-24. Vista de la zona desgastada de la prueba 6 (la flauta se encontraba en la parte derecha).



Gráfica 5-10. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 6 con áreas en tres dimensiones (la flauta estaba localizada en el punto 16).



Gráfica 5-11. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 6 con superficie en tres dimensiones (la flauta estaba localizada en el punto 16).

En la **Gráfica 5-10** y la **Gráfica 5-11** se representan la zona erosionada y el orificio, a partir de las mediciones del micrómetro. En ellas se puede observar que la región afectada presenta un mayor desgaste en los extremos y menor en la parte central, de la misma forma



como se venía dando para las distintas pruebas. A partir de estos perfiles es evidente que existen algunas diferencias con los anteriores experimentos; sin embargo, a grandes rasgos la región desgastada sigue teniendo características similares. Teniendo esto en mente, se puede decir que para esta tubería, el cambio de diámetro no produjo una variación drástica en las variables de salida.

En cuanto al hundimiento del suelo, en la **Figura 5-25** se puede ver que el tamaño de éste disminuyó en comparación con los encontrados en casos previos. Las dimensiones exactas fueron 9 cm de profundidad, 43 cm de ancho y 62 centímetro de largo. A partir de la evidencia encontrada se puede suponer que la reducción de la presión de prueba, y el limitado tiempo para que pase material del tanque al tubo, previnieron que el hundimiento de la arena fuera mayor.



Figura 5-25. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 6.



Figura 5-26. Suelo por encima de la tubería en el montaje de la prueba 6.



Cabe aclarar que gracias a que en esta prueba no pasó mucho material del tanque a la tubería, no había razones para realizar un análisis granulométrico del mismo. No obstante, en la **Figura 5-26** se puede apreciar el tipo de suelo que se encontró por encima de la tubería a medida que avanzaba el proceso de desmontaje. A primera vista, es evidente que este material contiene un número de partículas de gran tamaño sustancialmente mayor que la mezcla que se encontraba originalmente en el tanque. Por ende, se puede afirmar que de nuevo se dio el lavado de las partículas más finas alrededor de la flauta.



## 5.7 Prueba número 7. Tubería de 6” en Hierro Dúctil.

En lugar de seguir adelante experimentando con tuberías de PVC de mayor diámetro, se optó por cambiar el material y trabajar con prototipos en hierro dúctil de 6”. Antes de mostrar los resultados, es importante mencionar que este tipo de tubos tienen una capa exterior metálica, pero también tienen un recubrimiento interno en mortero que aísla la superficie externa del agua transportada en el interior. Por esta razón, aunque el espesor total es de casi 18 mm, tan sólo una parte de esto corresponde al hierro dúctil.

| <b>PRUEBA NÚMERO 7</b>  |                   |
|---|-------------------|
| <b>Diámetro Nominal (Pulg)</b>  | 6                 |
| <b>Diámetro Interno Mortero (mm)</b>                                    | 149.93            |
| <b>Diámetro Interno Hierro (mm)</b>                                     | 155.35            |
| <b>Diámetro Externo (mm)</b>  | 169.87            |
| <b>Espesor de Pared Hierro (mm)</b>                                     | 7.26              |
| <b>Espesor de Pared Total (mm)</b>                                      | 9.97              |
| <b>Fecha de Prueba (dd/mm/aa)</b>                                       | 25-26-27-30/07/12 |
| <b>Duración de la Prueba</b>  | 24h 32min         |
| <b>Presión de Prueba (Bar)</b>  | 1.9- 2.1          |
| <b>Tiempo desde que falló la tubería hasta que se detiene la prueba</b> | 13 min            |
| <b>Promedio de Caudales (L/s)</b>                                       | 1.2331            |
| <b>Peso del material dentro de la tubería (g)</b>                       | 17340             |
| <b>Dimensiones del orificio o perforación</b>                           |                   |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 7.87              |
| <b>Largo (mm)</b>   | 13.89             |
| <b>Dimensiones de la zona desgastada</b>                                |                   |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 53.29             |
| <b>Largo (mm)</b>   | 73.07             |
| <b>Caracterización del hundimiento del suelo</b>                        |                   |
| <b>Ancho (cm)</b>   | 70                |
| <b>Largo (cm)</b>   | 92                |
| <b>Profundidad (cm)</b>   | 20                |

Tabla 5-10. Resumen de los resultados de la prueba número 7.

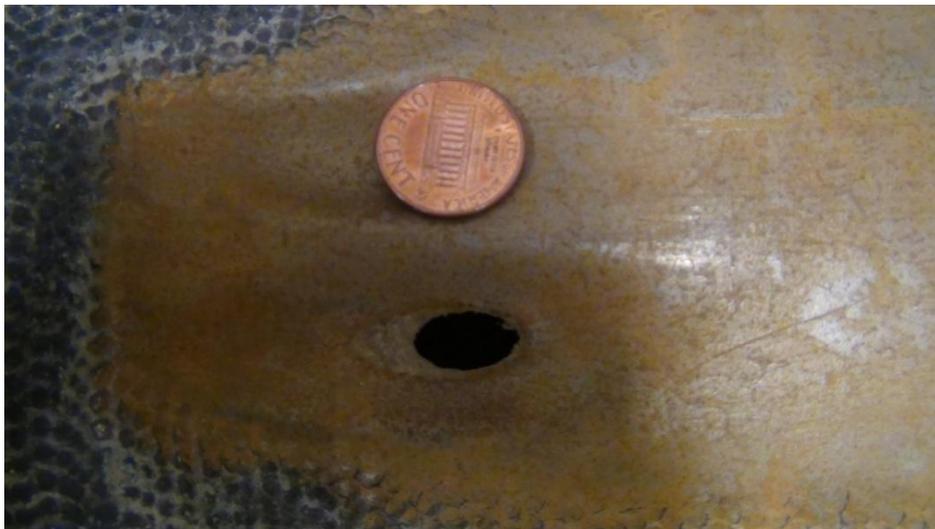
La primera tubería de 6 pulgadas en hierro dúctil fue sometida a una presión que oscilaba entre los 1.9 y los 2.1 bares, es decir entre 27.6 y 30.4 psi o entre 19.4 y 21.4 metros de columna de agua. La duración total del experimento fue de 24 horas y 32 minutos, y el tiempo hasta la falla fue de 13 minutos menos, es decir 24 horas y 19 minutos. Al comparar



estos valores con los de las anteriores pruebas, no se encuentran variaciones muy grandes en términos absolutos, pues otros prototipos habían resistido periodos de tiempo similares.

Sin embargo, si se analiza la información con relación a la presión del ensayo, saltarán a la vista diferencias bastante grandes entre ambos materiales. Por ejemplo, los prototipos de las pruebas 5 y 6 resistieron más de 25 horas, y el de la 4 soportó las condiciones por más de 17; no obstante, ninguno de ellos trabajaba con más de la mitad de la presión del presente tubo. Esto quiere decir que la diferencia entre las resistencias de ambos materiales puede ser sustancialmente grande, y posiblemente, si se llegara a probar el PVC en condiciones más extremas, las perforaciones aparecerían en cuestión de minutos. De esta forma se confirmó lo que se esperaba intuitivamente: que las tuberías metálicas presentarían un mejor desempeño que el del PVC.

En cuanto a la falla, en la **Figura 5-27** se ve que en este caso sólo se formó un orificio en la superficie de la tubería. Aunque la forma de éste es bastante similar a las que se había encontrado anteriormente, sus dimensiones son superiores al promedio pero levemente inferiores a las de las pruebas 2 y 5.



**Figura 5-27.** Vista del orificio de la prueba 7 (la flauta se encontraba en la parte izquierda de la imagen).

Respecto a la zona desgastada en esta prueba, se puede decir que al igual que los orificios; ésta siguió la forma general encontrada en los experimentos previos. Es decir que a pesar del cambio del material, las características principales de la región erosionada permanecen constantes. La única diferencia relevante, es que para este ensayo se podría hablar de abrasión y corrosión al mismo tiempo, ya que en la zona afectada se alcanza a percibir cierto tono amarillento que es indicio de procesos químicos de oxidación.

Las causas de esto son: el chorro a altas presiones que destruye la capa que protege la superficie metálica ante este fenómeno, y por supuesto, la presencia de agua saliendo desde



la flauta. Esta última permite que se den los procesos de oxidación en las partes de la pared que han perdido su capa protectora. El estado final de la región afectada se puede observar en la **Figura 5-27** y la **Figura 5-28**; en esta última se puede apreciar con mayor detalle la superficie de falla de la prueba 7.



**Figura 5-28.** Vista de la zona desgastada de la prueba 7 (la flauta se encontraba en la parte superior de la imagen).

En relación con el hundimiento del suelo, se puede decir que a pesar que la forma general del mismo es similar a la que se venía presentando en el resto de ensayos, las dimensiones son mucho mayores a cualquier otra, aún a aquellas de la prueba 5 que hasta ahora habían sido las más grandes. Este comportamiento, seguramente se debe a que el lavado de las partículas a una presión tan alta es mucho más efectivo, y también a que las condiciones del experimento permitieron que entrara una gran cantidad de material a la tubería (17340 g).

En la **Figura 5-29** se ilustra el estado final de la superficie de arena; en ella es evidente que el ancho del espacio vacío ya alcanzó los límites del tanque, y por ende no puede expandirse más en esta dirección. Asimismo, es importante mencionar que la profundidad del mismo empieza a ser considerable, 20 cm ya es un valor que modifica bastante las características de la superficie. Infortunadamente, el agua no permite visualizar la magnitud del vacío, y al intentar retirarla se afectaban las condiciones originales.



Figura 5-29. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 7.

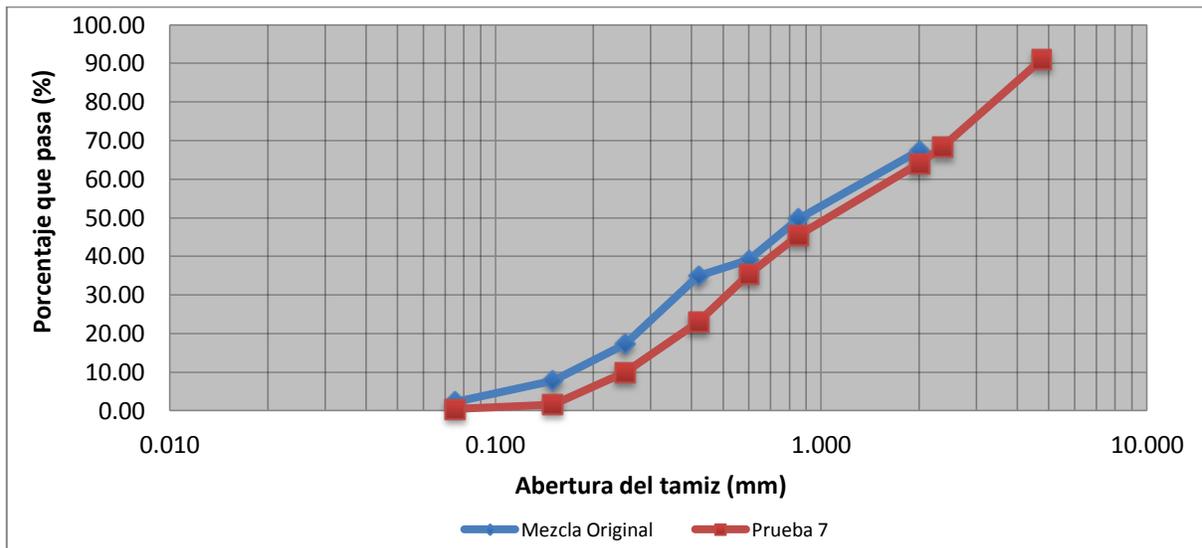
### 5.7.1 Granulometría

Tras haber encontrado una gran cantidad de material en el interior de esta tubería, se optó por realizar el mismo análisis que se había hecho en los casos anteriores. De nuevo, esto se hizo con el objetivo de evaluar las diferencias en la distribución de tamaños de las partículas que pasaron del tanque al tubo, respecto a la mezcla original, y a las encontradas en las otras dos oportunidades. Los resultados encontrados se muestran en la **Tabla 5-11**, en el mismo formato con el que se venía trabajando previamente.

| Abertura (mm) | # Tamiz | % Parcial Retenido | Peso Retenido (g) | % Acumulado Retenido | % Acumulado que pasa | Coeficientes de la muestra |       |
|---------------|---------|--------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|-------|
| 4.750         | 4       | 8.98               | 1556.57           | 8.98                 | 91.02                | D10                        | 0.251 |
| 2.360         | 8       | 22.74              | 3943.59           | 31.72                | 68.28                |                            |       |
| 2.000         | 10      | 4.25               | 737.38            | 35.97                | 64.03                | D30                        | 0.522 |
| 0.850         | 20      | 18.57              | 3220.77           | 54.55                | 45.45                |                            |       |
| 0.600         | 30      | 10.08              | 1748.31           | 64.63                | 35.37                | D60                        | 1.751 |
| 0.420         | 40      | 12.42              | 2153.51           | 77.05                | 22.95                |                            |       |
| 0.250         | 60      | 13.06              | 2263.90           | 90.10                | 9.90                 | Cu                         | 6.965 |
| 0.150         | 100     | 8.28               | 1434.99           | 98.38                | 1.62                 |                            |       |
| 0.075         | 200     | 1.20               | 208.47            | 99.58                | 0.42                 | Cc                         | 0.620 |
| 0.000         | Fondo   | 0.42               | 72.50             | 100                  | 0.00                 |                            |       |

Tabla 5-11 Análisis granulométrico de la mezcla encontrada en la tubería usada en la prueba 7.

