

**EFFECTO DEL FLUJO SECUNDARIO EN LA SEPARACION DE PLOMO DE  
UNA MATRIZ ALUVIAL EN UN HIDROCICLON**

**OSWALDO VLADIMIR BASTIDAS MELO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL  
PROGRAMA INGENIERIA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2010**

**EFFECTO DEL FLUJO SECUNDARIO EN LA SEPARACION DE PLOMO DE  
UNA MATRIZ ALUVIAL EN UN HIDROCICLON**

**OSWALDO VLADIMIR BASTIDAS MELO**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para  
Optar el título de:**

**INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR**

**IC. HERNAN GOMEZ ZAMBRANO  
Magíster en Recursos Hidráulicos**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2010**

## **NOTA DE RESPONSABILIDAD**

La Universidad de Nariño no es responsable por las ideas, opiniones, resultados y/o conclusiones derivadas de la presente investigación.

Artículo 1 de acuerdo N° 324 de octubre de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Pasto, mayo 2010**

## **AGRADECIMIENTOS**

**Doy gracias a Dios Todo Poderoso, por haberme prestado la vida y dado la inteligencia y oportunidad de poder realizar mis estudios superiores y así terminar con mi carrera como Ingeniero Civil.**

**Le agradezco a mi madre por sus cuidados y todo el apoyo que me brindó para que pueda culminar con mi carrera**

**Gracias a la Universidad Nariño, por haberme brindado la oportunidad de estudiar en tan prestigiosa institución, ya que, muchas personas no pueden ingresar y además me colaboró con la realización de este proyecto de investigación.**

**Agradezco especialmente al Ingeniero civil magíster en recursos hidráulicos Hernán Gómez Zambrano, por haber colaborado y asesorado en toda la ejecución del proyecto.**

**Gracias a todo el personal docente, por todos los conocimientos que me impartieron día a día hasta la terminación de mi carrera.**

**Gracias a mis familiares y amigos que de alguna u otra forma pusieron su granito de arena para que pueda culminar con este sueño.**

## TABLA DE CONTENIDO

Contenido	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	18
<b>RESUMEN.....</b>	<b>20</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>22</b>
<b>1. NOMENCLATURA.....</b>	<b>24</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>25</b>
2.1 SÍNTESIS.....	25
2.2 CONCEPTOS GENERALES.....	25
2.3 FLUJO SECUNDARIO.....	27
2.3.1 Separación de las partículas.....	29
2.4 NÚMERO DE DEÁN (DE).....	30
2.5 HIDROCICLONES.....	30
2.5.1 Cono pronunciado, convencionales.....	33
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>41</b>
3.1 ETAPAS DEL PROYECTO .....	41
3.1.1 Revisión y análisis del estado del arte.....	41
<b>4. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EL HIDROCICLÓN.....</b>	<b>46</b>
4.1 CORRELACIÓN MATEMÁTICA PARA CONCENTRACIÓN DE PLOMO, CPB.....	46
4.1.1 Número de Deán (De).....	46
4.2 DISEÑOS FACTORIAL.....	49
4.2.1 Diseño factorial $2^5$ con punto al centro con cuatro replicas.....	49
4.3 VARIABLES A MEDIR EN CADA TRATAMIENTO EXPERIMENTAL.	51
4.4 FLEXIBILIDAD DEL MODELO.....	51
4.5 MONTAJE PARA EL FACTORIAL COMPLETO $2^5$ CON PUNTO AL CENTRO.....	52

<b>5.</b>	<b>CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE.....</b>	<b>53</b>
5.1	MATERIALES, HERRAMIENTA Y EQUIPO UTILIZADO.....	54
5.1.1	Materiales.....	54
5.2	CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL HIDROCICLÓN.....	55
5.2.1	Tanque del hidrociclón.....	55
5.3	DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL MONTAJE.....	57
5.3.1	Tolva de alimentación de sólidos.....	57
5.4	MATERIAL UTILIZADO.....	58
5.5	PROCEDIMIENTO PARA PEGAR ACCESORIOS Y TUBERÍAS.....	59
5.6	TANQUE DE ALMACENAMIENTO VORTEX.....	62
5.7	TANQUE DE ALMACENAMIENTO APEX.....	62
5.8	FILTROS.....	63
5.9	MOTOBOMBA.....	64
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS ENSAYOS REALIZADOS.....</b>	<b>65</b>
6.1	AFORADO DEL HIDROCICLÓN.....	65
6.1.1	Pasos para empezar un ensayo de arranque para el hidrociclón....	65
6.2	ENSAYOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	66
6.2.1	Equipo.....	66
6.3	ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA MUESTRA INICIAL.....	74
6.3.1	Equipo Utilizado.....	74
6.4	CÁLCULOS REALIZADOS EN GRANULOMETRÍA.....	76
6.5	ENSAYOS EN EL HIDROCICLON.....	81
<b>7.</b>	<b>METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL HIDROCICLÓN.....</b>	<b>169</b>
7.1	DISEÑO TEORICO.....	169
7.1.1	Datos iniciales.....	169
<b>7.2</b>	<b>CALCULOS.....</b>	<b>170</b>
7.3	CORRELACIÓN MATEMÁTICA PARA.....	172
7.4	EJEMPLO DE DISEÑO.....	173
7.4.1	Datos iniciales:.....	173
<b>8.</b>	<b>PRESUPUESTO.....</b>	<b>178</b>

9	<b>IMPACTOS ESPERADOS.....</b>	183
10	<b>CONCLUSIONES.....</b>	184
11	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	185



## LISTA DE TABLAS

Tabla		Pág.
<b>Tabla 3.1</b>	Clasificación de sedimentos naturales según su tamaño dada por Lane y reportada por (yang, 1996).....	42
<b>Tabla 4.1</b>	Diseño factorial $2^5$ con punto al centro.....	50
<b>Tabla 5.1</b>	Resumen tubería y accesorios utilizados en conexión.....	60
<b>Tabla 5.2</b>	Resumen tubería y accesorios utilizados en salidas.....	61
<b>Tabla 6.1</b>	Gravedad específica y absorción de agregados finos INV E – 22 Muestra 1.....	71
<b>Tabla 6.2</b>	Gravedad específica y absorción de agregados finos INV E – 22 muestra 2.....	72
<b>Tabla 6.3</b>	Gravedad específica y absorción de agregados finos INV E – 22 muestra 3 .....	73
<b>Tabla 6.4</b>	Granulometría muestra arena gris.....	76
<b>Tabla 6.5</b>	Granulometría muestra arena café.....	77
<b>Tabla 6.6</b>	Granulometría muestra arena negra.....	77
<b>Tabla 6.7</b>	Granulometría muestra plomo.....	78
<b>Tabla 6.8</b>	Cantidad de sólidos arena Gris (teórico).....	80
<b>Tabla 6.9</b>	Cantidad de sólidos arena Café (teórico).....	80
<b>Tabla 6.10</b>	Cantidad de sólidos arena Negra (teórico).....	80
<b>Tabla 6.11</b>	Diseño factorial realizado.....	83

<b>Tabla 6.12</b>	Tabla variables manipulables.....	85
<b>Tabla 6.13</b>	Datos de entrada.....	87
<b>Tabla 6.14</b>	Variables medidas.....	89
<b>Tabla 6.15</b>	Tabla Peso de agregados utilizados para el ensayo.....	91
<b>Tabla 6.16</b>	Arena gris Vortex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	93
<b>Tabla 6.17</b>	Arena gris Ápex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	93
<b>Tabla 6.18</b>	Arena gris Vortex $Q_{W+}$ $D_{A-}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	94
<b>Tabla 6.19</b>	Arena gris Ápex $Q_{W+}$ $D_{A-}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	95
<b>Tabla 6.20</b>	Arena gris Vortex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	96
<b>Tabla 6.21</b>	Arena gris ápex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	96
<b>Tabla 6.22</b>	Arena gris Vortex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	97
<b>Tabla 6.23</b>	Arena gris ápex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	98
<b>Tabla 6.24</b>	Arena gris Vortex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	99
<b>Tabla 6.25</b>	Arena gris ápex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	99
<b>Tabla 6.26</b>	Arena gris Vortex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	100
<b>Tabla 6.27</b>	Arena gris ápex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	100
<b>Tabla 6.28</b>	Arena gris Vortex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	102
<b>Tabla 6.29</b>	Arena gris ápex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	102
<b>Tabla 6.30</b>	Arena gris Vortex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	103
<b>Tabla 6.31</b>	Arena gris ápex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	104
<b>Tabla 6.32</b>	Arena café Vortex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	105
<b>Tabla 6.33</b>	Arena café ápex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	105

<b>Tabla 6.34</b>	Arena café Vortex $Q_{W+}$ $D_{A-}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	106
<b>Tabla 6.35</b>	Arena café ápex $Q_{W+}$ $D_{A-}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	107
<b>Tabla 6.36</b>	Arena café Vortex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	108
<b>Tabla 6.37</b>	Arena café ápex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	108
<b>Tabla 6.38</b>	Arena café Vortex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	109
<b>Tabla 6.39</b>	Arena café ápex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	110
<b>Tabla 6.40</b>	Arena café Vortex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	111
<b>Tabla 6.41</b>	Arena café ápex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	111
<b>Tabla 6.42</b>	Arena café Vortex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	112
<b>Tabla 6.43</b>	Arena café ápex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	113
<b>Tabla 6.44</b>	Arena café Vortex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V+}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	114
<b>Tabla 6.45</b>	Arena café ápex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V+}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	114
<b>Tabla 6.46</b>	Arena café Vortex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V+}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	115
<b>Tabla 6.47</b>	Arena café ápex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S-}$ .....	116
<b>Tabla 6.48</b>	Arena gris Vortex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	117
<b>Tabla 6.49</b>	Arena gris ápex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	117
<b>Tabla 6.50</b>	Arena gris Vortex $Q_{W+}$ $D_{A-}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S+}$ .....	118
<b>Tabla 6.51</b>	Arena gris ápex $Q_{W+}$ $D_{A-}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S+}$ .....	119
<b>Tabla 6.52</b>	Arena gris Vortex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S+}$ .....	120
<b>Tabla 6.53</b>	Arena gris ápex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S+}$ .....	120
<b>Tabla 6.54</b>	Arena gris Vortex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S+}$ .....	121
<b>Tabla 6.55</b>	Arena gris ápex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S+}$ .....	122

<b>Tabla 6.56</b>	Arena gris Vortex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	123
<b>Tabla 6.57</b>	Arena gris ápex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S-}$ .....	123
<b>Tabla 6.58</b>	Arena gris Vortex $Q_{W+}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S+}$ .....	124
<b>Tabla 6.59</b>	Arena gris ápex $Q_{W+}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S+}$ .....	125
<b>Tabla 6.60</b>	Arena gris Vortex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S+}$ .....	126
<b>Tabla 6.61</b>	Arena gris ápex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50-}$ $Q_{S+}$ .....	126
<b>Tabla 6.62</b>	Arena gris Vortex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S+}$ .....	127
<b>Tabla 6.63</b>	Arena gris ápex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V+}$ $d_{50-}$ $Q_{S+}$ .....	128
<b>Tabla 6.64</b>	Arena café Vortex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	129
<b>Tabla 6.65</b>	Arena café ápex $Q_{W-}$ $D_{A-}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	129
<b>Tabla 6.66</b>	Arena café Vortex $Q_{W+}$ $D_{A-}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	130
<b>Tabla 6.67</b>	Arena café ápex $Q_{W+}$ $D_{A-}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	131
<b>Tabla 6.68</b>	Arena café Vortex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	132
<b>Tabla 6.69</b>	Arena café ápex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	132
<b>Tabla 6.70</b>	Arena café Vortex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	133
<b>Tabla 6.71</b>	Arena café ápex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	134
<b>Tabla 6.72</b>	Arena café Vortex $Q_{W+}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	135
<b>Tabla 6.73</b>	Arena café ápex $Q_{W+}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	135
<b>Tabla 6.74</b>	Arena café Vortex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	136
<b>Tabla 6.75</b>	Arena café ápex $Q_{W+}$ $D_{A-}$ $L_{V+}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	137
<b>Tabla 6.76</b>	Arena café Vortex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	138
<b>Tabla 6.77</b>	Arena café ápex $Q_{W-}$ $D_{A+}$ $L_{V-}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	138

<b>Tabla 6.78</b>	Arena café Vortex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V+}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	139
<b>Tabla 6.79</b>	Arena café ápex $Q_{W+}$ $D_{A+}$ $L_{V+}$ $d_{50+}$ $Q_{S+}$ .....	140
<b>Tabla 6.80</b>	Q m arena negra Vortex.....	141
<b>Tabla 6.81</b>	Q m arena negra ápex.....	141
<b>Tabla 6.82</b>	Q m arena negra Vortex.....	142
<b>Tabla 6.83</b>	Q m arena negra ápex.....	143
<b>Tabla 6.84</b>	Q m arena negra Vortex.....	144
<b>Tabla 6.85</b>	Q m arena negra ápex.....	144
<b>Tabla 6.86</b>	Q m arena negra Vortex.....	145
<b>Tabla 6.87</b>	Q m arena negra ápex.....	146
<b>Tabla 6.88</b>	Desviación estándar geométrica muestras iniciales.....	147
<b>Tabla 6.89</b>	Desviación estándar geométrica para el ápex.....	148
<b>Tabla 6.90</b>	Desviación estándar geométrica para el VORTEX.....	149
<b>Tabla 6.91</b>	Concentración de plomo, CPB.....	150
<b>Tabla 6.92</b>	Cálculo concentración volumétrica y numero de Restricciones...	152
<b>Tabla 6.93</b>	Cálculo número de Deam y Euler.....	154
<b>Tabla 6.94</b>	Cálculo de las propiedades de los sedimentos con variación de la concentración.....	156
<b>Tabla 6.95</b>	Valores Iniciales Regresión Lineal Múltiple.....	160
<b>Tabla 6.96</b>	Cálculo CPb teórico por medio de Regresión Lineal Múltiple.....	162
<b>Tabla 6.97</b>	Correlación Matemática para La pérdida de energía, H.....	163
<b>Tabla 6.98</b>	Correlación matemática para la Partición de Agua, PA.....	165

<b>Tabla 6.99</b>	Correlación Matemática para la Remoción de Arena.....	167
<b>Tabla 8. 1</b>	Lista de precios .....	178
<b>Tabla 8. 2</b>	Precios unitarios de accesorios.....	179
<b>Tabla 8. 3</b>	Precios unitarios de equipos.....	180
<b>Tabla 8. 4</b>	Precios unitarios de materiales.....	180
<b>Tabla 8. 5</b>	Precios unitarios de puntos hidráulicos.....	181
<b>Tabla 8. 6</b>	Precios unitarios de ensayos de agregados.....	182
<b>Tabla 8. 7</b>	Precios totales en hidrociclón.....	182

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Pág.
Figura 2.1	Forma y partes de un hidrociclón cónico.....	28
Figura 2.2	Forma de entrada de la alimentación al hidrociclón.....	28
Figura 2.3	Fuerzas que actúan sobre una partícula que gira en un hidrociclón.....	29
Figura 2.4	Geometría de un hidrociclón de fondo plano y el esquema de las corrientes internas.....	32
Figura 2.5	Diagrama de flujo del hidrociclón convencional.....	33
Figura 2.6	Ciclón cilíndrico LAROX tipo TWIN Vortex.....	35
Figura 2.7	Ciclón cilíndrico AKW ( $\varnothing$ 200 mm) Tipo fondo plano CBC.....	36
Figura 5.1	Montaje físico de laboratorio para el hidrociclón.....	53
Figura 5.2	Molde en cartón paja.....	55
Figura 5.3	Corte del acrílico.....	55
Figura 5.4	Calentado acrílico en horno.....	55
Figura 5.5	Manipulado del acrílico.....	55
Figura 5.6	Pegado del acrílico con inyección.....	56
Figura 5.7	Hidrociclón final.....	56
Figura 5.8	Base soporte del hidrociclón.....	56
Figura 5.9	Tolva de alimentación.....	57

Figura 5.10	Tubos cuadrados.....	57
Figura 5.11	Corte de molde circular.....	58
Figura 5.12	Tapa para hidrociclón.....	58
Figura 5.13	Tamizado de agregados.....	59
Figura 5.14	Arena negra final.....	59
Figura 5.15	Tanque receptor Vortex.....	62
Figura 5.16	Tanque receptor ápex.....	63
Figura 5.17	Filtros.....	63
Figura 6.1	Aforo del hidrociclón.....	65
Figura 6.2	Muestra saturada.....	67
Figura 6.3	Muestra secada al ambiente.....	68
Figura 6.4	Muestra SSS.....	68
Figura 6.5	Llenado al balón aforador.....	68
Figura 6.6	Llenado agua hasta la línea de aforo.....	69
Figura 6.7	Muestras al baño María.....	69
Figura 6.8	Extracción de vacíos.....	70
Figura 6.9	Completado de agua hasta la línea de aforo.....	70
Figura 6.10	Balanza granera.....	74
Figura 6.11	Serie de tamices.....	75
Figura 6.12	Tamizador mecánico.....	75
Figura 6.13	Hidrociclón en funcionamiento.....	82
Figura 6.14	Muestra obtenida de ápex.....	82



Figura 7. 1	Dimensiones internas reales del Hidrociclón estudiado.....	177
Figura 7.2	Dimensiones internas reales del hidrociclón y salidas ápex..	177

## LISTA DE GRAFICAS

Grafica		Pág.
<b>Grafica 6.1</b>	Curvas granulométricas diferentes muestras.....	79
<b>Grafica 6.2</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 1.....	94
<b>Grafica 6.3</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 2.....	95
<b>Grafica 6.4</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 3.....	97
<b>Grafica 6.5</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 4.....	98
<b>Grafica 6.6</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 5.....	100
<b>Grafica 6.7</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 6.....	101
<b>Grafica 6.8</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 7.....	103
<b>Grafica 6.9</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 8.....	104
<b>Grafica 6.10</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 9.....	106
<b>Grafica 6.11</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 10.....	107
<b>Grafica 6.12</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 11.....	109
<b>Grafica 6.13</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 12.....	110
<b>Grafica 6.14</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 13.....	112
<b>Grafica 6.15</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 14.....	113
<b>Grafica 6.16</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 15.....	115
<b>Grafica 6.17</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 16.....	116
<b>Grafica 6.18</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 17.....	118

<b>Grafica 6.19</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 18.....	119
<b>Grafica 6.20</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 19.....	121
<b>Grafica 6.21</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 20.....	122
<b>Grafica 6.22</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 21.....	124
<b>Grafica 6.23</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 22.....	125
<b>Grafica 6.24</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 23.....	127
<b>Grafica 6.25</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 24.....	128
<b>Grafica 6.26</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 25.....	130
<b>Grafica 6.27</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 26.....	131
<b>Grafica 6.28</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 27.....	133
<b>Grafica 6.29</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 28.....	134
<b>Grafica 6.30</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 29.....	136
<b>Grafica 6.31</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 30.....	137
<b>Grafica 6.32</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 31.....	139
<b>Grafica 6.33</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 32.....	140
<b>Grafica 6.34</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 33.....	142
<b>Grafica 6.35</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 34.....	143
<b>Grafica 6.36</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 35.....	145
<b>Grafica 6.37</b>	Curva Granulométrica Ensayo # 36.....	146

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO		Pág.
<b>Anexo A</b>	<b>ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE.....</b>	<b>186</b>
	1A. Variable dependiente: CPb.....	186
	2A. Variable dependiente: Eu.....	188
	3A. Variable dependiente: PA.....	190
	4A. Variable dependiente: RA.....	192
<b>Anexo B</b>	<b>Montaje en 2D y 3D .....</b>	<b>194</b>
	1B. Montaje 2D.....	194
	2B. Montaje 3D.....	195

## INTRODUCCIÓN

A través de la ingeniería civil se desea enfocar su conocimiento en la separación de materiales aluviales creando un nuevo sistema como es el hidrociclón. Este es un gran avance tecnológico para la región, ya que los hidrociclones son equipos indispensables, en las industrias de Minería para la clasificación de sólidos en el rango 10 –300 micras, especialmente en circuitos de molienda, en el espesado de pulpas previo a etapas de concentración y separación sólido-líquido, en la clarificación parcial de afluentes, como ayuda a clarificadores, y en los circuitos de lavado en contra-corriente; el cual contribuirá al mejoramiento de la cadena de producción y comercialización del producto, comenzando por la tecnificación de la pequeña minería informal existente, debido a la excelente separación de material aluvial por medio de un hidrociclón.

Hoy en día los mineros realizan la explotación en forma manual siendo este un sistema dispendioso, por ello se desea facilitar el trabajo para ellos y además proteger el medio ambiente, siendo así los pioneros con esta nueva técnica, que beneficiara a los mineros quienes ahorraran tiempo y mejoraran la eficiencia en la explotación de materiales valiosos como es el oro y el plomo.

Este sistema ha sido creado desde hace mas de 50 años aproximadamente del cual solo se conoce teóricamente su eficiencia, se demostrará con formulas experimentales por medio de ensayos de laboratorio que el hidrociclón es el mejor

Sistema de separación; además las empresas obtendrán mayores beneficios en cuanto a calidad y precio por su fácil ejecución.

Según al UPME<sup>1</sup> En Colombia sólo existen seis Instituciones encargadas de promover la implementación de la minería limpia, los denominados Centros Ambientales Mineros (CAM) como instrumentos de producción más limpia (PML), los cuales han sido considerados por el Departamento Nacional de Planeación - DNP como “instrumentos de investigación, capacitación, desarrollo y transferencia tecnológica” que en otras palabras significa promover el desarrollo de la minería, con una visión de producción más limpia y de desarrollo sostenible. Los CAM existen en: Sotomayor (Nariño), Ginebra (Valle del Cauca), Fondas (Cauca); Santa Rosa del Sur y San Martín de Loba (en el sur de Bolívar) y en Puerto Limón (Putumayo). Las causas del problema en nuestra región son la falta de políticas para la transferencia de tecnología, la falta de recursos económicos para investigar el tema propuesto y la falta de personal capacitado en el tema que emprenda proyectos de investigación.

---

<sup>1</sup> UPME. (2007) Unidad de Planeación Minero Energética. “Producción más limpia en la minería del oro en Colombia”. Ministerio de Minas y Energía. Subdirección de Planeación Minera. Bogotá. Oct. 2007. Versión Web.

## RESUMEN

El presente proyecto contiene la investigación del efecto que tiene el flujo secundario, generado por la fuerza centrífuga, sobre la eficiencia de separación de metales pesados contenidos en una mezcla de material sólido aluvial y agua. Para evaluar dicho efecto se propuso el estudio de un dispositivo que funciona con fuerza centrífuga, el cual comercialmente es conocido como hidrociclón.

El problema consiste en el desconocimiento que existe sobre el comportamiento básico del fenómeno de separación de metales pesados usando métodos gravimétricos con acción de flujo secundario. El cual se abordará construyendo pequeños prototipos en laboratorio y midiendo su efecto sobre la eficiencia de separación del metal pesado.

El prototipo realizado en laboratorio sirve como base de diseño para los posibles hidrociclones que se pretenden vender en un futuro, para lo cual, se realizaron una serie de ensayos, para luego realizar los posibles cálculos experimentales y comparar con los teóricos posibles y poder analizar la eficiencia de separación de material pesado del material aluvial, y conocer la partición de agua real por medio del hidrociclón.

En este caso se analizó el hidrociclón convencional como un equipo de sedimentación debido a que todo el material pasó por la salida del Ápex y no se pudo encontrar separación de material aluvial, y el hidrociclón de fondo plano se lo puede utilizar como equipo de separación de material fino debido a que se observó la separación de material fino de la mezcla de material aluvial y aumentar la concentración de material pesado por la mezcla de material aluvial recogido por la parte del ápex y la que se recogió por la parte de Vortex se pudo determinar que no tuvo material pesado en nuestro caso Plomo.

## **ABSTRACT**

This research project contains the effect of the secondary flow generated by the centrifugal force on the separation efficiency of heavy metals in a mixture of solid material and water flood. To evaluate this effect was proposed to study a device that works with centrifugal force, which is commercially known as a hydrocyclone.

The problem is the ignorance that exists about the basic behavior of the phenomenon of separation of heavy metals using gravimetric methods with secondary flow action. Which will be addressed by building small prototypes in the laboratory and measuring their effect on separation efficiency of heavy metal?

The prototype performed in laboratory design provides a basis for potential hydrocyclones that are intended to sell in the future, for which, there were a series of tests and then perform any calculations compare with experimental and theoretical potential and to analyze the separation efficiency of heavy equipment. Alluvial material, and know the actual water partition through the hydrocyclone.

In this case, we examined the conventional hydrocyclone sedimentation as a team because all the material passed through the exit of the Apex and could not find separation of alluvial material, and the flat bottom hydrocyclone can be used as separation equipment fine material was observed due to the separation of fine material from the mixture of alluvial material and increase the concentration of heavy equipment by the mixture of alluvial material collected by the party's apex and was collected by the vortex part of it was determined he had no heavy equipment in our case lead.



## 1. NOMENCLATURA

$D_h$	Densidad relativa del mineral pesado.
$D_l$	Densidad relativa del mineral liviano.
$D_f$	Densidad relativa del medio fluido.
$\mu$	Viscosidad cinemática del fluido
$v$	Velocidad del flujo
$\rho$	Densidad del fluido
$D_E$	Diámetro de entrada al hidrociclón
$D_V$	Diámetro de salida Vortex
$D_A$	Diámetro de salida ápex
$DC$	Diámetro del hidrociclón
$L_V$	Longitud del hidrociclón
$R$	Radio de la curvatura.
$D_{eq}$	Diámetro equivalente
$R_H$	Radio hidráulico de la sección mojada.
$\eta$	Eficiencia de separación
$W_r$	Peso de metal recuperado
$W_T$	Peso de metal contenido en la mezcla
$C_D'$	Coeficiente de arrastre de las partículas afectadas por la mezcla
$\sigma_g$	Desviación estándar geométrica del sedimento
$P$	Perímetro mojado
$A_c$	Área mojada.
$S_c$	Pendiente de la línea de energía
$Q_s$	Caudal del material aluvial,
$Q_m$	Caudal del metal pesado
$Q_w$	Caudal líquido.

<b>Ws</b>	Peso del sedimento.
<b>WPb<sub>A</sub></b>	Peso de plomo contenido en la muestra seca de arena obtenida del Apex.
<b>WTA</b>	Peso del sedimento seco más el peso de plomo obtenido del Apex.
<b>De</b>	Número adimensional Deam
<b>Eu</b>	Número adimensional Euler.
<b>N<sub>R</sub></b>	Número adimensional de restricciones
<b>LN</b>	Numero Longitud Normalizada del "Vortex Finder"
<b>C<sub>v</sub></b>	Concentración volumétrica
<b>d<sup>'*</sup></b>	Diámetro adimensional de partícula retardado
<b>RA</b>	Matemática para la remoción de arena
<b>Cu</b>	Coeficiente de uniformidad,
<b>CC</b>	Coeficiente de contracción (coefficient of curvature)
<b>d<sub>50</sub></b>	Diámetro por el cual pasa el 50%.
<b>Gs</b>	Gravedad específica de cada muestra.
<b>SSS</b>	Saturado con superficie seca
<b>Wfw</b>	Peso del balón con agua destilada hasta la marca
<b>Wfws</b>	Peso del balón volumétrico lleno con agua y sólido
<b>Wsol</b>	Peso del sólido seco.
<b>RA</b>	Matemática para la petición de agua
<b>T</b>	Temperatura de ensayo
<b>γ<sub>w</sub></b>	Peso específico del agua a temperatura T°
<b>ρ<sub>w</sub></b>	Densidad del agua a temperatura T°
<b>ρ<sub>s</sub></b>	Densidad del sólido
<b>ρ<sub>m</sub></b>	Densidad de la muestra
<b>Δ</b>	Gravedad específica sumergida
<b>vw</b>	Viscosidad cinemática del agua
<b>vm</b>	Viscosidad cinemática de la mezcla
<b>d<sup>*</sup></b>	Diámetro adimensional de partícula
<b>d<sup>'*</sup></b>	Diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla

- Rs** Número de Reynolds de la partícula para sedimentos naturales
- Rm** Número de Reynolds de partículas afectadas por la mezcla
- n** Exponente que cuantifica el efecto de la concentración sobre la velocidad de asentamiento de las partículas
- Vs** Velocidad de sólido
- Vm** Velocidad promedio de la mezcla
- CD** Coeficiente de arrastre de las partículas
- RLM** Regresión Lineal Múltiple
- WPb** Plomo contenido en la muestra seca de arena
- D<sub>c</sub>** Diámetro de corte del hidrociclón

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 SÍNTESIS

El tema propuesto en esta investigación, está enmarcado en lo que se conoce como separación gravimétrica y el transporte hidráulico de sólidos, tema que ha venido tomando auge en las últimas décadas, aunque su estudio ha venido haciéndose especialmente por empresas privadas extranjeras. En nuestro país su estudio ha sido muy limitado por lo general enfocado a la “transferencia de tecnología”.

### 2.2 CONCEPTOS GENERALES

La separación gravimétrica comprende muchos métodos de separación, pero los que se usan con influencia del flujo secundario se encuentran en el hidrociclón, este aparato ha sido utilizado para la separación de partículas gruesas de otras de menor diámetro.

Según Pavés (1987)<sup>2</sup> los métodos de separación por gravedad (concentración gravítica o gravimétrica) se usan para tratar una gran variedad de minerales, que varían desde los sulfuros metálicos pesados hasta carbón, en algunos casos con tamaños del orden de los micrones.

En los últimos años, muchas compañías han re-evaluado los sistemas gravimétricos debido al incremento en los costos de los reactivos de flotación, la relativa simplicidad de los proceso gravimétricos, ya que producen poca contaminación ambiental.

---

<sup>2</sup> Pavés, Oswaldo (1987) “Concentración Gravimétrica”. Universidad de Atacama. [www.minas.upm.es/catedra-aneфа/Bouso-M3/Hidrociclones\\_Fondo\\_Plano.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-aneфа/Bouso-M3/Hidrociclones_Fondo_Plano.pdf)

Actualmente, las técnicas más modernas que se aplican en este tipo de concentración incluyen equipos que aprovechan la fuerza centrífuga para la separación de partículas finas. Entre estas tecnologías modernas se pueden citar las siguientes: el concentrador centrífugo Knelson, el concentrador Centrífugo Falcón, el jig-centrífugo Kelsey y el Separador de Gravedad Múltiple (MGS) Mozley con la desventaja que hay que suministrarles la energía de forma externa, principalmente con motores.

Los métodos de concentración gravimétrica se utilizan para la separación de minerales de diferentes densidades utilizando la fuerza de gravedad y, últimamente, las tecnologías modernas aprovechan también la fuerza centrífuga para la separación de los minerales.

En este tipo de separación se generan dos o tres productos: el concentrado, las colas, y en algunos casos, un producto medio (“middling”).

Para una separación efectiva en este tipo de concentración es fundamental que exista una marcada diferencia de densidad entre el mineral y la ganga. A partir del llamado criterio de concentración se tendrá una idea sobre el tipo de separación posible. El criterio de concentración utilizado en la separación gravimétrica es el siguiente:

$$\Pi_1 = \left( \frac{D_h - D_f}{D_l - D_f} \right) \quad [\text{EC. 2.1}]$$

En términos generales, cuando el cociente es mayor que 2,5, ya sea positivo o negativo, la separación gravimétrica es relativamente fácil. A medida que el cociente disminuye, la eficiencia de la separación disminuye; valores menores que 1,25 indicarían que la concentración por gravedad, por lo general, no sería posible comercialmente.

Si se aplica la ecuación [2.1] al plomo, como metal pesado propuesto para estudio en esta investigación con  $D_h$  (plomo) = 11.34,  $D_l$  (material aluvial) = 2.65 y  $D_f$  (agua) = 1, Se obtiene un  $\Pi_1$  de 6.27, el cual es adecuado para realizar ensayos de concentración.

A continuación se exponen algunos conceptos teóricos sobre temas como el flujo secundario, el Número de Dean que son la base para la cuantificación de la separación de partículas sometidas a fuerzas centrifugas. Luego se hace una descripción de cada dispositivo propuesto para ensayos en el laboratorio.

### **2.3 FLUJO SECUNDARIO**

El flujo secundario se considera como el campo de movimiento de un fluido que puede ser como superpuesto sobre un campo primario de movimiento, por la acción de la fricción, generalmente en la proximidad de límites sólidos. También conocido por flujo friccional secundario.

Aunque hay varias maneras de clasificar o de definir flujos secundarios, pueden ser observados como disturbio pequeño en un flujo primario donde el flujo primario depende de dos dimensiones principalmente.

Mientras que el flujo secundario se suele considerar erróneamente y a menudo, como un flujo pequeño sobrepuesto en un flujo más grande, realmente el flujo secundario puede ser del mismo orden de la magnitud que el flujo primario.

La figura 2.1 y Figura 2.2, muestra la forma típica de un hidrociclón de fondo cónico como generador de vórtices.

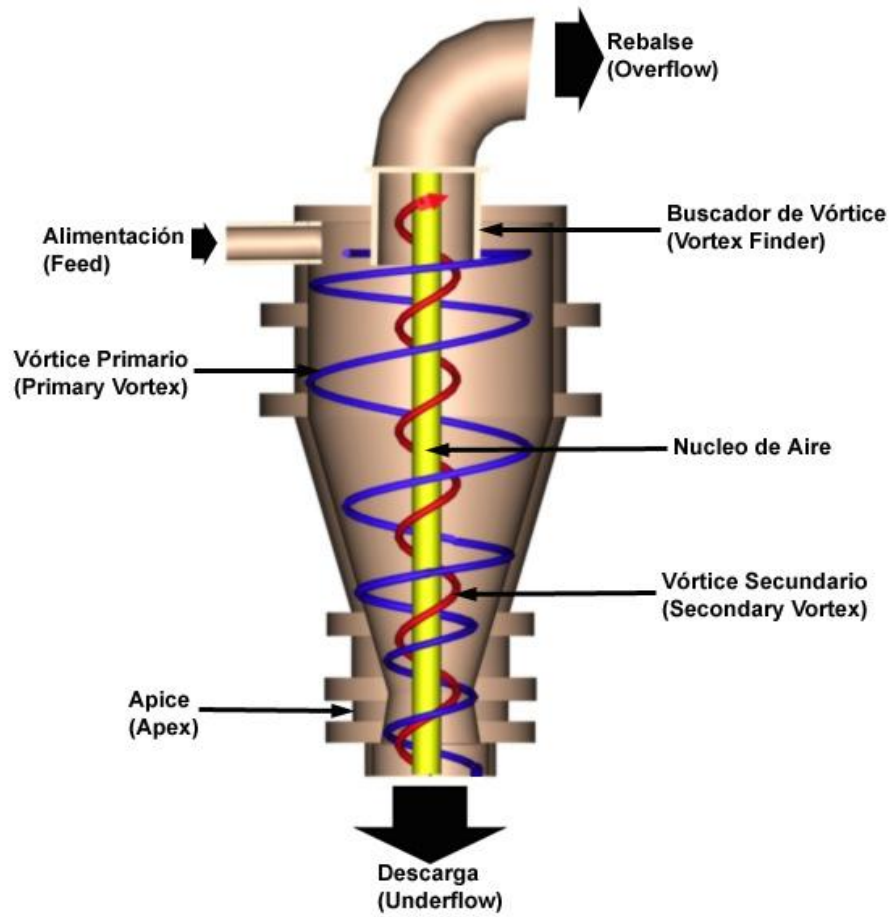


Figura 2.1 Forma y partes de un hidrociclón cónico.<sup>3</sup>

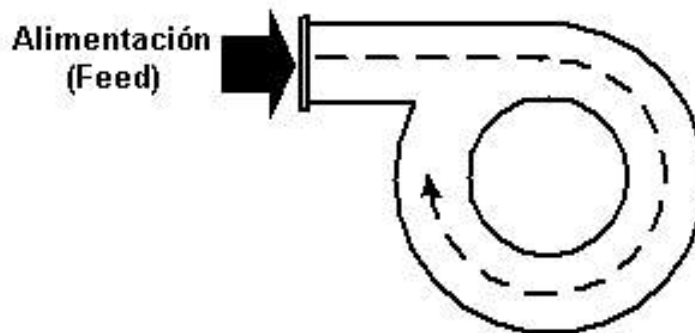


Figura 2.2 Forma de entrada de la alimentación al hidrociclón.

<sup>3</sup> ELEMENTOS Y TECNICAS DE CLASIFICACION, Jaime Tapia Quezada, UNIVERSIDAD ARTURO PRAT IQUIQUE – CHILE INGENIERIA EN METALURGIA EXTRACTIVA [www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/Preparación Mecánica de Minerales.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/Preparación Mecánica de Minerales.pdf)

**Vórtice Primario** = Desciende por las paredes.

**Núcleo de Aire** = Conectado a la atmósfera.

**Vórtice Secundario** = Ascende alrededor del núcleo de aire.

**2.3.1 Separación de las partículas:** La separación es producida por la Rotación del Fluido, el cual desarrolla grandes fuerzas centrífugas. La aceleración de gravedad  $g$  es reemplazada por  $w^2R$  de modo que las velocidades terminales de todas las partículas aumentan pero permanecen en la misma proporción relativa, por lo que se alcanza una mayor capacidad de tratamiento.



**Figura 2.3** Fuerzas que actúan sobre una partícula que gira en un hidrociclón.

Las partículas más grandes y pesadas que tienen mayor velocidad de sedimentación se mueven hacia la pared del hidrociclón y son arrastradas por el vórtice primario hacia la descarga. Las partículas más pequeñas debido al mayor efecto de arrastre relativo a las fuerzas inerciales, que produce un menor movimiento relativo al fluido, se mueven hacia la zona de baja presión en el centro



del hidrociclón y son arrastradas hacia arriba a través de buscador de vórtice y salen por el Rebalse.

La calidad de la separación en un hidrociclón se representa a través de la curva de eficiencia de clasificación. Esta curva muestra la fracción (o porcentaje) de material de tamaño  $i$  que viene en la alimentación que se va a la descarga.

## 2.4 NÚMERO DE DEÁN (DE).

Número adimensional que relaciona la fuerza de viscosidad que actúa sobre un fluido que fluye en una tubería curvada y la fuerza centrífuga ( $De$ ) es igual al número de Reynolds multiplicado por la raíz cuadrada de la relación entre el diámetro equivalente y el radio de curvatura del conducto. Para un tubo circular y agua limpia se da como.

$$De = \left( \frac{DV\rho}{\mu} \right) \left( \frac{D}{2R} \right)^{1/2} \quad [\text{EC. 2.2}]$$

Para un canal o una sección transversal diferente a la circular es posible dar el Número de Deán como:

$$De = \left( \frac{D_{eq}V\rho}{\mu} \right) \left( \frac{D_{eq}}{2R} \right)^{1/2} \quad [\text{EC. 2.3}]$$

$$D_{eq} = 4R_H \quad [\text{EC. 2.4}]$$

Este número adimensional será la base para relacionar la eficiencia de separación del metal con las propiedades del flujo y del conducto.

## 2.5 HIDROCICLONES

A comienzos del Siglo XX empiezan a aparecer, esporádicamente, aplicaciones de Hidrociclones. La primera patente de que se tiene constancia sobre un hidrociclón, fue otorgada a Bretney en Estados Unidos en 1891, pero curiosamente hasta 1914

no se conoce la aplicación aislada de un hidrociclón en una mina de fosfato americana, tal y como recoge Bradley en su libro “The Hydrocyclone”, la primera publicación sería sobre este equipo.

Mediados los años 20, se hicieron tímidas incursiones con Hidrociclones para la depuración de arenas en la extracción de petróleo, y a finales de los 30 se empiezan a emplear con éxito en la industria del papel. En 1939 el Estado de Minas Holandés, Dutch State Mines (DSM) comienza a estudiar la aplicación de los Hidrociclones en el lavado de carbón por medios densos, más concretamente en el desaguado de estériles, y un poco más tarde en el desaguado del carbón lavado previo a las cribas de escurrido.

Los mayores desarrollos en esta aplicación fueron llevados a cabo por M. G. Driessen, quien publicó numerosos artículos sobre sus trabajos, entre los años 1939 a 1948.