Con los resultados obtenidos se concluye que la muestra no es uniforme por tener un Cu bastante grande, y de igual forma, sus partículas no están tan bien repartidas en todo el rango disponible pues el Cc se encuentra por fuera del rango sugerido.



Gráfica 5-12. Curva granulométrica del material encontrado en la tubería de la prueba 7.

A partir de la **Gráfica 5-12** y la **Tabla 5-11** se puede constatar que la principal conclusión con respecto al análisis granulométrico sigue siendo la misma, la muestra encontrada en el interior de la tubería contiene un mayor número de partículas gruesas. Asimismo, en comparación con las otras dos pruebas en las que se realizó este estudio, se puede decir que los resultados de este caso son bastante similares al experimento número 5, y al igual que éste, son levemente más finos que los del número 2.

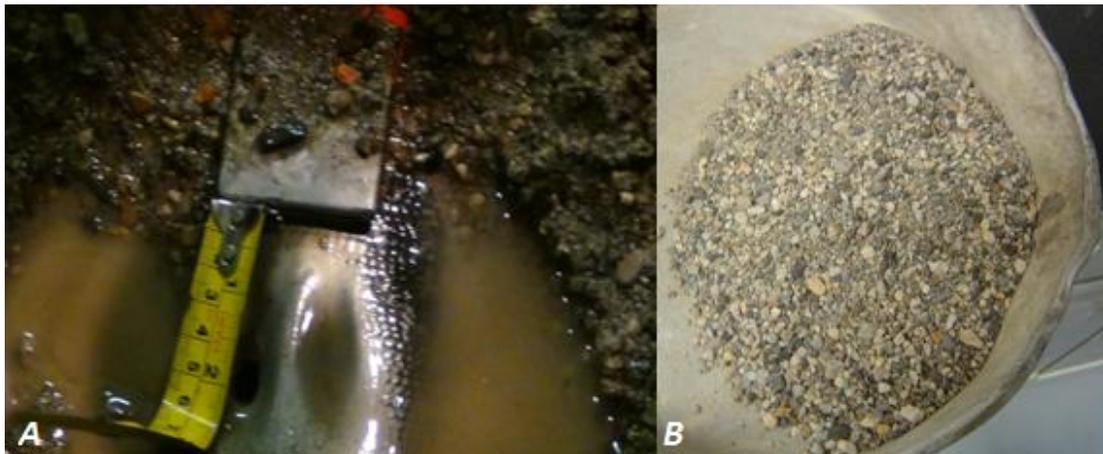


Figura 5-30. La Figura A muestra el suelo que quedó por encima de la tubería una vez terminada la prueba 7. La Figura B muestra el suelo que entró a la tubería ensayada en la prueba 7.

En la **Figura 5-30** se puede ver que el material encontrado cerca de la flauta y del orificio, es decir, el que pudo atravesar la pared y entrar a la tubería, es diferente al que se encuentra en otras partes del tanque. Por último, en la **Figura 5-31** se ilustra de forma mucho más



clara las diferencias entre el material que se extrajo de la zona cercana a la flauta, y el resto de lugares, como por ejemplo las paredes alrededor.



**Figura 5-31. Material por encima de la tubería en la prueba 7.**



## 5.8 Prueba número 8. Tubería de 6” en Hierro Dúctil.

Tras haber constatado que aún las tuberías de hierro dúctil eran vulnerables a los efectos de la abrasión externa, se decidió llevar a cabo otro ensayo en este material para conocer la influencia de la presión de prueba en el desempeño de este tipo de superficie.

| <b>PRUEBA NÚMERO 8</b>  |               |
|---|---------------|
| <b>Diámetro Nominal (Pulg)</b>  | 6             |
| <b>Diámetro Interno Mortero (mm)</b>                                    | 149.93        |
| <b>Diámetro Interno Hierro (mm)</b>                                     | 155.35        |
| <b>Diámetro Externo (mm)</b>  | 169.87        |
| <b>Espesor de Pared Hierro (mm)</b>                                     | 7.26          |
| <b>Espesor de Pared Total (mm)</b>                                      | 9.97          |
| <b>Fecha de Prueba (dd/mm/aa)</b>                                       | 8 al 26/08/12 |
| <b>Duración de la Prueba</b>  | 150 h         |
| <b>Presión de Prueba (Bar)</b>  | 1.5- 1,6      |
| <b>Tiempo desde que falló la tubería hasta que se detiene la prueba</b> | NA*           |
| <b>Promedio de Caudales (L/s)</b>                                       | 1.0770        |
| <b>Peso del material dentro de la tubería (g)</b>                       | NA*           |
| <b>Dimensiones del orificio o perforación</b>                           |               |
| <b>Ancho (mm)</b>   | NA*           |
| <b>Largo (mm)</b>   | NA*           |
| <b>Dimensiones de la zona desgastada</b>                                |               |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 57.2          |
| <b>Largo (mm)</b>   | 92.75         |
| <b>Caracterización del hundimiento del suelo</b>                        |               |
| <b>Ancho (cm)</b>   | 70            |
| <b>Largo (cm)</b>   | 96            |
| <b>Profundidad (cm)</b>   | 19            |

Tabla 5-12. Resumen de los resultados de la prueba número 8.

\* Esta tubería tampoco falló.

A pesar que se quería disminuir la presión de prueba, para acercar las condiciones del ensayo a aquellas de los primeros experimentos, se tuvo en cuenta que este material había tenido un desempeño muy superior al del PVC, y por ende se decidió escoger un valor intermedio entre los extremos ya probados. La magnitud seleccionada fue de 1.5-1.6 Bar, es decir entre 21.8 y 23.2 Psi o entre 15.3 y 16.3 metros de columna de agua; no obstante, a pesar de haber esperado más de 150 horas bajo estas condiciones, no se llegó a dar la falla



de la tubería. En un principio, se pensó que algo había quedado mal instalado o que el valor escogido para esta prueba no era suficiente; sin embargo, tras desinstalar el montaje la superficie de la tubería evidenció los efectos de la abrasión. Gracias a esto último, se concluyó una vez más que era cuestión de tiempo para que se formara el orificio.

Esta información muestra claramente la relación que existe entre la disminución de la presión, el material de la superficie, el tiempo de falla y el desgaste total. Pues aunque en esta oportunidad no se generó un orificio, se encontró que la zona desgastada tenía dimensiones comparables con las demás pruebas, al menos en lo referente al área afectada (es difícil comparar profundidades pues el micrómetro no lee el espesor de este material). Esto querría decir que cada una de las variables de entrada influye de forma diferente en las de salida, y por ende, cada vez que se use una nueva combinación de los parámetros iniciales se pueden encontrar resultados no esperados.

En cuanto a la forma general de la zona desgastada, sorprende que por primera vez parece haber una diferencia notable con el resto de pruebas. Tal como se puede evidenciar en la **Figura 5-32**, en este caso no se distinguen claramente las zonas laterales ni la línea central que las separa. Asimismo, esta última fue afectada por primera vez mucho más que las regiones de los costados. Al detallar la imagen se ve que; la superficie del medio es la más afectada en el nuevo perfil, que en la zona cercana a la flauta los costados parecen haberse desgastado considerablemente, y que la primera está separada de las segundas a través de dos líneas de mayor espesor.



**Figura 5-32.** Vista de la zona desgastada en la prueba 8 (la flauta se encontraba en la parte izquierda de la imagen).

Otro aspecto que vale la pena mencionar, es que la zona desgastada volvió a mostrar evidencia clara de procesos de oxidación. En la **Figura 5-32**, la **Figura 5-33** y la **Figura 5-34**, se muestra la zona corroída desde distintos ángulos. En estas imágenes es evidente que para las tuberías metálicas, este efecto secundario del agua puede llegar a tener



consecuencias bastante graves, pues a pesar de que la superficie no presenta orificios, si puede llegarse a debilitar por la oxidación. De esta forma, a largo plazo la pared podría romperse, no a causa de la erosión del material particulado, sino a consecuencia de este fenómeno.



Figura 5-33. Oxidación en la pared de la tubería 9 (vista desde la zona superior derecho).



Figura 5-34. Oxidación en la pared de la tubería 9 (vista desde la zona posterior).

Respecto al hundimiento del suelo encontrado en esta prueba, se puede decir que él sí siguió las tendencias que se venían dando en los otros experimentos. Este tenía una profundidad de 19 cm, 70 cm de ancho y 96 cm de largo, una vez más la segunda medida fue limitada por el ancho. Aparte de esto, la forma general y las pendientes de los taludes coinciden con lo que se había encontrado previamente. Es importante tener en mente que al no haberse generado un orificio, la magnitud del hundimiento de la arena se explica



únicamente por el material perdido gracias al lavado durante el periodo de prueba. De esta forma se concluye que este fenómeno tiene una gran capacidad para movilizar partículas. No obstante, dado el caso en el que se hubiera roto la pared, el volumen de arena desplazado hubiera sido mucho más grande.



**Figura 5-35. Vista del hundimiento del suelo en la prueba 8.**

A pesar que por razones obvias, en este caso no se realizó un análisis granulométrico, en la **Figura 5-36** se puede ver que el material granular situado cerca de la zona donde estaba enterrada la flauta, tiene más partículas gruesas que los alrededores. Esto sigue la misma tendencia que se ha tenido en las anteriores pruebas, y confirma que la mayoría de material fino de esta región fue lavado y alejado de ella.



**Figura 5-36. Material por encima de la tubería en la prueba 8.**



## 5.9 Prueba número 9. Tubería de 8” en PVC Biaxial.

Después de haber llevado a cabo las pruebas en las tuberías de hierro dúctil, se decidió experimentar con prototipos en PVC de 8” de diámetro. Los resultados del primer ensayo se muestran a continuación.

| <b>PRUEBA NÚMERO 9</b>  |            |
|---|------------|
| <b>Diámetro Nominal (Pulg)</b>  | 8          |
| <b>Diámetro Interior (mm)</b>   | 207.1      |
| <b>PR (psi)</b>   | 200        |
| <b>RDE</b>  | 37         |
| <b>Fecha de Prueba (dd/mm/aa)</b>                                       | 09/04/2012 |
| <b>Duración de la Prueba</b>  | 2h 30min   |
| <b>Presión de Prueba (Bar)</b>  | 1.5-1.6    |
| <b>Tiempo desde que falló la tubería hasta que se detiene la prueba</b> | 30 min     |
| <b>Promedio de Caudales (L/s)</b>                                       | 1.1150     |
| <b>Peso del material dentro de la tubería (g)</b>                       | 7035       |
| <b>Dimensiones del orificio o perforación</b>                           |            |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 4.33       |
| <b>Largo (mm)</b>   | 22.87      |
| <b>Dimensiones de la zona desgastada</b>                                |            |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 23.11      |
| <b>Largo (mm)</b>   | 95.11      |
| <b>Caracterización del hundimiento del suelo</b>                        |            |
| <b>Ancho (cm)</b>   | 50         |
| <b>Largo (cm)</b>   | 94         |
| <b>Profundidad (cm)</b>   | 10         |

Tabla 5-13. Resumen de los resultados de la prueba número 9.

Tal como se puede ver en la **Tabla 5-13**, el tiempo que demoró esta tubería en fallar fue el más corto que se ha presentado a lo largo de todos los experimentos. A pesar que el espesor de las tuberías de PVC aumenta proporcionalmente con el diámetro, esta superficie no resistió sino dos horas hasta el momento en que se presentó una falla. De esta forma, resulta evidente que la diferencia entre este material y el hierro dúctil es muy grande, teniendo en cuenta que este último bajo las mismas condiciones, resistió 150 horas y nunca se formaron orificios.

Es importante mencionar que la presión de prueba, de 1.5 a 1.6 bares o entre 15.3 y 16.3 metros de columna de agua, no es una presión exagerada en una red de distribución de agua

potable. Al contrario, como se mencionó anteriormente es un valor cercano al mínimo requerido por la normativa colombiana para todos los prestadores del servicio en el país. Por ende, en un horario diurno es un valor bastante común, mientras que de noche puede ser superado considerablemente.