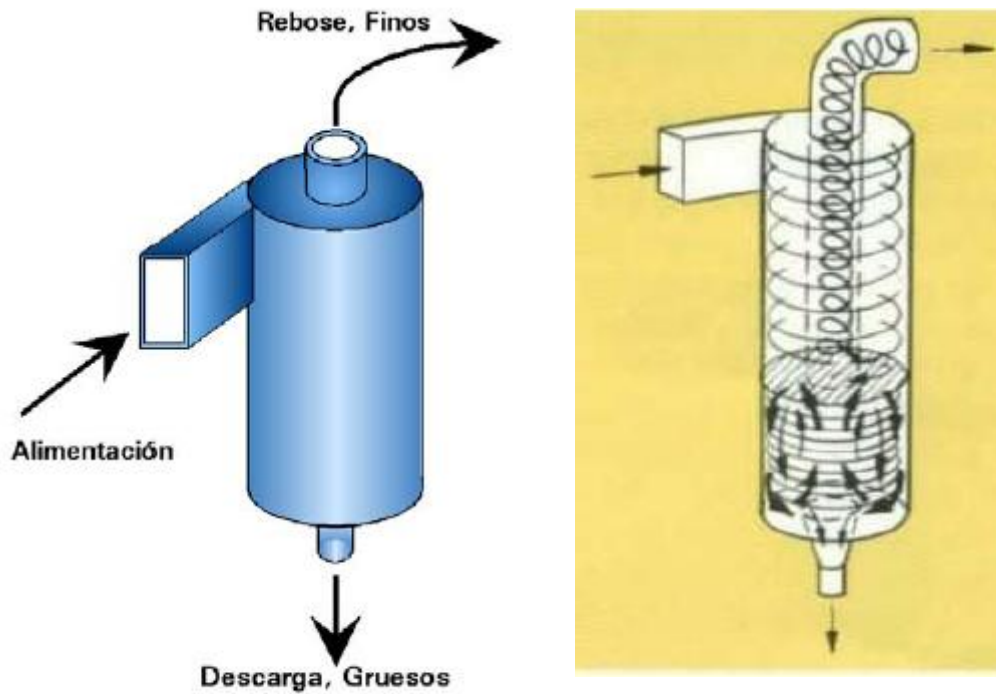
El hidrociclón diseñado por Driessen carecía de tobera de rebose, evacuándose el mismo a través de una sencilla abertura practicada en la tapa del cuerpo de alimentación. No obstante, al momento de su comercialización en 1948, por la Empresa Stamicarbon N. V., el hidrociclón ya contaba con la correspondiente tobera de rebose.<sup>4</sup>

En un hidrociclón el fluido de alimentación entra tangencialmente a la parte cilíndrica bajo una cierta presión, lo que genera su rotación alrededor del eje longitudinal del hidrociclón, formando un torbellino descendente hacia el vértice de la parte circular o cónica. Las partículas más gruesas debido a la aceleración centrífuga giran cercanas a la pared, siendo evacuadas a través de la boquilla en forma de pulpa espesa. Debido a las reducidas dimensiones de ésta, solamente

---

<sup>4</sup> BOUSO, Juan Luis. Hitos históricos en el desarrollo de la clasificación. IX simposium sobre procesamiento de minerales Moly- Cop 2001. Puyehue, Chile [www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/Hidrociclones\\_Fondo\\_Plano.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/Hidrociclones_Fondo_Plano.pdf)

se evacua una parte de la suspensión, creándose en el vértice del cono un segundo torbellino de trayectoria ascendente, el cual transporta las partículas finas junto con la mayor parte del líquido, abandonando el hidrociclón a través de un tubo central situado en la tapa superior del cuerpo cilíndrico. En la figura 2.4, se indica la geometría general de un hidrociclón y el comportamiento del flujo en su interior.

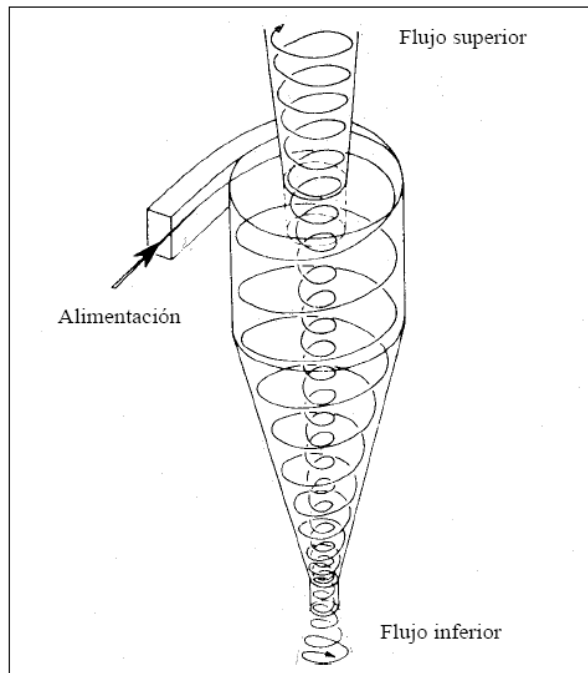


**Figura 2.4.** Geometría de un hidrociclón de fondo plano y el esquema De las corrientes internas<sup>5</sup>

Como se puede observar en la figura 2.5, debido al incremento de la velocidad tangencial en el torbellino secundario (flujo inferior), las altas fuerzas centrífugas generadas traen consigo una eficientísima separación secundaria. Las partículas finas rechazadas sedimentan radialmente y se unen al torbellino primario; la mayoría de estas partículas son evacuadas finalmente a través de la boquilla

<sup>5</sup> **HIDROCICLONES DE FONDO PLANO. JUAN LUIS BOUSO**, Director General de ERAL, Equipos y Procesos, S.A. [En línea]. [www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun\\_Prac\\_Hidrociclones.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun_Prac_Hidrociclones.pdf) - Pág. 5

formada por el vértice del cono. Por consiguiente, la separación dentro de un hidrociclón tiene lugar como resultado de estos dos procesos, y el punto de corte final será determinado principalmente por la aceleración centrífuga del torbellino secundario interior<sup>6</sup>.



*Diagrama de flujo en un hidrociclón.*

**Figura 2.5.-** Diagrama de flujo del hidrociclón convencional<sup>7</sup>

**2.5.1 Cono pronunciado, convencionales:** Este grupo recogería los hidrociclones con ángulo menor de  $20^\circ$ , caracterizados por un cuerpo relativamente largo debido a su conicidad. Este tipo de diseño se acompaña con partes cilíndricas de gran longitud (mayor que una vez el diámetro), y toberas de alimentación y rebose de pequeñas dimensiones, para aumentar el tiempo de residencia.

<sup>6</sup> TRAWINSKI, Helmut. Aplicaciones y funcionamiento práctico de los hidrociclones. Adaptación: Juan Luis Bouso Aragonés, Director General de ERAL, Equipos y Procesos, S.A. [En línea]. [www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun\\_Prac\\_Hidrociclones.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun_Prac_Hidrociclones.pdf) -

<sup>7</sup> **NUEVOS TIPOS DE HIDROCICLONES.** Adaptación: **JUAN LUIS BOUSO**, Director General de ERAL, Equipos y Procesos, S.A. [En línea]. [www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun\\_Prac\\_Hidrociclones.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun_Prac_Hidrociclones.pdf) -

Esto, debido a la gran altura libre de vórtice, (distancia entre el borde inferior de la tobera de rebose y el vértice de la parte cónica), y su influencia inversamente proporcional al tamaño de corte, los hace los más adecuados para clasificaciones finas, como se requiere en operaciones de clarificación y espesado.

En general, solamente los hidrociclones de pequeño y medio diámetro, hasta 25 cm. se construyen con conicidad pronunciada.

Suelen operar a presiones medias, entre 150 y 400 kPa, obteniendo tamaños de corte entre 2 micras y 30 micras.

Es este tipo el más difundido, especialmente en el tratamiento de minerales industriales donde a menudo se requieren clasificaciones más finas (Fig. 2.3).

**2.5.2 Hidrociclones Cilíndricos:** Podrían incluirse dentro de la clasificación anterior, como hidrociclones de fondo plano, pero debido a que exteriormente no se aprecia nada más que su cuerpo cilíndrico por su ángulo de 180°, es decir fondo perpendicular a la pared lateral, y también porque su campo de aplicación difiere notablemente de aquellos, merecen un tratamiento diferenciado.

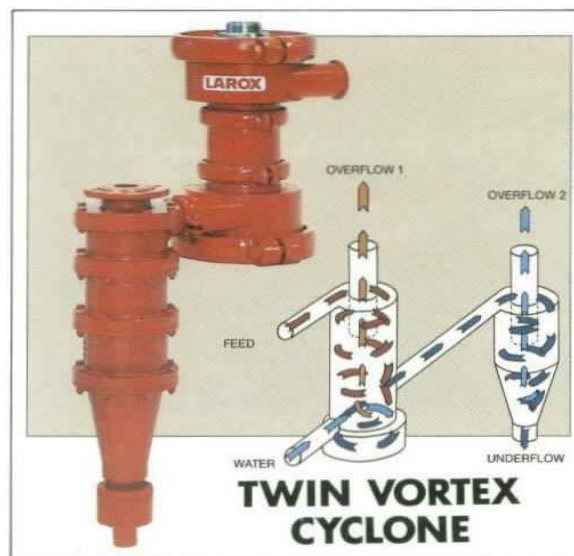
No suponen realmente una nueva teoría, pues ya a principios de siglo pueden encontrarse las primeras aplicaciones de este tipo de ciclones.

**a) Con descarga periférica:** Consisten, básicamente en un ciclón convencional del cual se ha eliminado su zona cónica, remplazándola por una parte cilíndrica de similar longitud. El fondo del ciclón es plano y la extracción del producto grueso se realiza tangencialmente por la zona baja de la pared cilíndrica.

Como quiera, este diseño provoca una descarga muy diluida, debido al cortocircuito, (partículas finas en suspensión en el líquido acompañando a la descarga), la eficiencia de separación se reduce.

Hace unos 30 años uno de los principales fabricantes de hidrociclones, KREBS, comercializó un tipo de hidrociclones, conocidos como EE<sup>8</sup> que, basándose en este diseño de descarga tangencial, conectó dos unidades. Una primera de gran diámetro y pared cilíndrica y una segunda convencional, cónica, de menor diámetro. Este diseño no tuvo mucha aceptación al menos a escala industrial, quizás debido a los elevados desgastes que podrían esperarse en la zona de transición debido a la alta concentración de sólidos.

En resumen, este nuevo diseño, llevado a la práctica por la firma LAROX bajo el nombre de Twin Vortex Cyclone presenta las ventajas de una doble etapa de clasificación, pero sin la necesidad de una bomba intermedia (Fig. 2.6).



**Figura 2.6 - Ciclón cilíndrico LAROX tipo TWIN vortex<sup>9</sup>.**

---

<sup>8</sup> KREBS, **NUEVOS TIPOS DE HIDROCICLONES**. Adaptación: JUAN LUIS BOUSO, Director General de ERAL, Equipos y Procesos, S.A. [En línea]. [www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun\\_Prac\\_Hidrociclones.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun_Prac_Hidrociclones.pdf) -

<sup>9</sup> KREBS, **NUEVOS TIPOS DE HIDROCICLONES**. Adaptación: JUAN LUIS BOUSO, Director General de ERAL, Equipos y Procesos, S.A. [En línea]. [www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun\\_Prac\\_Hidrociclones.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun_Prac_Hidrociclones.pdf) -

Este tipo de hidrociclones debería presentar ventajas operativas en procesos de tratamiento de minerales industriales, donde se opera normalmente a bajas concentraciones de sólidos.

**b) Cilíndricos con descarga central fondo plano<sup>10</sup>:** Difiere este diseño del anterior en que la descarga se realiza de modo convencional, es decir, a través de un orificio central (Fig. 2.7).



**Figura 2.7. - Ciclón cilíndrico AKW ( $\varnothing$  200 mm)  
Tipo fondo plano CBC<sup>11</sup>**

Con el fin de ampliar el campo de trabajo de los hidrociclones hacia tamaños de corte mayores, por encima de las 150 micras surgió, basándose en la cama de sólidos que se crea en los ciclones de cono obtuso, el desarrollo de los llamados ciclones de fondo plano, mejor llamados por su inventor el Prof. Dr. Helmut Trawinski de Amberger Kaolinwerke GmbH ciclones CBC (Circulating Bed Cyclone) o (Circulating Bed Classifier), ciclones de lecho circulante o clasificadores del lecho circulante.

---

<sup>10</sup> KREBS, **NUEVOS TIPOS DE HIDROCICLONES**. Adaptación: JUAN LUIS BOUSO, Director General de ERAL, Equipos y Procesos, S.A. [En línea]. [www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun\\_Prac\\_Hidrociclones.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun_Prac_Hidrociclones.pdf) -

<sup>11</sup> KREBS, **NUEVOS TIPOS DE HIDROCICLONES**. Adaptación: JUAN LUIS BOUSO, Director General de ERAL, Equipos y Procesos, S.A. [En línea]. [www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun\\_Prac\\_Hidrociclones.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun_Prac_Hidrociclones.pdf) -

Se explicaba anteriormente que el lecho "fluido" creado en la zona inferior de los ciclones de cono ancho, no es un lecho estacionario, sino que está dotado de un movimiento de convención alrededor del núcleo central, lo cual favorece la reclasificación de partículas, ligeras o de pequeño tamaño, mal clasificadas, que en su movimiento constante son en algún momento arrastradas por el torbellino interior o principal, siendo finalmente evacuadas con el rebose superior.

Este principio no puede ser aprovechado en un ciclón cónico, porque un aumento de la altura del lecho provocaría rápidamente la obstrucción de la boquilla de descarga, debido a la fricción de las partículas con la pared cónica (efecto silo), pero si puede ser desarrollado, alejando la pared del orificio de descarga, para lo cual se elimina la zona cónica, prolongando al mismo tiempo la zona cilíndrica y "cerrando" el ciclón con un fondo horizontal o casi, con un ángulo comprendido entre 160°-180°.

El lecho fluido creado en el fondo del ciclón actúa como un "colchón", amortiguando las variaciones en la alimentación, tanto en caudal como en concentración de sólidos. Este efecto es de sumo interés, especialmente en circuitos cerrados de molienda donde existen variaciones frecuentes de la concentración de sólidos en la alimentación, debido a los cambios de dureza del mineral y otras variables. Una disminución de la concentración de alimentación es seguida de una disminución de la concentración en la descarga, lo que provoca automáticamente una pérdida de partículas finas con el producto grueso (cortocircuito o by-pass).

Contrariamente a lo que podría pensarse la tendencia a la obstrucción de la descarga, por aumentos en el tonelaje de sólidos, es menor en ese tipo de ciclones que en los convencionales, resultando extraño, llegar a la obstrucción total, lo que es bastante usual en circuitos de molienda, con las terribles consecuencias que esto trae para los circuitos de flotación posteriores que reciben el producto del rebose de los ciclones.



La responsabilidad de esta "resistencia" al bloqueo se debe buscarla en los flujos de convección existentes en el lecho de sólidos que lo mantienen en rotación.

A continuación se muestra diez aplicaciones esenciales para Hidrociclones:<sup>12</sup>

**2.5.3 Espesado.** Esta denominación se refiere a la eliminación de la mayor cantidad de agua para producir un escurrido de los sólidos. El verdadero espesado apunta a la recuperación de todos los sólidos, resultando una clarificación del líquido, pero como en la práctica, y debido a que los agentes floculantes no pueden ser utilizados, en los Hidrociclones, como acelerante de la sedimentación, la recuperación de peso es limitada y el resultado es un flujo superior turbio, es decir, lo que tiene lugar en el ciclón es un deslamado. La construcción de diques de residuos con Hidrociclones es un ejemplo muy conocido de esta técnica.

**2.5.4 Deslamado.** En esta operación el objeto es eliminar las partículas finas junto con el flujo superior. Esto es a menudo necesario para mejorar el producto para procesos posteriores, tales como flotación, separación magnética en húmedo, filtración, etc. En plantas químicas, los ciclones en deslamado se usan frecuentemente para eliminar el agua después de un proceso de cristalización; los cristales finos, son evacuados con el flujo superior, siendo reciclados al cristalizador donde actúan como núcleos para la formación de un nuevo cristal.

**2.5.5 Refinado.** En el refinado, el flujo superior es el producto final y pequeñas cantidades de partículas superiores al tamaño deseado son evacuadas con el flujo inferior.

**2.5.6 Circuitos cerrados de molienda.** Los ciclones de deslamado y refinado se usan a menudo juntos con procesos de molienda a diferentes circuitos posibles,

---

<sup>12</sup> Idem [www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/Hidrociclones\\_Fondo\\_Plano.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/Hidrociclones_Fondo_Plano.pdf)

en los cuales, los Hidrociclones de clasificación y molinos en vía húmeda, pueden emplearse conjuntamente.

**2.5.6.1 Clasificación selectiva.** La separación de una alimentación heterogénea en sus componentes minerales puede basarse en las diferentes características de los minerales: por ejemplo: el peso específico (separación por medios densos, jigs, mesas, espirales); forma de partículas (mesas, espirales); tensión superficial (flotación); propiedades eléctricas y magnéticas (separadores); solubilidad (proceso de lixiviación); y otras. Algunas veces, tan sólo la diferencia en el tamaño del grano permite la separación por un simple proceso mecánico. En este caso se genera una distribución granulométrica llamada anti paralela. Un ejemplo es el caolín (china clay) es refinado basándose en esto. El producto más fino, a la izquierda, es el caolín, mientras que el de la derecha es cuarzo. La separación al tamaño indicado en el diagrama produce un enriquecimiento del caolín fino en el flujo superior del ciclón del cuarzo grueso en el inferior, esto se llama clasificación selectiva.

**2.5.7 Recuperación de sólidos.** Los equipos de lavado y escurrido, a menudo, generan efluentes turbios (flujos superiores o filtrados) que transportan con ellos fracciones finas, las cuales causan pérdidas de producto. La recuperación de estas fracciones finas de: tornillos lavadores de arenas, desenlodadores, escurridores, Cribas, escurridoras centrífugas, es una aplicación atractiva para los Hidrociclones.

**2.5.8 Fraccionamiento.** Otra aplicación interesante en el tratamiento por Hidrociclones, es la clasificación en dos fracciones para un tratamiento posterior en diferentes procesos. Un ejemplo típico, es el fraccionado de un concentrado de hierro para alimentación sinter (gruesos) y pellet (finos).

**2.5.9 Pre-concentración.** Si hay grandes diferencias en el peso específico de los componentes minerales, el producto bruto puede ser enriquecido en Hidrociclones. Esto es un proceso de concentración por gravedad, o quizás, mejor dicho, un proceso de concentración centrífuga. En estos Hidrociclones no se usan medios densos. Un ejemplo típico es la separación de componentes pesados, tales como sulfuros metálicos (pirita, blenda), óxidos metálicos, metales preciosos (plata, platino), etc., de gangas. Los ciclones para esta operación difieren de los tipos normales, ya que su fondo plano y su larga parte cilíndrica se han proyectado para aumentar la eficacia.

**2.5.10 Recuperación de líquido.** Si las aguas de procesos o soluciones madres deben reciclarse, con Hidrociclones puede obtenerse a menudo una clarificación satisfactoria. En las plantas de lavado de carbón, este es uno de los problemas más importantes, especialmente cuando los esperadores existentes están sobrecargados; en estos casos, los Hidrociclones se instalan frecuentemente en paralelo para mantener el nivel de turbiedad del agua de reciclado dentro de valores admisibles.

**2.5.11 Lavado contra-corriente.** La eliminación de ácidos adherentes, lejías o partículas finas de un producto en particular, es realizada por diluciones y espesados periódicos en etapas múltiples de ciclones. El lavado en contra-corriente puede alcanzar eficiencias altas, añadiendo agua solamente una vez, p. ej. en la última etapa de ciclonado. En comparación con los procesos en los que se añade agua limpia varias veces, el efecto total de lavado es un poco más reducido, por supuesto, pero en relación con la cantidad de agua limpia añadida, el sistema contra-corriente es mucho más efectivo.

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 ETAPAS DEL PROYECTO

**3.1.1 Revisión y análisis del Estado del Arte:** Durante esta etapa se consulta y asimila el estado del arte de los temas tratados y demás bibliografía que se considera necesaria durante la ejecución de la investigación para la posible culminación de esta investigación.

**3.1.2 Identificación y selección de los diferentes desarrollos matemáticos que se han planteado para la separación gravimétrica:** Se selecciona los desarrollos matemáticos existentes, que puedan ser usados en el diseño definitivo de los dispositivos que se analizaron en laboratorio; enfocados en determinar la velocidad crítica de depositación, las pérdidas de energía y el efecto del flujo secundario en la separación de plomo.

**3.1.3 Diseño definitivo de los montajes de laboratorio:** Tomando como base los esquemas de los montajes indicados en el presente Protocolo de Investigación, se diseñó los montajes definitivos, usando las recomendaciones encontradas en la literatura y se consideró necesario la construcción de un sistema convencional y uno de fondo plano para la determinación del diseño final del sistema.

#### **3.1.4 Preparación de la mezcla de plomo agua y sedimentos aluviales:**

- **Descripción de los sedimentos:** El material sólido a usar fueron sedimentos naturales para preparar las diferentes mezclas desde 0.062 mm (tamiz pasa 200) hasta tamaño de arena fina con diámetro de 0.35 mm, mezclados con agua limpia.

Los rangos propuestos son los que se indican en la Tabla 3.1, Los ensayos de suelos que se realizaron, son los de granulometría y peso específico o gravedad específica para los rangos de tamaños de sedimentos estipulados en el proyecto, cumpliendo con las normas establecidos según (INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: 1998) I.N.V. E – 222 y otras referencias correspondientes, ASTM C128, AASHTO T84 y NLT154.

Los diámetros a cuantificar del ensayo granulométrico son  $d_{84}$ ,  $d_{16}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{10}$  y  $d_{60}$ , para calcular la desviación estándar geométrica del sedimento donde su valor es mayor 1.3 el sedimento es no uniforme y el coeficiente de uniformidad,  $C_u$ , pues su valor numérico decrece cuando la uniformidad aumenta, los suelos con  $C_u < 3$  se consideran muy uniformes; aun las arenas naturales muy uniformes rara vez tienen un  $C_u > 2$ .

**Tabla 3.1** Clasificación de sedimentos naturales según su tamaño. Dada por Lane y reportada por (yang, 1996).<sup>13</sup>

DIAMETRO DE PARTICULA [mm]	CLASE DE PARTICULA	Nº de TAMIZ Estándar	RANGO DE TAMAÑOS PARA LOS ENSAYOS
1-0.5	Arena gruesa	35 – 18	X
0.5-0.25	Arena Media	60 – 35	X
0.25-0.125	Arena Fina	120 – 60	X
0.125-0.062	Arena Muy Fina	230 – 120	X

- **Descripción del plomo.** En la presente investigación se uso plomo como metal pesado, se seleccionó este metal porque tiene una densidad alta representativa de los metales pesados, no se oxida en contacto con el agua

<sup>13</sup> YANG, Ted Chih. "Sediment Transport: Theory and Practice". McGraw.Hill. Series in Water Resources and Enviromental Engineering. New York. 1996. Pg 1.18.

pudiéndose reutilizar y además por su bajo costo. Este mineral se pulverizará en tamaños de pocos micrones (30 micrones) hasta 1000 micrones.

“El plomo es un metal blando, maleable y dúctil. Si se calienta lentamente puede hacerse pasar a través de agujeros anulares o troqueles. Presenta una baja resistencia a la tracción y es un mal conductor de la electricidad. Al hacer un corte, su superficie presenta un lustre plateado brillante, que se vuelve rápidamente de color gris azulado y opaco, característico de este metal.

Tiene un punto de fusión de 328°C, y un punto de ebullición de 1.740°C. Su densidad relativa es de 11,34, y 207,20 su masa atómica. El plomo reacciona con el ácido nítrico, pero a temperatura ambiente apenas le afectan los ácidos sulfúrico y clorhídrico. En presencia de aire, reacciona lentamente con el agua formando hidróxido de plomo, que es ligeramente soluble. Los compuestos solubles de plomo son venenosos. Aunque normalmente el agua contiene sales que forman una capa en las tuberías que impide la formación de hidróxido de plomo soluble, no es aconsejable emplear plomo en las tuberías de agua potable. El plomo se presenta en la naturaleza en ocho formas isotópicas (Nombre que se da a cada átomo de un elemento químico que posee el mismo número atómico, es decir, el mismo número de electrones y protones, pero distinta masa atómica, es decir, distinto número de neutrones): cuatro de ellas son estables y las otras cuatro son radiactivas. Los isótopos estables plomo 206, plomo 207 y plomo 208 son, respectivamente, los productos finales de las series de descomposición radiactiva del uranio, actinio y torio. El plomo 204, también estable, no tiene precursores radiactivos naturales”<sup>14</sup>.

La concentración de plomo dentro de la mezcla será de 15 gramos por tonelada, valor promedio de concentraciones de oro en minas pequeñas. Por lo general se

---

<sup>14</sup> ARQHYS ARCHITECS SITE. [En línea]. <http://www.arqhys.com/arquitectura/plomo-propiedades.html>

recoge solamente 3 ó 4 gramos de oro por tonelada, en las explotaciones hace algunas décadas era mayor entre 15 y 35 gramos de oro por tonelada<sup>15</sup>.

**3.1.5 Construcción de los montajes de laboratorio:** Una vez se realiza los planos de construcción del dispositivo, se procede a su construcción. Este dispositivo se construye en material transparente con el objetivo de una observación más didáctica del funcionamiento del mismo. Se realiza en acrílico transparente de espesor 3 mm.

**3.1.6 Toma de las mediciones en laboratorio:** En laboratorio se tuvo en cuenta el siguiente procedimiento para medir las variables

- Abrir la válvula de entrada de agua limpia, para un determinado caudal, previamente calibrado.
- Abrir la válvula de entrada de caudal sólido, para un determinado caudal, previamente calibrado.
- Anotar las lecturas del medidor de caudal de agua limpia.
- Anotar la altura de presión en M.C.A en la entrada del dispositivo debido a que la alta desestabilización del flujo no permitió tomar lecturas del manómetro.
- Recuperar y pesar el metal pesado de la salida ápex y Vortex.
- Repetir los pasos del 1 al 7 para diferentes caudales líquidos, tomar los diferentes valores.

**3.1.7 Procesamiento de la información y análisis de resultados:** Con los datos obtenidos en laboratorio se calcularon los siguientes valores:

- Coeficiente de arrastre de las partículas afectadas por la mezcla, con la metodología dada por Cheng (1997a) y Cheng (1997b).
- Concentración volumétrica de partículas de materia sólido y metal.

---

<sup>15</sup> ENERGY & MINING. [En línea]. <http://www.dani2989.com/gold/prod707es.htm>

- Desviación estándar geométrica, esta relaciona los diámetros  $d_{84}$ ,  $d_{16}$  y  $d_{50}$ , como  $\sigma_g = d_{84}/d_{50} \approx d_{84}/d_{16} \approx d_{50}/d_{16}$ , siendo su valor mayor 1.3 el sedimento se consideró como **no uniforme**.
- Número de Deán, con la EC. [4.5], donde la velocidad para el hidrociclón corresponde a la velocidad tangencial de entrada.
- Una vez calculados todos los parámetros de la relación funcional adimensional, se encuentra una correlación entre la eficiencia y el resto de parámetros.



## 4 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EL HIDROCICLÓN

### 4.1 CORRELACIÓN MATEMÁTICA PARA CONCENTRACIÓN DE PLOMO

El rendimiento de plomo se establece como la concentración en peso de plomo contenido en la muestra total (CPbt) que efectivamente alimenta el hidrociclón y la concentración en peso de plomo contenido en la muestra recuperada en el “Apex” (CPb<sub>A</sub>). Como se indica en las siguientes ecuaciones:

$$CPbt = \frac{W_{Pb}}{W_T} \quad 16 \quad \text{EC. 4.1}$$

De la ecuación 4.1 se deducen las siguientes ecuaciones:

$$CPb_A = \frac{W_{PbA}}{W_{TA}} \quad \text{EC. 4.2}$$

$$CPb = \frac{CPbt}{CPb_A} \quad \text{EC. 4.3}$$

El CPb se correlaciona con los parámetros adimensionales, obtenidos por análisis dimensional usando el teorema de PI o de Buckingham, como se establece en la siguiente ecuación:

$$CPb = a_0 [De]^{a_1} [Eu]^{a_2} [N_R]^{a_3} [L_N]^{a_4} [Cv]^{a_5} [C'_D \text{ ó } d'_*]^{a_6} \quad 17 \quad \text{EC. 4.4}$$

Una vez obtenida la correlación de EC. [4.4], lo que interesa es calcular CPb<sub>A</sub>, para obtener la cantidad de metal pesado y la cantidad de sedimento, recuperada por el Apex.

Para la solución de las correlaciones matemáticas del sistema se debe solucionar las siguientes expresiones:

**4.1.1 Número de Dean (De):** es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos para el estudio de flujos en tuberías y canales

<sup>16</sup> <http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso>

<sup>17</sup> <http://www.oasificacion.com/archivos/Pidebuck.pdf>

Curvados. Su nombre es en honor al científico británico W. R. Deán que estudió estos flujos en los años 20 del siglo XX.

El número de Deán se define como:

$$De = \frac{VD_E}{\nu} \sqrt{\frac{D_E}{D_C}} \quad \text{EC. 4.5}$$

**4.1.2 Número de Euler.** También conocido como coeficiente de presión, tiene poca importancia con excepción de fenómenos donde la caída de presión produzca cavitación. Representa un cambio de presión relativa relacionado con la inercia del fluido.

$$Eu = \frac{2P}{\rho_m V_m^2} \quad \text{EC. 4.6}$$

**4.1.3 Número de restricciones.** Puede considerarse como la razón entre la suma de los cuadrados del diámetro del Vortex y ápex entre el cuadrado del diámetro de entrada.

$$N_R = \frac{D_v^2 + D_A^2}{D_E^2} \quad \text{EC. 4.7}$$

**4.1.4 Longitud normal:** es la razón entre la longitud del hidrociclón sobre el diámetro del mismo es inversamente proporcional al diámetro del hidrociclón.

$$LN = \frac{Lv}{D_C} \quad \text{EC. 4.8}$$

**4.1.5 Concentración volumétrica:** es el porcentaje que representa el caudal sólido sobre el caudal total en el sistema.

$$C_V = \frac{Q_s}{Q_s + Q_L} \quad \text{EC. 4.9}$$

Las variables manipulables son las siguientes:

$Q_L$	[m <sup>3</sup> /s]	Caudal del agua
$L_v$	[m]	Longitud del “vortex Finder” o del hidrociclón
$D_A$	[m]	Diámetro de la boquilla de salida inferior o del “Ápex”
$d_{50}$	[mm]	Diámetro por el cual pasa el 50 % en la granulometría de alimentación del hidrociclón
$Q_s$	[Kgf/s]	Caudal sólido incluido los sedimentos y el plomo.

Las cuales tomarán el valor de máximo (+) y mínimo (-), el cual afectará en el mismo sentido de cada factor o parámetro adimensional. Teniendo en cuenta que el Número de Euler y el número de Dean, poseen variables las cuales se ven afectadas por el caudal  $Q_L$ , como son  $V$  y  $H$ , lo que no permite, para el diseño factorial, tener un valor,  $De =$  máximo y un valor de  $Eu =$  mínimo, y que si se incrementa el caudal se incrementan estos dos factores o viceversa. Por lo tanto,  $Eu$  no se incluye en el diseño factorial, y se parte de que el número de  $Eu$ , sea una variable de respuesta y no un factor, ya que en este caso nos representa la pérdida de energía del flujo a través del hidrociclón. Por lo tanto, la ecuación [4.4], se simplifica un poco, y podría quedar como la siguiente:

$$RPb = ao[De]^{a1}[N_R]^{a2}[L_N]^{a3}[Cv]^{a4}[d_*']^{a5} \quad \text{EC. 4.10}$$

Las otras variables de respuesta que se van a estudiar son las siguientes:

#### 4.1.6 Correlación Matemática para La pérdida de energía, H.

$$Eu = ao[De]^{a1}[N_R]^{a2}[L_N]^{a3}[Cv]^{a4}[C_D']^{a5} \quad \text{EC. 4.11}$$

#### 4.1.7 Correlación Matemática para la remoción de arena.

La remoción de arena (fina), la cual se define como la relación másica de arena entre el “overflow” y la alimentación. Se da en la siguiente ecuación:

$$RA = ao[De]^{a1}[N_R]^{a2}[L_N]^{a3}[Cv]^{a4}[d_*']^{a5} \quad \text{EC. 4.12}$$

#### 4.1.8 Correlación matemática para la Partición de Agua, PA.

$$PA = a_0 [De]^{a_1} [N_R]^{a_2} [L_N]^{a_3} [Cv]^{a_4} [d_*]^{a_5} \quad \text{EC. 4.13}$$

La partición de agua, PA se define como la relación másica del agua entre el “underflow” y el “overflow”. La PA se evaluará realizando un balance de materia al contenido de agua en cada una de las corrientes en el hidrociclón, lo cual permite determinar el contenido de humedad de cada uno de los efluentes del hidrociclón.

## 4.2 DISEÑOS FACTORIAL

**4.2.1 Diseño factorial  $2^5$  con punto al centro con cuatro replicas.** El punto al centro son las posiciones indicadas con cero (0), las cuales tomarán el valor medio entre el máximo (+) y el mínimo (-).

**Tabla 4.1** Diseño factorial 2<sup>5</sup> con punto al centro

Corrida	1	2	3	4	5	Orden de Ejecución
	QL	Lv	DA	d <sub>50</sub>	Qs	
1	-	-	-	-	-	17
2	+	-	-	-	-	32
3	-	+	-	-	-	18
4	+	+	-	-	-	31
5	-	-	+	-	-	21
6	+	-	+	-	-	15
7	-	+	+	-	-	26
8	+	+	+	-	-	35
9	-	-	-	+	-	20
10	+	-	-	+	-	6
11	-	+	-	+	-	11
12	+	+	-	+	-	19
13	-	-	+	+	-	1
14	+	-	+	+	-	27
15	-	+	+	+	-	28
16	+	+	+	+	-	12
17	-	-	-	-	+	25
18	+	-	-	-	+	4
19	-	+	-	-	+	22
20	+	+	-	-	+	13
21	-	-	+	-	+	24
22	+	-	+	-	+	9
23	-	+	+	-	+	29
24	+	+	+	-	+	33
25	-	-	-	+	+	8
26	+	-	-	+	+	14
27	-	+	-	+	+	34
28	+	+	-	+	+	23
29	-	-	+	+	+	16
30	+	-	+	+	+	30
31	-	+	+	+	+	36
32	+	+	+	+	+	10
33	0	0	0	0	0	2
34	0	0	0	0	0	3
35	0	0	0	0	0	5
36	0	0	0	0	0	7

#### 4.3 VARIABLES A MEDIR EN CADA TRATAMIENTO EXPERIMENTAL:

<b>QL</b>	[m <sup>3</sup> /s]	Caudal de agua a la entrada del hidrociclón
<b>QLV</b>	[m <sup>3</sup> /s]	Caudal de agua por la salida superior del hidrociclón o por el "Vortex Finder"
<b>QLA</b>	[m <sup>3</sup> /s]	Caudal de agua por la salida inferior del hidrociclón o "Ápex"
<b>WT</b>	[kgf]	Peso total de los sólidos a la entrada del hidrociclón
<b>WTA</b>	[kgf]	Peso total de los sólidos por la salida superior del hidrociclón o por el "Vortex Finder"
<b>WTV</b>	[kgf]	Peso total de los sólidos por la salida inferior del hidrociclón o por el "Ápex"
<b>WPbE</b>	[gf]	Peso total de plomo a la entrada del hidrociclón
<b>WPbA</b>	[gf]	Peso total de plomo por la salida superior del hidrociclón o por el "Vortex Finder"
<b>WPbV</b>	[gf]	Peso total de plomo por la salida inferior del hidrociclón o por el "Ápex"
<b>H</b>	[m]	Perdida de energía debido al hidrociclón
<b>T</b>	°C	Temperatura

Para la entrada y cada salida de arena del hidrociclón se debe realizar las granulometrías, para determinar los siguientes valores

Propiedad	1	2	3
C <sub>u</sub>	3.171	1.430	4.347
CC	0.67	0.91	1.11
$\sigma_g=d_{84}/d_{50}$	2.32	1.42	1.48
$\sigma_g=d_{50}/d_{16}$	1.88	1.32	2.16
$\sigma_g=d_{84}/d_{16}$	4.38	1.87	3.20
G <sub>s</sub>	2.81	2.43	2.62
d <sub>50</sub> (mm)	0.120	0.351	0.201

#### 4.4 FLEXIBILIDAD DEL MODELO:

El modelo experimental debe tener las siguientes opciones:

1. Variar el caudal líquido entre un valor mínimo y un máximo

2. La longitud vertical del hidrociclón entre un valor mínimo y máximo
3. El diámetro de salida inferior de del hidrociclón o “Ápex”, entre un valor mínimo y máximo
4. Obtener dos granulometrías de arena y el plomo que proporcionen un  $d_{50}$  máximo y mínimo. Este  $d_{50}$  es diferente al  $d_{50}$  del hidrociclón. El primero es el diámetro por el cual pasa el 50 % en la granulometría de alimentación del hidrociclón.
5. Que el dosificador de sólidos proporcione un caudal de sólido mínimo y uno máximo.

Los valores se proponen en la siguiente tabla:

<b>Variable Manipulable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>	<b>Valor Medio</b>
$Q_L$	[m <sup>3</sup> /s]	0.00218	0.00125	0.00156
$L_v$	[cm]	30	15	15
$D_A$	[m]	0.0226	0.0176	0.0176
$d_{50}$	[mm]	0.351	0.120	0.201
$Q_s$	[Kgf/s]	0.0375	0.0187	0.0325

#### **4.5 MONTAJE PARA EL FACTORIAL COMPLETO $2^5$ CON PUNTO AL CENTRO.**

Teniendo en cuenta que en este arreglo se incluye un tratamiento con valores de las variables manipulables en un punto medio, es necesario garantizar que el montaje proporcione estos valores medios, como los indicados en la anterior tabla. Los más complicados de lograr son los de  $L_v$  y  $d_{50}$ , ya que habría que construir una sección media de longitud del hidrociclón y una tercera cantidad de sedimentos con un  $d_{50}$  intermedio.

## 5 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

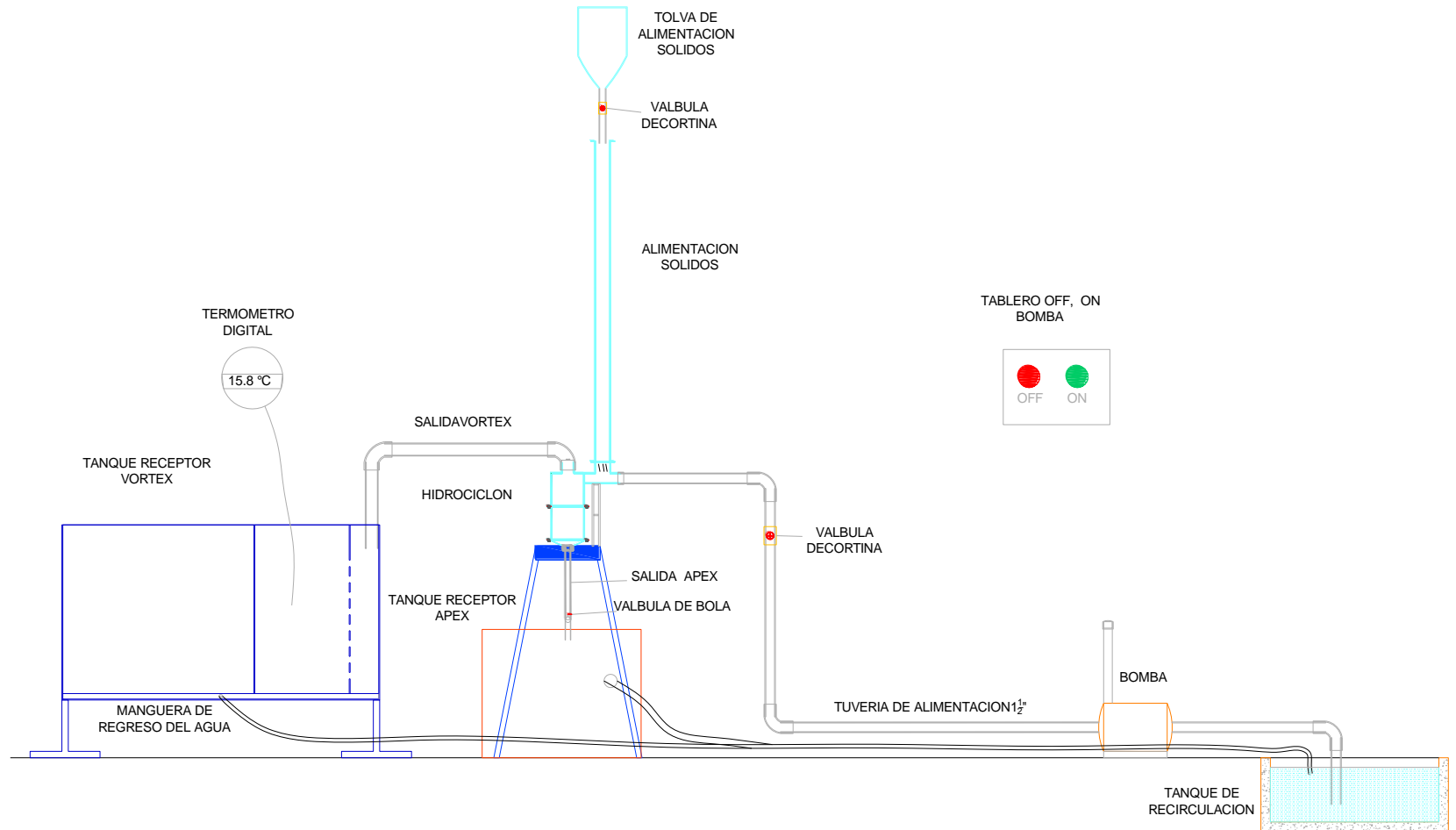


Figura 5.1 Montaje físico de laboratorio para el hidrociclón



El montaje de laboratorio se construye en base al “**montaje físico de laboratorio para el hidrociclón**” según planos mostrados en la Figura 5.1.

## **5.1 MATERIALES, HERRAMIENTA Y EQUIPO UTILIZADO.**

### **5.1.1 Materiales**

- Brochas
- Tornillos de diferente diámetro y longitud
- Metro
- Marcador
- Bisturí
- Cinta teflón
- Silicona
- Limpiador PVC
- Soldadura PVC

### **5.1.2 Herramienta**

- Llaves y brocas de distintos tamaños
- Destornillador de estrella y de pala.
- Segueta
- Cortafrío
- Bisturí
- Llave de tubo

### **5.1.3 Equipo**

- Cortadora
- Taladro
- Pulidora
- Estufa

## 5.2 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL HIDROCICLÓN

**5.2.1 Tanque del hidrociclón:** Los tanques del hidrociclón se construyeron en acrílico, espesor 3 mm con diámetros de 14.96 cm y altura de 15 cm, el acrílico se corto en forma rectangular como se indica en la figura 5.3, se verificó sus dimensiones y luego se las colocó a calentar en una estufa (ver figura 5.4) , para manipular con facilidad la forma circular de los tanques; (ver figura 5.2 y 5.5), de igual diámetro que los tanques para dar la forma circular; al enfriar el acrílico se procede a pegar con cloruro de metilo para que quede completamente fundido el tanque en acrílico como muestra la figura 5.6, y así se obtiene el equipo esperado final como indica la figura 5.7.



**Figura 5.2** molde en cartón paja



**Figura 5.3** corte del acrílico



**Figura 5.4** calentado acrílico en horno



**Figura 5.5** manipulado del acrílico



**Figura 5.6** pegado del acrílico con inyección



**Figura 5.7** hidrociclón final

**5.2.2 Construcción de base soporte:** La base tiene una altura de 80 cm y está elaborado con ángulos de 1" de ancho y espesor 3 mm, que están soldados entre sí para mejorar su capacidad de soporte.

Esta fue pintada de color azul con pintura de agua como se muestra en la figura 5.8.



**Imagen 5.8** Base soporte del hidrociclón

### 5.3 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL MONTAJE

**5.3.1 Tolva de alimentación de sólidos:** Tiene una altura de 15 cm y diámetro de 15 cm fabricado en acrílico de 3 mm de espesor y la parte inferior en forma de cono circular y la salida de los sólidos está pegado una unión PVC de 1½" indicado en la figura 5.9.



**Figura 5.9** Tolva de alimentación

**5.3.2 Tubo cuadrado para caída de sólidos:** Este tubo tiene una altura de 1 metro y una sección de 68 mm x 25 mm y espesor de 2 mm (ver figura 5.10).



**Imagen 5.10** tubos cuadrados

**5.3.3 Molde para elaboración de ángulos circulares:** Se tuvo la necesidad de realizar moldes (ver figura 5.11), para elaborar ángulos de forma circular diámetro de 15 cm para luego ser pegados en el hidrociclón circular para que sirvan de conexión entre tanques y formar diferentes alturas para el hidrociclón (ver figura 5.12), estos ángulos se les realizo ocho perforaciones para a cada uno para apretar entre ángulos con tornillos de 1”.

El sellado de los ángulos se lo realizo con empaques del mismo diámetro y con Silicona gris para evitar fugas de agua en esta forma de unión del hidrociclón.



Figura 5.11 corte de molde



Figura 5.12 Tapa del hidrociclón

#### **5.4 MATERIAL UTILIZADO**

Se utilizó para la concentración de plomo tres tipos de arena de diferentes granulometrías el cual se utilizo arena negra de las terrazas, arena gris del Pilcuan y arena de color café de mina de pasto.

Esta arena se tuvo que pasarlas por el tamiz número 40 para disminuir la cantidad de agregados gruesos y solamente trabajar con material fino, este trabajo de separación se lo realizo de forma manual como se muestra en las figuras 5.13 y figura 5.14, hasta conseguir el material final necesario para esta investigación.



**Imagen 5.13** Tamizado de agregados



**Imagen 5.14** arena negra final

## 5.5 PROCEDIMIENTO PARA PEGAR ACCESORIOS Y TUBERÍAS.

- Se mide la longitud necesaria de tubo y se traza la guía para cortar con segueta.
- Se eliminan las rebabas con una lima o bisturí.
- Se agrega el limpiador en un trapo y se limpia el extremo del tubo y la campana del accesorio.
- Como pegante se utiliza silicona si el tubo y el accesorio no van a trabajar a presión. Si soporta presión se adiciona soldadura con una brocha o cepillo de forma generosa.
- Se une el tubo y el accesorio dando un cuarto de vuelta para distribuir el pegante, hay que verificar que el tubo ingrese en su totalidad en el accesorio. Si se trabaja con soldadura el proceso debe realizarse en el menor tiempo posible debido a la reacción instantánea del pegante.

En la tabla 5.1 y 5.2, se indica los diferentes tipos de accesorios utilizados en la conexión final del montaje de laboratorio.

**Tabla 5.1** Resumen tubería y accesorios utilizados en conexión

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Buje 1 1/2" - 1"	Unidad	1
Buje 1 1/2" - 3/4"	Unidad	1
Buje 1 1/2" - 1/2"	Unidad	1
Codo PVC 2"	Unidad	1
Unión PVC 1 1/2"	Unidad	2
Empaques □ 15 cm	Unidad	2
Empaque 3 x 7 cm	Unidad	2
Codo PVC 1/2"	Unidad	1
Codo PVC 1"	Unidad	1
Macho PVC 3/4"	Unidad	4
Cinta Teflón	Unidad	10
Tuvo PVC 2"	m	3
Llave de cortina 2"	Unidad	1
Adaptador macro CPVC 1/2"	Unidad	2
Codo CPVC 1/2"	Unidad	1
Unión PVC 2"	Unidad	1
Tee PVC 2"	Unidad	1
Llave de bola 1/2"	Unidad	1
Buje 2 1/2" - 2"	Unidad	1
Buje de 2 1/2" - 1 1/2"	Unidad	2
Tuvo acrílico	m	1
Codo PVC 1 1/2"	Unidad	3

**Tabla 5.2** Resumen tubería y accesorios utilizados en salidas

Descripción	Unidad	Cantidad
<b>ALIMENTACION LV +</b>		
Codo PVC 1 1/2"	Unidad	2
Tee PVC 1 1/2"	Unidad	1
Unión PVC 1 1/2"	Unidad	1
Tubería PVC 2"	Unidad	1,5
<b>ALIMENTACION LV -</b>		
Codo PVC 1 1/2"	Unidad	3
Tee PVC 1 1/2"	Unidad	1
Unión PVC 1 1/2"	Unidad	1
Tubería PVC 1 1/2"	Unidad	1,7
<b>VORTEX</b>		
Codo PVC 2"	Unidad	2
Tee PVC 2"	Unidad	1
Tubería PVC 2"	ml	1
<b>Ápex</b>		
Codo PVC 3/4"	Unidad	2
Machos PVC 3/4"	Unidad	2
Válvula de bola 3/4"	Unidad	1
Reducción PVC 1 1/2" a 3/4"	Unidad	1
Tubería PVC 3/4"	ml	0,95
Codo PVC 1/2"	Unidad	2
Machos PVC 1/2"	Unidad	2
Válvula de bola 1/2"	Unidad	1
Reducción PVC 1 1/2" a 1/2"	Unidad	1
Tubería PVC 1/2"	ml	1,25



## 5.6 TANQUE DE ALMACENAMIENTO VORTEX

Como se muestra en la figura 5.15, este tanque consta de tres separaciones cada 30 cm la primera es donde descarga el agua a presión salida de Vortex, la segunda pasa el agua por una pantalla perforada con orificios de 1" de diámetro y separación de 3.5 cm que sirven para disminuir turbulencia del agua y la tercera por medio de una pantalla con salida en forma de vertedero triangular aforado para la toma de alturas y medición de caudales por medio de la siguiente ecuación:

$$Q = 0.00785 H^{2.5} \text{ [Its / seg.]}$$

EC. 5.1



**Figura 5.15** Tanque receptor Vortex

## 5.7 TANQUE DE ALMACENAMIENTO APEX

Como se puede observar en la figura 8.16 consta de una caneca de 50 litros cortada una parte lateral y salida por la entrada por medio de tubería de 2" como se muestra en la figura 5.16.



**Figura 5.16** Tanque receptor ápex

## **5.8 FILTROS**

Los filtros fueron construidos por seda china de color blancos que se sostenían de un marco de 40 x 50 cm construido en varengas de 2 x 4 cm de sección, indicados en la figura 5.17.



**Figura 5. 17** filtros

## **5.9 MOTOBOMBA.**

Es necesario precisar que este equipo es autocebante y tiene una potencia de 3 Hp o 2.2 Kw y su capacidad de bombeo es de 3 lps. Toma el agua de un tanque de laboratorio o desde el desarenador y la sube al tanque para almacenamiento de cabeza constante o tanque interno o la envía directamente hacia el canal. Esta motobomba trabaja a 3430 rpm, con un voltaje de 220 / 440 voltios, su conexión es trifásica y su eficiencia es del 84%.

## 6 RESULTADOS ENSAYOS REALIZADOS

### 6.1 AFORADO DEL HIDROCICLÓN

Para realizar el aforo del hidrociclón se tomo lecturas a la lamina de agua que pasaba por el vertedero triangular del tanque receptor de Vortex y se calculaba el caudal por medio de la formula 5.1.



**Figura 6.1** aforo del hidrociclón

La Figura 6.1, se indica como esta en funcionamiento el hidrociclón, el agua gira en forma circular como licuadora h forma un remolino desde la parte superior hasta la inferior.

#### 6.1.1 pasos para empezar un ensayo de arranque para el hidrociclón.

- Abrir la válvula de entrada en el hidrociclón una vuelta
- Encender la motobomba

- Abrir la válvula de entrada del hidrociclón hasta obtener el caudal ideal.
- Colocar la muestra de los sólidos en la tolva de alimentación.
- Colocar el termómetro dentro del tanque de agua (Vortex o ápex)
- Abrir la válvula de la tolva de alimentación a su caudal ideal para el ensayo.
- Lavar los tanques recolectores de agua Vortex y ápex y recoger el material final de cada salida
- Llevar las muestras al horno por 24 horas para su respectivo secado.
- Pesar cada material seco
- Realizar las granulometrías respectivas.

## **6.2 ENSAYOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA.**

Se realiza el ensayo de peso específico o gravedad específica para los rangos de tamaños de sedimentos estipulados en el proyecto, estos se indican en la Tabla 6.1 a Tabla 6.3.

Se hace el ensayo de peso específico de agregados finos según (INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: 1998) I.N.V. E – 222 y otras referencias correspondientes:

- ✓ ASTM C 128
- ✓ AASHTO T 84
- ✓ NLT 154

### **6.2.1 Equipo**

- Picnómetros o balones volumétricos de 500 ml
- Molde de cono (tronco de cono recto)
- Varilla metálica para apisonar
- Balanza de precisión de 0.1 gr
- Bomba de vacío
- Termómetro

- Pipeta
- Horno
- Bandejas
- Recipientes de secado

### 6.2.2 Procedimiento

- Se toma una muestra de 1000 gr. Del material y se pone a saturar por 24 horas como indica la figura 6.2, en el caso tres muestras de material.



**Figura 6.2** Muestra saturada

- El material saturado se extiende sobre una bandeja y se pone a secar hasta que este SSS\*, esto se verifica realizando la prueba del cono la cual consiste en llenar el material en el cono en varias capas dándole 25 golpes, se dice que el material es SSS cuando el material conserva la altura del cono y solo sus paredes se desmoronan, proceso mostrado en la Figura 6.3 y 6.4.

---

\* SSS = Saturado con superficie seca



**Figura 6.3** muestra secada al ambiente



**Figura 6.4** Muestra SSS

- Se registra el peso de tres balones volumétricos vacíos y se marcan para su posterior identificación.
- Se pesan tres muestras de 250 gr. De material y son adicionadas a los balones volumétricos respectivamente.



**Figura 6.5** Llenado al balón aforador

En la Figura 6.5 se indica el proceso de vaciado desde un recipiente hasta el balón volumétrico sin haya perdidas de material.

- Se adiciona agua desairada hasta tres cuartos de la marca de 250 ml indicada en los picnómetros ver figura 6.6, en la cual se indica cómo se adiciona agua en los balones volumétricos.



**Figura 6.6** Llenado agua hasta la línea de aforo

- Los vasos aforados se ponen en baño maría aproximadamente 7 horas dependiendo del tipo de material para facilitar la salida de vacíos proceso indicado en Figura 6.7.



**Figura 6.7** Muestras al baño María

- Se conecta la bomba de vacío a los picnómetros durante 15 minutos o más tiempo hasta que se haya retirado la totalidad de vacíos ver Figura 6.8.





**Figura 6.8** Extracción de vacíos

- Después de este proceso se completa con agua desairada hasta llegar a las marcas de los balones las cuales indican 250 ml ver Figura 6.9.



**Figura 6.9** Completado de agua hasta la línea de aforo

- Se registra el peso del picnómetro con la muestra de suelo y agua, también se lee la temperatura.
- Se retira el contenido de los picnómetros en los recipientes de secado pesados con anterioridad y se llevan al horno.
- Después de 24 horas se retiran los recipientes del horno y se registra su peso.

- Se determina el peso de los balones volumétricos llenos con agua desairada hasta la marca de 250 ml. El agua debe estar a 20° centígrados.

**6.2.3 Cálculos y Resultados:** La gravedad específica  $G_s$  se calcula por la siguiente ecuación:

$$G_s = \frac{W_{sol}}{W_w} = \frac{W_{sol}}{W_{fw} + W_{sol} - W_{fws}} \quad ^{18} \quad [EC 6.1]$$

La gravedad específica obtenida para los materiales que se utilizan para efectuar los ensayos de laboratorio se muestran en las tablas 6.1 A 6.3.

**Tabla 6.1** Gravedad específica y absorción de agregados finos INV E – 22  
Muestra 1

Obra: **Trabajo de grado** Muestra N°: **1**  
Descripción: **Arena Negra** Fuente: **Mina las Terrazas**  
Fecha: **27/05/2009**

Ensayo N°		Unidad	1	2	Promedio
Temperatura de ensayo		°C	25	25	
Peso muestra sss	Wsss	gr.	250	250	
Peso matraz + agua	Wfw	gr.	655,8	655,8	
Peso matraz + agua + muestra	Wfws	gr.	806,7	806,7	
Peso muestra seca	Wsol	gr.	243,6	244	
densidad nominal: $W_{sol}/(W_{sol}+W_{fw}-W_{fws})$		gr./cm <sup>3</sup>	2,63	2,62	<b>2,62</b>
Densidad aparente: $W_{sol}/(W_{sss}+W_{fw}-W_{fws})$		gr./cm <sup>3</sup>	2,46	2,46	2,46
Densidad aparente sss: $W_{sss}/(W_{sss}+W_{fw}-W_{fws})$		gr./cm <sup>3</sup>	2,52	2,52	2,52
Absorción: $(W_{sss}-W_s)/W_s \times 100$		gr./cm <sup>3</sup>	2,63%	2,46%	2,54%
Peso muestra seca + recipiente		gr.	391	391	391
Peso recipiente		gr.	147,4	147	147
Peso muestra seca		gr.	<b>243,6</b>	<b>244</b>	244

<sup>18</sup> <http://www.unalmed.edu.co/~geotecni/GG-07.pdf>

**Tabla 6.2** Gravedad específica y absorción de agregados finos INV E – 22 muestra 2

Obra: **Trabajo de grado** Muestra N° : **2**  
 Descripción: **Arena Gris** Fuente: **Río Guaitara**  
 Fecha: **27/05/2009**

Ensayo N°		Unidad	1	2	Promedio
Temperatura de ensayo		°C	25	25	
Peso muestra sss	Wsss	gr.	250	250	
Peso matraz + agua	Wfw	gr.	656,5	660,5	
Peso matraz + agua + muestra	Wfws	gr.	816,02	819,9	
Peso muestra seca	Wsol	gr.	247,8	247,8	
densidad nominal: Wsol/(Wsol+Wfw-Wfws)		gr./cm <sup>3</sup>	2,807	2,803	<b>2,81</b>
Densidad aparente: Wsol/(Wsss+Wfw-Wfws)		gr./cm <sup>3</sup>	2,74	2,74	<b>2,74</b>
Densidad aparente sss: $W_{sss} / (W_{sss} + W_{fw} - W_{fws})$		gr./cm <sup>3</sup>	2,76	2,76	<b>2,76</b>
Absorción: $(W_{sss} - W_s) / W_s \times 100$		gr./cm <sup>3</sup>	0,89%	0,89%	<b>0,89%</b>
Peso muestra seca + recipiente		gr.	385	310	348
Peso recipiente		gr.	137,2	62,2	100
Peso muestra seca		gr.	<b>248</b>	<b>248</b>	248

**Tabla 6.3** Gravedad específica y absorción de agregados finos INV E – 22 muestra 3

Obra: **Trabajo de grado** Muestra N° : **3**  
 Descripción: **Arena Café** Fuente: **Mina común**  
 Fecha: **27/05/2009**

Ensayo N°		Unidad	1	2	Promedio
Temperatura de ensayo		°C	25	25	
Peso muestra sss	Wsss	gr.	250	250	
Peso matraz + agua	Wfw	gr.	675,5	669,7	
Peso matraz + agua + muestra	Wfws	gr.	821,3	815,7	
Peso muestra seca	Wsol	gr.	247,9	248,4	
densidad nominal: $W_{sol}/(W_{sol}+W_{fw}-W_{fws})$		gr./cm <sup>3</sup>	2,43	2,43	<b>2,43</b>
Densidad aparente: $W_{sol}/(W_{sss}+W_{fw}-W_{fws})$		gr./cm <sup>3</sup>	2,38	2,39	2,38
Densidad aparente: $W_{sss}/(W_{sss}+W_{fw}-W_{fws})$		gr./cm <sup>3</sup>	2,40	2,40	2,40
Absorción: $(W_{sss}-W_s)/W_s \times 100$		gr./cm <sup>3</sup>	0,85%	0,64%	0,75%
Peso muestra seca + recipiente		gr.	326	329	328
Peso recipiente		gr.	78,1	80,6	79
Peso muestra seca		gr.	<b>247,9</b>	<b>248,4</b>	248

### 6.3 ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA MUESTRA INICIAL.

Se realiza el ensayo de granulometría para los rangos de tamaños de sedimentos estipulados en el proyecto, estos se indican en la tabla 6.4.

Se hace el ensayo de granulometría para agregados según (INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: 1998) I.N.V. E – 213 y otras referencias correspondientes:

- ASTM C-136
- AASHTO T-27
- NLT - 150
- Norma Icontec 77

#### 6.3.1 Equipo utilizado

- Balanza, con sensibilidad de por lo menos 0.1% ver Figura 6.10.



**Figura 6.10** Balanza granera

- Tamices estándares seleccionados de acuerdo con las especificaciones del material que va a ser ensayado ver Figura 6.11, los tamices utilizados fueron los número 40, 50, 60, 70, 80, 100, 120, 140, 170, 200.



**Figura 6.11** Serie de tamices

- Tamizador mecánico de agitación y vibración que soporta un juego de tamices junto con un fondo y una tapa, vibra durante un tiempo estipulado se acciona con un motor eléctrico, indicado en la Figura 6.12.



**Figura 8.12** Tamizador mecánico

- Bandejas
- Recipientes

**6.3.2 Procedimiento:** Se selecciona un grupo de tamices de tamaños adecuados para cumplir con las especificaciones de los materiales a ensayar. Se coloca los tamices en orden decreciente, por tamaño de abertura (No. 30, No. 40, No. 50, No. 60, No. 70, No. 80 No. 100, No. 120, No 140, No 170, No 200, fondo) se realiza el tamizado a mano o por medio de un tamizador mecánico, durante un tiempo adecuado.

Se determina el peso del material retenido en cada tamiz en la balanza teniendo cuidado de no disipar el material al llevarlo del tamiz al recipiente. El peso total del material después del tamizado, debe ser comparado con el peso original de la muestra que se ensayó. Si la cantidad difiere en más del 0.3% basado en el peso de la muestra original seca, el resultado no debe ser aceptado.

**Tabla 6.4 Granulometría muestra arena gris**

1	2	3	4	5	6	7	8
Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80	80	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	83,3	80,00	3,30	0,66%	0,66%	99,34%
50	0,297	127,9	80,00	47,90	9,58%	10,24%	89,76%
60	0,25	150,1	80,00	70,10	14,02%	24,26%	75,74%
70	0,21	108,5	80,00	28,50	5,70%	29,96%	70,04%
80	0,177	90,5	80,00	10,50	2,10%	32,06%	67,94%
100	0,149	126,6	80,00	46,60	9,32%	41,38%	58,62%
120	0,125	115,1	80,00	35,10	7,02%	48,40%	51,60%
140	0,105	131,4	80,00	51,40	10,28%	58,68%	41,32%
170	0,088	111,1	80,00	31,10	6,22%	64,90%	35,10%
200	0,074	134,5	80,00	54,50	10,90%	75,80%	24,20%
pasa 200	0,062	201	80,00	121,00	24,20%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,00%		

#### 6.4 CÁLCULOS REALIZADOS EN GRANULOMETRÍA

- Columna 1 Número de tamiz
- Columna 2 Abertura de tamiz en milímetros.
- Columna 3 Peso material más recipiente

- Columna 4 Peso recipiente.  
 Columna 5 Peso material.  
 Columna 6 Porcentaje retenido  
 Columna 7 Porcentaje retenido acumulado  
 Columna 8 Porcentaje que pasa.

**Tabla 6.5** Granulometría muestra arena café

1	2	3	4	5	6	7	8
Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80	80	0,00	0,00%	0,00%	100%
40	0,42	225	80,00	145,00	29,00%	29,00%	71,00%
50	0,297	266	80,00	186,00	37,20%	66,20%	33,80%
60	0,25	211	80,00	131,00	26,20%	92,40%	7,60%
70	0,21	85	80,00	5,00	1,00%	93,40%	6,60%
80	0,177	86	80	6,00	1,20%	94,60%	5,40%
100	0,149	82	80	2,00	0,40%	95,00%	5,00%
120	0,125	84	80	4,00	0,80%	95,80%	4,20%
140	0,105	82	80	2,00	0,40%	96,20%	3,80%
170	0,088	84	80	4,00	0,80%	97,00%	3,00%
200	0,074	85	80	5,00	1,00%	98,00%	2,00%
pasa 200	0,062	90	80	10,00	2,00%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100%		

**Tabla 6.6** Granulometría muestra arena negra

1	2	3	4	5	6	7	8
Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80	80	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	81,6	80,00	1,60	0,32%	0,32%	99,68%
50	0,297	159,2	80,00	79,20	15,84%	16,16%	83,84%
60	0,25	219,5	80,00	139,50	27,91%	44,07%	55,93%
70	0,21	106,5	80,00	26,50	5,30%	49,37%	50,63%
80	0,177	91,6	80,00	11,60	2,32%	51,69%	48,31%
100	0,149	138,4	80,00	58,40	11,68%	63,37%	36,63%
120	0,125	121,6	80,00	41,60	8,32%	71,69%	28,31%
140	0,105	131	80,00	51,00	10,20%	81,90%	18,10%
170	0,088	95	80,00	15,00	3,00%	84,90%	15,10%
200	0,074	99	80,00	19,00	3,80%	88,70%	11,30%
pasa 200	0,062	136,5	80,00	56,50	11,30%	100,00%	0,00%
suma total				499,90	100,00%		



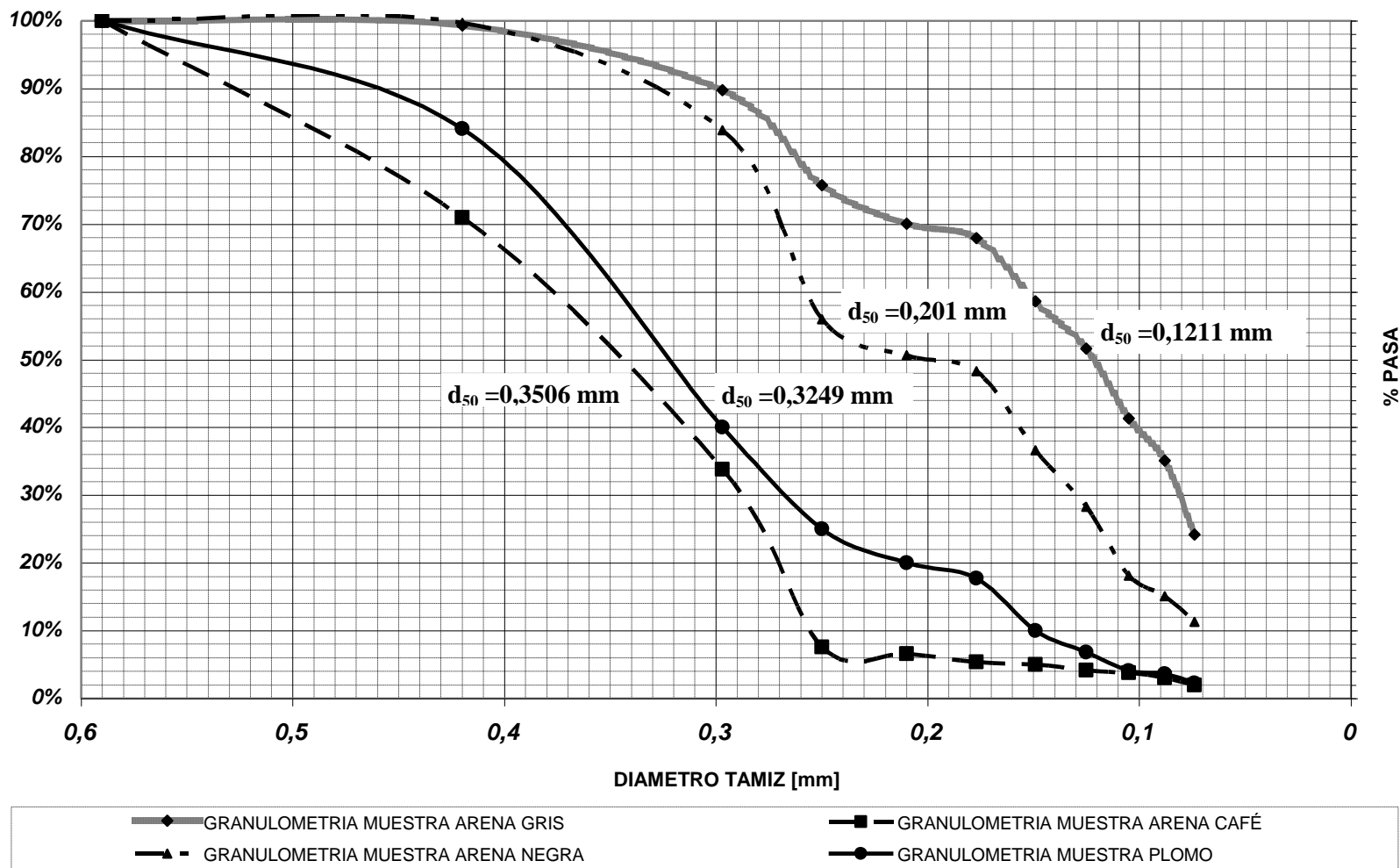
**Tabla 6.7 Granulometría muestra plomo**

1	2	3	4	5	6	7	8
Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	34,5	34,5	0,00	0	0,00%	100%
40	0,42	52	34,50	17,50	0,16	15,91%	84,09%
50	0,297	83	34,50	48,50	0,44	60,00%	40,00%
60	0,25	51	34,50	16,50	0,15	75,00%	25,00%
70	0,21	40	34,50	5,50	0,05	80,00%	20,00%
80	0,177	37	34,50	2,50	0,02	82,27%	17,73%
100	0,149	43	34,50	8,50	0,08	90,00%	10,00%
120	0,125	38	34,50	3,50	0,03	93,18%	6,82%
140	0,105	37,5	34,50	3,00	0,03	95,91%	4,09%
170	0,088	35	34,50	0,50	0,00	96,36%	3,64%
200	0,074	36	34,50	1,50	0,01	97,73%	2,27%
pasa 200	0,062	37	34,50	2,50	0,02	100,00%	0,00%
suma total				110	100%		

En la Gráfica 6.1, se muestran las diferentes curvas granulométricas de los agregados utilizados como son arena fina (arena gris), arena gruesa (arena café), arena granulometría media (arena negra) y muestra de plomo.

Las curvas realizadas son de la recopilación de datos de las tablas 6.4 a 6.7, en donde se indican los datos obtenidos de las muestras iniciales de los agregados.

### GRANULOMETRIA MUESTRAS AGREGADOS



**Grafica 6.1** Curvas granulométricas diferentes muestras

**Tabla 6.8** Cantidad de sólidos arena Gris (teórico)

QL	Gs	Tiempo ensayo	Porosidad	C	Qs	Qs	Qs	Volumen Ensayo	Dimensiones cubo	QS	Peso neto	C PB	Pb
					NETO	NETO	Total			NETO			neto
[L/s]	[-]	[min.]	[%]	[%]	[L/s]	[cm <sup>3</sup> /s]	[cm <sup>3</sup> /s]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm]	[Kgf/s]	[gr]	[gr/T]	[gr]
1,25	2,81	3	65	4,04	0,053	53	81	14573	24,4	0,0187	3371	200	0,67
2,18	2,81	3	65	4,61	0,105	105	162	29149	30,8	0,0375	6743	202	1,36

**Tabla 6.9** Cantidad de sólidos arena Café (teórico)

QL	Gs	Tiempo ensayo	Porosidad	C	Qs	Qs	Qs	Volumen Ensayo	Dimensiones cubo	QS	Peso neto	C PB	Pb
					NETO	NETO	Total			NETO			neto
[L/s]	[-]	[min]	[%]	[%]	[L/s]	[cm <sup>3</sup> /s]	[cm <sup>3</sup> /s]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm]	[Kgf/s]	[gr]	[gr/ton]	[gr]
1,25	2,43	3	65	3,76	0,049	49	75	13516	23,8	0,020	3616	15	0,05
2,18	2,43	3	65	4,29	0,098	98	150	27037	30,0	0,040	7232	15	0,11

**Tabla 6.10** Cantidad de sólidos arena Negra (teórico)

QL	Gs	Tiempo ensayo	Porosidad	C	Qs	Qs	Qs	Volumen Ensayo	Dimensiones cubo	QS	Peso neto	C PB	Pb
					NETO	NETO	Total			NETO			neto
[L/s]	[-]	[min]	[%]	[%]	[L/s]	[cm <sup>3</sup> /s]	[cm <sup>3</sup> /s]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm]	[Kgf/s]	[gr]	[gr/ton]	[gr]
1,56	2,62	3	65	5,2	0,085	85	131	23571	28,7	0,0325	5848	200	1,17

Cálculos realizados para determinar la cantidad de plomo en las tablas 6.8 a 6.10.

C1		Caudal en litros por segundo
C2		Gravedad específica
C3		Tiempo duración de ensayo en minutos
C4		Porosidad de la muestra en porcentaje
C5		Concentración de plomo en porcentaje
C6	$\frac{Q_L * C}{1 - C}$	Caudal de sólidos neto en litros por segundo
C7	$Q_{S[L/s]} * 1000$	Caudal de sólidos neto en centímetro cúbico por seg.
C8	$Q_{S[cm^3/s]} / P\%$	Caudal de sólidos Total
C9	$Q_S * t * 60$	Volumen total de la muestra
C10	$Vol.^{(1/3)}$	Dimensiones del cubo para Los sólidos
C11	$\frac{W_S * 10^{-3}}{t * 60}$	Caudal de sólidos neto en kilogramo por seg.
C12	$\frac{Vol * P\%}{G_S}$	Peso neto en gramos
C13		Concentración de plomo por tonelada
C14		$W_S * CPB * 10^{-6}$ Peso de plomo por muestra de sólidos en gr.

## 6.5 ENSAYOS EN EL HIDROCICLON

En cada ensayo realizado se tomó la información necesaria con el fin de mostrar los resultados obtenidos de la investigación realizada.

Cada ensayo tuvo diferentes variables y diferentes resultados; a cada ensayo se le tomó la granulometría respectiva de las muestras obtenidas de las dos salidas del hidrociclón que son el ápex y vortex, demostrando así las diferencia de separación por medio del hidrociclón indicando su funcionamiento en la Figura 6.13.

Para recoger las muestras de arena de cada salida fue necesario de colocar filtros a la salida del ápex para que recogiera toda la muestra de mayor dimensión y para recoger la muestra en la salida de Vortex, se la recogió por medio de una manguera sifóneando los granos más finos que se sedimentaban en al tanque receptor de Vortex y se la mando a un filtro para que recibiera la cantidad de arena que se acumuló en el tanque de salida de Vortex (ver Figura 6.14).



**Figura 6.13** hidrociclón en funcionamiento



**Figura 6.14** muestra obtenida de ápex

**Tabla 6.11** Diseño factorial realizado

Corrida	1	2	3	4	5	Orden de Ejecución	descripción Sólido
	QL	Lv	DA	d <sub>50</sub>	Qs		
1	-	-	-	-	-	17	Arena gris
2	+	-	-	-	-	32	Arena gris
3	-	+	-	-	-	18	Arena gris
4	+	+	-	-	-	31	Arena gris
5	-	-	+	-	-	21	Arena gris
6	+	-	+	-	-	15	Arena gris
7	-	+	+	-	-	26	Arena gris
8	+	+	+	-	-	35	Arena gris
9	-	-	-	+	-	20	Arena Café
10	+	-	-	+	-	6	Arena Café
11	-	+	-	+	-	11	Arena Café
12	+	+	-	+	-	19	Arena Café
13	-	-	+	+	-	1	Arena Café
14	+	-	+	+	-	27	Arena Café
15	-	+	+	+	-	28	Arena Café
16	+	+	+	+	-	12	Arena Café
17	-	-	-	-	+	25	Arena gris
18	+	-	-	-	+	4	Arena gris
19	-	+	-	-	+	22	Arena gris
20	+	+	-	-	+	13	Arena gris
21	-	-	+	-	+	24	Arena gris
22	+	-	+	-	+	9	Arena gris
23	-	+	+	-	+	29	Arena gris
24	+	+	+	-	+	33	Arena gris
25	-	-	-	+	+	8	Arena Café
26	+	-	-	+	+	14	Arena Café
27	-	+	-	+	+	34	Arena Café
28	+	+	-	+	+	23	Arena Café
29	-	-	+	+	+	16	Arena Café
30	+	-	+	+	+	30	Arena Café
31	-	+	+	+	+	36	Arena Café
32	+	+	+	+	+	10	Arena Café
33	m	m	m	m	m	2	Arena Negra
34	m	m	m	m	m	3	Arena Negra
35	m	m	m	m	m	5	Arena Negra
36	m	m	m	m	m	7	Arena Negra

En la tabla 6.11, se indica el proceso en el cual se llevara el orden de ejecución de los ensayos realizados en el hidrociclón.

Columna 1 se indica el caudal que se tendrá en cuenta para la ejecución de cada corrida.

Columna 2 Longitud de hidrociclón máximo, mínimo y medio.

Columna 3 Diámetro de ápex mínimo, máximo y medio.

Columna 4 tamaño o  $d_{50}$  de los agregados utilizados.

Columna 5 Caudal de los sólidos utilizados respectivamente.

**Tabla 6.12** Tabla variables manipulables

# Corrida	1 QL [m <sup>3</sup> /s]	2 LV [cm]	3 D <sub>A</sub> [m]	4 d <sub>50</sub> [mm]	5 Q <sub>S</sub> [Kg./s]
1	0,00125	15	0,018	0,120	0,02
2	0,002184	15	0,018	0,120	0,02
3	0,00125	30	0,018	0,120	0,02
4	0,002184	30	0,018	0,120	0,02
5	0,00125	15	0,023	0,120	0,02
6	0,002184	15	0,023	0,120	0,02
7	0,00125	30	0,023	0,120	0,02
8	0,002184	30	0,023	0,120	0,02
9	0,00125	15	0,018	0,351	0,02
10	0,002184	15	0,018	0,351	0,02
11	0,00125	30	0,018	0,351	0,02
12	0,002184	30	0,018	0,351	0,02
13	0,00125	15	0,023	0,351	0,02
14	0,002184	15	0,023	0,351	0,02
15	0,00125	30	0,023	0,351	0,02
16	0,002184	30	0,023	0,351	0,02
17	0,00125	15	0,018	0,120	0,04
18	0,002184	15	0,018	0,120	0,04
19	0,00125	30	0,018	0,120	0,04
20	0,002184	30	0,018	0,120	0,04
21	0,00125	15	0,023	0,120	0,04
22	0,002184	15	0,023	0,120	0,04
23	0,00125	30	0,023	0,120	0,04
24	0,002184	30	0,023	0,120	0,04
25	0,00125	15	0,018	0,351	0,05
26	0,002184	15	0,018	0,351	0,05
27	0,00125	30	0,018	0,351	0,05
28	0,002184	30	0,018	0,351	0,05
29	0,00125	15	0,023	0,351	0,05
30	0,002184	15	0,023	0,351	0,05
31	0,00125	30	0,023	0,351	0,05
32	0,002184	30	0,023	0,351	0,05
33	0,001558	15	0,018	0,201	0,03
34	0,001558	15	0,018	0,201	0,03
35	0,001558	15	0,018	0,201	0,03
36	0,001558	15	0,018	0,201	0,03



En la tabla 6.12, se llenó los datos iniciales o variables manipulables que se deben tener en cuenta para el respectivo proceso y funcionamiento adecuado del hidrociclón; el cual se lo llenó de la siguiente manera.

Columna 1 indica el caudal líquido en litros por segundo que se tuvo en cuenta para la ejecución de dichos ensayos.

Columna 2 determina la altura máxima y mínima del hidrociclón en centímetros.

Columna 3 determina el diámetro de ápex en metros el cual se tuvo en cuenta para dichos ensayos.

Columna 4 muestra el  $d_{50}$  en milímetros de cada muestra de arena.

Columna 5 indica el caudal de los sólidos en Kilogramo fuerza por segundo.