Las características del orificio encontrado en esta tubería son similares a los anteriores (Ver **Figura 5-37**). Su forma general es de ovalo alargado; sin embargo, la relación entre la longitud y el ancho si parece ser levemente superior a las que se habían presentado. La zona desgastada, por su parte, sí presenta diferencias sustanciales en comparación con los ensayos anteriores. En este caso no se formaron dos canales separados por una pared como en la mayoría de las pruebas, ni tampoco se encontró una región principal y dos más en la zona más cercana a la flauta, como se vio en la sección anterior.

En este caso hay una única zona desgastada bastante larga, la cual no está dividida internamente por paredes de mayor espesor. Esto es evidente en la **Figura 5-38**, donde las dimensiones se pueden percibir con relación a la medida de un centavo de dólar de Estados Unidos.



**Figura 5-37.** Vista de la zona desgastada y el orificio de la prueba 9 (la flauta se encontraba en la parte izquierda de la imagen).

En la **Gráfica 5-13** se ilustra la forma general del orificio y la zona donde se presentó el desgaste, a partir de las mediciones de espesor con el micrómetro. En ella se confirma que la superficie erosionada tiene una forma diferente a la que se encontró en los casos anteriores, pues presenta únicamente una región afectada y no aparecen en ningún lugar paredes de mayor altura que generen divisiones internas.

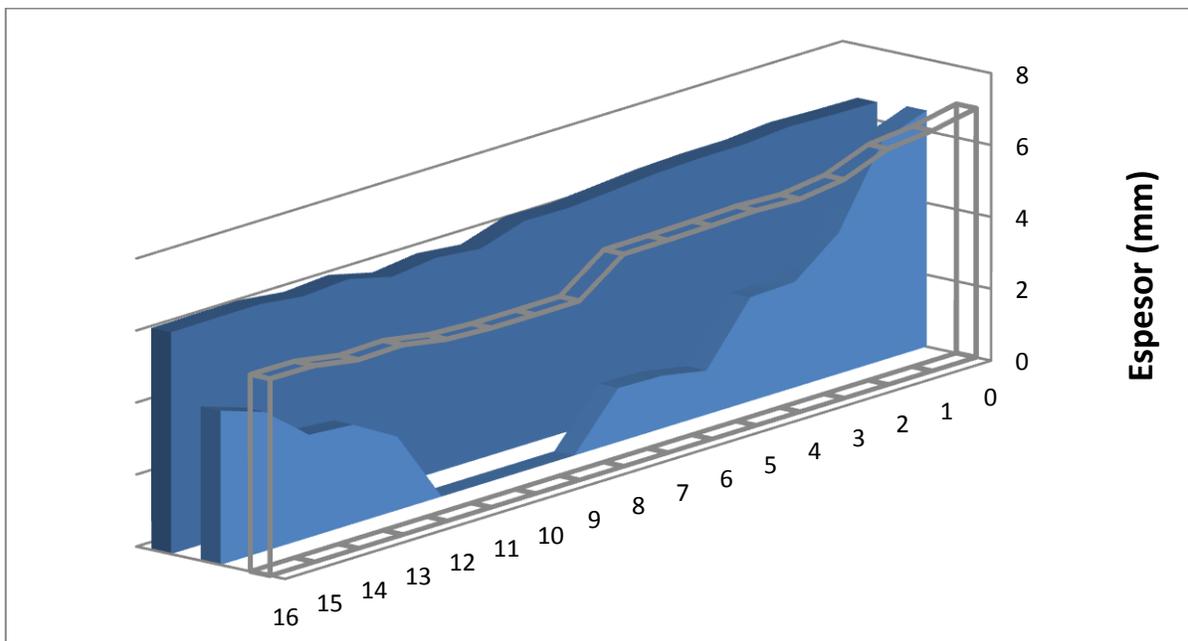
Asimismo, se ve que la totalidad de los puntos de la línea central han disminuido su grosor considerablemente, mientras que los de los costados no perdieron tanto material. Esto



sugiere que la diferencia entre los daños en la dirección paralela al flujo y los perpendiculares a él, aumenta proporcionalmente con el tamaño de los prototipos. En otras palabras, si se analiza la relación entre el largo y el ancho del hundimiento, el valor resultante para este caso será superior a los anteriores.



Figura 5-38. Vista de la zona desgastada y el orificio de la prueba 9 (la flauta se encontraba en la parte superior de la imagen).



Gráfica 5-13. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 9 con áreas en tres dimensiones (la flauta estaba localizada en el punto 16).



En cuanto al hundimiento del suelo encontrado en la superficie del tanque, se puede decir que su forma general es similar a las que se han presentado, no obstante, las dimensiones totales son inferiores a aquellas de ensayos con rangos de presión similares (Ver **Figura 5-39**). Las razones para que se haya dado esto es que el tiempo hasta la falla fue bastante reducido, por ende, el lavado de las partículas finas no fue tan grande a pesar que el chorro de agua salía con una presión de 1.5-1.6 Bar. De igual forma, una vez se formó el orificio, sólo pasó media hora hasta que se detuvo completamente la prueba, por ende no fue mucho el material que pasó a través de él hacia la tubería.



**Figura 5-39. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 9.**

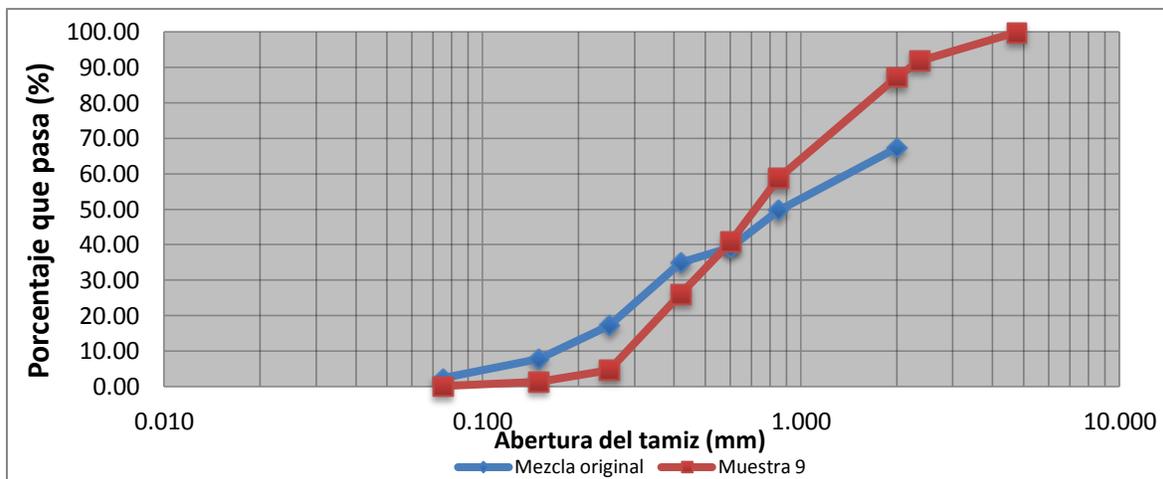
### 5.9.1 Granulometría

Tal cual se hace cada vez que se encuentra una gran cantidad de material sólido al interior de la tubería, en esta oportunidad se llevó a cabo un análisis granulométrico de la arena que pasó a través del orificio. En la **Tabla 5-14** se muestran los principales resultados de este proceso, se presentan los porcentajes acumulados y retenidos en cada tamiz, y los coeficientes que describen la distribución de la mezcla.



| Abertura (mm) | # Tamiz | % Parcial Retenido | Peso Retenido (g) | % Acumulado Retenido | % Acumulado que pasa | Coeficientes de la muestra |       |
|---------------|---------|--------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|-------|
| 4.750         | 4       | 0.16               | 11.58             | 0.16                 | 99.84                | D10                        | 0.292 |
| 2.360         | 8       | 8.00               | 562.87            | 8.17                 | 91.83                |                            |       |
| 2.000         | 10      | 4.57               | 321.64            | 12.74                | 87.26                | D30                        | 0.468 |
| 0.850         | 20      | 28.58              | 2010.27           | 41.31                | 58.69                |                            |       |
| 0.600         | 30      | 18.00              | 1266.47           | 59.32                | 40.68                | D60                        | 0.903 |
| 0.420         | 40      | 14.57              | 1025.24           | 73.89                | 26.11                |                            |       |
| 0.250         | 60      | 21.43              | 1507.70           | 95.32                | 4.68                 | Cu                         | 3.090 |
| 0.150         | 100     | 3.43               | 241.23            | 98.75                | 1.25                 |                            |       |
| 0.075         | 200     | 1.14               | 80.41             | 99.89                | 0.11                 | Cc                         | 0.830 |
| 0.000         | Fondo   | 0.11               | 7.59              | 100                  | 0.00                 |                            |       |

Tabla 5-14. Resumen de los resultados del análisis granulométrico de la prueba número 9.



Gráfica 5-14. Curva granulométrica del material encontrado al interior de la tubería de la prueba número 9 y de la mezcla original.

La **Tabla 5-14** y la **Gráfica 5-14** muestran que en esta oportunidad, las partículas sólidas tienen una distribución diferente a la que se había encontrado en los casos anteriores. La curva granulométrica de la prueba 9 está por debajo de la de la mezcla original para los primeros tamices, tal como ha sucedido con otros ensayos, pero después de un punto la supera. Esto quiere decir que la gran mayoría de las partículas sólidas se quedaron en los tamaños intermedios, y que los extremos no retuvieron tantas partículas. Esta información concuerda con el valor del Cu, que al estar muy cerca del rango sugerido ( $< 3$ ) demuestra que el material es bastante uniforme.

En comparación con las muestras extraídas en el resto de experimentos, en este caso el material es mucho más fino. Tanto así que tal parece, que casi el 60% de sus partículas, en peso, son más finas que la mezcla original. En la **Figura 5-40** se puede ver una imagen del material. Aunque no es evidente la información de la granulometría, se puede percibir que existen ciertas diferencias con lo encontrado en las otras oportunidades.



**Figura 5-40. Material encontrado al interior de la tubería de la prueba número 9.**



### 5.10 Prueba número 10. Tubería de 8” en PVC Biaxial.

| <b>PRUEBA NÚMERO 10</b>   |              |
|---|--------------|
| <b>Diámetro Nominal (Pulg)</b>  | 8            |
| <b>Diámetro Interior (mm)</b>   | 207.1        |
| <b>PR (psi)</b>   | 200          |
| <b>RDE</b>  | 37           |
| <b>Fecha de Prueba (dd/mm/aa)</b>                                       | 10-11/9/2012 |
| <b>Duración de la Prueba</b>  | 6 h 50 min   |
| <b>Presión de Prueba (Bar)</b>  | 1.15-1.2     |
| <b>Tiempo desde que falló la tubería hasta que se detiene la prueba</b> | 5 min        |
| <b>Promedio de Caudales (L/s)</b>                                       | 1.1810       |
| <b>Peso del material dentro de la tubería (g)</b>                       | NA           |
| <b>Dimensiones del orificio o perforación</b>                           |              |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 4.71         |
| <b>Largo (mm)</b>   | 14.65        |
| <b>Dimensiones de la zona desgastada</b>                                |              |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 43.49        |
| <b>Largo (mm)</b>   | 86.86        |
| <b>Caracterización del hundimiento del suelo</b>                        |              |
| <b>Ancho (cm)</b>   | 54           |
| <b>Largo (cm)</b>   | 85           |
| <b>Profundidad (cm)</b>   | 9            |

**Tabla 5-15. Resumen de los resultados de la prueba número 10.**

Para la segunda tubería de PVC de 8 pulgadas, la presión del experimento oscilaba entre los 1.15 y los 1.2 bares, equivalentes a aproximadamente 17 psi o 12 metros de columna de agua. El tiempo total del ensayo fue de 6 horas y 50 minutos, lo cual equivale a un aumento de más de 40 minutos comparado con la prueba 5 (la cual tenía la misma presión pero un diámetro de 6”) y un incremento de más del 200 % respecto a la 9, en la que se trabajó con el mismo tamaño pero con una presión de 1.5 Bar. Esta información sugiere que el tiempo hasta que se forma la perforación es mucho más sensible a los cambios en la presión del chorro de agua, que a los aumentos del diámetro de las tuberías.

Es importante mencionar que en este ensayo el orificio se detectó rápidamente, y en consecuencia, el experimento se detuvo poco tiempo después que ésta hubiera aparecido. Por lo tanto, los efectos abrasivos sobre la superficie del material, así como las dimensiones del hundimiento del suelo en la superficie de arena, son considerablemente menores a las presentadas en la prueba 5.



Respecto a la falla encontrada, en la **Figura 5-41** se puede ver que el orificio es bastante pequeño en comparación con los de la prueba 5, pero entra en el rango de valores encontrados en los otros casos. De igual manera, si se observa la **Figura 5-42** se puede apreciar que la forma general de la zona desgastada no coincide con lo que se había encontrado en anteriores ensayos, exceptuando la prueba 9. Al igual que en esta última, en la región erosionada no se aprecia una línea central que separa dos zonas laterales donde se da el mayor deterioro. Por el contrario, se observa una única zona afectada, cuyo centro coincide aproximadamente con el de la perforación.

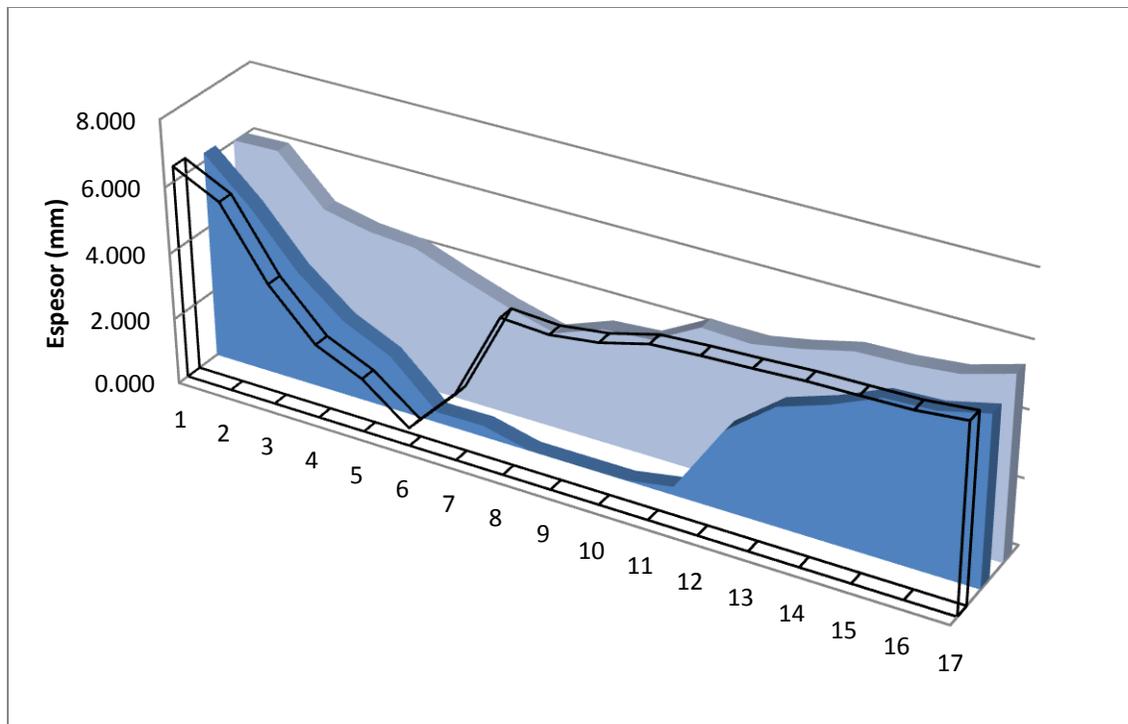
Al haber encontrado este comportamiento por segunda vez, se podría suponer que este se debe al aumento del diámetro de la tubería, ya que el área de contacto con la flauta disminuyó su curvatura. En otras palabras, la zona de impacto tiende a ser más plana y esto pudo haber alterado la forma en la que se desarrolla la zona desgastada. En la **Gráfica 5-15** se encuentra una representación de la zona desgastada a partir de las mediciones del micrómetro. En ella se puede confirmar que los puntos ubicados en la línea central son los más afectados, mientras que los de los costados parecen conservar, en la mayoría de los casos, un grosor considerable. A partir de este perfil, vuelve a ser evidente que existe una notoria diferencia entre los últimos 2 ensayos y el resto de pruebas en tuberías de PVC.



**Figura 5-41.** Vista del orificio de la prueba 10 (la flauta se encontraba en la parte izquierda de la imagen).



Figura 5-42. Vista de la zona desgastada de la prueba 10 (la flauta se encontraba en la parte derecha de la imagen).



Gráfica 5-15. Caracterización de la zona desgastada de la prueba 10 con áreas en tres dimensiones (la flauta estaba localizada en el punto 1).

En cuanto al hundimiento del suelo, en la **Figura 5-43** se puede ver que el tamaño de éste disminuyó en comparación con el encontrado en la prueba 5, pero es bastante similar al de la número 9. Las dimensiones exactas fueron 9 cm de profundidad, 54 cm de ancho y 85



centímetro de largo. No obstante, es importante recordar que en este experimento, el periodo de tiempo entre la aparición de la perforación y la finalización de la prueba fue de tan sólo 5 minutos, por ende no fue mucho el material que se movió desde el tanque hacia la tubería.



Figura 5-43. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 10.

Vale la pena mencionar que debido a que en esta prueba no pasó mucho material desde el tanque hacia la tubería, no había razones para realizar un análisis granulométrico del mismo. No obstante, en la **Figura 5-44** se puede apreciar el tipo de suelo que se encontró en el interior del tubo durante el proceso de desmontaje.



Figura 5-44. Suelo dentro de la tubería en el montaje de la prueba 10.



### 5.11 Prueba número 11. Tubería de 8” en Polietileno.

Tras haber finalizado las pruebas en tuberías de hierro dúctil y PVC, se procedió a experimentar con prototipos en polietileno de 8 pulgadas. Los resultados se presentan a continuación.

| <b>PRUEBA NÚMERO 11</b>   |               |
|---|---------------|
| <b>Diámetro Nominal (Pulg)</b>  | 8             |
| <b>Diámetro Interior (mm)</b>   | 176.2         |
| <b>PE (psi)</b>   | 100           |
| <b>RDE</b>  | 17            |
| <b>Fecha de Prueba (dd/mm/aa)</b>                                       | 14-26/10/2012 |
| <b>Duración de la Prueba</b>  | 79 h 5 min    |
| <b>Presión de Prueba (Bar)</b>  | 1.5-1.6       |
| <b>Tiempo desde que falló la tubería hasta que se detiene la prueba</b> | 20 min        |
| <b>Promedio de Caudales (L/s)</b>                                       | 1.1037        |
| <b>Peso del material dentro de la tubería (g)</b>                       | 7980          |
| <b>Dimensiones del orificio o perforación</b>                           |               |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 5.79          |
| <b>Largo (mm)</b>   | 8.93          |
| <b>Dimensiones de la zona desgastada</b>                                |               |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 55.22         |
| <b>Largo (mm)</b>   | 131.87        |
| <b>Caracterización del hundimiento del suelo</b>                        |               |
| <b>Ancho (cm)</b>   | 65            |
| <b>Largo (cm)</b>   | 95            |
| <b>Profundidad (cm)</b>   | 34            |

Tabla 5-16. Resumen de los resultados de la prueba número 11.

La primera tubería de polietileno fue sometida a una presión que oscila entre los 1.5 y los 1.6 bares, es decir entre 21.8 y 23.2 Psi o entre 15.3 y 16.3 metros de columna de agua. La duración del experimento fue de aproximadamente 79 horas, más de 30 veces el tiempo de la prueba 9, es decir que la diferencia entre el PVC y el polietileno es tan grande que trabajan con órdenes de magnitud diferentes. En comparación con el hierro dúctil, aunque en este caso los contrastes no son tan grandes, este último alcanza a duplicar el tiempo hasta la falla bajo las mismas condiciones del ensayo.

Las dimensiones del orificio fueron de 8.93 mm de largo y 5.79 mm de largo, lo cual equivale a una disminución aproximada del 61% y un aumento del 33.7% respectivamente,

respecto a la prueba 9. Resulta paradójico que la perforación sea mucho más corta, y al mismo tiempo más ancha, *a priori* se pensaba que habría consistencia en el incremento o en el decrecimiento en ambos sentidos. No obstante, estos datos revelan que dependiendo de las características del material, la resistencia en distintas direcciones puede variar.



**Figura 5-45.** Vista del orificio y de la zona desgastada de la prueba 11 (la flauta se encontraba en la parte superior de la imagen).

En la **Figura 5-45** se puede ver que el orificio formado en la superficie de polietileno es mucho más corto, en ella se observa cómo la moneda de un centavo de Estados Unidos lo supera considerablemente. Asimismo, es de resaltar que aunque la longitud disminuyó, en la pared de la tubería quedó marcada una trayectoria previa a la falla, que hace pensar que las partículas dejaban marcado su camino en una región mucho más extensa a la que alcanzó a romperse.

Por otra parte, las dimensiones de la región erosionada fueron de 55.22 mm de ancho y 131.87 mm de largo, lo que equivale a un crecimiento aproximado del 139% y del 39% respectivamente, en comparación con la prueba 9. Este aumento se explica por la diferencia en la duración de la prueba, pero demuestra que antes de la perforación, el polietileno puede llegar a desgastarse mucho más antes de ceder ante los efectos abrasivos de las partículas sólidas.

Es de resaltar que gracias a que el espesor de las tuberías en polietileno es mucho mayor al resto de materiales, la zona desgastada es considerablemente más profunda que el resto de casos. Este factor fue fundamental para retrasar el rompimiento de la pared, y esto puede ser la explicación para que el daño aumentara tanto en las otras direcciones; hasta el momento este es la región erosionada más larga encontrada en una superficie. Por último, es importante mencionar que el área de falla en este ensayo es distinta a las que aparecieron en PVC e hierro dúctil, debido a que el eje principal de la zona erosionada no coincide con



la dirección paralela a la lámina de agua, sino que esta levemente inclinada (Ver **Figura 5-46**).



**Figura 5-46.** Vista de la zona desgastada de la prueba 11 (la flauta se encontraba en la parte izquierda de la imagen).



**Figura 5-47.** Vista del hundimiento del suelo de la prueba 11.

Respecto al hundimiento del suelo, se obtuvieron dimensiones de 65 cm de ancho, 95 cm de largo y 34 cm de profundo, que representan un crecimiento del 30%, 1% y 240% respectivamente, respecto a la prueba 9. Vale la pena resaltar que el valor que se obtuvo en el eje vertical es el mayor que se ha presentado hasta el momento. Asimismo, teniendo en cuenta que la cantidad de material que pasó al interior de la tubería se encuentra dentro del



rango normal, queda en evidencia una vez más, la importancia de la duración de la prueba a la hora de determinar la magnitud del hundimiento de la arena.

En la **Figura 5-47** se ilustra el hundimiento del suelo después de la prueba 11. Al detallar la imagen se puede observar que en distintas partes las pendientes son más pronunciadas que lo normal. Es importante mencionar que el material ubicado en la zona aguas arriba de la boquilla de la flauta (parte derecha de la foto) se ve casi intacto, lo que significa que la influencia del flujo del agua en esta zona no fue considerable. Por el contrario, gran parte del suelo aguas abajo luce bastante diferente a su estado inicial, por tanto se puede establecer cuánto, y en qué medida afectó el chorro el interior del tanque.



**Figura 5-48. Suelo cercano a la zona de falla de la prueba 11.**

Por otro lado, tal como sucedió en casi todos los experimentos, en la parte de arriba de la perforación, se encuentra cierta cantidad de material granular lavado que luce bastante diferente al resto de la mezcla. En la **Figura 5-48** se puede ver que éste tiene un número mayor de partículas de diámetro grande, en comparación con la arena en otros lugares del tanque. Suponiendo que esta muestra es similar a aquella que logró ingresar a la tubería, se espera corroborar las diferencias a través de un análisis granulométrico a esta última.