Tabla 6.13 Datos de entrada

Corrida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	H <sub>T</sub>	H <sub>V</sub>	W <sub>S</sub>	L <sub>V</sub>	D <sub>A</sub>	D <sub>V</sub>	D <sub>E</sub>	H	T	G <sub>S</sub>
	cm	cm	Kg.	cm	mm	mm	mm	m	°C	Kg./m <sup>3</sup>
1	7,6	6,5	3,371	15	17,60	54,20	41,95	0,6	15,8	2805
2	9,5	9	6,743	15	17,60	54,20	41,95	1,0	16,5	2805
3	7,6	6,5	3,371	30	17,60	54,20	41,95	0,6	15,8	2805
4	9,5	9	6,743	30	17,60	54,20	41,95	1,0	16,5	2805
5	7,6	6,5	3,371	15	22,55	54,20	41,95	0,6	15,8	2805
6	9,5	9	6,743	15	22,55	54,20	41,95	1,0	16,5	2805
7	7,6	6,5	3,371	30	22,55	54,20	41,95	0,6	15,8	2805
8	9,5	9	6,743	30	22,55	54,20	41,95	1,0	16,5	2805
9	7,6	6,5	3,616	15	17,60	54,20	41,95	0,6	15,8	2427
10	9,5	9	7,232	15	17,60	54,20	41,95	1,0	16,5	2427
11	7,6	6,5	3,616	30	17,60	54,20	41,95	0,6	15,8	2427
12	9,5	9	7,232	30	17,60	54,20	41,95	1,0	16,5	2427
13	7,6	6,5	3,616	15	22,55	54,20	41,95	0,6	15,8	2427
14	9,5	9	7,232	15	22,55	54,20	41,95	1,0	16,5	2427
15	7,6	6,5	3,616	30	22,55	54,20	41,95	0,6	15,8	2427
16	9,5	9	7,232	30	22,55	54,20	41,95	1,0	16,5	2427
17	7,6	6,5	3,371	15	17,60	54,20	41,95	0,6	15,8	2805
18	9,5	9	6,743	15	17,60	54,20	41,95	1,0	16,5	2805
19	7,6	6,5	3,371	30	17,60	54,20	41,95	0,6	15,8	2805
20	9,5	9	6,743	30	17,60	54,20	41,95	1,0	16,5	2805
21	7,6	6,5	3,371	15	22,55	54,20	41,95	0,6	15,8	2805
22	9,5	9	6,743	15	22,55	54,20	41,95	1,0	16,5	2805
23	7,6	6,5	3,371	30	22,55	54,20	41,95	0,6	15,8	2805
24	9,5	9	6,743	30	22,55	54,20	41,95	1,0	16,5	2805
25	7,6	6,5	3,616	15	17,60	54,20	41,95	0,6	15,8	2427
26	9,5	9	7,232	15	17,60	54,20	41,95	1,0	16,5	2427
27	7,6	6,5	3,616	30	17,60	54,20	41,95	0,6	15,8	2427
28	9,5	9	7,232	30	17,60	54,20	41,95	1,0	16,5	2427
29	7,6	6,5	3,616	15	22,55	54,20	41,95	0,6	15,8	2427
30	9,5	9	7,232	15	22,55	54,20	41,95	1,0	16,5	2427
31	7,6	6,5	3,616	30	22,55	54,20	41,95	0,6	15,8	2427
32	9,5	9	7,232	30	22,55	54,20	41,95	1,0	16,5	2427
33	8,3	7,6	5,848	15	17,60	54,20	41,95	0,9	16,0	2624
34	8,3	7,6	5,848	15	17,60	54,20	41,95	0,9	16,0	2624
35	8,3	7,6	5,848	15	17,60	54,20	41,95	0,9	16,0	2624
36	8,3	7,6	5,848	15	17,60	54,20	41,95	0,9	16,0	2624

En la tabla 6.13, se indican los datos de entrada a tener en cuenta para realizar los respectivos ensayos y se los ubico en las respectivas columnas de la siguiente manera:

Columna 1 Altura total de la lámina de agua que pasa por el vertedero de salida del tanque de aforo Vortex, cerrada el paso de salida ápex  $H_T$  cm.

Columna 2 Altura de la lámina de agua que pasa por el vertedero de salida del tanque de aforo Vortex, Abierto paso de salida Ápex.  $H_V$  cm.

Columna 3 Peso total de los sólidos.  $W_S$  Kg.

Columna 4 Longitud del hidrociclón  $L_V$  cm

Columna 5 Diámetro de ápex  $DA$  mm

Columna 6 Diámetro de Vortex  $DV$  mm

Columna 7 Diámetro de entrada  $DE$  mm

Columna 8 Altura de columna de agua en la entrada del hidrociclón en metros

Columna 9 Temperatura ensayo en grados centígrados

Columna 10 Gravedad especifica de los sólidos en kilogramo por metro cúbico

**Tabla 6.14** Variables medidas

Corrida	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	d <sub>50</sub> mm	Q <sub>s</sub> Kg/s	Q <sub>s</sub> M <sup>3</sup> /s	Q <sub>s</sub> L/s	Pb gr	Q <sub>L</sub> L/s	Q <sub>LV</sub> L/s	Q <sub>LA</sub> L/s	C <sub>v</sub> %
1	0,120	0,0187	6,6764E-06	0,00668	0,674	1,25	0,84558	0,404	0,53%
2	0,120	0,0375	1,3355E-05	0,01335	1,349	2,18	1,90755	0,276	0,61%
3	0,120	0,0187	6,6764E-06	0,00668	0,674	1,25	0,84558	0,404	0,53%
4	0,120	0,0375	1,3355E-05	0,01335	1,349	2,18	1,90755	0,276	0,61%
5	0,120	0,0187	6,6764E-06	0,00668	0,674	1,25	0,84558	0,404	0,53%
6	0,120	0,0375	1,3355E-05	0,01335	1,349	2,18	1,90755	0,276	0,61%
7	0,120	0,0187	6,6764E-06	0,00668	0,674	1,25	0,84558	0,404	0,53%
8	0,120	0,0375	1,3355E-05	0,01335	1,349	2,18	1,90755	0,276	0,61%
9	0,351	0,0201	8,2776E-06	0,00828	0,723	1,25	0,84558	0,404	0,66%
10	0,351	0,0402	1,6555E-05	0,01656	1,446	2,18	1,90755	0,276	0,75%
11	0,351	0,0201	8,2776E-06	0,00828	0,723	1,25	0,84558	0,404	0,66%
12	0,351	0,0402	1,6555E-05	0,01656	1,446	2,18	1,90755	0,276	0,75%
13	0,351	0,0201	8,2776E-06	0,00828	0,723	1,25	0,84558	0,404	0,66%
14	0,351	0,0402	1,6555E-05	0,01656	1,446	2,18	1,90755	0,276	0,75%
15	0,351	0,0201	8,2776E-06	0,00828	0,723	1,25	0,84558	0,404	0,66%
16	0,351	0,0402	1,6555E-05	0,01656	1,446	2,18	1,90755	0,276	0,75%
17	0,120	0,0187	6,6764E-06	0,00668	0,674	1,25	0,84558	0,404	0,53%
18	0,120	0,0375	1,3355E-05	0,01335	1,349	2,18	1,90755	0,276	0,61%
19	0,120	0,0187	6,6764E-06	0,00668	0,674	1,25	0,84558	0,404	0,53%
20	0,120	0,0375	1,3355E-05	0,01335	1,349	2,18	1,90755	0,276	0,61%
21	0,120	0,0187	6,6764E-06	0,00668	0,674	1,25	0,84558	0,404	0,53%
22	0,120	0,0375	1,3355E-05	0,01335	1,349	2,18	1,90755	0,276	0,61%
23	0,120	0,0187	6,6764E-06	0,00668	0,674	1,25	0,84558	0,404	0,53%
24	0,120	0,0375	1,3355E-05	0,01335	1,349	2,18	1,90755	0,276	0,61%
25	0,351	0,0201	8,2776E-06	0,00828	0,723	1,25	0,84558	0,404	0,66%
26	0,351	0,0402	1,6555E-05	0,01656	1,446	2,18	1,90755	0,276	0,75%
27	0,351	0,0201	8,2776E-06	0,00828	0,723	1,25	0,84558	0,404	0,66%
28	0,351	0,0402	1,6555E-05	0,01656	1,446	2,18	1,90755	0,276	0,75%
29	0,351	0,0201	8,2776E-06	0,00828	0,723	1,25	0,84558	0,404	0,66%
30	0,351	0,0402	1,6555E-05	0,01656	1,446	2,18	1,90755	0,276	0,75%
31	0,351	0,0201	8,2776E-06	0,00828	0,723	1,25	0,84558	0,404	0,66%
32	0,351	0,0402	1,6555E-05	0,01656	1,446	2,18	1,90755	0,276	0,75%
33	0,201	0,0325	1,238E-05	0,01238	1,170	1,56	1,24998	0,308	0,79%
34	0,201	0,0325	1,238E-05	0,01238	1,170	1,56	1,24998	0,308	0,79%
35	0,201	0,0325	1,238E-05	0,01238	1,170	1,56	1,24998	0,308	0,79%
36	0,201	0,0325	1,238E-05	0,01238	1,170	1,56	1,24998	0,308	0,79%

En la tabla 6.14, se recopiló la información de las variables medidas en todos los ensayos respectivos ubicados de la siguiente manera:

Columna 1  $d_{50}$  de los sólidos obtenido por medio de la curva granulométrica de las muestras iniciales de los sólidos en milímetros

Columna 2 Caudal de los sólidos en Kilogramo fuerza por segundos

Columna 3 Caudal de los sólidos en metro cúbico por segundos

Columna 4 Caudal de los sólidos en litros por segundos

Columna 5 Peso de plomo en gramos

Columna 6 Caudal líquido calculado con la ecuación 9.1 en litros por segundo

Columna 7 Caudal líquido Vortex calculado con la ecuación 9.1 en litros por segundo

Columna 8 Caudal líquido ápex determinado por la diferencia de  $Q_L - Q_{LV}$

Columna 9 Concentración volumétrica calculado con la ecuación 8.9

**Tabla 6.15** Peso de agregados utilizados para el ensayo

# Corrida	1	2	3	4	5	6	7
	W <sub>T</sub>	W <sub>TA</sub>	W <sub>TV</sub>	WP <sub>bE</sub>	WP <sub>bA</sub>	WP <sub>bV</sub>	H
	[Kgf]	[Kgf]	[Kgf]	[gr]	[gr]	[gr]	[m]
1	3,37	2,92	0,451	0,051	0,051	0,000	0,64
2	6,74	5,69	1,053	0,101	0,101	0,000	1,00
3	3,37	3,03	0,341	0,051	0,051	0,000	0,64
4	6,74	6,01	0,733	0,101	0,101	0,000	1,00
5	3,37	2,9	0,471	0,051	0,051	0,000	0,64
6	6,74	5,71	1,033	0,101	0,101	0,000	1,00
7	3,37	3,04	0,331	0,051	0,051	0,000	0,64
8	6,74	5,98	0,763	0,101	0,101	0,000	1,00
9	3,62	3,12	0,496	0,054	0,054	0,000	0,64
10	7,23	6,15	1,082	0,108	0,108	0,000	1,00
11	3,62	3,36	0,256	0,054	0,054	0,000	0,64
12	7,23	6,5	0,732	0,108	0,108	0,000	1,00
13	3,62	3,16	0,456	0,054	0,054	0,000	0,64
14	7,23	6,23	1,002	0,108	0,108	0,000	1,00
15	3,62	3,37	0,246	0,054	0,054	0,000	0,64
16	7,23	6,58	0,652	0,108	0,108	0,000	1,00
17	3,37	2,95	0,421	0,051	0,051	0,000	0,64
18	6,74	5,71	1,033	0,101	0,101	0,000	1,00
19	3,37	3,04	0,331	0,051	0,051	0,000	0,64
20	6,74	5,87	0,873	0,101	0,101	0,000	1,00
21	3,37	2,98	0,391	0,051	0,051	0,000	0,64
22	6,74	5,8	0,943	0,101	0,101	0,000	1,00
23	3,37	3,09	0,281	0,051	0,051	0,000	0,64
24	6,74	6,15	0,593	0,101	0,101	0,000	1,00
25	3,62	3,08	0,536	0,054	0,054	0,000	0,64
26	7,23	6,1	1,132	0,108	0,108	0,000	1,00
27	3,62	3,36	0,256	0,054	0,054	0,000	0,64
28	7,23	6,43	0,802	0,108	0,108	0,000	1,00
29	3,62	3,19	0,426	0,054	0,054	0,000	0,64
30	7,23	6,19	1,042	0,108	0,108	0,000	1,00
31	3,62	3,34	0,276	0,054	0,054	0,000	0,64
32	7,23	6,59	0,642	0,108	0,108	0,000	1,00
33	5,85	5,09	0,758	0,088	0,088	0,000	0,85
34	5,85	5,05	0,798	0,088	0,088	0,000	0,85
35	5,85	5,07	0,778	0,088	0,088	0,000	0,85
36	5,85	5,08	0,768	0,088	0,088	0,000	0,85

En la tabla 6.15, se muestran los datos obtenidos de cada corrida del hidrociclón el cual sirven para realizar los cálculos respectivos planteados en el capítulo 4. Estos datos se los tomo lo más exacto posible para que luego no exista mucha variación en los resultados finales.

La información recopilada es la siguiente.

Columna 1 Peso total de los sólidos en kilogramo fuerza

Columna 2 Peso total de los sólidos en kilogramo fuerza salientes por ápex

Columna 3 Peso total de los sólidos en kilogramo fuerza salientes por Vortex

Columna 4 Peso total de plomo en la entrada del hidrociclón en gramos.

Columna 5 Peso total de plomo saliente por ápex en gramos.

Columna 6 Peso total de plomo saliente por Vortex en gramos.

Columna 7 Altura de la columna de agua en metros.

En las tablas 6.16 hasta 6.87, se muestran los respectivos cálculos de las granulometrías realizadas a las muestras de sólidos obtenidas en ápex y Vortex, el cual se indican con las respectivas curvas granulometrías.

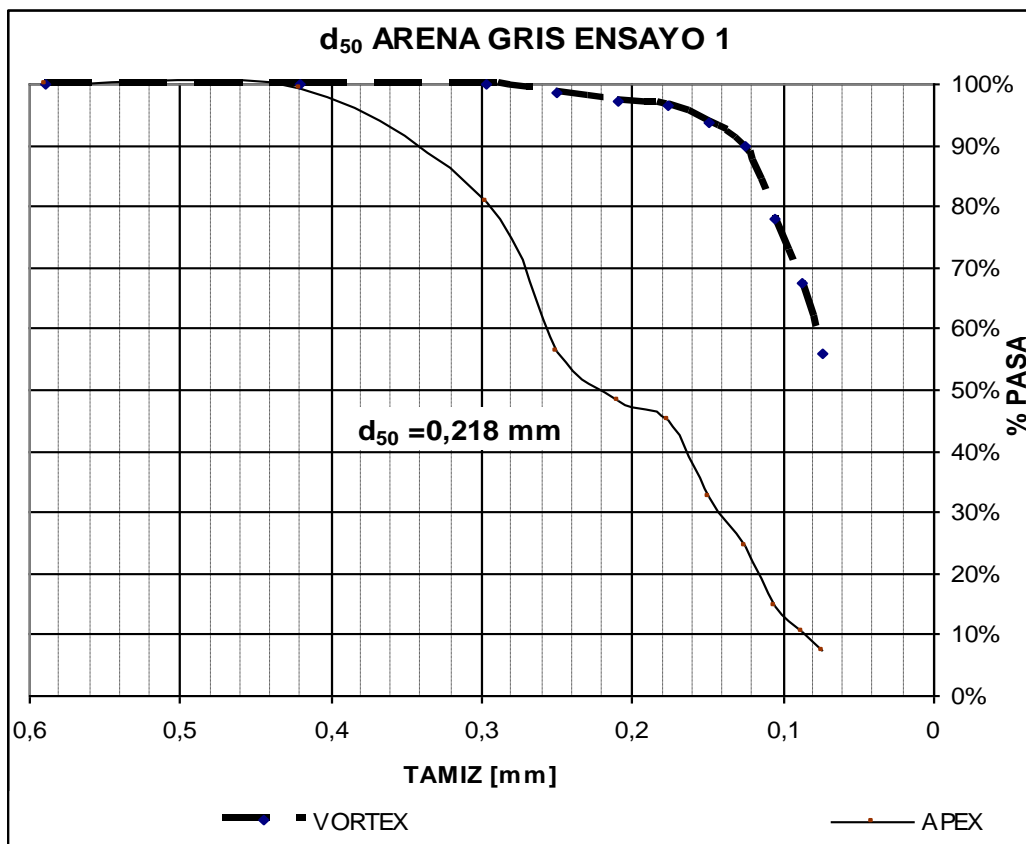
**Tabla 6.16** Vortex arena gris  $Q_W$ -  $D_A$ -  $L_V$  -  $d_{50}$  -  $Q_S$  -

Nº de	Abertura	W + Reci	W reci	Ware	%	%	%
Tamiz	[mm]	[gr]	[gr]	[gr]	retenido	Ret acum.	pasa
30	0,59	40,5	40,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	40,5	40,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
50	0,297	41	40,5	0,50	0,16%	0,16%	99,84%
60	0,25	44	40,5	3,50	1,09%	1,25%	98,75%
70	0,21	45,5	40,5	5,00	1,56%	2,81%	97,19%
80	0,177	43	40,5	2,50	0,78%	3,59%	96,41%
100	0,149	49	40,5	8,50	2,66%	6,25%	93,75%
120	0,125	53	40,5	12,50	3,91%	10,16%	89,84%
140	0,105	79	40,5	38,50	12,03%	22,19%	77,81%
170	0,088	73	40,5	32,50	10,16%	32,34%	67,66%
200	0,074	77,5	40,5	37,00	11,56%	43,91%	56,09%
pasa 200	0,062	220	40,5	179,50	56,09%	100,00%	0,00%
suma total				320,00	100,0%		

**Tabla 6.17** ápex arena gris  $Q_W$ -  $D_A$ -  $L_V$  -  $d_{50}$  -  $Q_S$  -

Nº de	Abertura	W + Reci	W reci	Ware	%	%	%
Tamiz	[mm]	[gr]	[gr]	[gr]	retenido	Ret acum.	pasa
30	0,59	34	34	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	37	34	3,00	0,60%	0,60%	99,40%
50	0,297	128	34	94,00	18,80%	19,40%	80,60%
60	0,25	156	34	122,00	24,40%	43,80%	56,20%
70	0,21	73	34	39,00	7,80%	51,60%	48,40%
80	0,177	51	34	17,00	3,40%	55,00%	45,00%
100	0,149	97	34	63,00	12,60%	67,60%	32,40%
120	0,125	73	34	39,00	7,80%	75,40%	24,60%
140	0,105	83	34	49,00	9,80%	85,20%	14,80%
170	0,088	56	34	22,00	4,40%	89,60%	10,40%
200	0,074	50	34	16,00	3,20%	92,80%	7,20%
pasa 200	0,062	70	34	36,00	7,20%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		





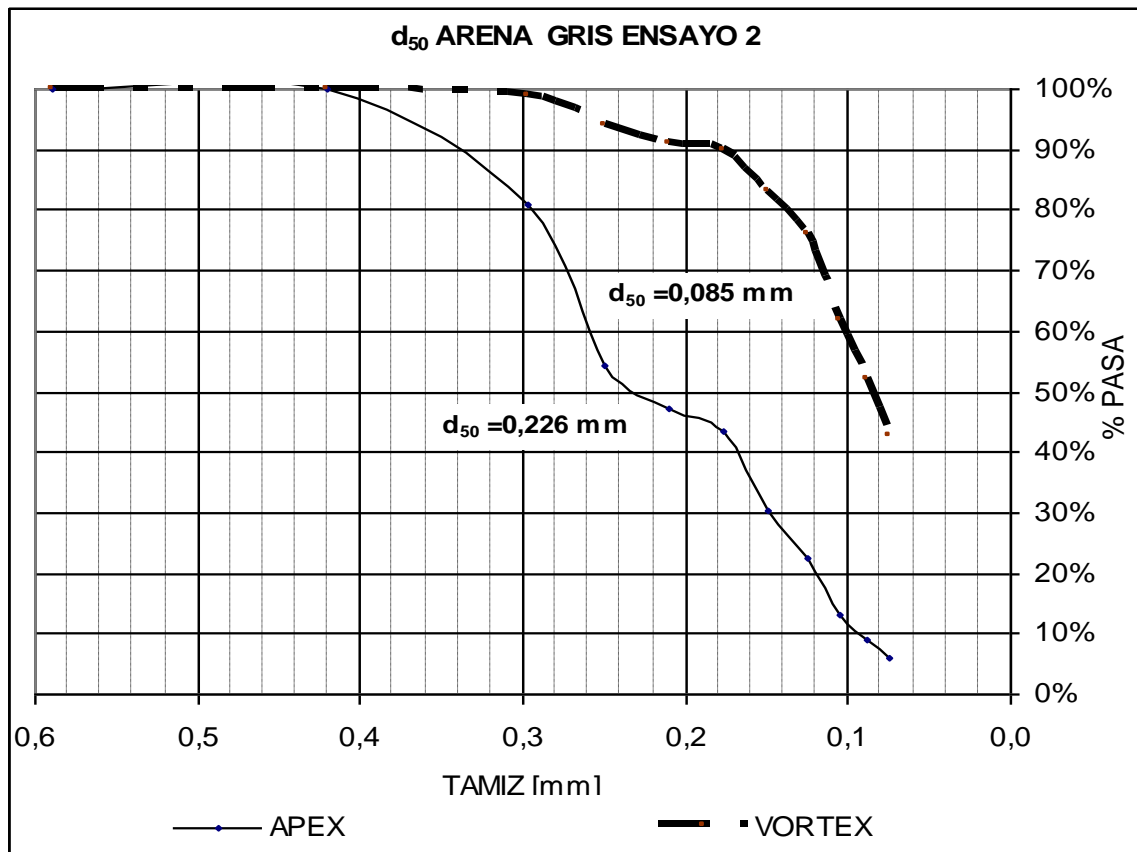
**Grafica 6. 2 Curva Granulométrica Ensayo # 1**

**Tabla 6.18 arena gris Vortex Q<sub>W</sub>+ D<sub>A</sub>- L<sub>V</sub> - d<sub>50</sub> - Q<sub>S</sub> -**

Nº de Tamiz	Abertura	W + Reci	W reci	Ware	%	%	%
	[mm]	[gr]	[gr]	[gr]	retenido	Ret acum.	pasa
30	0,59	37	37	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	37	37	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
50	0,297	44	37	7,00	1,06%	1,06%	98,94%
60	0,25	70	37	33,00	4,98%	6,03%	93,97%
70	0,21	57	37	20,00	3,02%	9,05%	90,95%
80	0,177	44	37	7,00	1,06%	10,11%	89,89%
100	0,149	81	37	44,00	6,64%	16,74%	83,26%
120	0,125	84	37	47,00	7,09%	23,83%	76,17%
140	0,105	133	37	96,00	14,48%	38,31%	61,69%
170	0,088	101	37	64,00	9,65%	47,96%	52,04%
200	0,074	99	37	62,00	9,35%	57,32%	42,68%
pasa 200	0,062	320	37	283,00	42,68%	100,00%	0,00%
suma total				663,00	100,0%		

**Tabla 6.19** arena gris ápex  $Q_{W+}$   $D_A$ -  $L_V$  -  $d_{50}$  -  $Q_S$  -

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Reci [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,0%
40	0,42	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,0%
50	0,297	137	41,5	95,50	19,12%	19,12%	80,9%
60	0,25	175	41,5	133,50	26,73%	45,85%	54,2%
70	0,21	76	41,5	34,50	6,91%	52,75%	47,2%
80	0,177	61	41,5	19,50	3,90%	56,66%	43,3%
100	0,149	106	41,5	64,50	12,91%	69,57%	30,4%
120	0,125	82	41,5	40,50	8,11%	77,68%	22,3%
140	0,105	88	41,5	46,50	9,31%	86,99%	13,0%
170	0,088	61	41,5	19,50	3,90%	90,89%	9,1%
200	0,074	58	41,5	16,50	3,30%	94,19%	5,8%
pasa 200	0,062	70,5	41,5	29,00	5,81%	100,00%	0,0%
suma total				500	100,0%		



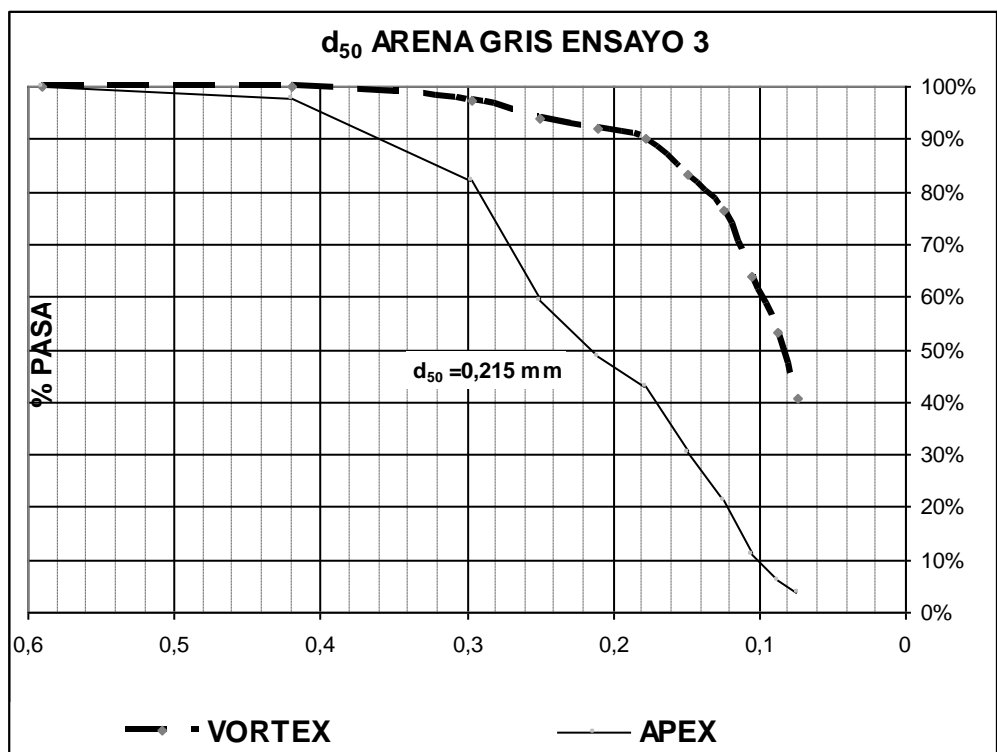
**Grafica 8. 3** Curva Granulométrica Ensayo # 2

**Tabla 6.20** arena gris Vortex  $Q_W$ -  $D_A+L_V$  -  $d_{50}$  -  $Q_S$  -

Nº de Tamiz	Abertura	W + Reci	W reci	Ware	%	%	%
	[mm]	[gr]	[gr]	[gr]	retenido	Ret acum.	pasa
30	0,59	77	77	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	77	77	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
50	0,297	82,1	77	5,10	2,58%	2,58%	97,42%
60	0,25	83,8	77	6,80	3,43%	6,01%	93,99%
70	0,21	81,1	77	4,10	2,07%	8,08%	91,92%
80	0,177	80,5	77	3,50	1,77%	9,85%	90,15%
100	0,149	90,8	77	13,80	6,97%	16,82%	83,18%
120	0,125	90,2	77	13,20	6,67%	23,48%	76,52%
140	0,105	102	77	25,00	12,63%	36,11%	63,89%
170	0,088	97,8	77	20,80	10,51%	46,62%	53,38%
200	0,074	102,2	77	25,20	12,73%	59,34%	40,66%
pasa 200	0,062	157,5	77	80,50	40,66%	100,00%	0,00%
suma total				198,00	100,0%		

**Tabla 6.21** arena gris apex  $Q_W$ -  $D_A+L_V$  -  $d_{50}$  -  $Q_S$  -

Nº de Tamiz	Abertura	W + Reci	W reci	Ware	%	%	%
	[mm]	[gr]	[gr]	[gr]	retenido	Ret acum.	pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	52	41,5	10,50	2,10%	2,10%	97,90%
50	0,297	119,5	41,5	78,00	15,60%	17,70%	82,30%
60	0,25	156	41,5	114,50	22,90%	40,60%	59,40%
70	0,21	95	41,5	53,50	10,70%	51,30%	48,70%
80	0,177	70	41,5	28,50	5,70%	57,00%	43,00%
100	0,149	104	41,5	62,50	12,50%	69,50%	30,50%
120	0,125	87	41,5	45,50	9,10%	78,60%	21,40%
140	0,105	94	41,5	52,50	10,50%	89,10%	10,90%
170	0,088	66	41,5	24,50	4,90%	94,00%	6,00%
200	0,074	53	41,5	11,50	2,30%	96,30%	3,70%
pasa 200	0,062	60	41,5	18,50	3,70%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



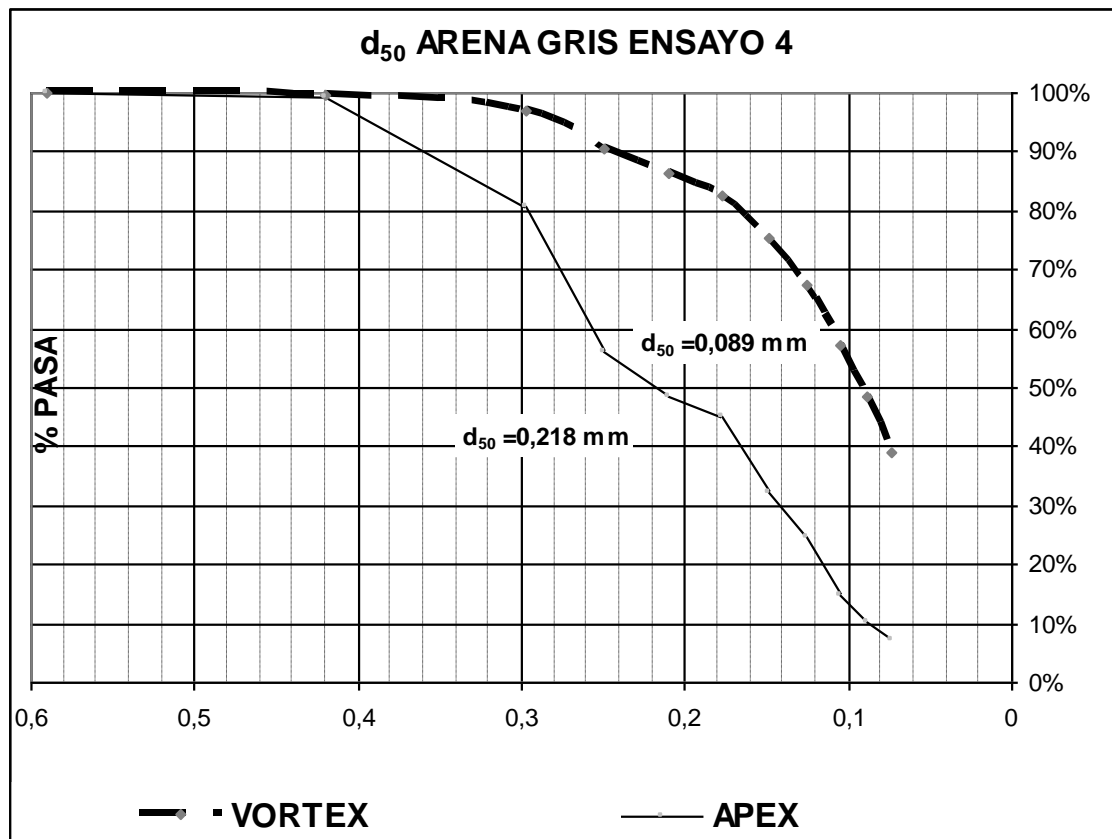
**Grafica 8.4** Curva Granulométrica Ensayo # 3

**Tabla 6.22** Arena gris Vortex Q<sub>w</sub>+ D<sub>A</sub>+ L<sub>V</sub> - d<sub>50</sub> - Q<sub>S</sub> -

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	31,5	31,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	34	31,5	2,50	0,32%	0,32%	99,68%
50	0,297	54	31,5	22,50	2,85%	3,16%	96,84%
60	0,25	80	31,5	48,50	6,14%	9,30%	90,70%
70	0,21	67	31,5	35,50	4,49%	13,80%	86,20%
80	0,177	59	31,5	27,50	3,48%	17,28%	82,72%
100	0,149	91	31,5	59,50	7,53%	24,81%	75,19%
120	0,125	94	31,5	62,50	7,91%	32,72%	67,28%
140	0,105	111	31,5	79,50	10,06%	42,78%	57,22%
170	0,088	100	31,5	68,50	8,67%	51,46%	48,54%
200	0,074	107	31,5	75,50	9,56%	61,01%	38,99%
pasa 200	0,062	339,5	31,5	308,00	38,99%	100,00%	0,00%
suma total				<b>790,00</b>	100,0%		

**Tabla 6.23** arena gris ápex  $Q_W + D_A + L_V - d_{50} - Q_S -$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	34	34	0,00	0,00%	0,00%	100,0%
40	0,42	37	34	3,00	0,60%	0,60%	99,4%
50	0,297	128	34	94,00	18,84%	19,44%	80,6%
60	0,25	156	34	122,00	24,45%	43,89%	56,1%
70	0,21	73	34	39,00	7,82%	51,70%	48,3%
80	0,177	51	34	17,00	3,41%	55,11%	44,9%
100	0,149	97	34	63,00	12,63%	67,74%	32,3%
120	0,125	73	34	39,00	7,82%	75,55%	24,4%
140	0,105	83	34	49,00	9,82%	85,37%	14,6%
170	0,088	56	34	22,00	4,41%	89,78%	10,2%
200	0,074	50	34	16,00	3,21%	92,99%	7,0%
pasa 200	0,062	69	34	35,00	7,01%	100,00%	0,0%
suma total				499,0	100,0%		



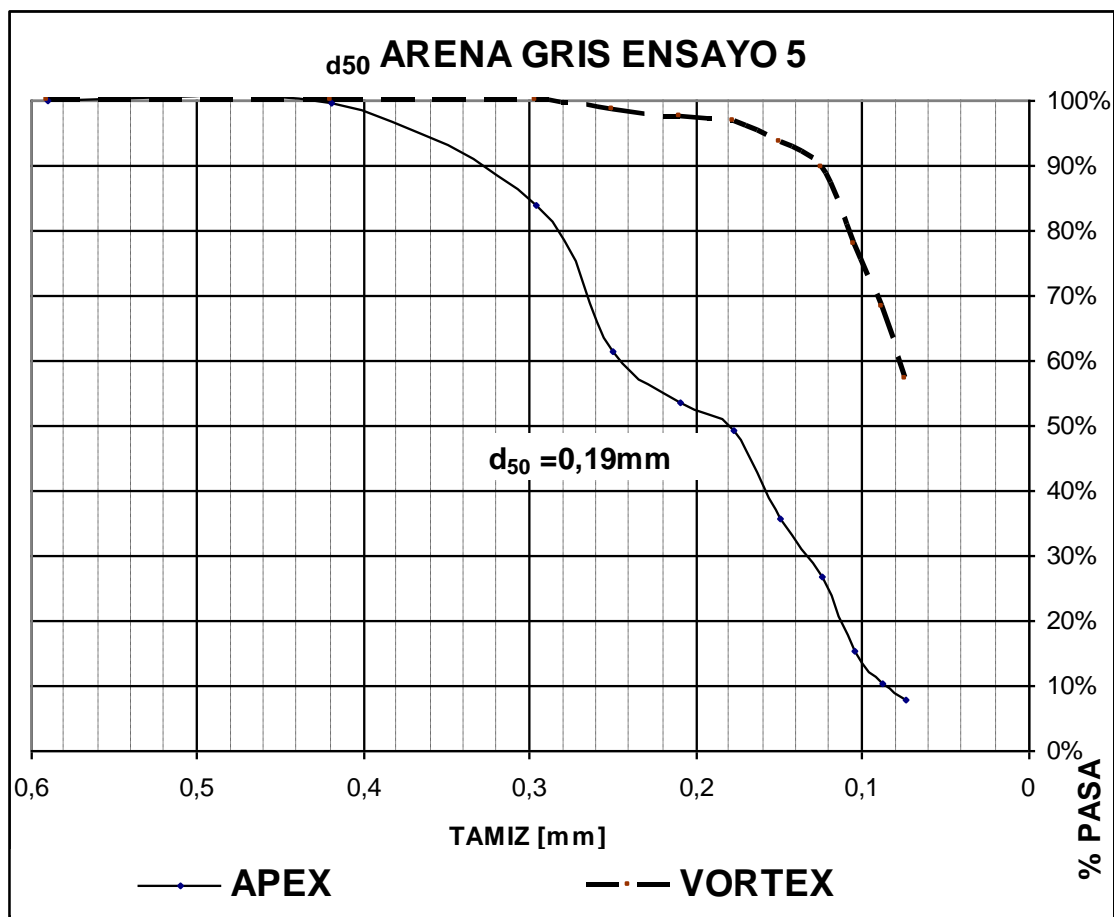
**Grafica 8.5** Curva Granulométrica Ensayo # 4

**Tabla 6.24** arena gris Vortex  $Q_W - D_A - L_V + d_{50} - Q_S -$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
50	0,297	42,1	41,5	0,60	0,17%	0,17%	99,83%
60	0,25	45,4	41,5	3,90	1,14%	1,31%	98,69%
70	0,21	45,5	41,5	4,00	1,17%	2,48%	97,52%
80	0,177	44,5	41,5	3,00	0,87%	3,35%	96,65%
100	0,149	51,5	41,5	10,00	2,92%	6,27%	93,73%
120	0,125	55,5	41,5	14,00	4,08%	10,35%	89,65%
140	0,105	81,5	41,5	40,00	11,66%	22,01%	77,99%
170	0,088	75,5	41,5	34,00	9,91%	31,92%	68,08%
200	0,074	79,5	41,5	38,00	11,08%	43,00%	57,00%
pasa 200	0,062	237	41,5	195,50	57,00%	100,00%	0,00%
suma total				343,00	100,0%		

**Tabla 6.25** arena gris ápex  $Q_W - D_A - L_V + d_{50} - Q_S -$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	44	41,5	2,50	0,50%	0,50%	99,50%
50	0,297	119	41,5	77,50	15,50%	16,00%	84,00%
60	0,25	155	41,5	113,50	22,70%	38,70%	61,30%
70	0,21	80	41,5	38,50	7,70%	46,40%	53,60%
80	0,177	63	41,5	21,50	4,30%	50,70%	49,30%
100	0,149	109	41,5	67,50	13,50%	64,20%	35,80%
120	0,125	87	41,5	45,50	9,10%	73,30%	26,70%
140	0,105	99	41,5	57,50	11,50%	84,80%	15,20%
170	0,088	66	41,5	24,50	4,90%	89,70%	10,30%
200	0,074	53	41,5	11,50	2,30%	92,00%	8,00%
pasa 200	0,062	81,5	41,5	40,00	8,00%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



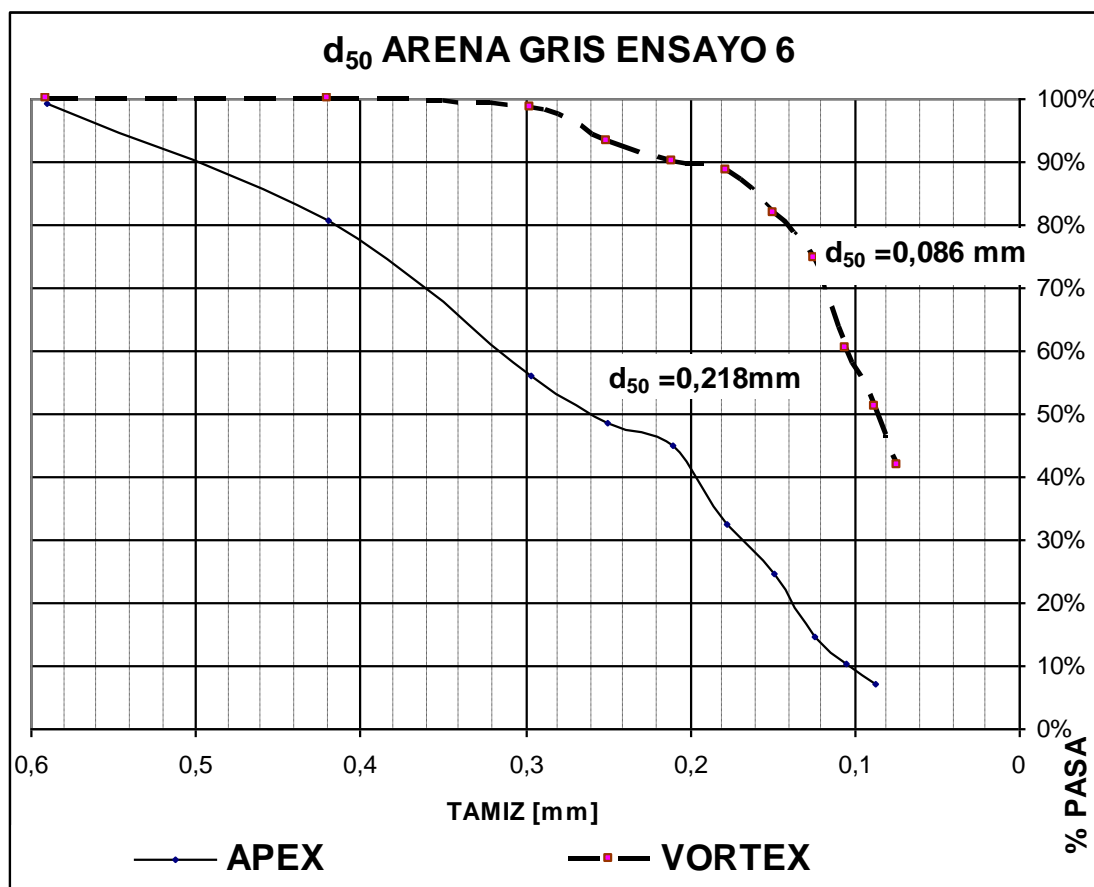
**Grafica 6.6** Curva Granulométrica Ensayo # 5

**Tabla 6.26** arena gris Vortex  $Q_W + D_A - L_V + d_{50} - Q_S -$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	34	34	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	34	34	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
50	0,297	44	34	10,00	1,44%	1,44%	98,56%
60	0,25	70	34	36,00	5,17%	6,61%	93,39%
70	0,21	57	34	23,00	3,30%	9,91%	90,09%
80	0,177	44	34	10,00	1,44%	11,35%	88,65%
100	0,149	81	34	47,00	6,75%	18,10%	81,90%
120	0,125	84	34	50,00	7,18%	25,29%	74,71%
140	0,105	133	34	99,00	14,22%	39,51%	60,49%
170	0,088	100	34	66,00	9,48%	48,99%	51,01%
200	0,074	97	34	63,00	9,05%	58,05%	41,95%
pasa 200	0,062	326	34	292,00	41,95%	100,00%	0,00%
suma total				<b>696,00</b>	100,0%		

**Tabla 6.27** arena gris áplex  $Q_{W+}$   $D_A$ -  $L_V$  +  $d_{50}$  -  $Q_S$  -

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Reци [gr]	W reци [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	34	34	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	37	34	3,00	0,60%	0,60%	99,40%
50	0,297	128	34	94,00	18,80%	19,40%	80,60%
60	0,25	156	34	122,00	24,40%	43,80%	56,20%
70	0,21	73	34	39,00	7,80%	51,60%	48,40%
80	0,177	51	34	17,00	3,40%	55,00%	45,00%
100	0,149	97	34	63,00	12,60%	67,60%	32,40%
120	0,125	73	34	39,00	7,80%	75,40%	24,60%
140	0,105	83	34	49,00	9,80%	85,20%	14,80%
170	0,088	56	34	22,00	4,40%	89,60%	10,40%
200	0,074	50	34	16,00	3,20%	92,80%	7,20%
pasa 200	0,062	70	34	36,00	7,20%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



**Gráfica 6.7** Curva Granulométrica Ensayo # 6

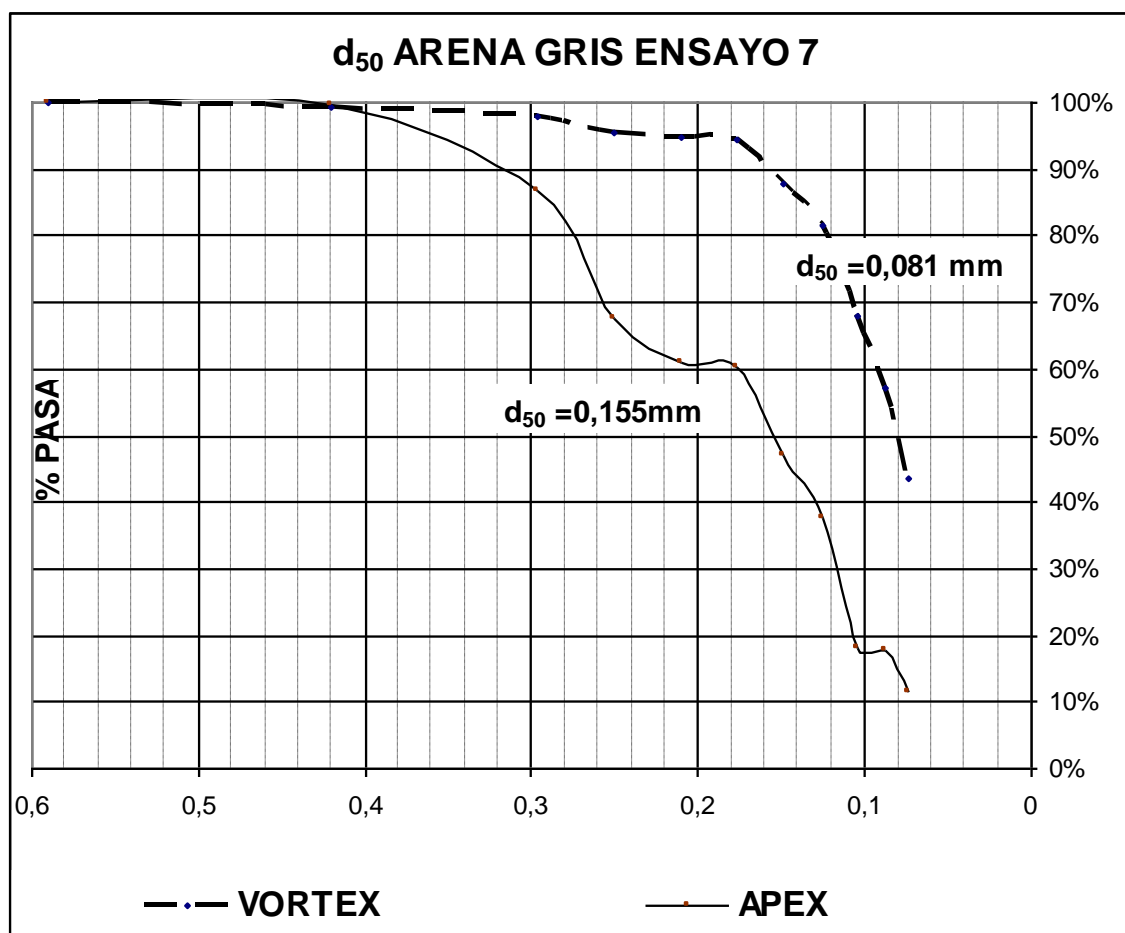


**Tabla 6.28** arena gris Vortex  $Q_W$ -  $D_A$ +  $L_V$  +  $d_{50}$  -  $Q_S$  -

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	79,8	79,8	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	80,7	79,8	0,90	0,55%	0,55%	99,45%
50	0,297	82,1	79,8	2,30	1,39%	1,94%	98,06%
60	0,25	83,8	79,8	4,00	2,42%	4,36%	95,64%
70	0,21	81,1	79,8	1,30	0,79%	5,15%	94,85%
80	0,177	80,5	79,8	0,70	0,42%	5,58%	94,42%
100	0,149	90,8	79,8	11,00	6,67%	12,24%	87,76%
120	0,125	90,2	79,8	10,40	6,30%	18,55%	81,45%
140	0,105	102,1	79,8	22,30	13,52%	32,06%	67,94%
170	0,088	97,8	79,8	18,00	10,91%	42,97%	57,03%
200	0,074	102,2	79,8	22,40	13,58%	56,55%	43,45%
pasa 200	0,062	151,5	79,8	71,70	43,45%	100,00%	0,00%
suma total				165,00	100,0%		

**Tabla 6.29** arena gris ápex  $Q_W$ -  $D_A$ +  $L_V$  +  $d_{50}$  -  $Q_S$  -

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80	80	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	82,3	80	2,30	0,46%	0,46%	99,54%
50	0,297	143,8	80	63,80	12,76%	13,22%	86,78%
60	0,25	176	80	96,00	19,20%	32,42%	67,58%
70	0,21	112,5	80	32,50	6,50%	38,92%	61,08%
80	0,177	84	80	4,00	0,80%	39,72%	60,28%
100	0,149	146,8	80	66,80	13,36%	53,08%	46,92%
120	0,125	127,1	80	47,10	9,42%	62,50%	37,50%
140	0,105	176,6	80	96,60	19,32%	81,82%	18,18%
170	0,088	81,6	80	1,60	0,32%	82,14%	17,86%
200	0,074	111	80	31,00	6,20%	88,34%	11,66%
pasa 200	0,062	138,3	80	58,30	11,66%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



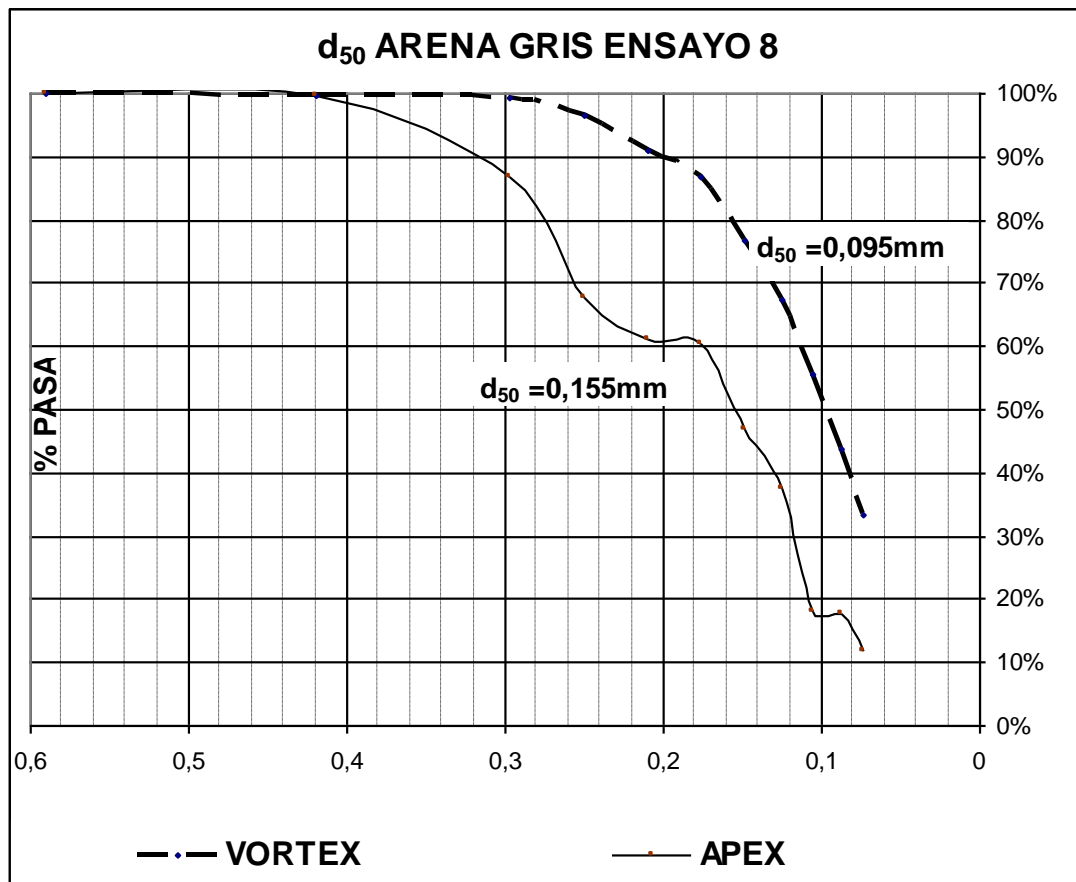
**Grafica 6.8** Curva Granulométrica Ensayo # 7

**Tabla 6.30** arena gris Vortex  $Q_W + D_A + L_V + d_{50} - Q_S -$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr.]	Ware [gr.]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	42,7	41,5	1,20	0,24%	0,24%	99,76%
50	0,297	44,1	41,5	2,60	0,53%	0,78%	99,22%
60	0,25	55,1	41,5	13,60	2,78%	3,55%	96,45%
70	0,21	68,5	41,5	27,00	5,51%	9,06%	90,94%
80	0,177	62,5	41,5	21,00	4,29%	13,35%	86,65%
100	0,149	90,8	41,5	49,30	10,06%	23,41%	76,59%
120	0,125	87,2	41,5	45,70	9,33%	32,73%	67,27%
140	0,105	99,2	41,5	57,70	11,78%	44,51%	55,49%
170	0,088	98,8	41,5	57,30	11,69%	56,20%	43,80%
200	0,074	92,1	41,5	50,60	10,33%	66,53%	33,47%
pasa 200	0,062	205,5	41,5	164,00	33,47%	100,00%	0,00%
suma total				490,00	100,0%		

**Tabla 6.31 arena gris ápex  $Q_W + D_A + L_V + d_{50} - Q_S$  -**

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80	80	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	82,3	80	2,30	0,46%	0,46%	99,54%
50	0,297	143,8	80	63,80	12,76%	13,22%	86,78%
60	0,25	176	80	96,00	19,20%	32,42%	67,58%
70	0,21	112,5	80	32,50	6,50%	38,92%	61,08%
80	0,177	84	80	4,00	0,80%	39,72%	60,28%
100	0,149	146,8	80	66,80	13,36%	53,08%	46,92%
120	0,125	127,1	80	47,10	9,42%	62,50%	37,50%
140	0,105	176,6	80	96,60	19,32%	81,82%	18,18%
170	0,088	81,6	80	1,60	0,32%	82,14%	17,86%
200	0,074	111	80	31,00	6,20%	88,34%	11,66%
pasa 200	0,062	138,3	80	58,30	11,66%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



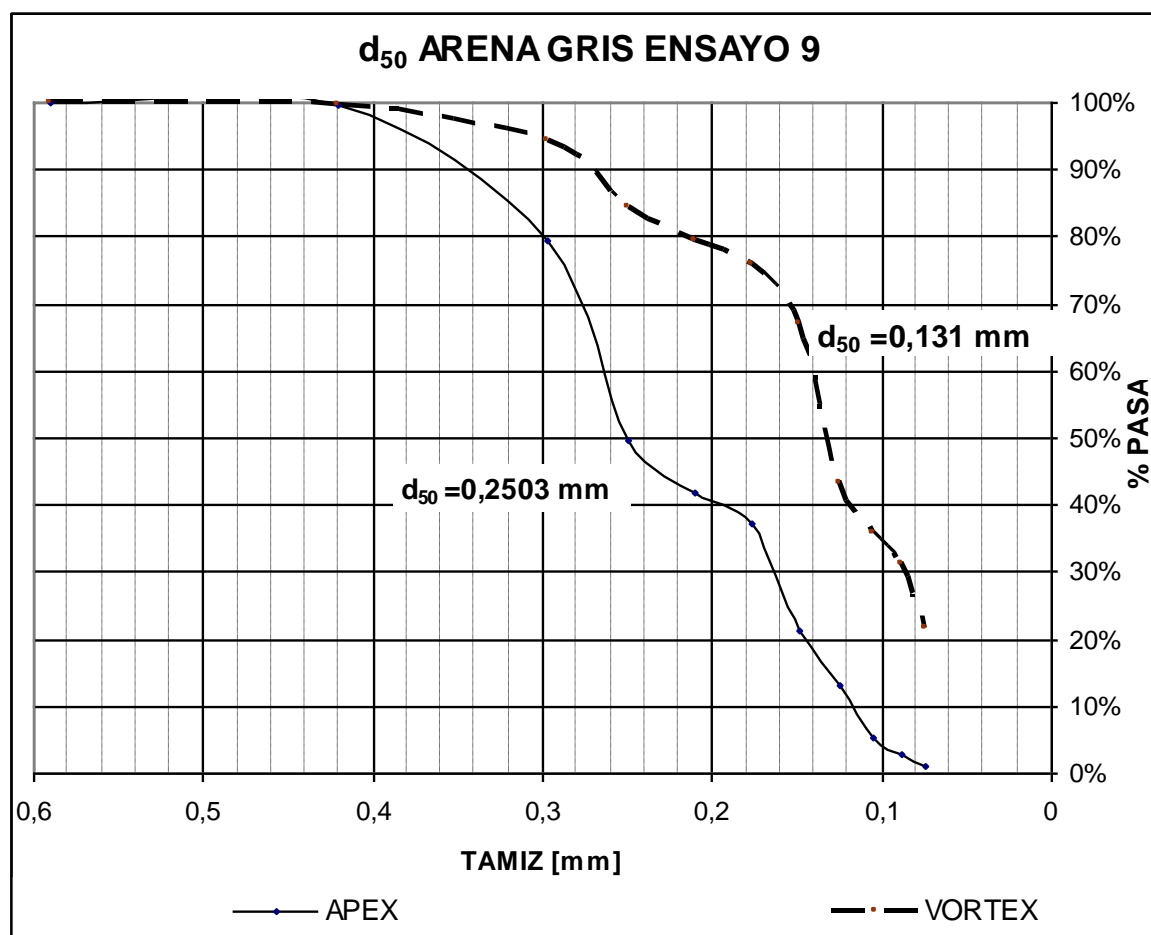
**Grafica 6.9 Curva Granulométrica Ensayo # 8**

**Tabla 6.32** arena café Vortex  $Q_W$ -  $D_A$ -  $L_V$  -  $d_{50}$  +  $Q_S$  -

Nº de Tamiz	Abertura	W + Recí	W reci	Ware	%	%	%
	[mm.]	[gr]	[gr]	[gr]	retenido	Ret acum.	pasa
30	0,59	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	81,5	80,5	1,00	0,28%	0,28%	99,72%
50	0,297	100	80,5	19,50	5,49%	5,77%	94,23%
60	0,25	116	80,5	35,50	10,00%	15,77%	84,23%
70	0,21	97	80,5	16,50	4,65%	20,42%	79,58%
80	0,177	94	80,5	13,50	3,80%	24,23%	75,77%
100	0,149	112	80,5	31,50	8,87%	33,10%	66,90%
120	0,125	164	80,5	83,50	23,52%	56,62%	43,38%
140	0,105	107	80,5	26,50	7,46%	64,08%	35,92%
170	0,088	97	80,5	16,50	4,65%	68,73%	31,27%
200	0,074	115	80,5	34,50	9,72%	78,45%	21,55%
pasa 200	0,062	157	80,5	76,50	21,55%	100,00%	0,00%
suma total				355,00	100,0%		

**Tabla 6.33** arena café ápex  $Q_W$ -  $D_A$ -  $L_V$  -  $d_{50}$  +  $Q_S$  -

Nº de Tamiz	Abertura	W + Recí	W reci	Ware	%	%	%
	[mm]	[gr]	[gr]	[gr]	retenido	Ret acum.	pasa
30	0,59	40	40	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	42	40	2,00	0,40%	0,40%	99,60%
50	0,297	140	40	100,00	20,00%	20,40%	79,60%
60	0,25	189	40	149,00	29,80%	50,20%	49,80%
70	0,21	80	40	40,00	8,00%	58,20%	41,80%
80	0,177	62	40	22,00	4,40%	62,60%	37,40%
100	0,149	120	40	80,00	16,00%	78,60%	21,40%
120	0,125	81	40	41,00	8,20%	86,80%	13,20%
140	0,105	80	40	40,00	8,00%	94,80%	5,20%
170	0,088	52	40	12,00	2,40%	97,20%	2,80%
200	0,074	48	40	8,00	1,60%	98,80%	1,20%
pasa 200	0,062	46	40	6,00	1,20%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



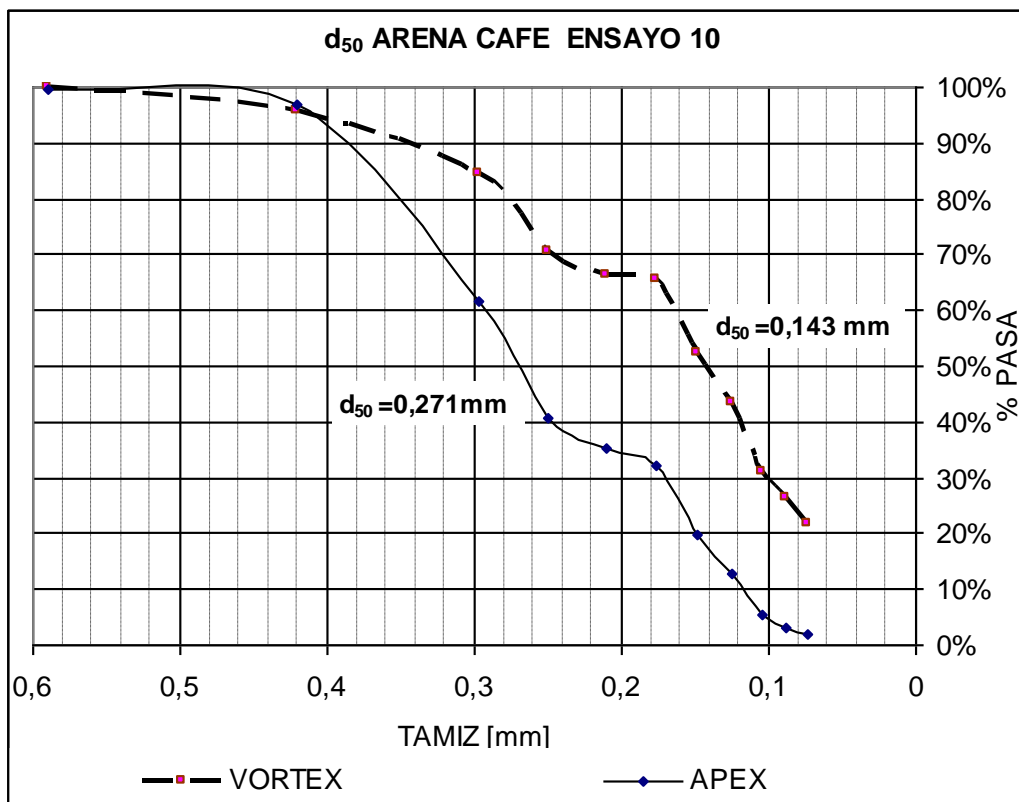
**Gráfica 6.10** Curva Granulométrica Ensayo # 9

**Tabla 6.34** arena café Vortex  $Q_W + D_A - L_V - d_{50} + Q_S -$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Reci [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80	80	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	100,8	80	20,80	4,08%	4,08%	95,92%
50	0,297	139,1	80	59,10	11,58%	15,65%	84,35%
60	0,25	149,8	80	69,80	13,68%	29,33%	70,67%
70	0,21	101,5	80	21,50	4,21%	33,54%	66,46%
80	0,177	84,9	80	4,90	0,96%	34,50%	65,50%
100	0,149	147	80	67,00	13,13%	47,63%	52,37%
120	0,125	125,2	80	45,20	8,86%	56,49%	43,51%
140	0,105	143,3	80	63,30	12,40%	68,89%	31,11%
170	0,088	105	80	25,00	4,90%	73,79%	26,21%
200	0,074	103,3	80	23,30	4,57%	78,35%	21,65%
pasa 200	0,062	190,5	80	110,50	21,65%	100,00%	0,00%
suma total				510	100,00%		

**Tabla 6.35** arena café apex  $Q_W + D_A - L_V - d_{50} + Q_S -$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Reci [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	42,5	41,5	1,00	0,20%	0,20%	99,80%
40	0,42	55,5	41,5	14,00	2,80%	3,00%	97,00%
50	0,297	218	41,5	176,50	35,30%	38,30%	61,70%
60	0,25	146	41,5	104,50	20,90%	59,20%	40,80%
70	0,21	69	41,5	27,50	5,50%	64,70%	35,30%
80	0,177	57	41,5	15,50	3,10%	67,80%	32,20%
100	0,149	103	41,5	61,50	12,30%	80,10%	19,90%
120	0,125	77	41,5	35,50	7,10%	87,20%	12,80%
140	0,105	78	41,5	36,50	7,30%	94,50%	5,50%
170	0,088	53	41,5	11,50	2,30%	96,80%	3,20%
200	0,074	48	41,5	6,50	1,30%	98,10%	1,90%
pasa 200	0,062	51	41,5	9,50	1,90%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,00%		



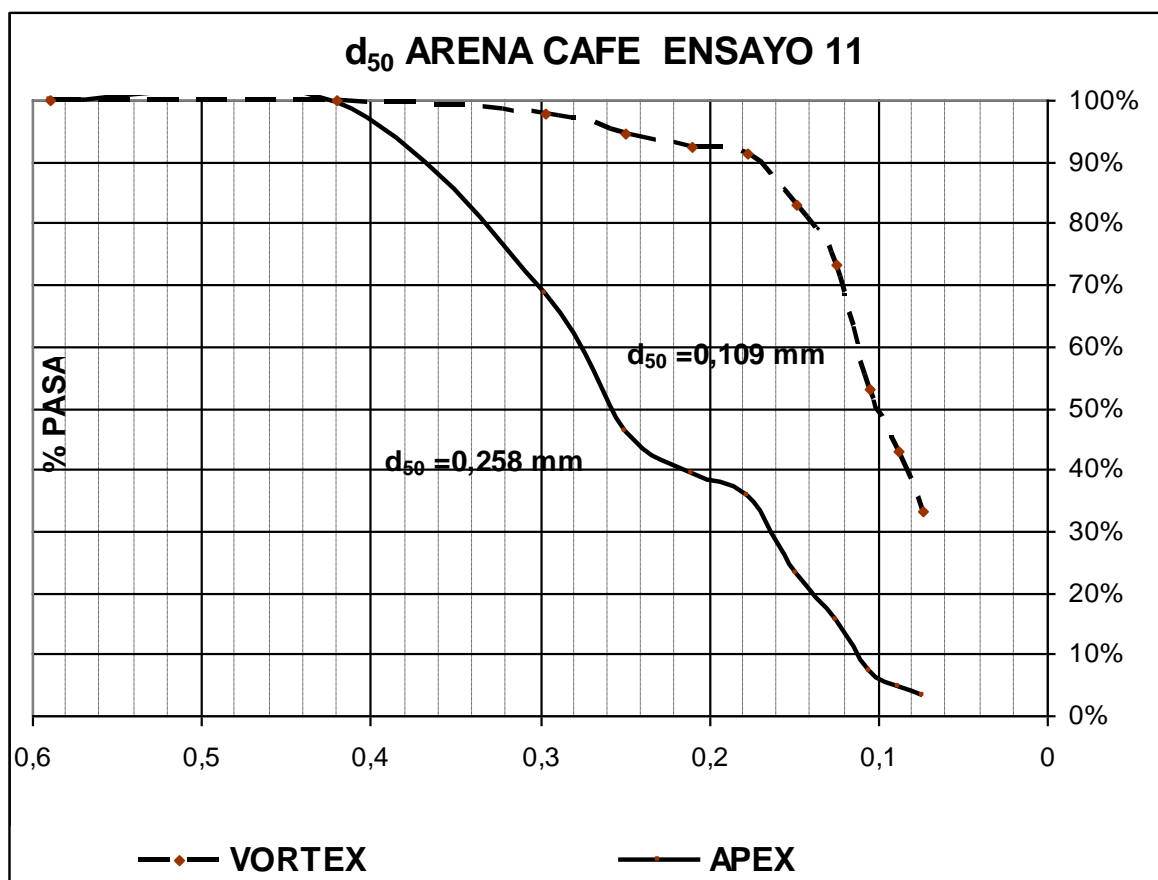
**Grafica 6.11** Curva Granulométrica Ensayo # 10

**Tabla 6.36** arena café Vortex  $Q_W - D_A + L_V - d_{50} + Q_S -$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	40,5	40,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	40,5	40,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
50	0,297	44	40,5	3,19	2,10%	2,10%	97,90%
60	0,25	45,3	40,5	4,82	3,17%	5,27%	94,73%
70	0,21	43,8	40,5	3,30	2,17%	7,44%	92,56%
80	0,177	42,3	40,5	1,77	1,17%	8,60%	91,40%
100	0,149	53,4	40,5	12,93	8,51%	17,11%	82,89%
120	0,125	54,9	40,5	14,45	9,51%	26,62%	73,38%
140	0,105	71,2	40,5	30,67	20,18%	46,80%	53,20%
170	0,088	56,0	40,5	15,46	10,17%	56,97%	43,03%
200	0,074	55,5	40,5	14,96	9,84%	66,81%	33,19%
pasa 200	0,062	90,9	40,5	50,45	33,19%	100,00%	0,00%
suma total				152,00	100,00%		

**Tabla 6.37** arena café ápex  $Q_W - D_A + L_V - d_{50} + Q_S -$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	34	34	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	35	34	1,00	0,20%	0,20%	99,80%
50	0,297	190	34	156,00	31,20%	31,40%	68,60%
60	0,25	146	34	112,00	22,40%	53,80%	46,20%
70	0,21	69	34	35,00	7,00%	60,80%	39,20%
80	0,177	52	34	18,00	3,60%	64,40%	35,60%
100	0,149	97	34	63,00	12,60%	77,00%	23,00%
120	0,125	72	34	38,00	7,60%	84,60%	15,40%
140	0,105	74	34	40,00	8,00%	92,60%	7,40%
170	0,088	48	34	14,00	2,80%	95,40%	4,60%
200	0,074	40	34	6,00	1,20%	96,60%	3,40%
pasa 200	0,062	51	34	17,00	3,40%	100,00%	0,00%
suma total				500	100,0%		



**Grafica 6.12** Curva Granulométrica Ensayo # 11

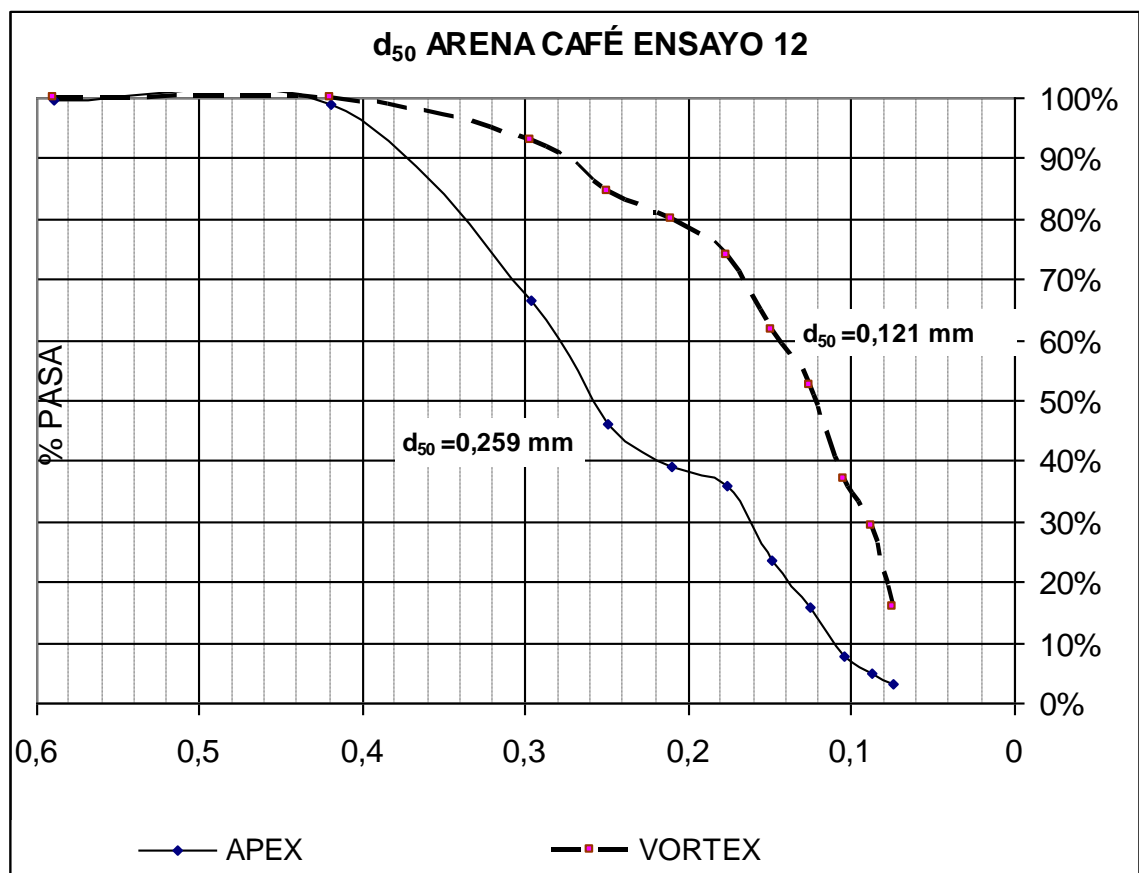
**Tabla 6.38** Arena café Vortex  $Q_W + D_A + L_V - d_{50} + Q_S -$

% Tamiz	Abertura [mm]	W + Reci [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	42,9	41,5	1,38	0,17%	0,17%	99,83%
50	0,297	95,7	41,5	54,17	6,86%	7,03%	92,97%
60	0,25	107,6	41,5	66,10	8,37%	15,40%	84,60%
70	0,21	79,1	41,5	37,64	4,76%	20,16%	79,84%
80	0,177	88,3	41,5	46,82	5,93%	26,09%	73,91%
100	0,149	138,8	41,5	97,32	12,32%	38,41%	61,59%
120	0,125	114,0	41,5	72,53	9,18%	47,59%	52,41%
140	0,105	164,5	41,5	123,02	15,57%	63,16%	36,84%
170	0,088	102,1	41,5	60,59	7,67%	70,83%	29,17%
200	0,074	148,0	41,5	106,50	13,48%	84,31%	15,69%
pasa 200	0,062	165,4	41,5	123,94	15,69%	100,00%	0,00%
suma total				790	100,00%		



**Tabla 6.39** Arena café ápex  $Q_W + D_A + L_V - d_{50} + Q_S -$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Reci [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	35	34	1,00	0,20%	0,20%	99,80%
40	0,42	39	34	5,00	1,00%	1,20%	98,80%
50	0,297	196	34	162,00	32,40%	33,60%	66,40%
60	0,25	135	34	101,00	20,20%	53,80%	46,20%
70	0,21	70	34	36,00	7,20%	61,00%	39,00%
80	0,177	50	34	16,00	3,20%	64,20%	35,80%
100	0,149	95	34	61,00	12,20%	76,40%	23,60%
120	0,125	72	34	38,00	7,60%	84,00%	16,00%
140	0,105	76	34	42,00	8,40%	92,40%	7,60%
170	0,088	48	34	14,00	2,80%	95,20%	4,80%
200	0,074	43	34	9,00	1,80%	97,00%	3,00%
pasa 200	0,062	49	34	15,00	3,00%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



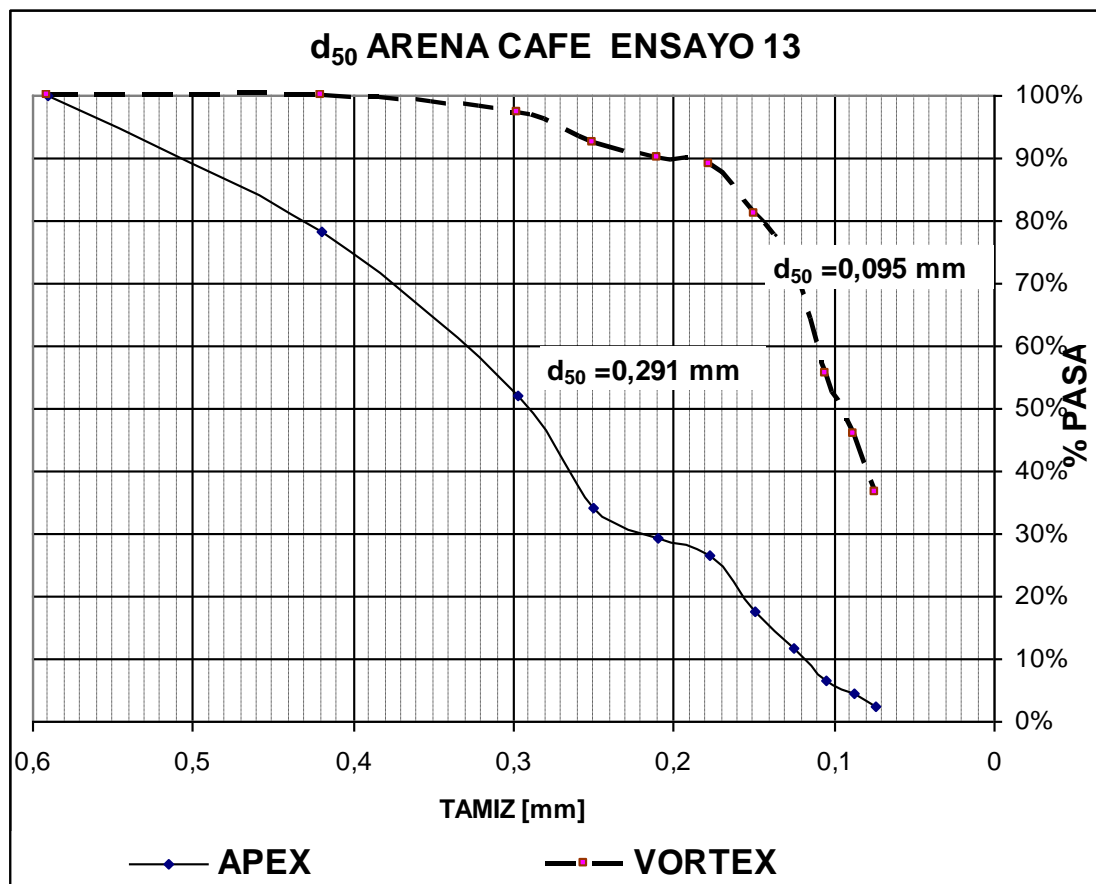
**Grafica 6.13** Curva Granulométrica Ensayo # 12

**Tabla 6.40** arena café Vortex  $Q_W - D_A - L_V + d_{50} + Q_S -$ 

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	37,5	37,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	37,5	37,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
50	0,297	47	37,5	9,50	2,62%	2,62%	97,38%
60	0,25	55	37,5	17,50	4,83%	7,46%	92,54%
70	0,21	47	37,5	9,50	2,62%	10,08%	89,92%
80	0,177	41	37,5	3,50	0,97%	11,05%	88,95%
100	0,149	66	37,5	28,50	7,87%	18,92%	81,08%
120	0,125	67	37,5	29,50	8,15%	27,07%	72,93%
140	0,105	101	37,5	63,50	17,54%	44,61%	55,39%
170	0,088	72	37,5	34,50	9,53%	54,14%	45,86%
200	0,074	71	37,5	33,50	9,25%	63,40%	36,60%
pasa 200	0,062	170	37,5	132,50	36,60%	100,00%	0,00%
suma total				362,00	100,00%		

**Tabla 6.41** arena café ápex  $Q_W - D_A - L_V + d_{50} + Q_S -$ 

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	78	78	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	185,9	78	107,90	21,58%	21,58%	78,42%
50	0,297	209,2	78	131,20	26,24%	47,82%	52,18%
60	0,25	168,3	78	90,30	18,06%	65,88%	34,12%
70	0,21	102,2	78	24,20	4,84%	70,72%	29,28%
80	0,177	91,1	78	13,10	2,62%	73,34%	26,66%
100	0,149	123	78	45,00	9,00%	82,34%	17,66%
120	0,125	108	78	30,00	6,00%	88,34%	11,66%
140	0,105	103,8	78	25,80	5,16%	93,50%	6,50%
170	0,088	88,4	78	10,40	2,08%	95,58%	4,42%
200	0,074	87,5	78	9,50	1,90%	97,48%	2,52%
pasa 200	0,062	90,6	78	12,60	2,52%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,00%		



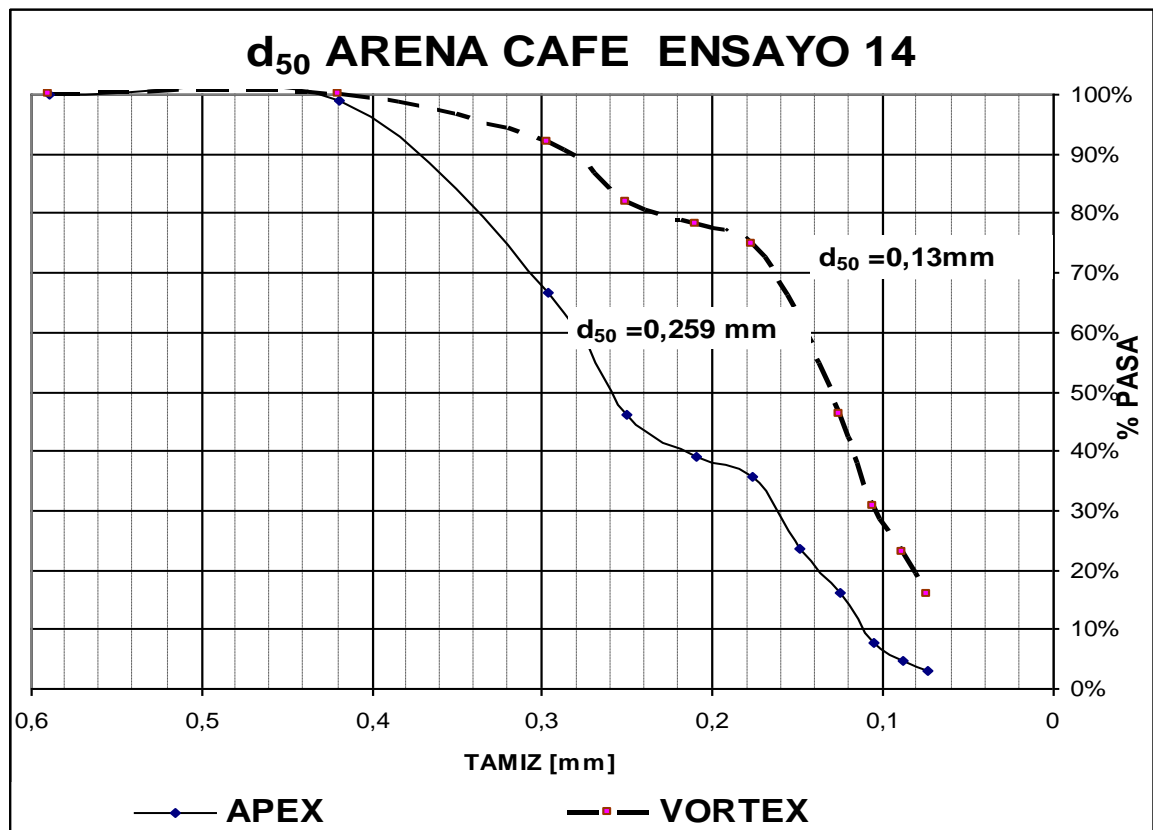
**Grafica 6.14** Curva Granulométrica Ensayo # 13