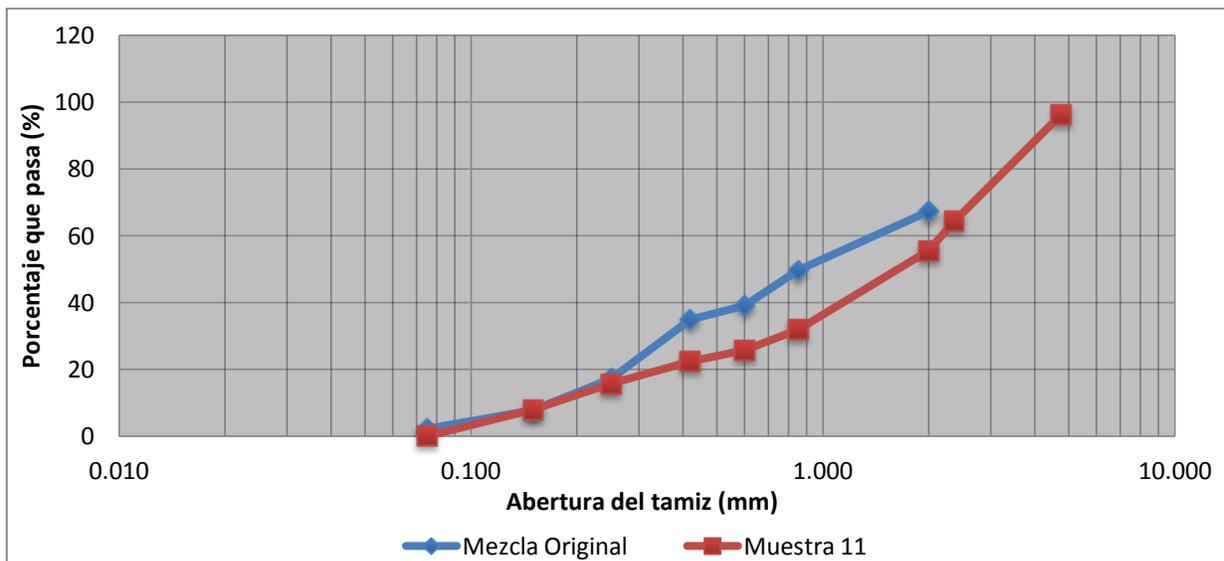
### **5.11.1 Granulometría**

Tal como se ha hecho siempre que se encuentra una cantidad considerable de material particulado al interior de una tubería, en esta prueba se realizó un estudio granulométrico de las características de esta muestra. Los resultados fueron los siguientes:



| Abertura (mm) | # Tamiz | % Parcial Retenido | Peso Retenido (g) | % Acumulado Retenido | % Acumulado que pasa | Coeficientes de la muestra |        |
|---------------|---------|--------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|--------|
| 4.750         | 4       | 3.76               | 300.41            | 3.76                 | 96.24                | D10                        | 0.177  |
| 2.360         | 8       | 31.87              | 2543.47           | 35.64                | 64.36                |                            |        |
| 2.000         | 10      | 8.78               | 700.96            | 44.42                | 55.58                |                            |        |
| 0.850         | 20      | 23.59              | 1882.57           | 68.01                | 31.99                | D30                        | 0.771  |
| 0.600         | 30      | 6.27               | 500.68            | 74.29                | 25.71                |                            |        |
| 0.420         | 40      | 3.26               | 260.35            | 77.55                | 22.45                | D60                        | 2.181  |
| 0.250         | 60      | 6.78               | 540.74            | 84.33                | 15.67                |                            |        |
| 0.150         | 100     | 7.78               | 620.85            | 92.11                | 7.89                 | Cu                         | 12.319 |
| 0.075         | 200     | 7.78               | 620.85            | 99.89                | 0.11                 |                            |        |
| 0.000         | Fondo   | 0.11               | 9.13              | 100                  | 0.00                 | Cc                         | 1.538  |

Tabla 5-17. Análisis granulométrico del material encontrado al interior de la tubería de la prueba número 11.



Gráfica 5-16. Curva granulométrica de la mezcla original y de la muestra de la prueba 11.

A partir de la información mostrada en la **Tabla 5-17** y la **Gráfica 5-16**, se podría concluir que el material encontrado dentro de la tubería es más grueso que la mezcla original. No obstante, en este caso los resultados no son tan claros, ya que las curvas se traslapan para los tamices con aberturas más pequeñas, y para los más grandes no hay información que permita extrapolar la curva azul. La única zona donde es evidente que las partículas que permanecen al interior del tanque son más finas, es la parte central, sin embargo, la diferencia no es tan clara como lo fue en anteriores experimentos.

Asimismo, si comparan los coeficientes C10, C30 y C60 de la prueba 11 con los de la mezcla original, se confirma que el suelo dentro de la tubería es más grueso, dado que las variables de la primera muestra superan los de la segundo. Por último, vale la pena



mencionar que las partículas que atravesaron el orificio son poco uniformes ( $C_u < 3$ ), pero están bien gradadas ( $C_c$  dentro del rango sugerido).



## 5.12 Prueba número 12. Tubería de 8” en Polietileno.

La segunda tubería de 8” en polietileno fue ensayada con una presión de prueba de 2 Bar, para evaluar con más detalle su desempeño en comparación con el hierro dúctil.

| <b>PRUEBA NÚMERO 12</b>   |                    |
|---|--------------------|
| <b>Diámetro Nominal (Pulg)</b>  | 8                  |
| <b>Diámetro Interior (mm)</b>   | 176.20             |
| <b>PE (psi)</b>   | 100                |
| <b>RDE</b>  | 17                 |
| <b>Fecha de Prueba (dd/mm/aa)</b>                                       | 1-5 y 8-10/10/2012 |
| <b>Duración de la Prueba</b>  | 69h 40min          |
| <b>Presión de Prueba (Bar)</b>  | 1.95 -2.05         |
| <b>Tiempo desde que falló la tubería hasta que se detiene la prueba</b> | 34 min             |
| <b>Promedio de Caudales (L/s)</b>                                       | 1.3560             |
| <b>Peso del material dentro de la tubería (g)</b>                       | N/A                |
| <b>Dimensiones del orificio o perforación</b>                           |                    |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 6.82               |
| <b>Largo (mm)</b>   | 7.04               |
| <b>Dimensiones de la zona desgastada</b>                                |                    |
| <b>Ancho* (mm)</b>  | 41,24 - 53,17      |
| <b>Largo (mm)</b>   | 153.11             |
| <b>Caracterización del hundimiento del suelo</b>                        |                    |
| <b>Ancho (cm)</b>   | 70                 |
| <b>Largo (cm)</b>   | 143                |
| <b>Profundidad (cm)</b>   | 20                 |

Tabla 5-18. Resumen de los resultados de la prueba número 12.

\* La primera medida corresponde a la parte de la zona desgastada que está más alejada de la flauta, y la otra, un poco más ancha, a la más cercana.

La tubería número 12 trabajó con una presión de prueba cercana a los 2 Bar, equivalentes a más o menos 20.4 metros de columna de agua o 29 psi. Se seleccionó este valor porque ya se había probado que el desempeño del polietileno era superior al del PVC, pero hacía falta una comparación más robusta entre el hierro dúctil y el polietileno, y esta magnitud fue precisamente la que se trabajó con los tubos metálicos.

Los resultados de esta prueba mostraron que, a diferencia de los ensayos con 1.5 Bar, con 2 Bar el desempeño del polietileno es superior al del hierro dúctil, pues la duración de este



experimento fue casi 3 veces mayor que la del tubo metálico. Resulta bastante curioso que la diferencia entre ambas superficies varíe tanto al modificar esta variable de entrada, no obstante, ya se había advertido que existe incertidumbre en el proceso general, y ésta podría generar estas discrepancias.

Es importante mencionar que las tuberías de polietileno no son completamente rectas, y presentan cierta curvatura en la dirección paralela al flujo de la lámina de agua. En consecuencia, cuando se instalaba la flauta el chorro no salía como se esperaba, sino que se alejaba de la pared del prototipo gracias a que esta era cóncava hacía arriba (para entender esto revisar la **Figura 5-49**). Para contrarrestar este efecto se manipuló la flauta y el tubo para minimizar el error, y aunque se redujo considerablemente el espacio entre la boquilla y la pared, llegaba un punto en el que se volvía a percibir la deflexión.

Después de la prueba 11, se pensó que esta medida había eliminado cualquier imperfección del montaje. Sin embargo, tras revisar los resultados de este ensayo, y evidenciar que éstos son inconsistentes con los del hierro dúctil, tal como se explicó previamente, se piensa que la curvatura de la tubería sí pudo haber afectado las condiciones del experimento, y por ende, esto podría ser una de las causas de las diferencias.

Para conocer la incertidumbre de los resultados, en primer lugar se debería realizar un análisis de sensibilidad de cada una de las variables de entrada, que defina qué tanto afecta cada una a los valores finales. Y en segundo lugar, sería útil repetir múltiples veces uno o dos ensayos, dejando constantes los parámetros iniciales en cada uno de los casos, para así poder evaluar qué tanto coinciden los datos de salida en las distintas iteraciones, y cuáles podrían ser las causas de las posibles diferencias.



**Figura 5-49.** Vista de la ubicación inicial de la boquilla de la flauta en las pruebas con tuberías de polietileno.

En cuanto al orificio, se puede decir que las dimensiones de éste son más pequeñas que aquellas de la tubería de 6" en hierro dúctil, cuya presión de prueba era de 2 Bar. Las



reducciones fueron de casi el 50% en el largo y del 13% en el ancho, respecto a la abertura de de la prueba 7 (ver la **Figura 5-50** y la **Figura 5-51**). Para tener una mejor idea de estas magnitudes, en la **Figura 5-52** se ilustra el tamaño de la perforación en comparación con una moneda de un centavo de dólar de Estados Unidos.

La zona desgastada, por el contrario, es más grande en la tubería de polietileno en comparación con la de hierro dúctil. El largo de la primera es dos veces más grande que el de la segunda, y para el caso del ancho, la relación varía dependiendo del lugar donde se haga el análisis. Si la medición se hace en la zona central o en la parte más alejada de la flauta (41.24 mm tal como se muestra en la **Figura 5-50**), la medida será un 22% menor que aquella en la superficie metálica. No obstante, si se realiza la medición en la zona más cercana a la flauta (53.17), el valor será prácticamente el mismo.



**Figura 5-50.** Vista de la zona desgastada y el orificio de la prueba 12. La medición del ancho de la región afectada se hace en la parte más angosta. (La flauta se encontraba en la parte superior de la imagen).



**Figura 5-51. Vista de la zona desgastada y el orificio de falla de la prueba 12 (La flauta se encontraba en la parte derecha de la imagen).**



**Figura 5-52. Vista de la zona desgastada y el orificio de falla de la prueba 12 con relación a una moneda de centavo de dólar (La flauta se encontraba en la parte derecha de la imagen).**

Es importante mencionar que una vez más, la dirección del área de falla no coincide con el eje de la tubería, sino que está inclinada algunos grados respecto a éste. Lo anterior sólo sucedió para tuberías en polietileno, en las cuales, por alguna razón después de un punto la abrasión no es paralela al chorro de agua. De igual forma, la región desgastada vuelve a dar la impresión de ser mucho más profunda que cualquier otra encontrada previamente.



Respecto al hundimiento del suelo, en la **Figura 5-53** se puede ver que el tamaño de éste aumentó considerablemente en comparación con el de la prueba 11, y en general, es mucho más grande que cualquier otro que se haya encontrado anteriormente. Las dimensiones exactas fueron 20 cm de profundidad, 143 centímetros de largo y 70 cm de ancho. Es importante aclarar que la magnitud del ancho del hundimiento de la arena pudo haber sido mucho mayor; sin embargo, el tamaño del tanque limitó el crecimiento de su volumen.

Por otro lado, si se observa detalladamente la **Figura 5-53** y la **Figura 5-54**, se puede ver que un hundimiento del suelo de este tamaño representa una amenaza enorme para cualquier red. Es importante mencionar que parte de este se formó gracias al material que ingresó a la tubería, lo cual en la vida real no sucedería porque la presión interna del tubo no lo permitiría. No obstante, otra parte se generó gracias al lavado de las partículas finas o acomodación de partículas al interior del tanque, a causa del chorro de agua que sale de la boquilla.

Esto se puede comprobar al revisar que el volumen de material extraído del interior de la tubería 12 (**Figura 5-55**), no alcanzaría para llenar el espacio vacío que se mostró en la **Figura 5-53** y la **Figura 5-54**. Asimismo, las pruebas 3 y 8, en las cuales no hubo perforación pero si bajó el nivel de la arena en el tanque, confirman que el chorro de agua hace bajar el nivel de arena en el tanque sin importar la formación o no de un orificio. La consecuencia de esto es que si se llega a dar un caso real con dimensiones similares a las encontradas en la prueba 12, se podría generar una catástrofe debido al colapso de una vía o una estructura pequeña, cuyos soportes se encuentren cercanos a la fuga.



Figura 5-53. Vista en planta del hundimiento del suelo de la prueba 12.



Figura 5-54. Vista del hundimiento del suelo de la prueba 12 en dirección inversa al flujo del chorro de agua.



Figura 5-55. Material encontrado dentro de la tubería de la prueba 12.

Vale la pena aclarar que debido a que en esta prueba no pasó mucho material del tanque a la tubería, no había razones para realizar un análisis granulométrico del mismo. No obstante, en la **Figura 5-55** se puede apreciar la muestra de partículas sólidas encontrada al interior del prototipo después de haber finalizado la prueba 12.



### 5.13 Prueba número 13. Tubería de 6” en Hierro dúctil.

Después de haber llevado a cabo los ensayos en tuberías de polietileno, se tomó la decisión de repetir el experimento número 8, cuya duración excedió considerablemente los rangos de valores esperados. Las condiciones de prueba fueron exactamente las mismas a las definidas para ese caso; un tubo de 6” de diámetro en hierro dúctil, y una presión del agua antes de la flauta de 1.5 Bar.

| <b>PRUEBA NÚMERO 13</b>   |                |
|---|----------------|
| <b>Diámetro Nominal (Pulg)</b>  | 6              |
| <b>Diámetro Interno Mortero (mm)</b>                                    | 149.93         |
| <b>Diámetro Interno Hierro (mm)</b>                                     | 155.35         |
| <b>Diámetro Externo (mm)</b>  | 169.87         |
| <b>Espesor de Pared Hierro (mm)</b>                                     | 7.26           |
| <b>Espesor de Pared Total (mm)</b>                                      | 9.97           |
| <b>Fecha de Prueba (dd/mm/aa)</b>                                       | 18 al 24/10/12 |
| <b>Duración de la Prueba</b>  | 39 h 48 min    |
| <b>Presión de Prueba (Bar)</b>  | 1.5- 1,6       |
| <b>Tiempo desde que falló la tubería hasta que se detiene la prueba</b> | 29 min         |
| <b>Promedio de Caudales (L/s)</b>                                       | 1.0770         |
| <b>Peso del material dentro de la tubería (g)*</b>                      | 4689*          |
| <b>Dimensiones del orificio o perforación</b>                           |                |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 10.07          |
| <b>Largo (mm)</b>   | 21.47          |
| <b>Dimensiones de la zona desgastada</b>                                |                |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 33.33          |
| <b>Largo (mm)</b>   | 107.44         |
| <b>Caracterización del hundimiento del suelo</b>                        |                |
| <b>Ancho (cm)</b>   | 70             |
| <b>Largo (cm)</b>   | 122            |
| <b>Profundidad (cm)</b>   | 23             |

Tabla 5-19. Resumen de los resultados de la prueba número 13.

\* Es importante aclarar que en esta prueba se tomó tan sólo una muestra representativa del total del material que atravesó la perforación y salió del tanque. Este material fue pesado y ese valor es el que se muestra en la tabla. La razón para haber analizado sólo una parte del total, es que en esta ocasión la cantidad de material encontrado fue muy grande, y resultaba poco práctico realizarle un estudio granulométrico a todo el volumen.



La duración de la prueba fue de aproximadamente 40 horas, equivalente al 26% del valor del experimento número 8. Dado este resultado, queda en evidencia la gran incertidumbre que se presenta en los resultados de este tipo de ensayos. Igualmente, es de suponer que durante el proceso no se están teniendo en cuenta todas las variables que influyen en el resultado final, o al menos no se están analizando de la forma adecuada.



Figura 5-56. Vista del orificio y de la zona desgastada de la tubería 13 con relación a una moneda de un centavo de dólar (la flauta estaba ubicada en la parte derecha de la imagen).

Además de la gran diferencia en el tiempo, respecto a la prueba 8, también se obtuvo un orificio cuyas dimensiones no se habían alcanzado antes. En la **Figura 5-56** se puede observar que en este experimento la perforación llega a tener un área superior a la de la moneda de un centavo de dólar, cuando en los otros casos ni siquiera se había acercado a esta magnitud. Las dimensiones de éste fueron de 10.07 mm de ancho y 21.47 mm de largo, valores que no se habían alcanzado en ningún otro caso.

La razón para que se haya presentado este comportamiento es que el tiempo desde que se rompió la pared hasta que se detuvo la prueba fue de 29 minutos, es decir, más de dos veces el de la prueba 7. Aún así, sigue resultando sorpresivo el cambio tan drástico entre una situación en la que no se rompe la tubería después de 150 horas, y otra en la que se presenta una perforación de grandes proporciones en menos de 40 horas.

Por otra parte, las dimensiones encontradas en la zona desgastada fueron de 33.33 mm a lo ancho y 107.44 mm a lo largo. Resulta contradictorio que al realizar la comparación con la prueba 8 se obtenga una disminución del 41.37% y un aumento del 15.83% respectivamente. Se podría pensar que al haber estado menos horas en prueba, la región erosionada sería más pequeña, a pesar que la perforación haya aumentado. Pero surge la pregunta de por qué no disminuyó la longitud de la zona afectada. Una vez más, este

análisis muestra la gran varianza que se puede llegar a presentar en los resultados del experimento.

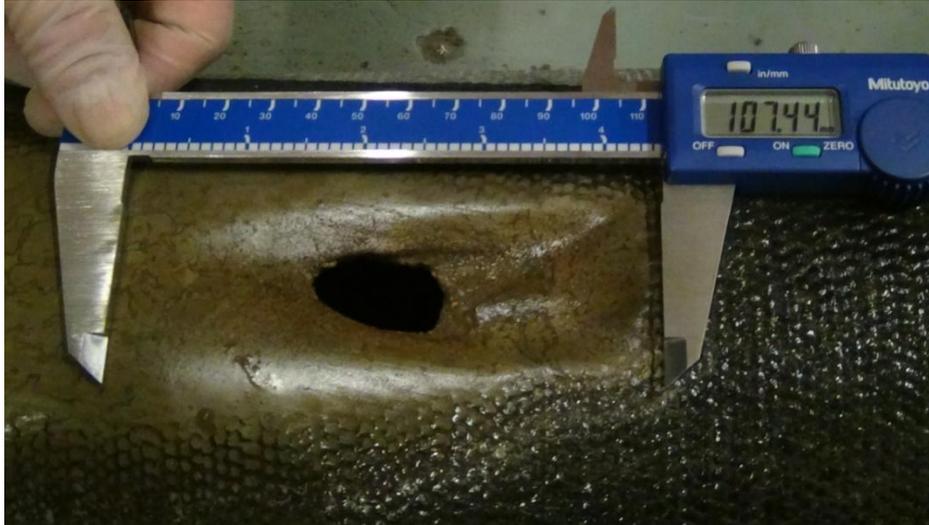


Figura 5-57. Vista del orificio y de la zona desgastada de la tubería 13 (la flauta estaba ubicada en la parte derecha de la imagen).

Por otro lado, si se mira con detenimiento la **Figura 5-56** en conjunto con la **Figura 5-57**, resulta relevante detallar que en la región cercana a la boca de la flauta, el material abrasivo desgastó considerablemente la pared y estuvo a punto de generar una perforación de mayor tamaño. En esta zona se puede ver que la superficie metálica desapareció, y únicamente queda la capa protectora de mortero.



Figura 5-58. Hundimiento del suelo de la tubería 13.



Respecto al hundimiento del suelo, se debe decir que éste fue de dimensiones considerables, pero no logró superar el de la prueba 12. El de este caso parece ser un poco más profundo, no obstante, las otras dos magnitudes son mucho menores. Las medidas exactas fueron de 70 cm a lo ancho, 122 cm a lo largo y 23 cm de profundo, teniendo así un aumento del 14.75%, 27.08% y 21.05% respectivamente, comparando con el octavo experimento.

Antes de entrar en el análisis granulométrico de esta prueba, vale la pena mencionar que teniendo en cuenta las grandes diferencias entre la prueba 8 y la 13, se decidió analizar la posición de la flauta en cada uno de los casos. De esta forma se buscaba revisar si un error en el montaje tuvo algo que ver con las variables de salida. Para fortuna de la investigación, la **Figura 5-59** y la **Figura 5-60**, muestran que en ambos casos, la flauta se encontraba ubicada en el mismo lugar, por ende, las discrepancias se deben a un factor endógeno del fenómeno y no a una falla en el montaje.



**Figura 5-59. Ubicación de la flauta en la prueba 13.**



Figura 5-60. Ubicación de la flauta en la prueba 8.



Figura 5-61. Estado del hundimiento del suelo tras las primeras 26 horas de la prueba 13.

Por otro lado, sabiendo que esta era la última prueba de la investigación, se decidió estudiar cuál era la influencia de la presión en la formación del hundimiento del suelo. Para conseguir esto, se detuvo temporalmente la prueba 13 cuando habían pasado 26 horas, se retiró la tapa superior del tanque, y sin modificar de ninguna forma las condiciones al interior del montaje, se midieron las dimensiones del hundimiento de arena en la parte superior. En la **Figura 5-61** se ilustra el caso de estudio, en la imagen se puede ver que las medidas se tomaron sin retirar el agua, pues esto podría afectar la muestra y con esto podría llegar a sesgar los resultados finales.

Al hacer este procedimiento se aisló la variable de presión de la prueba, y se pudo estudiar las diferencias de los resultados entre este caso y el experimento 3. En ambas situaciones la



cantidad de tiempo de exposición al chorro era la misma, y ninguno de los dos casos había fallado, por ende, el único parámetro que explica las diferencias entre los valores de salida de una y otra es la presión de prueba. Los resultados se pueden ver en la **Tabla 5-20**, en ella es evidente que al haber triplicado la presión, los valores aumentaron en un 200% respecto a los de la prueba 3. Con esto, queda demostrado que esta variable es un factor importante que dispara la recomodación del suelo, y de esta forma impulsa el hundimiento del nivel de arena.

| Caracterización del hundimiento del suelo a las 26 horas |     |
|--|-----|
| Ancho (cm)   | 62  |
| Largo (cm)   | 102 |
| Profundidad (cm)   | 15  |

Tabla 5-20. Dimensiones del hundimiento del suelo después de 26 horas de prueba.

### 5.13.1 Granulometría

En la **Figura 5-62** se muestra el tipo de material que salía de la zona cercana a la flauta cuando se estaba desmontando la tubería. Una vez más, es evidente que en esta muestra existe un número de partículas gruesas mucho mayor al de la original. Como consecuencia de esto, y también al hecho de que se encontró una gran cantidad de material al interior de la tubería, se decidió realizar un análisis granulométrico; los resultados de este se muestran en la **Tabla 5-21**.



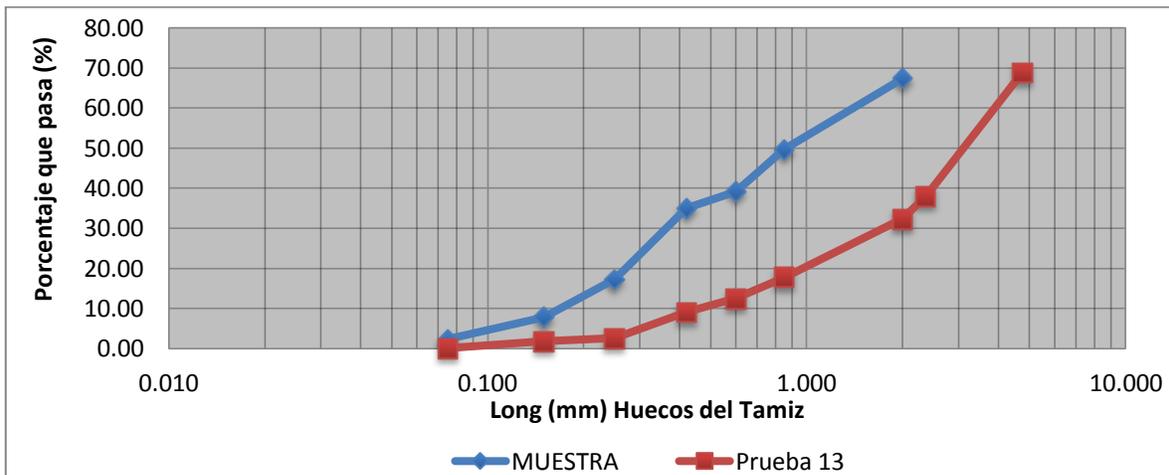
Figura 5-62. Material encontrado cerca de la zona de falla, durante el desmontaje de la tubería 13.



| Abertura (mm) | # Tamiz | % Parcial Retenido | Peso Retenido (g) | % Acumulado Retenido | % Acumulado que pasa | Coeficientes de la muestra |       |
|---------------|---------|--------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|-------|
| 4.750         | 4       | 31.14              | 1459.95           | 31.14                | 68.86                | D10                        | 0.468 |
| 2.360         | 8       | 30.92              | 1449.84           | 62.06                | 37.94                |                            |       |
| 2.000         | 10      | 5.60               | 262.69            | 67.66                | 32.34                | D30                        | 1.816 |
| 0.850         | 20      | 14.65              | 687.03            | 82.31                | 17.69                |                            |       |
| 0.600         | 30      | 5.17               | 242.48            | 87.48                | 12.52                | D60                        | 4.065 |
| 0.420         | 40      | 3.45               | 161.65            | 90.93                | 9.07                 |                            |       |
| 0.250         | 60      | 6.46               | 303.10            | 97.39                | 2.61                 | Cu                         | 8.676 |
| 0.150         | 100     | 0.82               | 38.43             | 98.21                | 1.79                 |                            |       |
| 0.075         | 200     | 1.74               | 81.46             | 99.95                | 0.05                 | Cc                         | 1.732 |
| 0.000         | Fondo   | 0.05               | 2.35              | 100                  | 0.00                 |                            |       |

Tabla 5-21. Análisis granulométrico de la prueba 13.