**Tabla 6.42** arena café Vortex  $Q_W + D_A - L_V + d_{50} + Q_S -$

Nº de Tamiz	1	2	3	4	5	6	7
	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	34	34	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	34,5	34	0,50	0,06%	0,06%	99,94%
50	0,297	102	34	68,00	7,90%	7,96%	92,04%
60	0,25	122,5	34	88,50	10,28%	18,23%	81,77%
70	0,21	65	34	31,00	3,60%	21,84%	78,16%
80	0,177	62	34	28,00	3,25%	25,09%	74,91%
100	0,149	143	34	109,00	12,66%	37,75%	62,25%
120	0,125	173	34	139,00	16,14%	53,89%	46,11%
140	0,105	168	34	134,00	15,56%	69,45%	30,55%
170	0,088	100	34	66,00	7,67%	77,12%	22,88%
200	0,074	96	34	62,00	7,20%	84,32%	15,68%
pasa 200	0,062	169	34	135,00	15,68%	100,00%	0,00%
suma total				<b>861,00</b>	<b>100,00%</b>		

**Tabla 6.43** arena café ápex  $Q_W + D_A - L_V + d_{50} + Q_S -$

Nº de Tamiz	1	2	3	4	5	6	7
	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	34	34	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	39,5	34	5,50	1,10%	1,10%	98,90%
50	0,297	196	34	162,00	32,40%	33,50%	66,50%
60	0,25	135,5	34	101,50	20,30%	53,80%	46,20%
70	0,21	70	34	36,00	7,20%	61,00%	39,00%
80	0,177	50	34	16,00	3,20%	64,20%	35,80%
100	0,149	95	34	61,00	12,20%	76,40%	23,60%
120	0,125	72	34	38,00	7,60%	84,00%	16,00%
140	0,105	76	34	42,00	8,40%	92,40%	7,60%
170	0,088	48	34	14,00	2,80%	95,20%	4,80%
200	0,074	43	34	9,00	1,80%	97,00%	3,00%
pasa 200	0,062	49	34	15,00	3,00%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	<b>100,00%</b>		



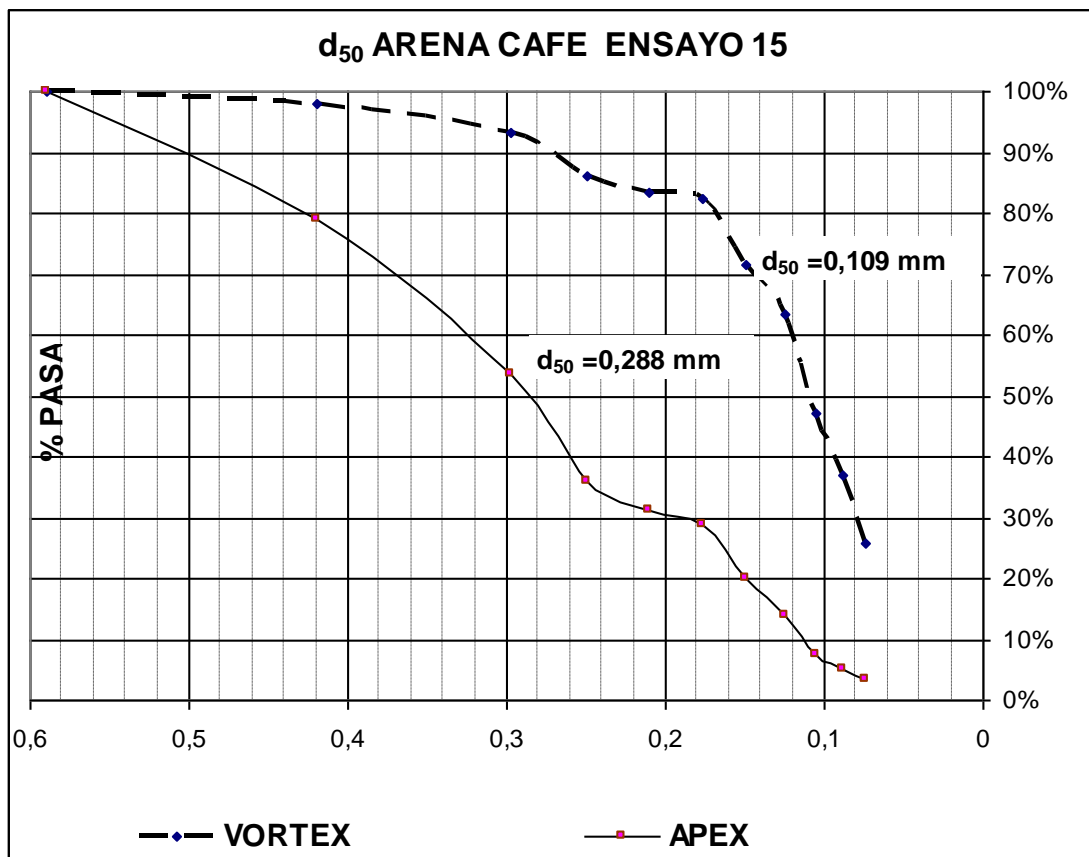
**Grafica 6.15** Curva Granulométrica Ensayo # 14

**Tabla 6.44** arena café Vortex  $Q_W - D_A + L_V + d_{50} + Q_S -$

Nº de Tamiz	1	2	3	4	5	6	7
	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	79,8	79,8	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	83,1	79,8	3,30	2,10%	2,10%	97,90%
50	0,297	87,4	79,8	7,60	4,84%	6,94%	93,06%
60	0,25	90,5	79,8	10,70	6,82%	13,76%	86,24%
70	0,21	84,4	79,8	4,60	2,93%	16,69%	83,31%
80	0,177	81,2	79,8	1,40	0,89%	17,58%	82,42%
100	0,149	97,1	79,8	17,30	11,02%	28,60%	71,40%
120	0,125	92,3	79,8	12,50	7,96%	36,56%	63,44%
140	0,105	105,6	79,8	25,80	16,43%	52,99%	47,01%
170	0,088	95,7	79,8	15,90	10,13%	63,12%	36,88%
200	0,074	97,3	79,8	17,50	11,15%	74,27%	25,73%
pasa 200	0,062	120,2	79,8	40,40	25,73%	100,00%	0,00%
suma total				157,00	100,00%		

**Tabla 6.45** arena café apex  $Q_W - D_A + L_V + d_{50} + Q_S -$

Nº de Tamiz	1	2	3	4	5	6	7
	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	78	78	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	185,9	78	107,90	20,97%	20,97%	79,03%
50	0,297	209,2	78	131,20	25,50%	46,47%	53,53%
60	0,25	168,3	78	90,30	17,55%	64,02%	35,98%
70	0,21	102,2	78	24,20	4,70%	68,73%	31,27%
80	0,177	91,1	78	13,10	2,55%	71,27%	28,73%
100	0,149	123,5	78	45,50	8,84%	80,12%	19,88%
120	0,125	108	78	30,00	5,83%	85,95%	14,05%
140	0,105	111,8	78	33,80	6,57%	92,52%	7,48%
170	0,088	90,4	78	12,40	2,41%	94,93%	5,07%
200	0,074	87,5	78	9,50	1,85%	96,77%	3,23%
pasa 200	0,062	94,6	78	16,60	3,23%	100,00%	0,00%
suma total				514,50	100,0%		



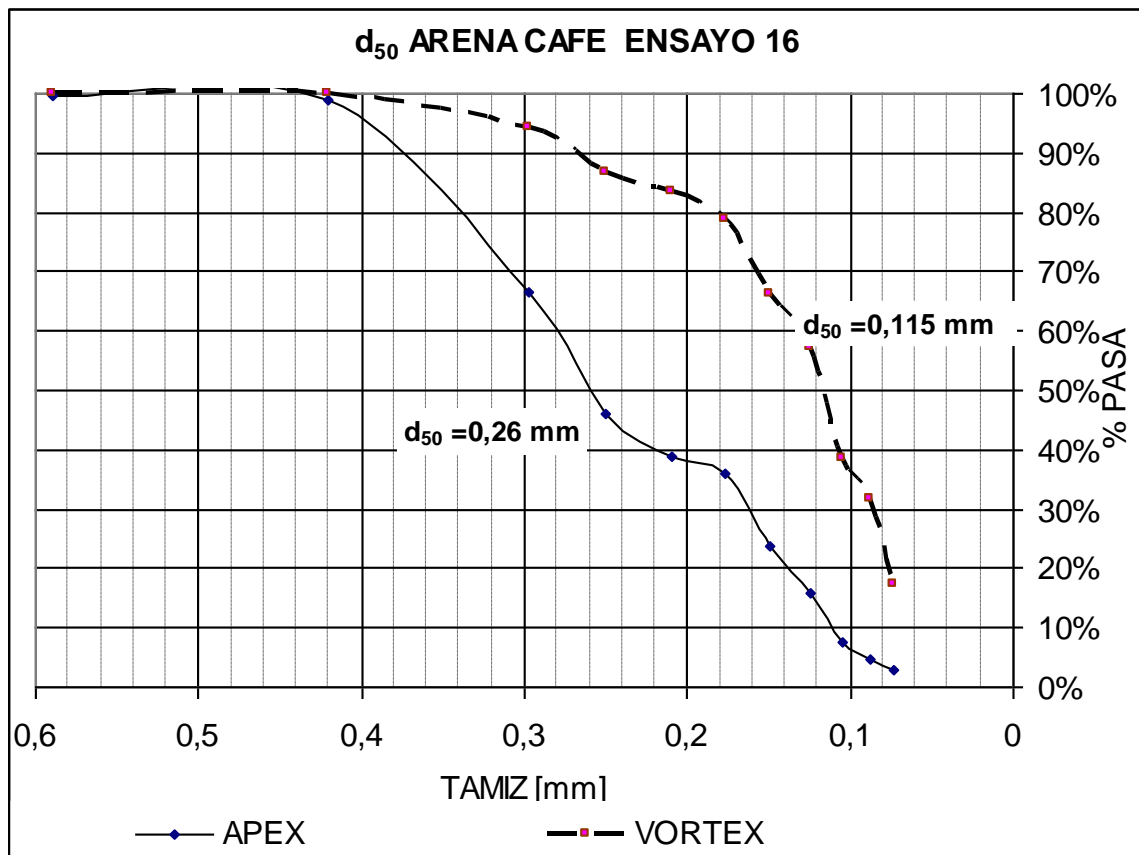
**Grafica 6.16** Curva Granulométrica Ensayo # 15

**Tabla 6.46** arena café Vortex Q<sub>W</sub> + D<sub>A</sub> + L<sub>V</sub> + d<sub>50</sub> + Q<sub>S</sub> -

Nº de Tamiz	1	2	3	4	5	6	7
	Abertura [mm]	W + Reci [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	45	45	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	45	45	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
50	0,297	74,2	45	29,20	5,76%	5,76%	94,24%
60	0,25	84,2	45	39,20	7,73%	13,49%	86,51%
70	0,21	60,4	45	15,40	3,04%	16,53%	83,47%
80	0,177	68	45	23,00	4,54%	21,06%	78,94%
100	0,149	110,3	45	65,30	12,88%	33,94%	66,06%
120	0,125	89,6	45	44,60	8,80%	42,73%	57,27%
140	0,105	139,5	45	94,50	18,64%	61,37%	38,63%
170	0,088	79,6	45	34,60	6,82%	68,19%	31,81%
200	0,074	118	45	73,00	14,40%	82,59%	17,41%
pasa 200	0,062	133,3	45	88,30	17,41%	100,00%	0,00%
suma total				507	100,00%		

**Tabla 6.47** arena café ápex  $Q_W + D_A + L_V + d_{50} + Q_S -$

Nº de Tamiz	1	2	3	4	5	6	7
	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	35	34	1,00	0,20%	0,20%	99,80%
40	0,42	39	34	5,00	1,00%	1,20%	98,80%
50	0,297	196	34	162,00	32,40%	33,60%	66,40%
60	0,25	135	34	101,00	20,20%	53,80%	46,20%
70	0,21	70	34	36,00	7,20%	61,00%	39,00%
80	0,177	50	34	16,00	3,20%	64,20%	35,80%
100	0,149	95	34	61,00	12,20%	76,40%	23,60%
120	0,125	72	34	38,00	7,60%	84,00%	16,00%
140	0,105	76	34	42,00	8,40%	92,40%	7,60%
170	0,088	48	34	14,00	2,80%	95,20%	4,80%
200	0,074	43	34	9,00	1,80%	97,00%	3,00%
pasa 200	0,062	49	34	15,00	3,00%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



**Grafica 6.17** Curva Granulométrica Ensaio # 16

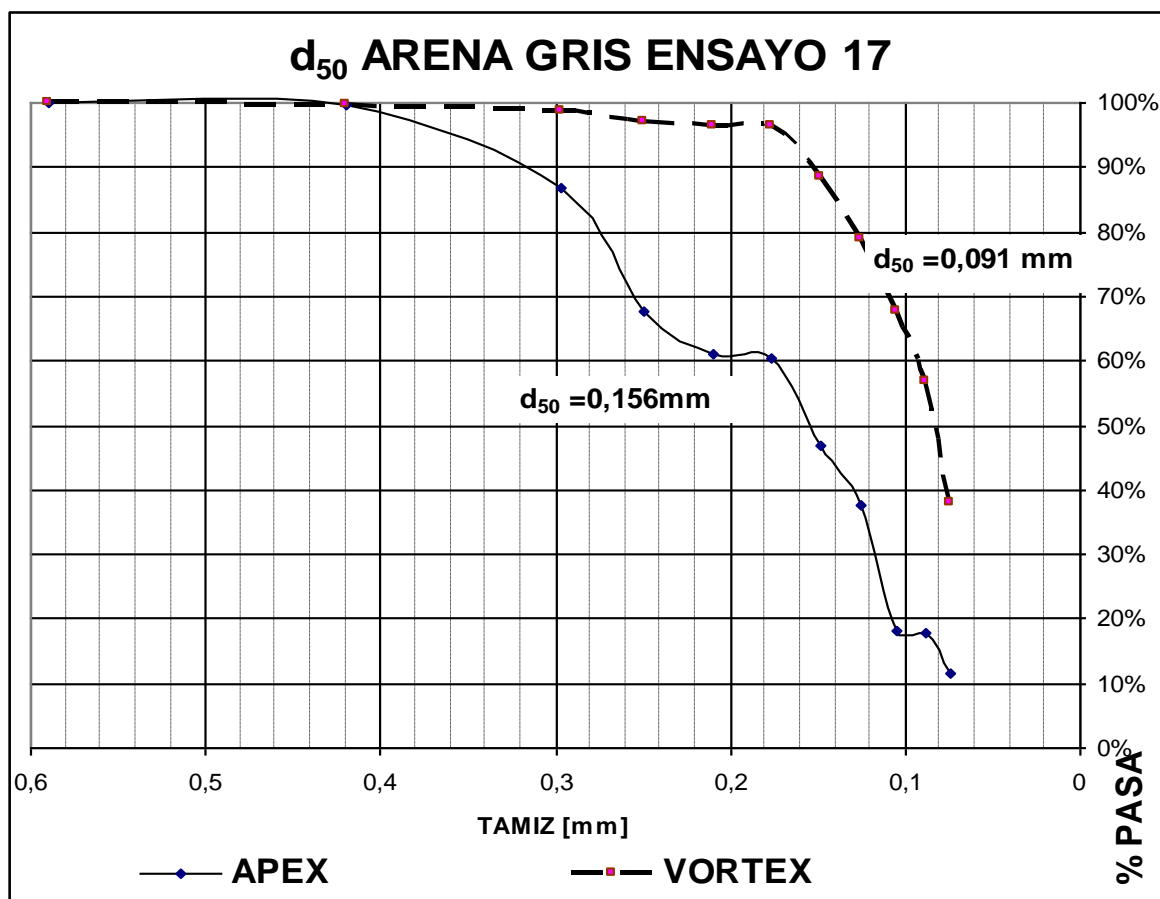
**Tabla 6.48** arena gris Vortex  $Q_W - D_A - L_V - d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	81,6	80,5	1,10	0,28%	0,28%	99,72%
50	0,297	84,4	80,5	3,90	0,98%	1,26%	98,74%
60	0,25	87,8	80,5	7,30	1,83%	3,09%	96,91%
70	0,21	82,4	80,5	1,90	0,48%	3,57%	96,43%
80	0,177	81,2	80,5	0,70	0,18%	3,74%	96,26%
100	0,149	112	80,5	31,50	7,91%	11,66%	88,34%
120	0,125	118,8	80,5	38,30	9,62%	21,28%	78,72%
140	0,105	124,6	80,5	44,10	11,08%	32,36%	67,64%
170	0,088	124	80,5	43,50	10,93%	43,29%	56,71%
200	0,074	155	80,5	74,50	18,72%	62,01%	37,99%
pasa 200	0,062	231,7	80,5	151,20	37,99%	100,00%	0,00%
suma total				<b>398,00</b>	100,0%		

**Tabla 6.49** arena gris ápex  $Q_W - D_A - L_V - d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80	80	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	82,3	80	2,30	0,46%	0,46%	99,54%
50	0,297	143,8	80	63,80	12,76%	13,22%	86,78%
60	0,25	176	80	96,00	19,20%	32,42%	67,58%
70	0,21	112,5	80	32,50	6,50%	38,92%	61,08%
80	0,177	84	80	4,00	0,80%	39,72%	60,28%
100	0,149	146,8	80	66,80	13,36%	53,08%	46,92%
120	0,125	127,1	80	47,10	9,42%	62,50%	37,50%
140	0,105	176,6	80	96,60	19,32%	81,82%	18,18%
170	0,088	81,6	80	1,60	0,32%	82,14%	17,86%
200	0,074	111	80	31,00	6,20%	88,34%	11,66%
pasa 200	0,062	138,3	80	58,30	11,66%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		





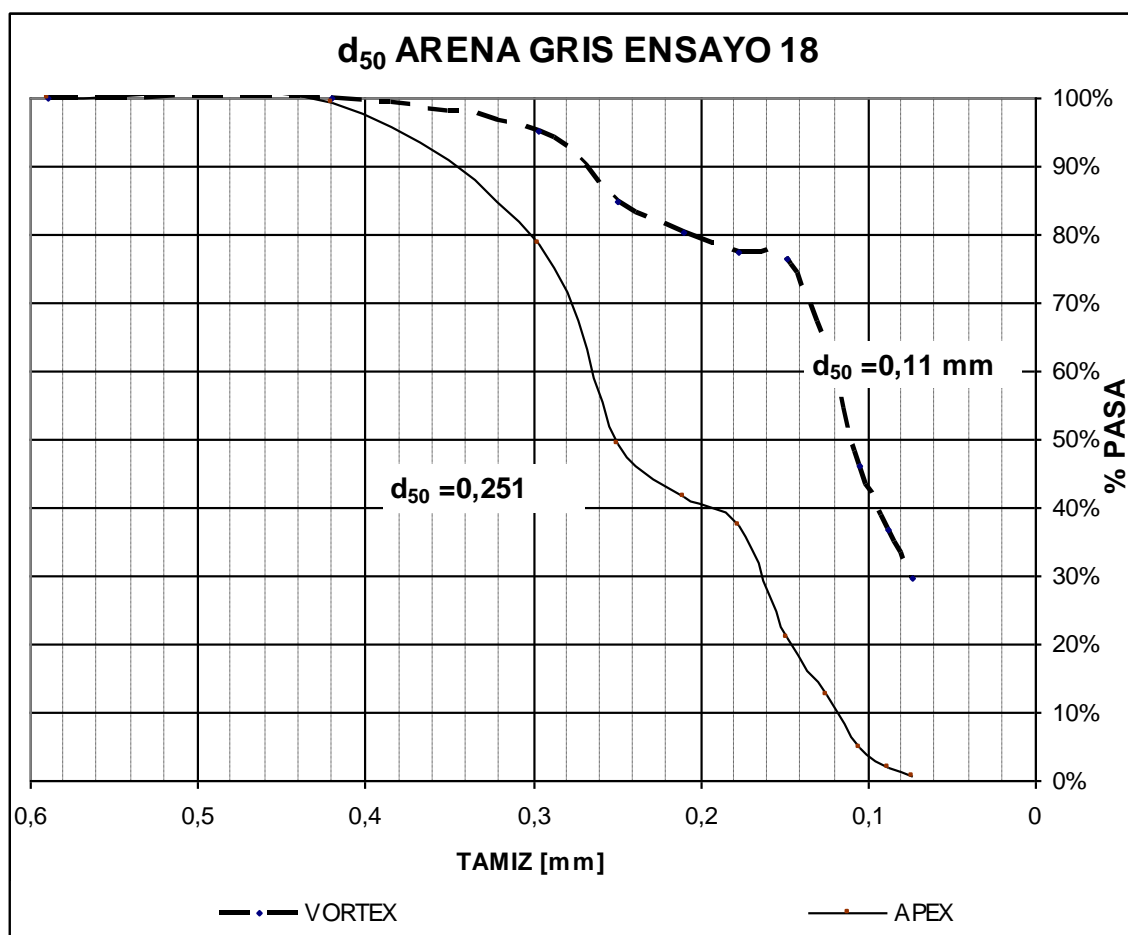
**Grafica 6.18** Curva Granulométrica Ensayo # 17

Tabla 6.50 arena negra gris  $Q_W + D_A - L_V - d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	81,5	80,5	1,00	0,16%	0,16%	99,84%
50	0,297	109	80,5	28,50	4,53%	4,69%	95,31%
60	0,25	146	80,5	65,50	10,41%	15,10%	84,90%
70	0,21	109	80,5	28,50	4,53%	19,63%	80,37%
80	0,177	99	80,5	18,50	2,94%	22,58%	77,42%
100	0,149	86,5	80,5	6,00	0,95%	23,53%	76,47%
120	0,125	164	80,5	83,50	13,28%	36,80%	63,20%
140	0,105	187	80,5	106,50	16,93%	53,74%	46,26%
170	0,088	140	80,5	59,50	9,46%	63,20%	36,80%
200	0,074	125	80,5	44,50	7,07%	70,27%	29,73%
pasa 200	0,062	267,5	80,5	187,00	29,73%	100,00%	0,00%
suma total				629,00	100,0%		

**Tabla 6.51** arena gris ápex  $Q_W + D_A - L_V - d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	44	41,5	2,50	0,50%	0,50%	99,50%
50	0,297	145	41,5	103,50	20,70%	21,20%	78,80%
60	0,25	189	41,5	147,50	29,50%	50,70%	49,30%
70	0,21	80	41,5	38,50	7,70%	58,40%	41,60%
80	0,177	62,5	41,5	21,00	4,20%	62,60%	37,40%
100	0,149	124	41,5	82,50	16,50%	79,10%	20,90%
120	0,125	83	41,5	41,50	8,30%	87,40%	12,60%
140	0,105	81	41,5	39,50	7,90%	95,30%	4,70%
170	0,088	55	41,5	13,50	2,70%	98,00%	2,00%
200	0,074	48	41,5	6,50	1,30%	99,30%	0,70%
pasa 200	0,062	45	41,5	3,50	0,70%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



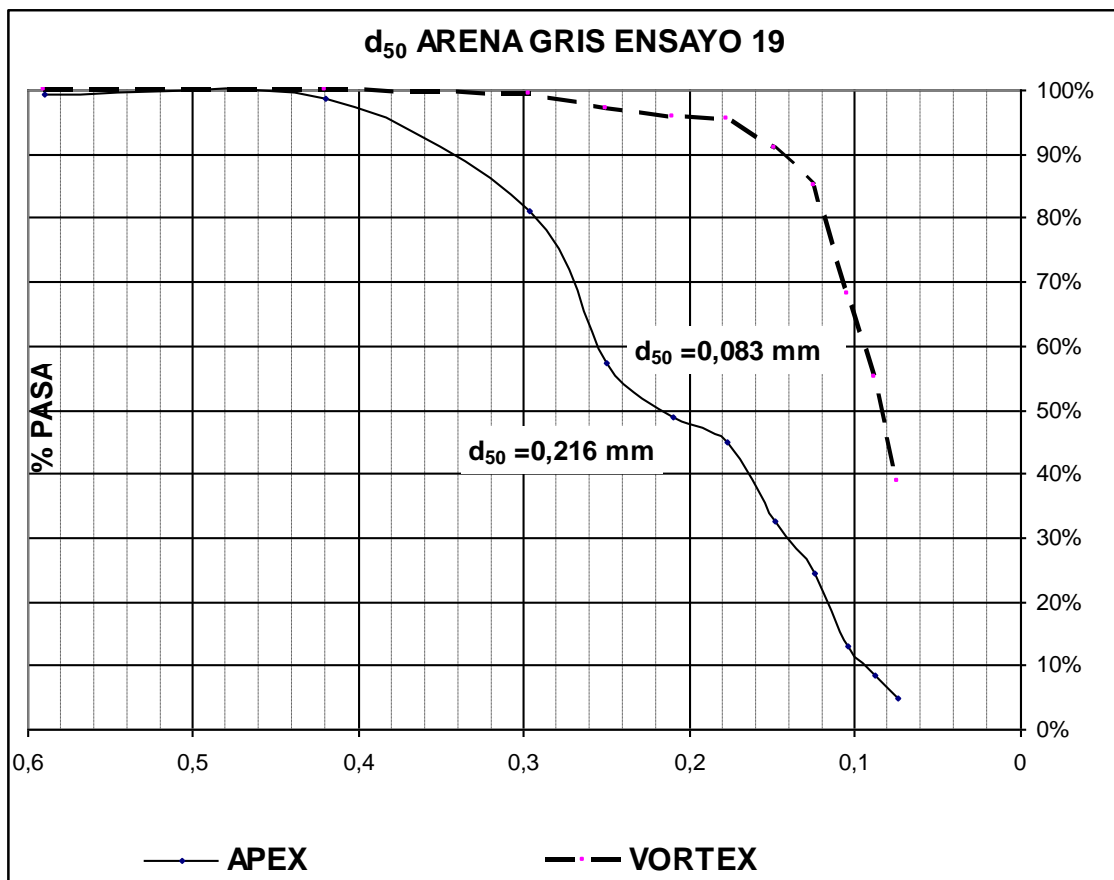
**Grafica 6.19** Curva Granulométrica Ensayo # 18

**Tabla 6.52** arena gris Vortex  $Q_W - D_A + L_V - d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
50	0,297	82,3	80,5	1,80	0,57%	0,57%	99,43%
60	0,25	87,5	80,5	7,00	2,22%	2,79%	97,21%
70	0,21	84,6	80,5	4,10	1,30%	4,10%	95,90%
80	0,177	81,8	80,5	1,30	0,41%	4,51%	95,49%
100	0,149	95,1	80,5	14,60	4,63%	9,14%	90,86%
120	0,125	98,5	80,5	18,00	5,71%	14,86%	85,14%
140	0,105	133,8	80,5	53,30	16,92%	31,78%	68,22%
170	0,088	122,1	80,5	41,60	13,21%	44,98%	55,02%
200	0,074	131,8	80,5	51,30	16,29%	61,27%	38,73%
pasa 200	0,062	202,5	80,5	122,00	38,73%	100,00%	0,00%
suma total				315,00	100,0%		

**Tabla 6.53** arena gris ápeX  $Q_W - D_A + L_V - d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	44	41,5	2,50	0,50%	0,50%	99,50%
40	0,42	46	41,5	4,50	0,90%	1,40%	98,60%
50	0,297	129	41,5	87,50	17,50%	18,90%	81,10%
60	0,25	160	41,5	118,50	23,70%	42,60%	57,40%
70	0,21	85	41,5	43,50	8,70%	51,30%	48,70%
80	0,177	61	41,5	19,50	3,90%	55,20%	44,80%
100	0,149	103	41,5	61,50	12,30%	67,50%	32,50%
120	0,125	82	41,5	40,50	8,10%	75,60%	24,40%
140	0,105	99	41,5	57,50	11,50%	87,10%	12,90%
170	0,088	64	41,5	22,50	4,50%	91,60%	8,40%
200	0,074	59	41,5	17,50	3,50%	95,10%	4,90%
pasa 200	0,062	66	41,5	24,50	4,90%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



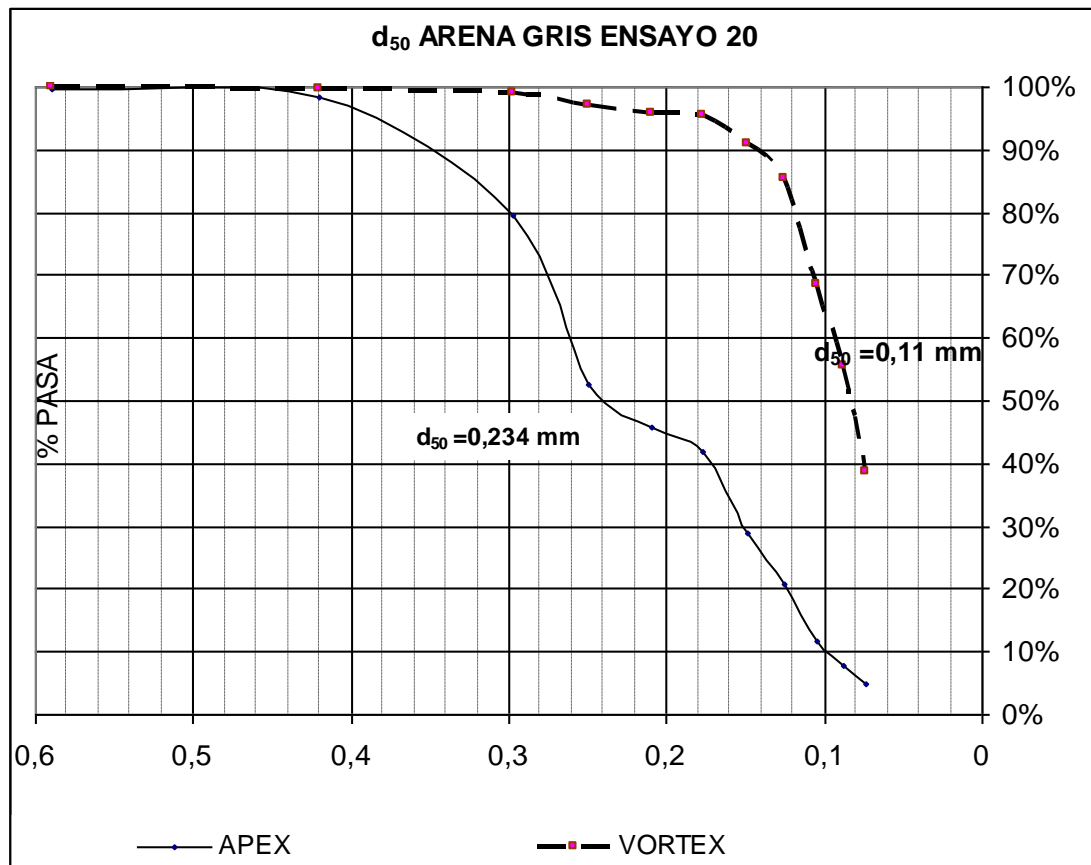
**Grafica 6.20** Curva Granulométrica Ensayo # 19

**Tabla 6.54** arena gris Vortex  $Q_W + D_A + L_V - d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80,5	80,5	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	82,9	80,5	2,4	0,37%	0,37%	99,63%
50	0,297	84,2	80,5	3,7	0,56%	0,93%	99,07%
60	0,25	94	80,5	13,5	2,06%	2,99%	97,01%
70	0,21	89,1	80,5	8,6	1,31%	4,30%	95,70%
80	0,177	82,9	80,5	2,4	0,37%	4,66%	95,34%
100	0,149	109,9	80,5	29,4	4,48%	9,15%	90,85%
120	0,125	117,2	80,5	36,7	5,59%	14,74%	85,26%
140	0,105	189,4	80,5	108,9	16,60%	31,34%	68,66%
170	0,088	166,2	80,5	85,7	13,06%	44,41%	55,59%
200	0,074	191,9	80,5	111,4	16,98%	61,39%	38,61%
pasa 200	0,062	333,8	80,5	253,3	38,61%	100,00%	0,00%
suma total				656,0	100,0%		

**Tabla 6.55** arena gris ápex  $Q_W + D_A + L_V - d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Reci [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	43,5	41,5	2,00	0,40%	0,40%	99,6%
40	0,42	47	41,5	5,50	1,10%	1,50%	98,5%
50	0,297	137	41,5	95,50	19,10%	20,60%	79,4%
60	0,25	175	41,5	133,50	26,70%	47,30%	52,7%
70	0,21	76	41,5	34,50	6,90%	54,20%	45,8%
80	0,177	61	41,5	19,50	3,90%	58,10%	41,9%
100	0,149	106	41,5	64,50	12,90%	71,00%	29,0%
120	0,125	82	41,5	40,50	8,10%	79,10%	20,9%
140	0,105	88	41,5	46,50	9,30%	88,40%	11,6%
170	0,088	61	41,5	19,50	3,90%	92,30%	7,7%
200	0,074	56	41,5	14,50	2,90%	95,20%	4,8%
pasa 200	0,062	65,5	41,5	24,00	4,80%	100,00%	0,0%
suma total				500	100,0%		



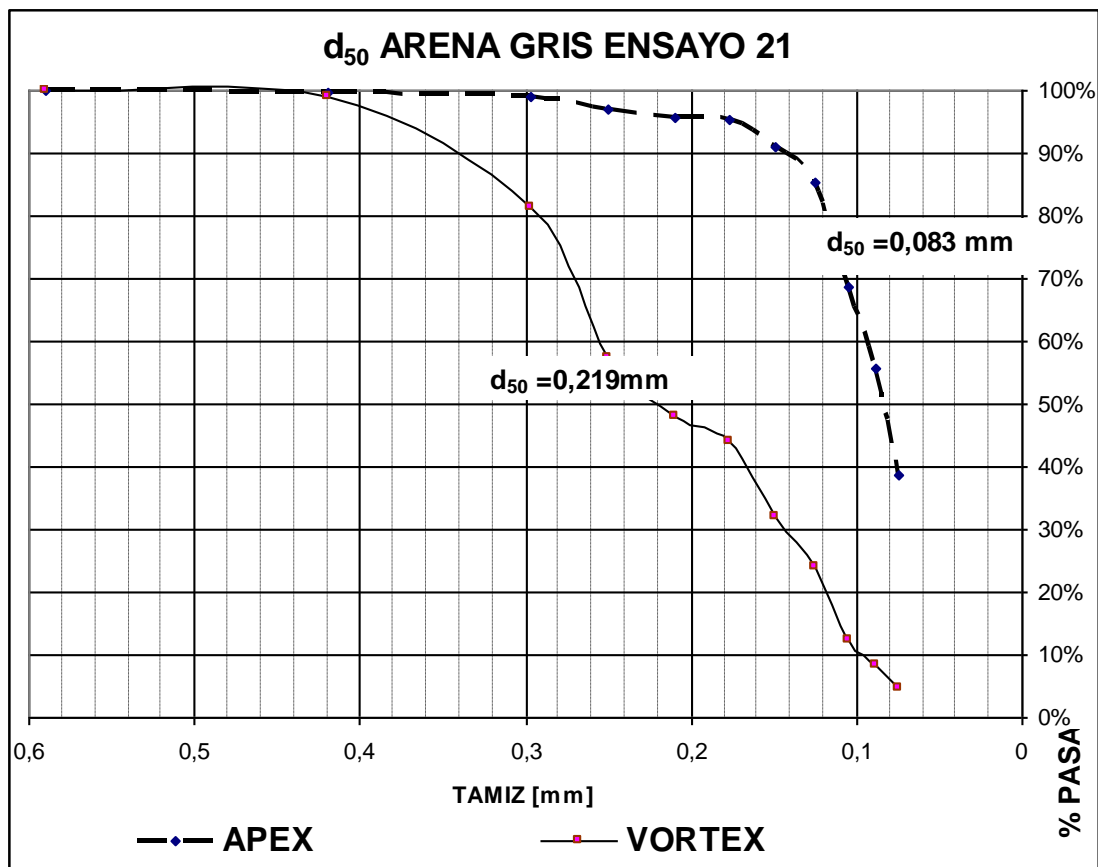
**Grafica 6.21** Curva Granulométrica Ensayo # 20

**Tabla 6.56** arena gris Vortex  $Q_W - D_A - L_V + d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	81,5	80,5	1,00	0,37%	0,37%	99,63%
50	0,297	82	80,5	1,50	0,56%	0,93%	99,07%
60	0,25	86	80,5	5,50	2,05%	2,99%	97,01%
70	0,21	84	80,5	3,50	1,31%	4,29%	95,71%
80	0,177	81,5	80,5	1,00	0,37%	4,66%	95,34%
100	0,149	92,5	80,5	12,00	4,48%	9,14%	90,86%
120	0,125	95,5	80,5	15,00	5,60%	14,74%	85,26%
140	0,105	125	80,5	44,50	16,60%	31,34%	68,66%
170	0,088	115,5	80,5	35,00	13,06%	44,40%	55,60%
200	0,074	126	80,5	45,50	16,98%	61,38%	38,62%
pasa 200	0,062	184	80,5	103,50	38,62%	100,00%	0,00%
suma total				268,00	100,0%		

**Tabla 6.57** arena gris ápex  $Q_W - D_A - L_V + d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	42	42	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	47	42	5,00	1,00%	1,00%	99,00%
50	0,297	129,5	42	87,50	17,50%	18,50%	81,50%
60	0,25	163	42	121,00	24,20%	42,70%	57,30%
70	0,21	89	42	47,00	9,40%	52,10%	47,90%
80	0,177	61	42	19,00	3,80%	55,90%	44,10%
100	0,149	103	42	61,00	12,20%	68,10%	31,90%
120	0,125	82	42	40,00	8,00%	76,10%	23,90%
140	0,105	99	42	57,00	11,40%	87,50%	12,50%
170	0,088	63,5	42	21,50	4,30%	91,80%	8,20%
200	0,074	59	42	17,00	3,40%	95,20%	4,80%
pasa 200	0,062	66	42	24,00	4,80%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



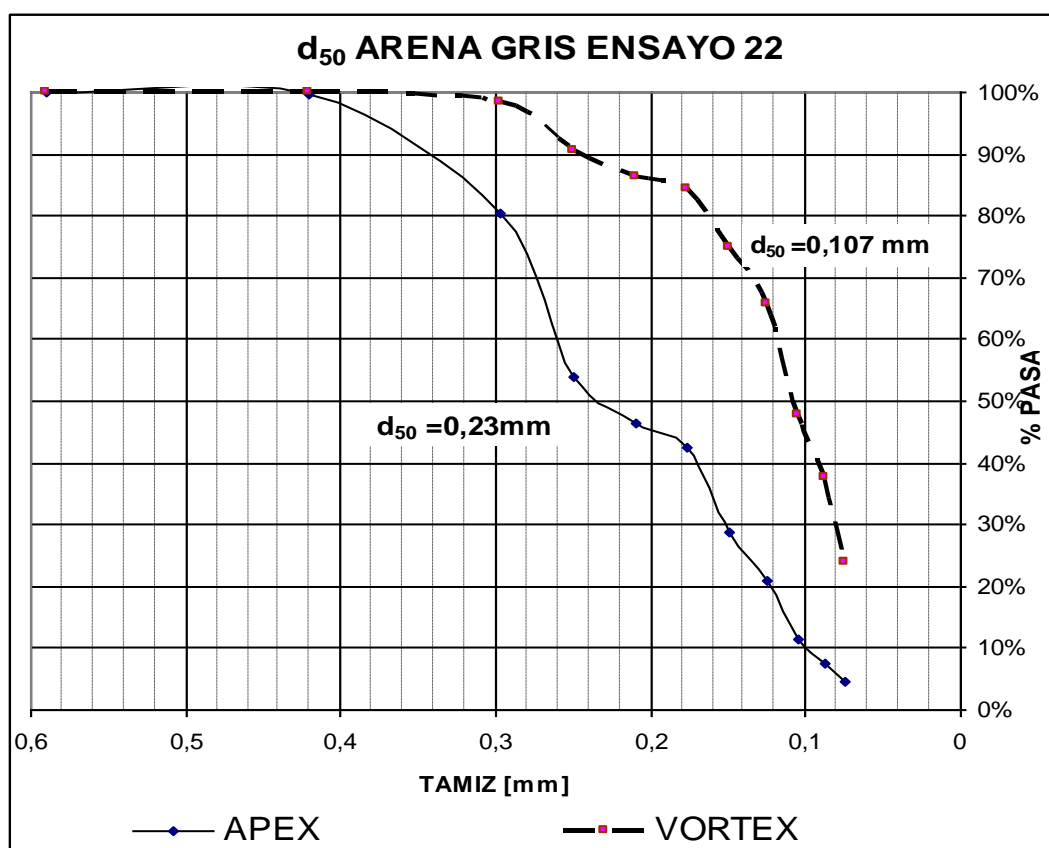
**Grafica 6.22** Curva Granulométrica Ensayo # 21