En la **Tabla 5-21**, se muestran los resultados de la granulometría de la prueba 13. En ella es evidente que la muestra es mucho más gruesa que la mezcla original, tal cual ha sucedido con los distintos casos. Asimismo, se puede ver que el material es poco uniforme ( $Cu > 3$ ), pero está bien gradado. Estos datos se pueden confirmar al revisar la **Gráfica 5-17**, y la **Figura 5-64**; en la primera se ve como la curva roja está muy por debajo de la azul, y en la segunda es evidente que el número de partículas de gran diámetro ha aumentado con respecto a las que se quedaron en el tanque.



Gráfica 5-17. Curva granulométrica de la prueba 13.



**Figura 5-64. Fotografía del material encontrado dentro de la tubería de la prueba 13.**



## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

A lo largo de esta sección se analizan los principales resultados que arrojó la presente investigación. Para esto, se tendrá en cuenta la información mencionada en el capítulo anterior, y algunas gráficas y tablas que recogen las características más relevantes de cada prueba, y que también resumen las diferencias más importantes entre ellas.

En primer lugar, vale la pena mencionar que los resultados muestran que existe una clara relación entre las variables de entrada y las de salida. A medida que crece la presión del agua, por ejemplo, la duración de las distintas pruebas tiende a disminuir considerablemente. En la **Tabla 6-1** se puede ver que independiente del material de las tuberías, o cualquier otro parámetro de entrada, el tiempo requerido para que se genere la perforación en una superficie disminuye a medida que la presión aumenta. Las diferencias pueden ser pequeñas, como aquella entre la prueba 1 y 2 que fue de alrededor de una hora, o también pueden llegar a ser de hasta 10 o más horas, como aquellas que hay entre los experimentos 7 y 13.

De igual forma, el tamaño de las tuberías es un parámetro que influye en el tiempo requerido para que el prototipo falle. Una vez más, en la **Tabla 6-1** se puede ver que a medida que crece el diámetro de los tubos de PVC, el tiempo hasta el final de la prueba aumenta. Es más, si se revisa la misma tabla, se puede ver que la diferencia más grande en las duraciones de prueba para un mismo material, se encuentra entre los casos de 4" y 6" de PVC con 0.92 Bar, esto querría decir que el resultado final es mucho más sensible a este parámetro que al anterior. No obstante, es prematuro realizar este tipo de afirmaciones ya que la incertidumbre del proceso ha mostrado ser bastante grande, y también porque hace falta evaluar cómo se dan estas variaciones en otros materiales.

Otra variable bastante relevante en esta investigación; es el tiempo que pasa desde que falla la tubería hasta que se detiene la prueba. Sin embargo, esta sobresale entre las demás ya que es muy difícil manipularla para que tenga un valor determinado. Tal como se mencionó en el **Capítulo 5**, este periodo de tiempo varía bastante al depender de que alguien se de cuenta de la falla y detenga la circulación del agua. Aún así, es importante tenerlo en cuenta pues influye en resultados como las dimensiones de; los orificios, la zona desgastada y el hundimiento del suelo.

El material de la tubería es la última variable de entrada que influye en los resultados finales, *a priori*, esta era la más importante pues representaba uno de los principales objetivos de la investigación. La respuesta a esta interrogante también se encuentra en la **Tabla 6-1**, el PVC es el material más vulnerable a fallar ante los efectos de la abrasión externa. El área de falla de estas superficies es, por lo general, el que resulta más afectado, ya que para presiones relativamente bajas presenta perforaciones de gran tamaño, y zonas desgastadas mucho más grandes. La diferencia entre el polietileno y el hierro dúctil no es



tan evidente, no obstante, parece que tal como se encontró en la literatura, el primero es levemente superior al segundo.

Por otro lado, es muy importante mencionar que el grado de incertidumbre de los resultados está lejos de ser el ideal. En la **Tabla 6-1** se ve que la variabilidad de los datos es muy grande, y siempre hay excepciones a las tendencias identificadas. Esto significa que se debe ser precavido a la hora de generar las conclusiones, porque la información podría tener algún porcentaje de error. Buscando mejorar este panorama a futuro, se mencionan a continuación ciertos aspectos del fenómeno que no se tuvieron en cuenta durante este trabajo, pero que a la luz de los resultados podrían estar relacionados con las imprecisiones.

En primer lugar, se cree que el grado de compactación de la arena puede llegar a influenciar el resultado final. Tal como se explicó en la **Sección 3.4**, en esta oportunidad esta actividad se desarrolló de una forma bastante *informal*, utilizando una herramienta fabricada en el laboratorio. No se tuvo en cuenta ninguna normativa, por ende nunca se controló que la cantidad de material y la energía utilizada para apisonar fuera la misma. Esto se hizo de esta forma porque es la metodología común en el medio local, no obstante, gracias a ella cada caso podía llegar a tener una cantidad de arena distinta, con una densidad global diferente.

Asimismo, la presión al interior del tanque puede llegar a influenciar el resultado final. No se debe confundir este parámetro con la presión del agua antes de la flauta, la cual era controlada estrictamente por medio de los manómetros digital y análogo. Esta variable representa las condiciones del agua al interior del tanque, una vez ha salido por la boquilla de la flauta. En algunos casos, el filtro a la salida del montaje limitaba mucho el flujo de agua y obligaba a aumentar bastante la presión dentro de la estructura para poder descargar el caudal. En otros casos, por el contrario, el filtro no era tan restrictivo y se podía transitar la misma magnitud sin necesidad de presurizar el tanque.

La dirección en la que sale expulsada el agua también puede ser un factor a tener en cuenta, ya que puede influenciar la velocidad con que se va creando el orificio. Durante esta investigación se supuso que ésta se fuga de forma paralela a la tubería, no obstante, los resultados pudieron haber sido diferentes dado el caso que esta lámina hubiese impactado directamente la superficie, o que por el contrario hubiese salido de forma divergente. Esto aplica más que todo para los tubos en polietileno, cuya curvatura puede darles una ventaja frente a sus competidores.

Estos son apenas algunos de los muchos factores que se pudieron haber quedado por fuera del análisis, y que surgen como hipótesis a partir de esta investigación. Otros podrían estar relacionados con aspectos propios del diseño del montaje como la forma de la flauta o las dimensiones de la boquilla. Si se desea entender completamente la ciencia de la abrasión externa, se deben contemplar todos estos aspectos a la hora de repetir las pruebas, y sobre todo a la hora de revisar los resultados.

| <b>NÚMERO DE LA PRUEBA</b>  | <b>1</b>  | <b>2</b> | <b>3</b>   | <b>4</b>    | <b>5</b>  | <b>6</b>  | <b>7</b>      | <b>8</b>      | <b>9</b> | <b>10</b>  | <b>11</b>   | <b>12</b>   | <b>13</b>     |        |
|---|-----------|----------|------------|-------------|-----------|-----------|---------------|---------------|----------|------------|-------------|-------------|---------------|--------|
| <b>Material</b>   | PVC       | PVC      | PVC        | PVC         | PVC       | PVC       | Hierro Dúctil | Hierro Dúctil | PVC      | PVC        | Polietileno | Polietileno | Hierro Dúctil |        |
| <b>Diámetro Nominal (pulg)</b>  | 4         | 4        | 4          | 4           | 6         | 6         | 6             | 6             | 8        | 8          | 8           | 8           | 6             |        |
| <b>Espesor (mm)</b>   | 3.12      | 3.12     | 3.12       | 3.12        | 4.62      | 4.62      | 9.97          | 9.97          | 5.99     | 5.99       | 11.9        | 11.9        | 9.97          |        |
| <b>Presión de la prueba (Valor promedio en Bar)</b>                     | 0.92      | 1.17     | 0.57       | 0.57        | 1.17      | 0.92      | 2.00          | 1.55          | 1.55     | 1.17       | 1.55        | 2.00        | 1.55          |        |
| <b>Duración de la prueba</b>  | 4h 10 min | 3h 4 min | 26 h 22min | 17 h 44 min | 7h 51min  | 26h 38min | 24h 32min     | 150 h         | 2h 30min | 6 h 50 min | 79 h 5 min  | 69h 40min   | 39 h 48 min   |        |
| <b>Dimensiones del orificio o perforación</b>                           |           |          |            |             | <b>1</b>  | <b>2</b>  |               |               |          |            |             |             |               |        |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 5.26      | 7.40     | N/A        | 4.66        | 9.34      | 7.94      | 3.34          | 7.87          | NA       | 4.33       | 4.71        | 5.79        | 6.82          | 10.07  |
| <b>Largo (mm)</b>   | 12.79     | 20.90    | N/A        | 10.03       | 14.46     | 15.91     | 8.48          | 13.89         | NA       | 22.87      | 14.65       | 8.93        | 7.04          | 21.47  |
| <b>Dimensiones de la zona desgastada</b>                                |           |          |            |             |           |           |               |               |          |            |             | <b>1</b>    | <b>2</b>      |        |
| <b>Ancho (mm)</b>   | 38.74     | 45.80    | 42.08      | 35.51       | 43.37     | 44.11     | 53.29         | 57.2          | 23.11    | 43.49      | 55.22       | 41.24       | 53.17         | 33.33  |
| <b>Largo (mm)</b>   | 62.33     | 66.29    | 49.20      | 49.73       | 71.5      | 62.42     | 73.07         | 92.75         | 95.11    | 86.86      | 131.87      | 153.11      |               | 107.44 |
| <b>Caracterización del hundimiento del suelo</b>                        |           |          |            |             |           |           |               |               |          |            |             |             |               |        |
| <b>Ancho (cm)</b>   | N/A       | 53       | 34         | 32          | 61        | 43        | 70            | 70            | 50       | 54         | 65          | 70          | 70            |        |
| <b>Largo (cm)</b>   | N/A       | 70       | 47         | 34          | 83        | 62        | 92            | 96            | 94       | 85         | 95          | 143         | 122           |        |
| <b>Profundidad (cm)</b>   | N/A       | 11       | 4          | 2           | 14        | 9         | 20            | 19            | 10       | 9          | 34          | 20          | 23            |        |
| <b>Tiempo desde que falló la tubería hasta que se detiene la prueba</b> | N/A       | 11 min   | N/A        | 1h 9 min    | 1h 49 min | 4 min     | 13 min        | NA            | 30 min   | 5 min      | 20 min      | 34 min      | 29 min        |        |
| <b>Peso del material dentro de la tubería (g)</b>                       | N/A       | 9200.47  | N/A        | N/A         | 20980.75  | N/A       | 17340         | NA            | 7035     | N/A        | 7980        | N/A         | 4689          |        |

**Tabla 6-1. Resumen de los resultados de la totalidad de las pruebas.**



Otro tema que vale la pena comentar a raíz de los resultados, es el lavado de las partículas finas, también llamado reacomodación de las partículas. En un principio, se podría pensar que una muestra de arena de las condiciones de la mezcla original sería incapaz de conseguir estos resultados, o al menos en estos periodos de tiempo. No obstante en la **Tabla 6-2** y la **Gráfica 6-1**, se evidencia que el chorro de agua separa las partículas pequeñas y deja en la zona aledaña a la boquilla únicamente las más gruesas, aumentando así la capacidad del remolino para erosionar la superficie del tubo. Se debe advertir que no se hizo análisis granulométrico del material que aparecía en el tanque, sino que se supuso que este coincidía con el que se encontraba dentro de las tuberías.

Estas distribuciones parecen relacionarse con otras variables, como las dimensiones de los orificios o el tiempo que pasa desde que falla la tubería hasta que se detiene la prueba. No obstante, una vez más parece haber gran incertidumbre alrededor del proceso, pues siempre aparecen excepciones a las tendencias que se presentan. Por ejemplo, se podría decir que la muestra de cada prueba se torna mucho más gruesa a medida que aumentan las medidas de las perforaciones, pero el experimento 9 contradeciría esta afirmación. A pesar que las medidas de este último son comparables con las del caso 2 y el 13, las partículas del primero son de lejos más finas que las de los últimos.