**Tabla 6.58** arena gris Vortex  $Q_W + D_A - L_V + d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80	80	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	80,8	80	0,80	0,12%	0,12%	99,88%
50	0,297	90,5	80	10,50	1,60%	1,72%	98,28%
60	0,25	130,1	80	50,10	7,64%	9,36%	90,64%
70	0,21	108	80	28,00	4,27%	13,63%	86,37%
80	0,177	93	80	13,00	1,98%	15,61%	84,39%
100	0,149	142,1	80	62,10	9,47%	25,08%	74,92%
120	0,125	140	80	60,00	9,15%	34,22%	65,78%
140	0,105	198	80	118,00	17,99%	52,21%	47,79%
170	0,088	148	80	68,00	10,37%	62,58%	37,42%
200	0,074	170	80	90,00	13,72%	76,30%	23,70%
pasa 200	0,062	235,5	80	155,50	23,70%	100,00%	0,00%
suma total				656,00	100,0%		

**Tabla 6.59** arena gris ápeex  $Q_W + D_A - L_V + d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	43,5	41,5	2,00	0,40%	0,40%	99,60%
50	0,297	137	41,5	95,50	19,10%	19,50%	80,50%
60	0,25	175	41,5	133,50	26,70%	46,20%	53,80%
70	0,21	79	41,5	37,50	7,50%	53,70%	46,30%
80	0,177	61	41,5	19,50	3,90%	57,60%	42,40%
100	0,149	109	41,5	67,50	13,50%	71,10%	28,90%
120	0,125	82	41,5	40,50	8,10%	79,20%	20,80%
140	0,105	88	41,5	46,50	9,30%	88,50%	11,50%
170	0,088	61	41,5	19,50	3,90%	92,40%	7,60%
200	0,074	56	41,5	14,50	2,90%	95,30%	4,70%
pasa 200	0,062	65	41,5	23,50	4,70%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



**Grafica 6.23** Curva Granulométrica Ensayo # 22

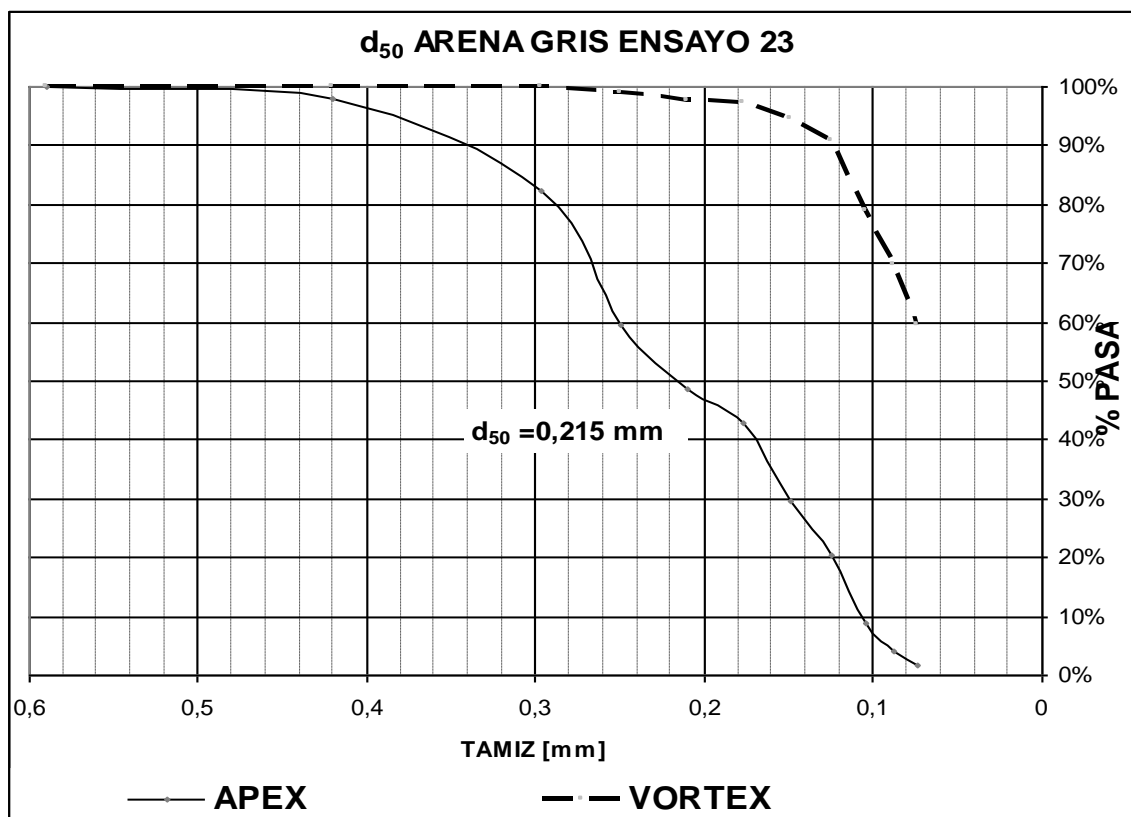


**Tabla 6.60** arena gris Vortex  $Q_W - D_A + L_V - d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
50	0,297	42	41,5	0,50	0,15%	0,15%	99,85%
60	0,25	44,5	41,5	3,00	0,93%	1,08%	98,92%
70	0,21	45,5	41,5	4,00	1,24%	2,32%	97,68%
80	0,177	42,5	41,5	1,00	0,31%	2,63%	97,37%
100	0,149	50,5	41,5	9,00	2,79%	5,42%	94,58%
120	0,125	53,5	41,5	12,00	3,72%	9,13%	90,87%
140	0,105	80,5	41,5	39,00	12,07%	21,21%	78,79%
170	0,088	70,5	41,5	29,00	8,98%	30,19%	69,81%
200	0,074	74,5	41,5	33,00	10,22%	40,40%	59,60%
pasa 200	0,062	234	41,5	192,50	59,60%	100,00%	0,00%
suma total				<b>323,00</b>	100,0%		

**Tabla 6.61** arena gris ápex  $Q_W - D_A + L_V - d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	52	41,5	10,50	2,10%	2,10%	97,90%
50	0,297	119,5	41,5	78,00	15,60%	17,70%	82,30%
60	0,25	156	41,5	114,50	22,90%	40,60%	59,40%
70	0,21	95	41,5	53,50	10,70%	51,30%	48,70%
80	0,177	70	41,5	28,50	5,70%	57,00%	43,00%
100	0,149	109	41,5	67,50	13,50%	70,50%	29,50%
120	0,125	87	41,5	45,50	9,10%	79,60%	20,40%
140	0,105	99	41,5	57,50	11,50%	91,10%	8,90%
170	0,088	66	41,5	24,50	4,90%	96,00%	4,00%
200	0,074	53	41,5	11,50	2,30%	98,30%	1,70%
pasa 200	0,062	50	41,5	8,50	1,70%	100,00%	0,00%
suma total				<b>500,00</b>	100,0%		



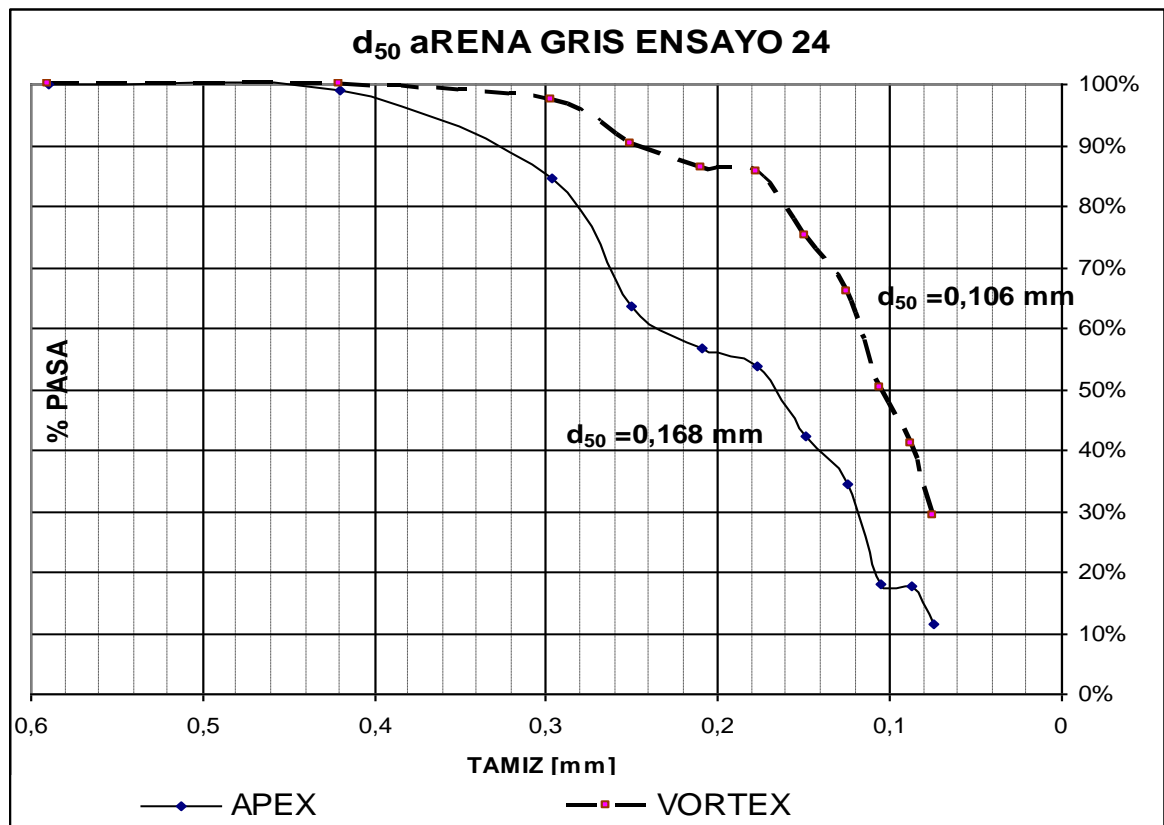
**Grafica 6.24** Curva Granulométrica Ensayo # 23

**Tabla 6.62** arena gris Vortex  $Q_W + D_A + L_V + d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Reci [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80	80	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	80,6	80	0,60	0,13%	0,13%	99,87%
50	0,297	90,6	80	10,60	2,38%	2,52%	97,48%
60	0,25	112,5	80	32,50	7,30%	9,82%	90,18%
70	0,21	97,5	80	17,50	3,93%	13,75%	86,25%
80	0,177	83,3	80	3,30	0,74%	14,49%	85,51%
100	0,149	126,6	80	46,60	10,47%	24,96%	75,04%
120	0,125	120	80	40,00	8,98%	33,94%	66,06%
140	0,105	151,3	80	71,30	16,02%	49,96%	50,04%
170	0,088	121	80	41,00	9,21%	59,16%	40,84%
200	0,074	131,8	80	51,80	11,64%	70,80%	29,20%
pasa 200	0,062	210	80	130,00	29,20%	100,00%	0,00%
suma total				445,20	100,0%		

**Tabla 6.63** arena gris ápex  $Q_W + D_A + L_V + d_{50} - Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recl [gr]	W recl [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80	80	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	84,2	80	4,20	0,84%	0,84%	99,16%
50	0,297	152,8	80	72,80	14,56%	15,40%	84,60%
60	0,25	185,7	80	105,70	21,14%	36,54%	63,46%
70	0,21	113,3	80	33,30	6,66%	43,20%	56,80%
80	0,177	95,6	80	15,60	3,12%	46,32%	53,68%
100	0,149	136,8	80	56,80	11,36%	57,68%	42,32%
120	0,125	119,8	80	39,80	7,96%	65,64%	34,36%
140	0,105	161	80	81,00	16,20%	81,84%	18,16%
170	0,088	81,7	80	1,70	0,34%	82,18%	17,82%
200	0,074	111,4	80	31,40	6,28%	88,46%	11,54%
pasa 200	0,062	137,7	80	57,70	11,54%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



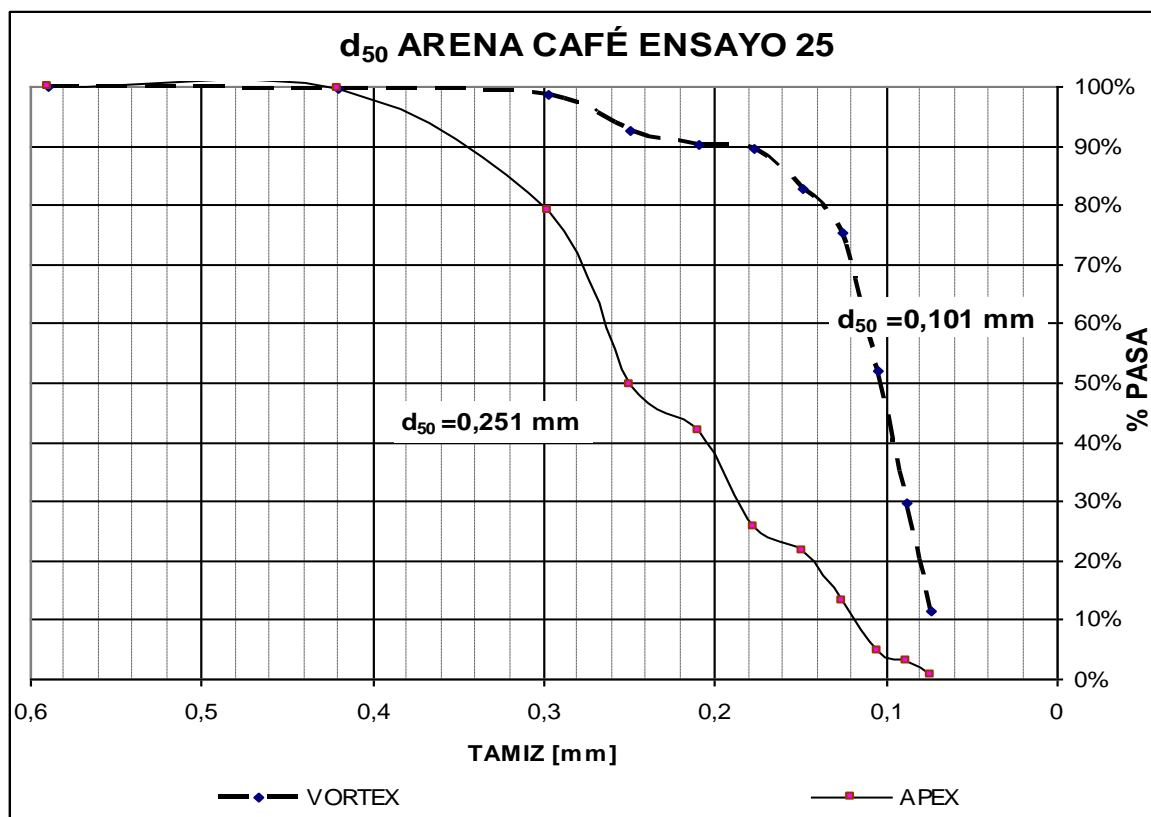
**Grafica 6.25** Curva Granulométrica Ensayo # 24

**Tabla 6.64** arena café Vortex  $Q_W - D_A - L_V - d_{50} + Q_S +$ 

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	81,5	80,5	1,00	0,43%	0,43%	99,57%
50	0,297	83	80,5	2,50	1,07%	1,50%	98,50%
60	0,25	94	80,5	13,50	5,79%	7,30%	92,70%
70	0,21	86,5	80,5	6,00	2,58%	9,87%	90,13%
80	0,177	82	80,5	1,50	0,64%	10,52%	89,48%
100	0,149	96	80,5	15,50	6,65%	17,17%	82,83%
120	0,125	98	80,5	17,50	7,51%	24,68%	75,32%
140	0,105	135	80,5	54,50	23,39%	48,07%	51,93%
170	0,088	132	80,5	51,50	22,10%	70,17%	29,83%
200	0,074	123	80,5	42,50	18,24%	88,41%	11,59%
pasa 200	0,062	107,5	80,5	27,00	11,59%	100,00%	0,00%
suma total				233,00	100,0%		

**Tabla 6.65** arena café ápex  $Q_W - D_A - L_V - d_{50} + Q_S +$ 

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	42	42	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	44	42	2,00	0,40%	0,40%	99,60%
50	0,297	145	42	103,00	20,60%	21,00%	79,00%
60	0,25	189	42	147,00	29,40%	50,40%	49,60%
70	0,21	80	42	38,00	7,60%	58,00%	42,00%
80	0,177	124	42	82,00	16,40%	74,40%	25,60%
100	0,149	62	42	20,00	4,00%	78,40%	21,60%
120	0,125	84	42	42,00	8,40%	86,80%	13,20%
140	0,105	85	42	43,00	8,60%	95,40%	4,60%
170	0,088	49	42	7,00	1,40%	96,80%	3,20%
200	0,074	55	42	13,00	2,60%	99,40%	0,60%
pasa 200	0,062	45	42	3,00	0,60%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



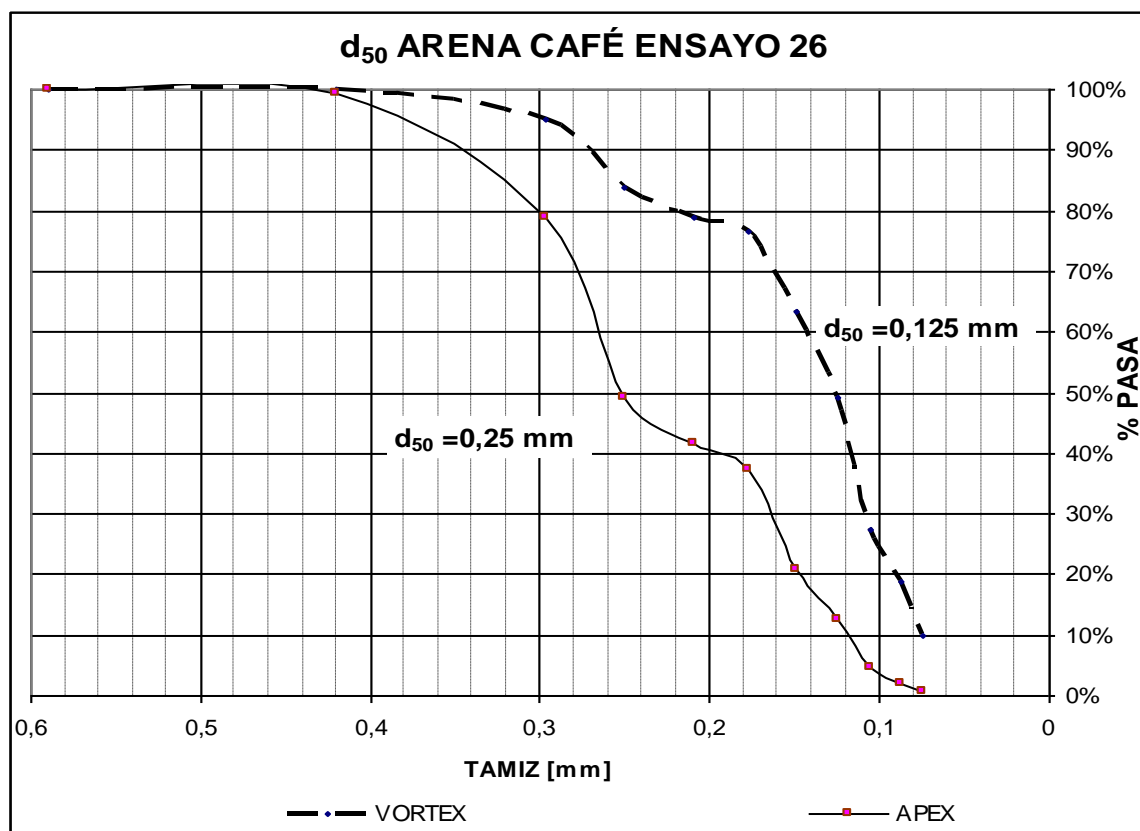
**Grafica 6.26** Curva Granulométrica Ensayo # 25

**Tabla 6.66** arena café Vortex  $Q_W + D_A - L_V - d_{50} + Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	81	80,5	0,50	0,09%	0,09%	99,91%
50	0,297	109	80,5	28,50	4,91%	4,99%	95,01%
60	0,25	146	80,5	65,50	11,27%	16,27%	83,73%
70	0,21	109	80,5	28,50	4,91%	21,17%	78,83%
80	0,177	94	80,5	13,50	2,32%	23,49%	76,51%
100	0,149	156	80,5	75,50	12,99%	36,49%	63,51%
120	0,125	164	80,5	83,50	14,37%	50,86%	49,14%
140	0,105	207	80,5	126,50	21,77%	72,63%	27,37%
170	0,088	130	80,5	49,50	8,52%	81,15%	18,85%
200	0,074	133	80,5	52,50	9,04%	90,19%	9,81%
pasa 200	0,062	137,5	80,5	57,00	9,81%	100,00%	0,00%
suma total				581,00	100,0%		

**Tabla 6.67** arena café ápex  $Q_W + D_A - L_V - d_{50} + Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	44	41,5	2,50	0,50%	0,50%	99,50%
50	0,297	145	41,5	103,50	20,70%	21,20%	78,80%
60	0,25	189	41,5	147,50	29,50%	50,70%	49,30%
70	0,21	80	41,5	38,50	7,70%	58,40%	41,60%
80	0,177	62,5	41,5	21,00	4,20%	62,60%	37,40%
100	0,149	124	41,5	82,50	16,50%	79,10%	20,90%
120	0,125	83	41,5	41,50	8,30%	87,40%	12,60%
140	0,105	81	41,5	39,50	7,90%	95,30%	4,70%
170	0,088	55	41,5	13,50	2,70%	98,00%	2,00%
200	0,074	48	41,5	6,50	1,30%	99,30%	0,70%
pasa 200	0,062	45	41,5	3,50	0,70%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



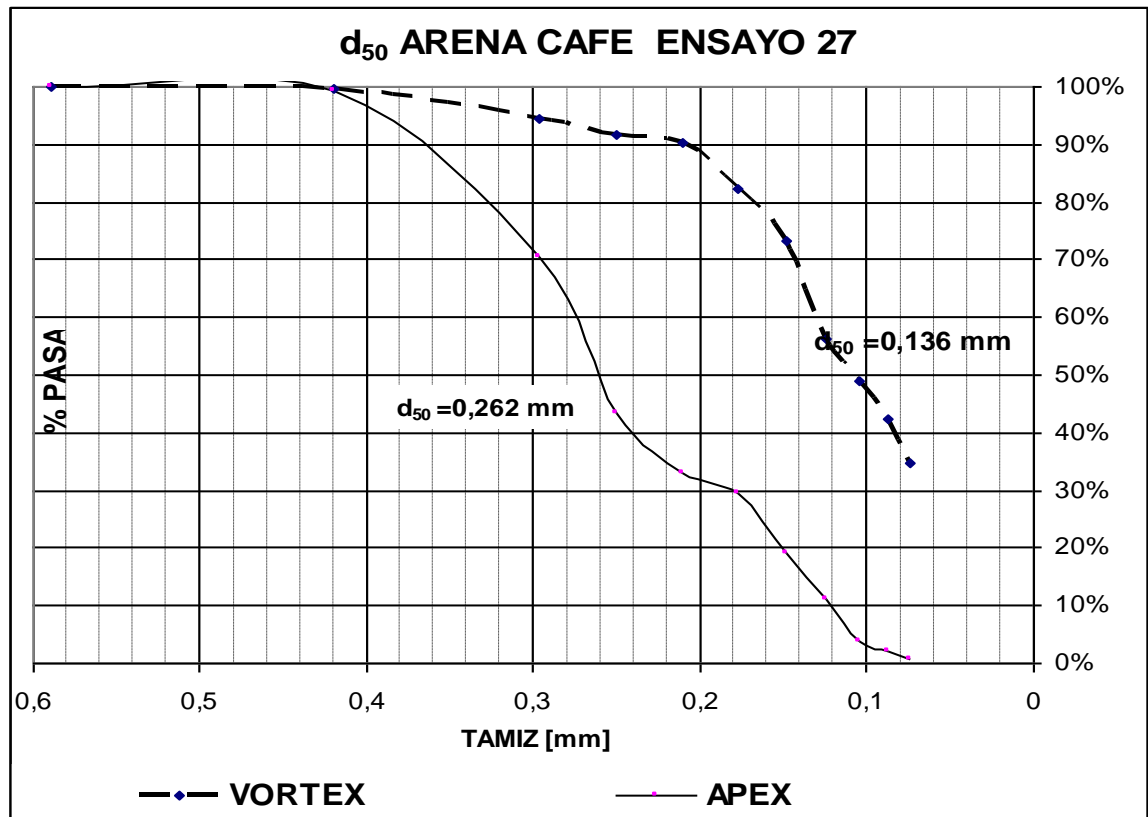
**Grafica 6.27** Curva Granulométrica Ensayo # 26

**Tabla 6.68** arena café Vortex  $Q_W - D_A + L_V - d_{50} + Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	80,8	80,5	0,30	0,19%	0,19%	99,81%
50	0,297	89,1	80,5	8,60	5,34%	5,53%	94,47%
60	0,25	85	80,5	4,50	2,80%	8,32%	91,68%
70	0,21	82,5	80,5	2,00	1,24%	9,57%	90,43%
80	0,177	93,4	80,5	12,90	8,01%	17,58%	82,42%
100	0,149	95,1	80,5	14,60	9,07%	26,65%	73,35%
120	0,125	108,1	80,5	27,60	17,14%	43,79%	56,21%
140	0,105	92	80,5	11,50	7,14%	50,93%	49,07%
170	0,088	91,3	80,5	10,80	6,71%	57,64%	42,36%
200	0,074	92,8	80,5	12,30	7,64%	65,28%	34,72%
pasa 200	0,062	136,4	80,5	55,90	34,72%	100,00%	0,00%
suma total				161,00	100,00%		

**Tabla 6.69** arena café apex  $Q_W - D_A + L_V - d_{50} + Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	43	41,5	1,50	0,75%	0,75%	99,25%
50	0,297	99	41,5	57,50	28,75%	29,50%	70,50%
60	0,25	96	41,5	54,50	27,25%	56,75%	43,25%
70	0,21	62	41,5	20,50	10,25%	67,00%	33,00%
80	0,177	48,5	41,5	7,00	3,50%	70,50%	29,50%
100	0,149	62	41,5	20,50	10,25%	80,75%	19,25%
120	0,125	58	41,5	16,50	8,25%	89,00%	11,00%
140	0,105	56	41,5	14,50	7,25%	96,25%	3,75%
170	0,088	45	41,5	3,50	1,75%	98,00%	2,00%
200	0,074	44	41,5	2,50	1,25%	99,25%	0,75%
pasa 200	0,062	43	41,5	1,50	0,75%	100,00%	0,00%
suma total				200	100,0%		



**Grafica 6.28** Curva Granulométrica Ensayo # 27

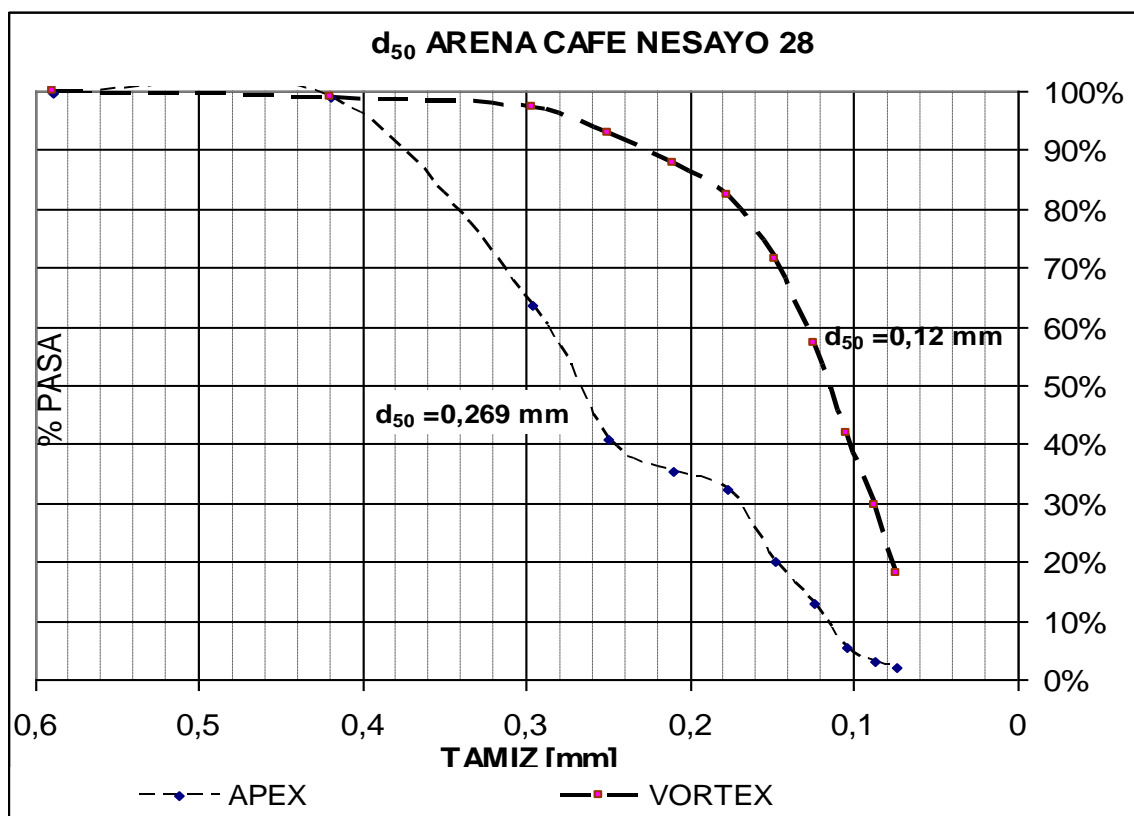
**Tabla 6.70** arena café Vortex  $Q_W + D_A + L_V - d_{50} + Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	50,64	41,5	9,14	1,11%	1,11%	98,89%
50	0,297	56,01	41,5	14,51	1,76%	2,86%	97,14%
60	0,25	77,51	41,5	36,01	4,36%	7,22%	92,78%
70	0,21	82,88	41,5	41,38	5,01%	12,23%	87,77%
80	0,177	87,18	41,5	45,68	5,53%	17,76%	82,24%
100	0,149	130,17	41,5	88,67	10,73%	28,50%	71,50%
120	0,125	160,27	41,5	118,77	14,38%	42,88%	57,12%
140	0,105	168,87	41,5	127,37	15,42%	58,30%	41,70%
170	0,088	142	41,5	100,50	12,17%	70,46%	29,54%
200	0,074	136,62	41,5	95,12	11,52%	81,98%	18,02%
pasa 200	0,062	190,36	41,5	148,86	18,02%	100,00%	0,00%
suma total				826	100,00%		



**Tabla 6.71** arena café ápex  $Q_W + D_A + L_V - d_{50} + Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	42,5	41,5	1,00	0,20%	0,20%	99,80%
40	0,42	45,5	41,5	4,00	0,80%	1,00%	99,00%
50	0,297	218	41,5	176,50	35,30%	36,30%	63,70%
60	0,25	156	41,5	114,50	22,90%	59,20%	40,80%
70	0,21	69	41,5	27,50	5,50%	64,70%	35,30%
80	0,177	57	41,5	15,50	3,10%	67,80%	32,20%
100	0,149	103	41,5	61,50	12,30%	80,10%	19,90%
120	0,125	77	41,5	35,50	7,10%	87,20%	12,80%
140	0,105	78	41,5	36,50	7,30%	94,50%	5,50%
170	0,088	53	41,5	11,50	2,30%	96,80%	3,20%
200	0,074	48	41,5	6,50	1,30%	98,10%	1,90%
pasa 200	0,062	51	41,5	9,50	1,90%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



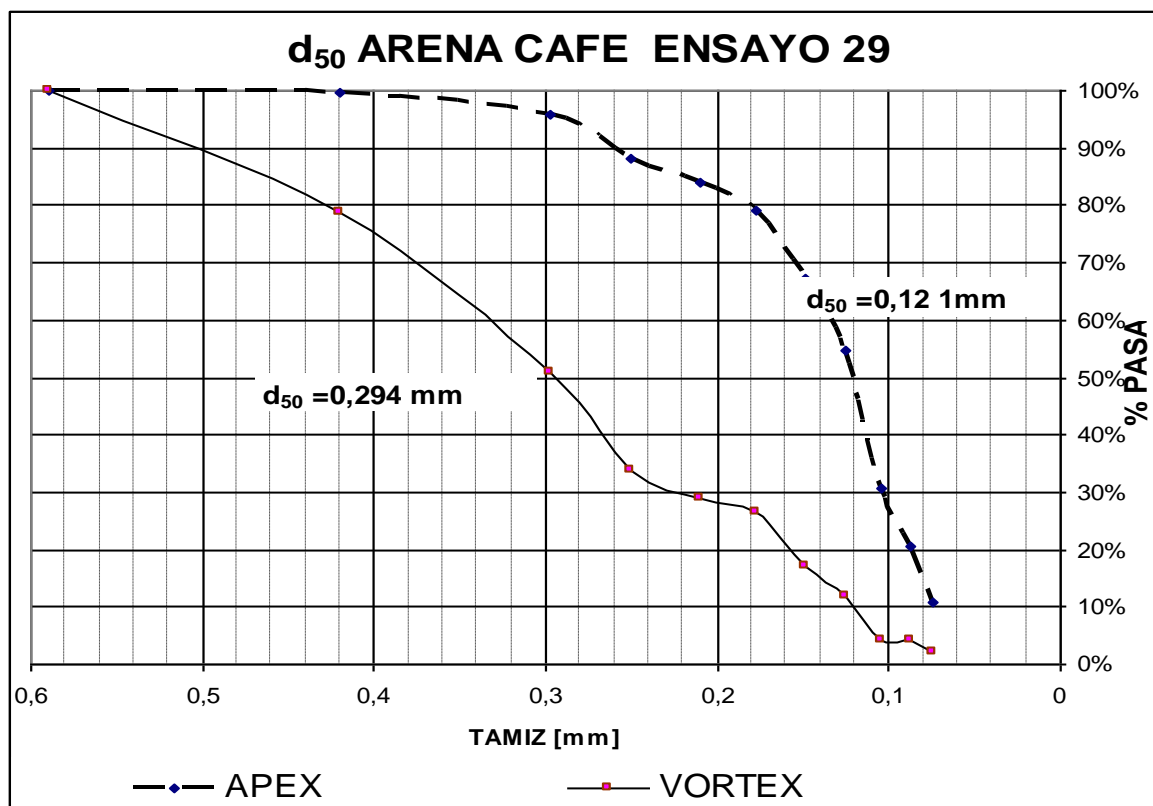
**Grafica 6.29** Curva Granulométrica Ensayo # 28

**Tabla 6.72** arena café Vortex  $Q_W - D_A - L_V + d_{50} + Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	81,6	80,5	1,10	0,29%	0,29%	99,71%
50	0,297	94,6	80,5	14,10	3,75%	4,04%	95,96%
60	0,25	109,6	80,5	29,10	7,73%	11,77%	88,23%
70	0,21	96,6	80,5	16,10	4,28%	16,05%	83,95%
80	0,177	98,6	80,5	18,10	4,81%	20,86%	79,14%
100	0,149	124,6	80,5	44,10	11,72%	32,58%	67,42%
120	0,125	128,6	80,5	48,10	12,78%	45,36%	54,64%
140	0,105	170,7	80,5	90,20	23,97%	69,33%	30,67%
170	0,088	118,7	80,5	38,20	10,15%	79,48%	20,52%
200	0,074	116,6	80,5	36,10	9,59%	89,08%	10,92%
pasa 200	0,062	121,6	80,5	41,10	10,92%	100,00%	0,00%
suma total				376,30	100,00%		

**Tabla 6.73** arena café áplex  $Q_W - D_A - L_V + d_{50} + Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80	80	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	187,1	80	107,10	21,42%	21,42%	78,58%
50	0,297	218,2	80	138,20	27,64%	49,06%	50,94%
60	0,25	166,5	80	86,50	17,30%	66,36%	33,64%
70	0,21	103,4	80	23,40	4,68%	71,04%	28,96%
80	0,177	92,9	80	12,90	2,58%	73,62%	26,38%
100	0,149	127	80	47,00	9,40%	83,02%	16,98%
120	0,125	105,1	80	25,10	5,02%	88,04%	11,96%
140	0,105	118,2	80	38,20	7,64%	95,68%	4,32%
170	0,088	80,5	80	0,50	0,10%	95,78%	4,22%
200	0,074	90,3	80	10,30	2,06%	97,84%	2,16%
pasa 200	0,062	90,8	80	10,80	2,16%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



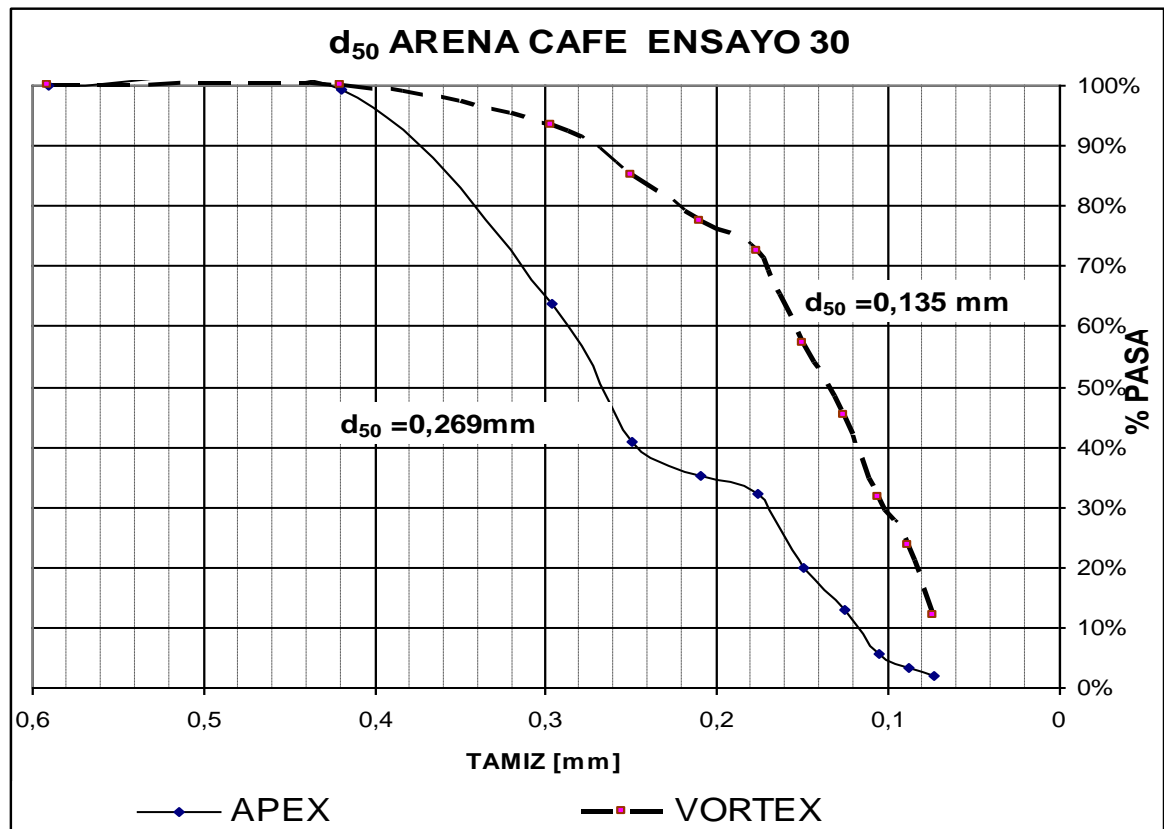
**Grafica 6.30** Curva Granulométrica Ensayo # 29