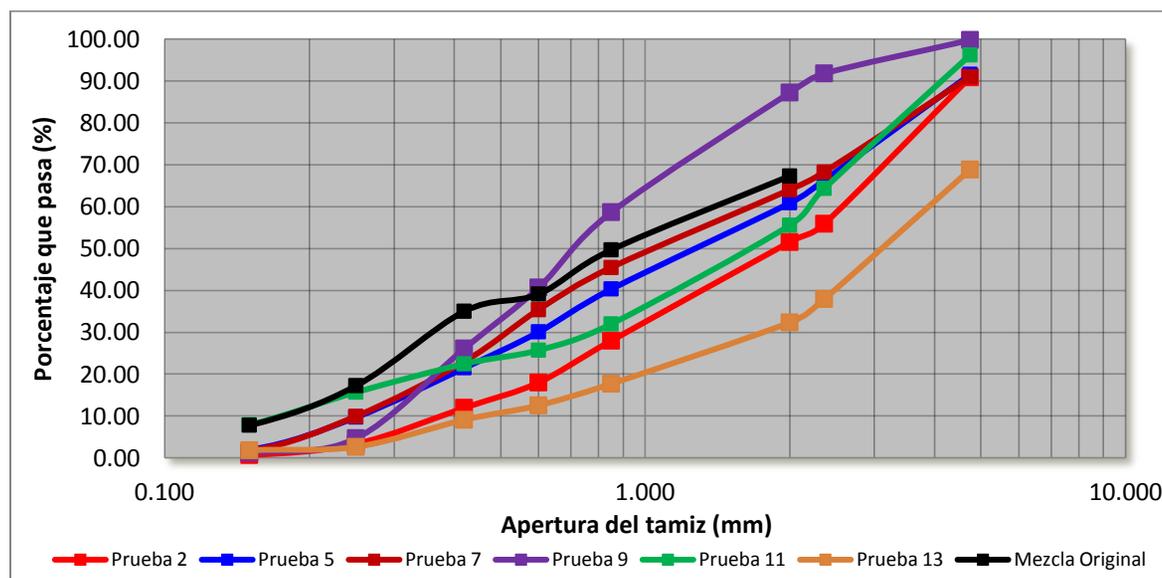
Después de haber analizado la relación entre las variables de entrada y los resultados, vale la pena examinar estos últimos a la luz de las condiciones reales. Lo primero que se debe decir, es que hay ciertos aspectos del montaje que podrían alejarse de la realidad, y por ende es relevante tenerlos en mente al analizar los resultados. En primer lugar, es fundamental tener en cuenta que durante las pruebas realizadas en esta investigación, el prototipo no se encontraba presurizado, tal como sucede con los tubos de redes reales. Esto permitió que las perforaciones crecieran paulatinamente como se vio en cada una de las pruebas. En la realidad, llegaría un punto en el que la debilidad estructural de la pared no soportaría la presión interna, y sería el agua dentro del ducto la que rompería la superficie, muy probablemente, en condiciones distintas a las evidenciadas en este trabajo.

En segundo lugar, se debe decir que cuando se ponen a prueba las tuberías de polietileno, se está suponiendo que en este material se pueden generar el mismo tipo de fugas que en los otros. No obstante, esto no es cierto porque sus uniones no se dan a partir de accesorios sino a partir de procesos de termofusión o electrofusión.

En este escenario, el fenómeno se podría presentar en otros lugares de la red como en los puntos de las acometidas domiciliarias, no obstante, las condiciones y consecuencias del mismo podrían ser diferentes. Sería importante investigar la factibilidad de que se produzca una fuga en una conexión de dos tuberías de polietileno, y aun más, la posibilidad de que bajo ese contexto se de la abrasión en la superficie.

| PRUEBA        |         | 2   | 5     | 7     | 9     | 11    | 13    | Mezcla Original |
|---------------|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| Abertura (mm) | # Tamiz | % Parcial Retenido en cada tamiz para cada prueba |       |       |       |       |       |                 |
| 4.750         | 4       | 9.10  | 8.38  | 8.98  | 0.16  | 3.76  | 31.14 |                 |
| 2.360         | 8       | 34.99   | 25.25 | 22.74 | 8.00  | 31.87 | 30.92 |                 |
| 2.000         | 10      | 4.37  | 5.43  | 4.25  | 4.57  | 8.78  | 5.60  | 32.68           |
| 0.850         | 20      | 23.56   | 20.59 | 18.57 | 28.58 | 23.59 | 14.65 | 17.64           |
| 0.600         | 30      | 9.99  | 10.25 | 10.08 | 18.00 | 6.27  | 5.17  | 10.56           |
| 0.420         | 40      | 6.04  | 8.58  | 12.42 | 14.57 | 3.26  | 3.45  | 4.11            |
| 0.250         | 60      | 8.61  | 11.78 | 13.06 | 21.43 | 6.78  | 6.46  | 17.77           |
| 0.150         | 100     | 2.68  | 7.77  | 8.28  | 3.43  | 7.78  | 0.82  | 9.45            |
| 0.075         | 200     | 0.57  | 1.57  | 1.20  | 1.14  | 7.78  | 1.74  | 5.48            |
| 0.000         | Fondo   | 0.09  | 0.39  | 0.42  | 0.11  | 0.11  | 0.05  | 2.31            |

**Tabla 6-2. Porcentajes del material retenido en cada tamiz (respecto al peso total de cada muestra) para cada una de las pruebas y para la mezcla original.**



**Gráfica 6-1. Curvas granulométricas de todas las pruebas y de la mezcla original.**



Asimismo, vale la pena mencionar que la presión del agua en la boquilla de la flauta no es la misma que la que se mide en la tubería de entrada al montaje. Este último valor se toma como referencia para comparar el prototipo con los tubos reales, porque probablemente, la presión interior en éstos, tampoco coincide con la del chorro de agua que se escapa. El cambio en el área transversal, y las pérdidas menores, seguramente obligan a variar esta magnitud entre los dos puntos, no obstante, puede que la variación en la situación real no sea la misma que la simulada en el modelo de laboratorio.

En otras palabras, se quiere decir que por más que la presión de entrada al montaje coincida con la presión del ducto real, es posible que ambos chorros de agua presenten pequeños desfases en el valor. Esto probablemente no generó mayores cambios en los resultados finales, pero es importante tenerlo en cuenta para conocer las condiciones en las que se desarrollaron las distintas pruebas en el laboratorio.



## 7. CONCLUSIONES

---

A partir de esta investigación se puede concluir que la abrasión externa se trata de un remolino de material particulado que impacta constantemente la superficie de una tubería. Esto se da por efecto de un chorro de agua que sale a altas presiones desde una conexión errónea entre dos tuberías, o una estructura similar. Se sabe que en esta zona se da un lavado de las partículas finas, y que únicamente las más grandes son las que se quedan erosionado la zona mencionada. La lámina del fluido no tiene que impactar directamente la tubería para generar el fenómeno, pero posiblemente el ángulo de expulsión del agua influye en los resultados finales.

También se puede concluir que existen tendencias claras al estudiar por separado las variables de entrada del modelo físico y los resultados. No obstante, cuando se busca describir el comportamiento global del fenómeno, teniendo en cuenta combinaciones de parámetros iniciales y no valores independientes, resulta mucho más difícil predecir cuál será el resultado final.

Esto se debe, en parte, a que este fenómeno está rodeado de bastante incertidumbre. No es claro cuál de los parámetros iniciales tiene más relevancia en cada uno de los de salida; siempre hay excepciones que rompen las tendencias que se vienen presentando. La solución más factible para esto es llevar a cabo un mayor número de pruebas; en las que se haga un análisis de sensibilidad de cada una de las variables de entrada, trabajando con rangos de valores de entrada más grandes.

Al extrapolar los resultados del laboratorio a las situaciones reales, lo primero que se debe decir es que sin importar el material, o cualquier otro de los parámetros iniciales, a largo plazo todas las tuberías fallan debido a los efectos de la abrasión externa. Los resultados encontrados en esta investigación evidencian diferencias entre las distintas superficies, no obstante, estas son relevantes únicamente a corto plazo. En la realidad los tubos permanecen años o décadas enterrados, por ende el hecho de que fallen 20 o 100 horas después es totalmente irrelevante porque finalmente todas fallarán.

A partir de esto, se puede afirmar que no se debe buscar la solución a este problema en los materiales de las tuberías. Por el contrario, lo que se debe hacer es optimizar la calidad de las conexiones, y capacitar a los operadores para que realicen bien su trabajo y no cometan errores durante el proceso constructivo, de esta forma se impedirá la aparición de las fugas y sólo así se evitará la abrasión externa.

Por otro lado, es importante tener en cuenta los distintos efectos colaterales del proceso que fueron identificados a partir de esta investigación. El primero de ellos, la pérdida de agua y presión en la red ya se esperaba, por ende no vale la pena profundizar en él; se supone que genera las mismas consecuencias que cualquier otro tipo de fuga. En segundo lugar, se



encuentra la posible contaminación del agua de la red a causa de sustancias que se encuentren disueltas en el suelo. Esta situación no es muy común debido a que en una red real las altas presiones al interior obligan al agua a salir, y es muy difícil que se de el caso contrario. No obstante, pueden darse excepciones en las que las condiciones hidráulicas permiten que ciertos solutos pasen del suelo a la red y contaminen el fluido.

En tercer lugar, es importante mencionar un aspecto exclusivo de las tuberías metálicas. A lo largo de esta investigación fue evidente que una vez se pierde el recubrimiento del hierro dúctil, la superficie que está en contacto directo con el agua empieza a oxidarse. En consecuencia, a mediano plazo el debilitamiento estructural de la pared no se limitaría a la zona desgastada, sino que se espera que éste se expanda hacia todas las regiones donde se ha perdido el recubrimiento. Si esto se analiza junto con los efectos de la presión interna del ducto, a largo plazo, ambos significarían un problema de gran magnitud para cualquier red.

La cuarta consecuencia, quizás la más grave, son los cambios drásticos en las condiciones del suelo alrededor de la tubería. *A priori* se sabía que el escape de agua a través del orificio afectaría la humedad de la arena, y con esto, modificaría la resistencia de la misma. De esta forma, cualquier estructura que tuviera sus bases en esta zona podría verse afectada por el fenómeno. No obstante, nunca se contempló que se diera el lavado de las partículas finas, y que esto generara hundimientos del suelo de tamaño considerable, aún sin que se presentaran perforaciones.

Si se piensa que en la realidad, el chorro de agua continúa lavando la arena por mucho tiempo, se podría pensar que a mediano o largo plazo, el hundimiento podría llegar a ser muy grande. Eso en el mejor de los contextos, pues dado el caso de que la presión interna de la tubería haga reventar la pared, la emergencia podría ser aún mayor. De esta forma, ambos escenarios representan una gran amenaza para la ciudad donde se encuentre la red, pues pueden llegar a colapsar vías o estructuras en la superficie.

A futuro, los estudios de abrasión externa deberían tener en cuenta los aspectos del fenómeno que se creyeron poco relevantes durante esta investigación, pero también deberían intentar mejorar la forma en la que el montaje simula las condiciones reales. Se debería estudiar mucho más la forma como se dan las fugas en la realidad, para que la flauta, y más que todo la boquilla, recreen de mejor forma la lámina de agua. Asimismo, se debe pensar en la principal limitante de este modelo, el hecho de que la tubería con la que se está experimentando no está presurizada. Si se quiere llegar a entender completamente la ciencia de la abrasión externa, se debe buscar la forma de hacer pasar agua al interior del tubo, en condiciones similares a las presentadas en una red real.



## 6 BIBLIOGRAFÍA

---

- ASTM. (2012). *Standard Terminology Relating to wear and erosion*. ASTM International.
- Bayer, R. G. (1994). *Mechanical wear prediction and prevention*. New York, United States of America: MARCEL DEKKER, INC.
- Harsha, A., & Tewari, U. (2003). Two-body and three-body abrasive wear behaviour of polyaryletherketone composites . *Polymer Testing* , 22 (4), 403-418.
- Houben, G. (2007). Mechanical Causes of well ageing. En G. Houben, *water well Rehabilitation and Reconstruction*. McGraw-Hill Professional.
- ICONTEC. (2007). Norma Técnica Colombiana 77. *Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos* . Bogotá, Colombia.
- Lester, G. (1998). Durabilty and service life. En G. Lester, *The Complete Corrugated Polyethylene Pipe Design Manual and Installation Guide*. California, United States of America: University of California.
- Martínez Pérez, F. (2002). *LA TRIBOLOGÍA ciencia y tecnica para el mantenimiento*. (Segunda edición ed.). México D.F, México: Editorial Limusa S.A.
- Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. (2012). RAS Título B: Sistemas de Acueducto. En *Reglamento tecnico del sector de Agua potable y Saneamiento basico* (pág. 157). Bogota, Colombia.
- Misra, A., & Finnie, I. (1979). *Proc. Intl.Conf.on Wear of Materials*. United States of America: ASME.
- National Sanitation Fundation. (1955). *A study of plastic pipe for potable water supplies*. Ann Arbor: School of Public Health University of Michigan.
- Sanchez De Guzmán, D. (1987). *Tecnología del concreto y del mortero*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Steels founder's of america ans ASM international. (1955). *Steel Castings Handbook*. En M. Blair, & T. Stevens (Edits.). United States of America: ASM international.



- Viswanath, B., & Vijayarangan, S. (2010). A STUDY OF THE LOW STRESS SLIDING ABRASION WEAR BEHAVIOR OF MULLITE COATINGS. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* , 5 (1), 107.
- Zlokovitz, R., & Juran, I. (2005). Trenchless Technology Solutions for professional training Sessions. (U. u. institute, Ed.)
- Zum Gahr, K. (1981). *Proc. Intl. Conf. On wear materials*. United States of America: ASME.