**Tabla 6.74** arena café Vortex  $Q_W + D_A - L_V + d_{50} + Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	83	83	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	83	83	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
50	0,297	130	83	47,00	6,72%	6,72%	93,28%
60	0,25	140	83	57,00	8,15%	14,88%	85,12%
70	0,21	137,5	83	54,50	7,80%	22,68%	77,32%
80	0,177	116,25	83	33,25	4,76%	27,43%	72,57%
100	0,149	190	83	107,00	15,31%	42,74%	57,26%
120	0,125	167,5	83	84,50	12,09%	54,83%	45,17%
140	0,105	178,75	83	95,75	13,70%	68,53%	31,47%
170	0,088	139	83	56,00	8,01%	76,54%	23,46%
200	0,074	163	83	80,00	11,44%	87,98%	12,02%
pasa 200	0,062	167	83	84,00	12,02%	100,00%	0,00%
suma total				<b>699,00</b>	100,00%		

**Tabla 6.75** arena café ápeX  $Q_W + D_A - L_V + d_{50} + Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	44,5	41,5	3,00	0,60%	0,60%	99,40%
50	0,297	220	41,5	178,50	35,70%	36,30%	63,70%
60	0,25	156	41,5	114,50	22,90%	59,20%	40,80%
70	0,21	69	41,5	27,50	5,50%	64,70%	35,30%
80	0,177	57	41,5	15,50	3,10%	67,80%	32,20%
100	0,149	103	41,5	61,50	12,30%	80,10%	19,90%
120	0,125	77	41,5	35,50	7,10%	87,20%	12,80%
140	0,105	78	41,5	36,50	7,30%	94,50%	5,50%
170	0,088	53	41,5	11,50	2,30%	96,80%	3,20%
200	0,074	48	41,5	6,50	1,30%	98,10%	1,90%
pasa 200	0,062	51	41,5	9,50	1,90%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



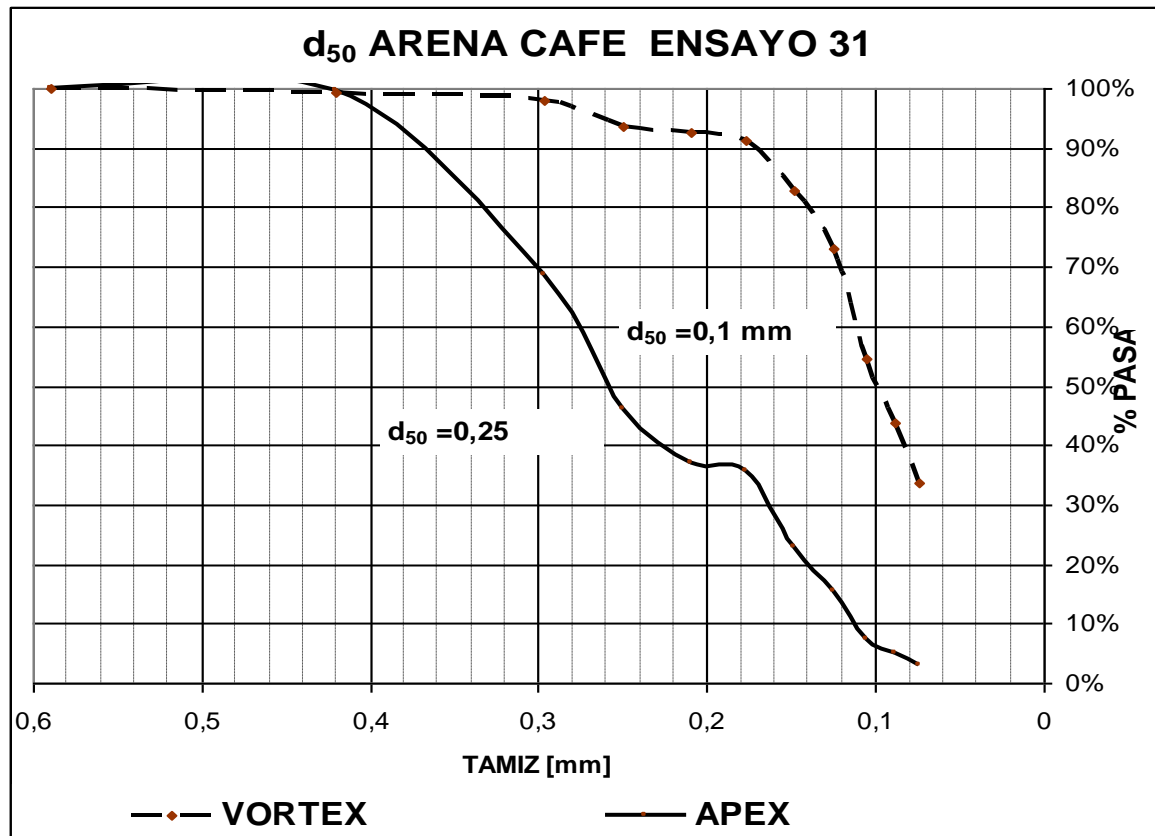
**Grafica 6.31** Curva Granulométrica Ensayo # 30

**Tabla 6.76** arena café Vortex  $Q_W - D_A + L_V + d_{50} + Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	34	34	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	36	34	2,00	0,78%	0,78%	99,22%
50	0,297	37	34	3,00	1,18%	1,96%	98,04%
60	0,25	45	34	11,00	4,31%	6,27%	93,73%
70	0,21	37	34	3,00	1,18%	7,45%	92,55%
80	0,177	37	34	3,00	1,18%	8,63%	91,37%
100	0,149	56	34	22,00	8,63%	17,25%	82,75%
120	0,125	59	34	25,00	9,80%	27,06%	72,94%
140	0,105	81	34	47,00	18,43%	45,49%	54,51%
170	0,088	61	34	27,00	10,59%	56,08%	43,92%
200	0,074	60	34	26,00	10,20%	66,27%	33,73%
pasa 200	0,062	120	34	86,00	33,73%	100,00%	0,00%
suma total				<b>255,00</b>	100,00%		

**Tabla 6.77** arena café ápex  $Q_W - D_A + L_V + d_{50} + Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	34	34	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	35	34	1,00	0,20%	0,20%	99,80%
50	0,297	190	34	156,00	31,20%	31,40%	68,60%
60	0,25	146	34	112,00	22,40%	53,80%	46,20%
70	0,21	79	34	45,00	9,00%	62,80%	37,20%
80	0,177	42	34	8,00	1,60%	64,40%	35,60%
100	0,149	97	34	63,00	12,60%	77,00%	23,00%
120	0,125	72	34	38,00	7,60%	84,60%	15,40%
140	0,105	74	34	40,00	8,00%	92,60%	7,40%
170	0,088	46	34	12,00	2,40%	95,00%	5,00%
200	0,074	44	34	10,00	2,00%	97,00%	3,00%
pasa 200	0,062	49	34	15,00	3,00%	100,00%	0,00%
suma total				500	100,0%		



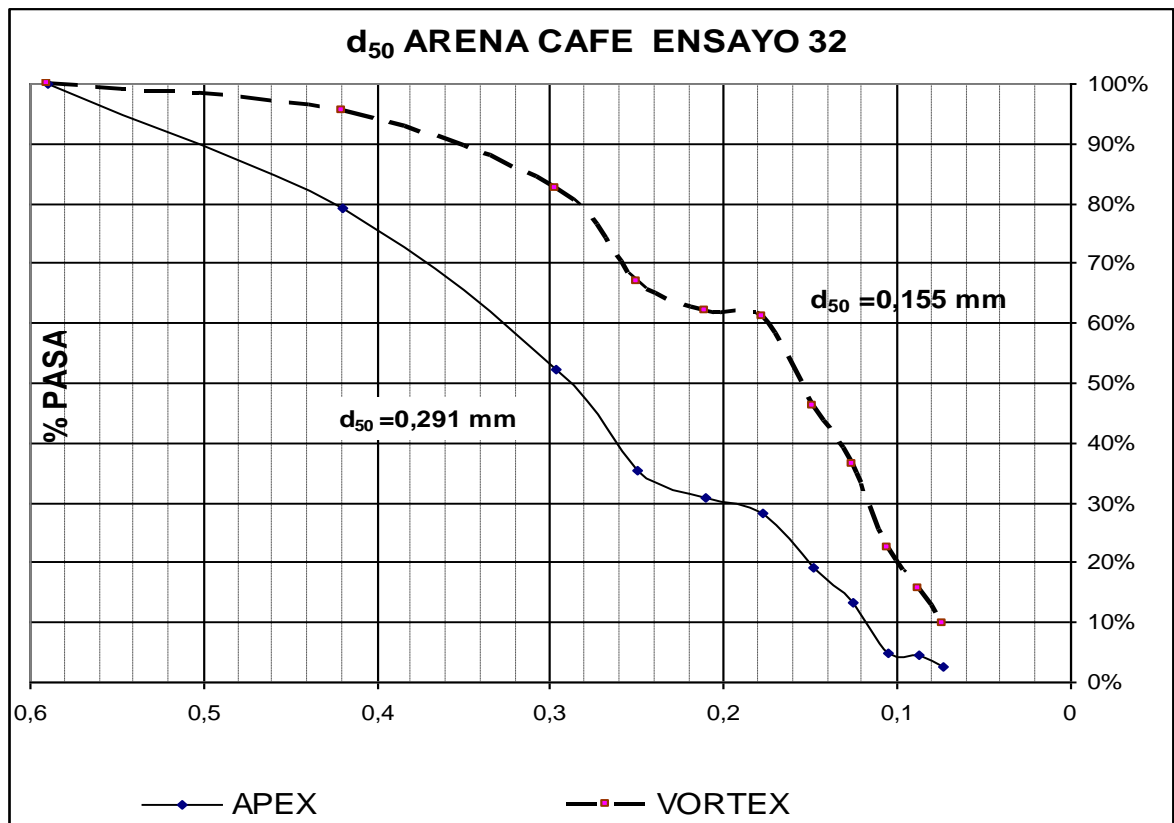
**Grafica 6.32** Curva Granulométrica Ensayo # 31

**Tabla 6.78** arena café Vortex  $Q_W + D_A + L_V + d_{50} + Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Reci [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80	80	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	100,8	80	20,80	4,60%	4,60%	95,40%
50	0,297	139,1	80	59,10	13,06%	17,66%	82,34%
60	0,25	149,8	80	69,80	15,43%	33,09%	66,91%
70	0,21	101,5	80	21,50	4,75%	37,84%	62,16%
80	0,177	84,9	80	4,90	1,08%	38,93%	61,07%
100	0,149	147	80	67,00	14,81%	53,74%	46,26%
120	0,125	125,2	80	45,20	9,99%	63,73%	36,27%
140	0,105	143,3	80	63,30	13,99%	77,72%	22,28%
170	0,088	110	80	30,00	6,63%	84,35%	15,65%
200	0,074	107,3	80	27,30	6,03%	90,38%	9,62%
pasa 200	0,062	123,5	80	43,50	9,62%	100,00%	0,00%
suma total				452,40	100,00%		

**Tabla 6.79** arena café ápex  $Q_W + D_A + L_V + d_{50} + Q_S +$

Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80	80	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	187,1	80	107,10	20,85%	20,85%	79,15%
50	0,297	218,2	80	138,20	26,90%	47,75%	52,25%
60	0,25	166,5	80	86,50	16,84%	64,59%	35,41%
70	0,21	103,4	80	23,40	4,56%	69,15%	30,85%
80	0,177	92,9	80	12,90	2,51%	71,66%	28,34%
100	0,149	127,7	80	47,70	9,29%	80,94%	19,06%
120	0,125	109,1	80	29,10	5,66%	86,61%	13,39%
140	0,105	124,2	80	44,20	8,60%	95,21%	4,79%
170	0,088	80,5	80	0,50	0,10%	95,31%	4,69%
200	0,074	91,3	80	11,30	2,20%	97,51%	2,49%
pasa 200	0,062	92,8	80	12,80	2,49%	100,00%	0,00%
suma total				513,70	100,0%		



**Grafica 6.33** Curva Granulométrica Ensayo # 32

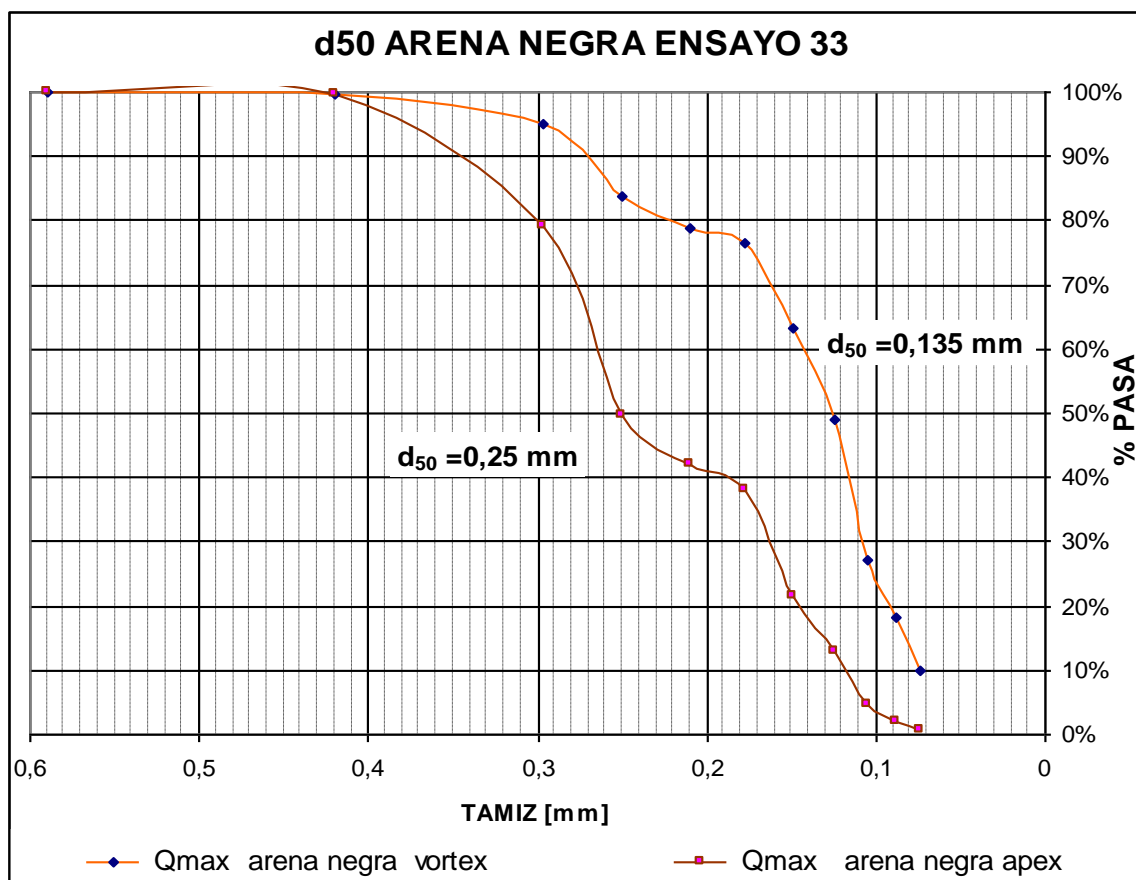
**Tabla 6.80** Tabla 9.74 Q m arena negra Vortex

1	2	3	4	5	6	7	8
Nº de Tamiz	Abertura	W + Recí	W reci	Ware	%	%	%
	[mm]	[gr]	[gr]	[gr]	retenido	Ret acum.	pasa
30	0,59	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	81,5	80,5	1,00	0,17%	0,17%	99,83%
50	0,297	109	80,5	28,50	4,91%	5,08%	94,92%
60	0,25	146	80,5	65,50	11,27%	16,35%	83,65%
70	0,21	109	80,5	28,50	4,91%	21,26%	78,74%
80	0,177	94	80,5	13,50	2,32%	23,58%	76,42%
100	0,149	156,5	80,5	76,00	13,08%	36,66%	63,34%
120	0,125	164	80,5	83,50	14,37%	51,03%	48,97%
140	0,105	207	80,5	126,50	21,77%	72,81%	27,19%
170	0,088	132	80,5	51,50	8,86%	81,67%	18,33%
200	0,074	130	80,5	49,50	8,52%	90,19%	9,81%
pasa 200	0,062	137,5	80,5	57,00	9,81%	100,00%	0,00%
suma total				581,00	100,0%		

**Tabla 6.81** Q m arena negra ápex

1	2	3	4	5	6	7	8
Nº de Tamiz	Abertura	W + Recí	W reci	Ware	%	%	%
	[mm]	[gr]	[gr]	[gr]	retenido	Ret acum.	pasa
30	0,59	42	42	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	44	42	2,00	0,40%	0,40%	99,60%
50	0,297	145	42	103,00	20,60%	21,00%	79,00%
60	0,25	189	42	147,00	29,40%	50,40%	49,60%
70	0,21	80	42	38,00	7,60%	58,00%	42,00%
80	0,177	62	42	20,00	4,00%	62,00%	38,00%
100	0,149	124	42	82,00	16,40%	78,40%	21,60%
120	0,125	85	42	43,00	8,60%	87,00%	13,00%
140	0,105	84	42	42,00	8,40%	95,40%	4,60%
170	0,088	55	42	13,00	2,60%	98,00%	2,00%
200	0,074	49	42	7,00	1,40%	99,40%	0,60%
pasa 200	0,062	45	42	3,00	0,60%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		





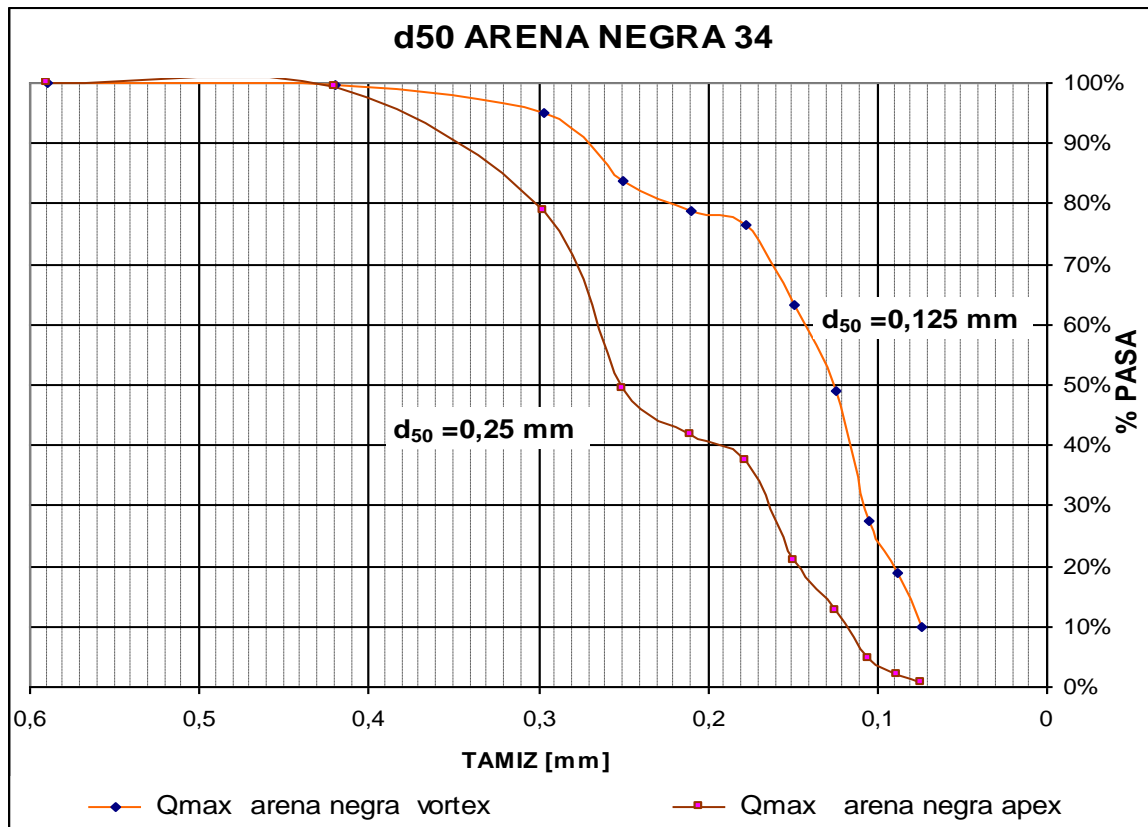
**Grafica 6.34** Curva Granulométrica Ensayo # 33

**Tabla 6.82** Q m arena negra Vortex

1	2	3	4	5	6	7	8
Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Reci [gr]	W reci [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	81,5	80,5	1,00	0,17%	0,17%	99,83%
50	0,297	109	80,5	28,50	4,90%	5,07%	94,93%
60	0,25	146	80,5	65,50	11,25%	16,32%	83,68%
70	0,21	109	80,5	28,50	4,90%	21,22%	78,78%
80	0,177	94	80,5	13,50	2,32%	23,54%	76,46%
100	0,149	156,5	80,5	76,00	13,06%	36,60%	63,40%
120	0,125	164	80,5	83,50	14,35%	50,95%	49,05%
140	0,105	207	80,5	126,50	21,74%	72,68%	27,32%
170	0,088	130	80,5	49,50	8,51%	81,19%	18,81%
200	0,074	133	80,5	52,50	9,02%	90,21%	9,79%
pasa 200	0,062	137,5	80,5	57,00	9,79%	100,00%	0,00%
suma total				582,00	100,0%		

**Tabla 6.83** Q m arena negra apex

1	2	3	4	5	6	7	8
Nº de Tamiz	Abertura	W + Recí	W recí	Ware	%	%	%
	[mm]	[gr]	[gr]	[gr]	retenido	Ret acum.	pasa
30	0,59	41,5	41,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	44	41,5	2,50	0,50%	0,50%	99,50%
50	0,297	145	41,5	103,50	20,70%	21,20%	78,80%
60	0,25	189	41,5	147,50	29,50%	50,70%	49,30%
70	0,21	80	41,5	38,50	7,70%	58,40%	41,60%
80	0,177	62,5	41,5	21,00	4,20%	62,60%	37,40%
100	0,149	124	41,5	82,50	16,50%	79,10%	20,90%
120	0,125	83	41,5	41,50	8,30%	87,40%	12,60%
140	0,105	81	41,5	39,50	7,90%	95,30%	4,70%
170	0,088	55	41,5	13,50	2,70%	98,00%	2,00%
200	0,074	48	41,5	6,50	1,30%	99,30%	0,70%
pasa 200	0,062	45	41,5	3,50	0,70%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		

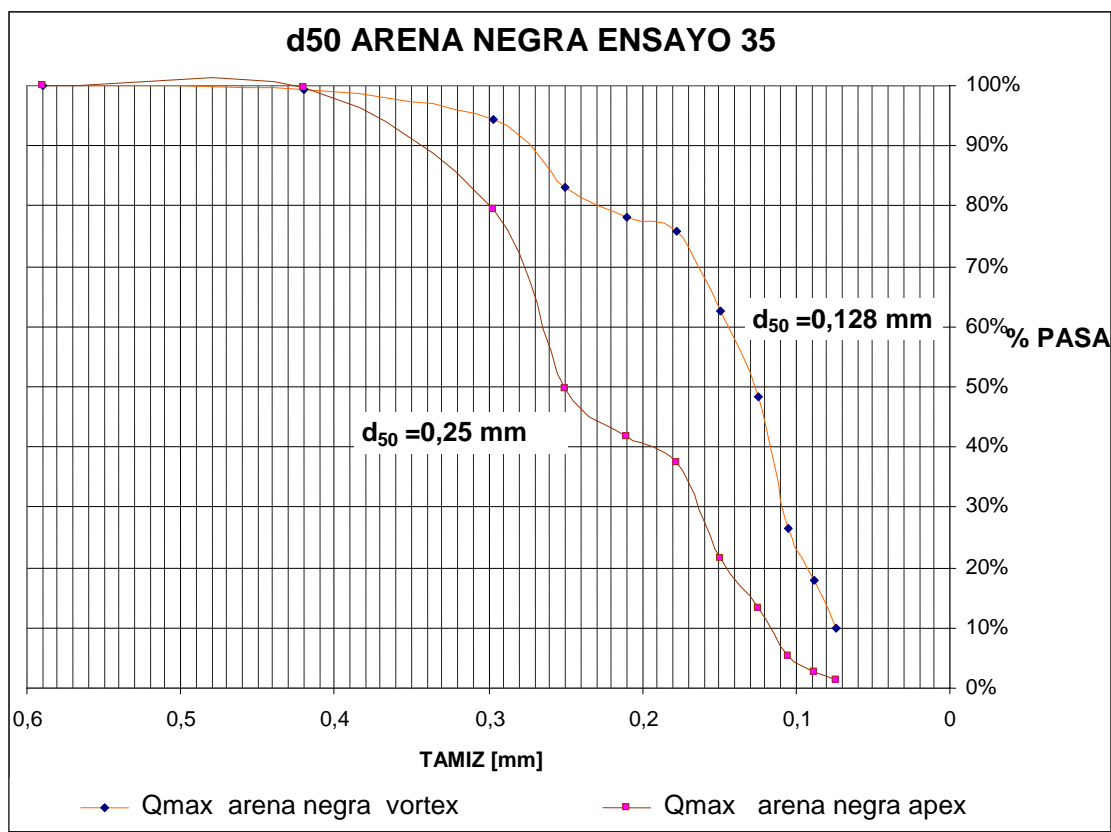


**Tabla 6.84** Q m arena negra Vortex

1	2	3	4	5	6	7	8
Nº de Tamiz	Abertura	W + Recí	W reci	Ware	%	%	%
	[mm]	[gr]	[gr]	[gr]	retenido	Ret acum.	pasa
30	0,59	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	85	80,5	4,50	0,77%	0,77%	99,23%
50	0,297	109	80,5	28,50	4,91%	5,68%	94,32%
60	0,25	146	80,5	65,50	11,27%	16,95%	83,05%
70	0,21	109	80,5	28,50	4,91%	21,86%	78,14%
80	0,177	94,5	80,5	14,00	2,41%	24,27%	75,73%
100	0,149	156,5	80,5	76,00	13,08%	37,35%	62,65%
120	0,125	164	80,5	83,50	14,37%	51,72%	48,28%
140	0,105	207	80,5	126,50	21,77%	73,49%	26,51%
170	0,088	130	80,5	49,50	8,52%	82,01%	17,99%
200	0,074	128	80,5	47,50	8,18%	90,19%	9,81%
pasa 200	0,062	137,5	80,5	57,00	9,81%	100,00%	0,00%
suma total				581,00	100,0%		

**Tabla 6.85** Q m arena negra ápex

1	2	3	4	5	6	7	8
Nº de Tamiz	Abertura	W + Recí	W reci	Ware	%	%	%
	[mm]	[gr]	[gr]	[gr]	retenido	Ret acum.	pasa
30	0,59	40	40	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	42	40	2,00	0,40%	0,40%	99,60%
50	0,297	140	40	100,00	20,00%	20,40%	79,60%
60	0,25	189	40	149,00	29,80%	50,20%	49,80%
70	0,21	80	40	40,00	8,00%	58,20%	41,80%
80	0,177	62	40	22,00	4,40%	62,60%	37,40%
100	0,149	120	40	80,00	16,00%	78,60%	21,40%
120	0,125	81	40	41,00	8,20%	86,80%	13,20%
140	0,105	80	40	40,00	8,00%	94,80%	5,20%
170	0,088	52	40	12,00	2,40%	97,20%	2,80%
200	0,074	48	40	8,00	1,60%	98,80%	1,20%
pasa 200	0,062	46	40	6,00	1,20%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



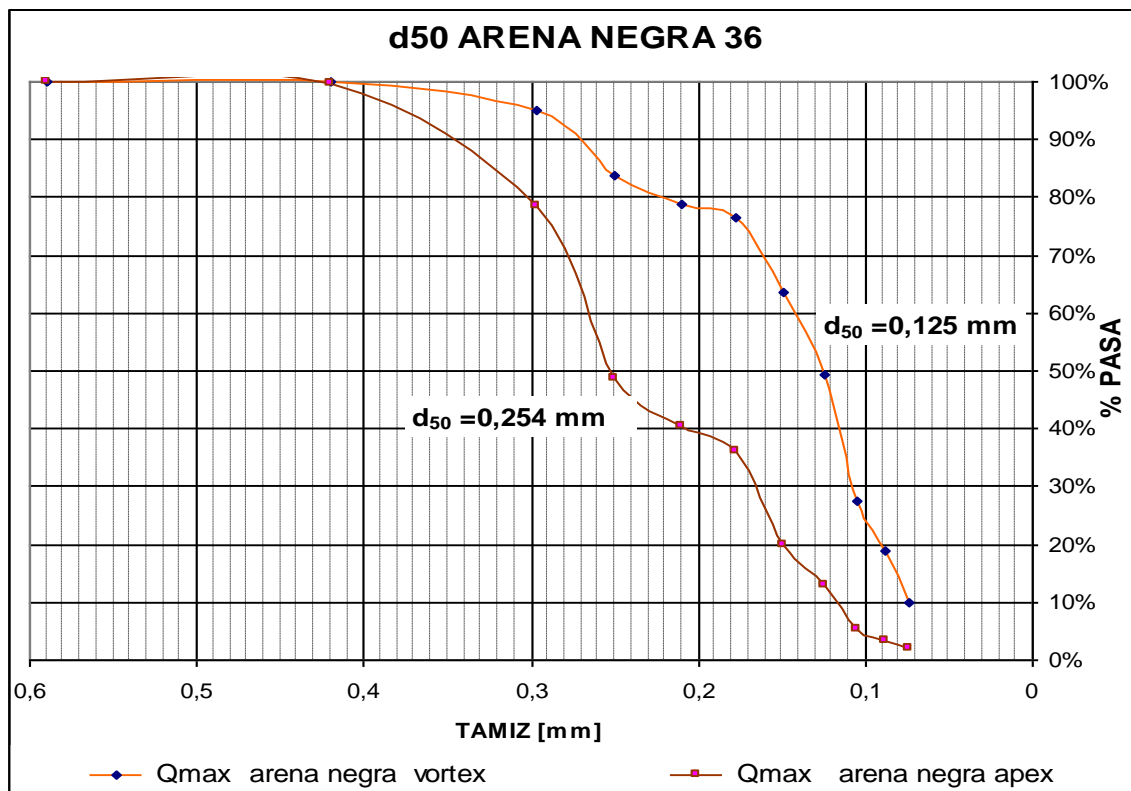
**Grafica 6.36** Curva Granulométrica Ensayo # 35

**Tabla 6.86** Q m arena negra Vortex

1	2	3	4	5	6	7	8
Nº de Tamiz	Abertura [mm]	W + Recí [gr]	W recí [gr]	Ware [gr]	% retenido	% Ret acum.	% pasa
30	0,59	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	80,5	80,5	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
50	0,297	109	80,5	28,50	4,90%	4,90%	95,10%
60	0,25	146	80,5	65,50	11,25%	16,15%	83,85%
70	0,21	109	80,5	28,50	4,90%	21,05%	78,95%
80	0,177	94	80,5	13,50	2,32%	23,37%	76,63%
100	0,149	156,5	80,5	76,00	13,06%	36,43%	63,57%
120	0,125	164	80,5	83,50	14,35%	50,77%	49,23%
140	0,105	207	80,5	126,50	21,74%	72,51%	27,49%
170	0,088	131	80,5	50,50	8,68%	81,19%	18,81%
200	0,074	133	80,5	52,50	9,02%	90,21%	9,79%
pasa 200	0,062	137,5	80,5	57,00	9,79%	100,00%	0,00%
suma total				582,00	100,0%		

**Tabla 6.87** Q m arena negra ápex

1	2	3	4	5	6	7	8
Nº de Tamiz	Abertura	W + Reçi	W reçi	Ware	%	%	%
	[mm]	[gr]	[gr]	[gr]	retenido	Ret acum.	pasa
30	0,59	40	40	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,42	42	40	2,00	0,40%	0,40%	99,60%
50	0,297	145	40	105,00	21,00%	21,40%	78,60%
60	0,25	189	40	149,00	29,80%	51,20%	48,80%
70	0,21	82	40	42,00	8,40%	59,60%	40,40%
80	0,177	62	40	22,00	4,40%	64,00%	36,00%
100	0,149	120	40	80,00	16,00%	80,00%	20,00%
120	0,125	76	40	36,00	7,20%	87,20%	12,80%
140	0,105	78	40	38,00	7,60%	94,80%	5,20%
170	0,088	50	40	10,00	2,00%	96,80%	3,20%
200	0,074	46	40	6,00	1,20%	98,00%	2,00%
pasa 200	0,062	50	40	10,00	2,00%	100,00%	0,00%
suma total				500,00	100,0%		



**Grafica 6.37** Curva Granulométrica Ensayo # 36

**Tabla 6.88** Desviación estándar geométrica muestras iniciales

No ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	D <sub>84</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>16</sub>	D <sub>10</sub>	CU	CC	□ <sub>g</sub>	□ <sub>g</sub>	□ <sub>g</sub>	Gs
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub>	d <sub>30</sub> <sup>2</sup> / (d <sub>60</sub> ·d <sub>10</sub> )	d <sub>84</sub> /d <sub>50</sub>	d <sub>50</sub> /d <sub>16</sub>	d <sub>84</sub> /d <sub>16</sub>	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Arena gris	0,27	0,17	0,12	0,08	0,06	0,05	3,17	0,67	2,32	1,88	4,38	2,81
Arena café	0,49	0,36	0,35	0,29	0,26	0,25	1,43	0,91	1,42	1,32	1,87	2,43
Arena negra	0,29	0,25	0,20	0,13	0,09	0,05	4,34	1,11	1,48	2,16	3,20	2,62
Plomo	0,42	0,35	0,32	0,24	0,17	0,14	2,36	1,17	1,29	1,82	2,35	11,65

En la Tabla 6.88, realizaron los cálculos de la desviación estándar geométrica teniendo en cuenta los diámetros de cada muestra de arena interpolando los diferentes puntos de la curva granulométrica.

Columna 1 diámetro en milímetros de la arena en pasante 84

Columna 2 diámetro en milímetros de la arena en pasante 60

Columna 3 diámetro en milímetros de la arena en pasante 50

Columna 4 diámetro en milímetros de la arena en pasante 30

Columna 5 diámetro en milímetros de la arena en pasante 16

Columna 6 diámetro en milímetros de la arena en pasante 10

Columna 7 Coeficiente de uniformidad de cada tipo de arena  $D_{60}/D_{10}$

Columna 8 Coeficiente de curvatura de cada muestra de arena  $\frac{D_{30}^2}{D_{60}D_{10}}$

Columna 9 desviación estándar geométrica calculada así:  $D_{84}/D_{50}$

Columna 10 desviación estándar geométrica calculada así:  $D_{50}/D_{16}$

Columna 11 desviación estándar geométrica calculada así:  $D_{84}/D_{16}$

Columna 12 Peso específico en gramo sobre centímetro cúbico

Los cálculos realizados para la tabla 6.86, son los mismos para la tabla 6.87 y 6.88.

**Tabla 6.89** Desviación estándar geométrica para el ápex

No ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	D <sub>84</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>16</sub>	D <sub>10</sub>	CU	CC	□ <sub>g</sub>	□ <sub>g</sub>	□ <sub>g</sub>	Gs
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub>	d <sub>30</sub> <sup>2</sup> / (d <sub>60</sub> d <sub>10</sub> )	d <sub>84</sub> /d <sub>50</sub>	d <sub>50</sub> /d <sub>16</sub>	d <sub>84</sub> /d <sub>16</sub>	[gr./cm <sup>3</sup> ]
1	0,319	0,265	0,218	0,142	0,107	0,086	3,07	0,88	1,46	2,03	2,97	2,81
2	0,317	0,267	0,226	0,148	0,111	0,092	2,91	0,89	1,40	2,03	2,85	2,81
3	0,310	0,259	0,215	0,148	0,115	0,102	2,55	0,83	1,44	1,87	2,71	2,81
4	0,319	0,265	0,219	0,142	0,108	0,087	3,05	0,87	1,46	2,03	2,96	2,81
5	0,297	0,256	0,182	0,134	0,106	0,086	2,97	0,81	1,63	1,71	2,79	2,81
6	0,319	0,265	0,218	0,144	0,107	0,086	3,07	0,90	1,46	2,03	2,97	2,81
7	0,300	0,228	0,155	0,117	0,114	0,063	3,59	0,95	1,93	1,37	2,64	2,81
8	0,301	0,228	0,155	0,117	0,114	0,063	3,59	0,95	1,94	1,37	2,65	2,81
9	0,324	0,272	0,250	0,164	0,133	0,117	2,33	0,84	1,29	1,88	2,43	2,43
10	0,375	0,302	0,271	0,172	0,136	0,117	2,58	0,83	1,38	1,99	2,76	2,43
11	0,358	0,287	0,258	0,165	0,127	0,112	2,58	0,85	1,39	2,03	2,82	2,43
12	0,364	0,291	0,259	0,164	0,125	0,111	2,63	0,83	1,41	2,07	2,91	2,43
13	0,374	0,352	0,291	0,216	0,142	0,119	2,97	1,12	1,28	2,05	2,62	2,43
14	0,363	0,291	0,259	0,164	0,125	0,111	2,63	0,83	1,40	2,07	2,91	2,43
15	0,444	0,325	0,288	0,194	0,133	0,113	2,89	1,02	1,54	2,16	3,34	2,43
16	0,364	0,291	0,259	0,164	0,125	0,111	2,63	0,83	1,41	2,07	2,91	2,43
17	0,270	0,241	0,155	0,114	0,084	0,070	3,43	0,76	1,74	1,86	3,22	2,81
18	0,328	0,273	0,251	0,164	0,135	0,118	2,31	0,84	1,31	1,86	2,43	2,81
19	0,317	0,263	0,216	0,143	0,110	0,094	2,80	0,83	1,47	1,96	2,88	2,81
20	0,327	0,270	0,234	0,151	0,114	0,098	2,75	0,86	1,39	2,05	2,85	2,81
21	0,315	0,263	0,219	0,145	0,111	0,095	2,77	0,84	1,44	1,97	2,83	2,81
22	0,320	0,268	0,230	0,151	0,115	0,098	2,72	0,87	1,39	2,00	2,79	2,81
23	0,310	0,259	0,215	0,150	0,117	0,109	2,38	0,80	1,44	1,83	2,65	2,81
24	0,292	0,251	0,168	0,119	0,084	0,071	3,56	0,79	1,74	2,00	3,48	2,81
25	0,327	0,273	0,251	0,208	0,135	0,118	2,32	1,35	1,30	1,86	2,43	2,43
26	0,328	0,273	0,251	0,164	0,134	0,118	2,31	0,84	1,31	1,88	2,45	2,43
27	0,374	0,286	0,262	0,180	0,138	0,166	1,72	0,69	1,43	1,90	2,72	2,43
28	0,368	0,298	0,269	0,172	0,137	0,117	2,54	0,85	1,37	1,96	2,68	2,43
29	0,444	0,365	0,294	0,188	0,146	0,120	3,04	0,81	1,51	2,02	3,04	2,43
30	0,367	0,298	0,269	0,172	0,136	0,117	2,54	0,85	1,36	1,98	2,70	2,43
31	0,358	0,287	0,258	0,165	0,127	0,112	2,58	0,85	1,39	2,03	2,82	2,43
32	0,492	0,361	0,291	0,182	0,136	0,117	3,08	0,78	1,69	2,14	3,62	2,43
33	0,327	0,267	0,251	0,163	0,133	0,118	2,26	0,85	1,30	1,88	2,45	2,62
34	0,328	0,267	0,251	0,164	0,135	0,118	2,26	0,86	1,31	1,86	2,43	2,62
35	0,324	0,266	0,250	0,164	0,133	0,117	2,27	0,86	1,29	1,88	2,43	2,62
36	0,306	0,303	0,256	0,167	0,136	0,118	2,58	0,78	1,19	1,88	2,25	2,62

**Tabla 6.90** Desviación estándar geométrica para el VORTEX

No ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	D <sub>84</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>16</sub>	D <sub>10</sub>	CU	CC	σ <sub>g</sub>	σ <sub>g</sub>	σ <sub>g</sub>	Gs
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub>	d <sub>30</sub> <sup>2</sup> / (d <sub>60</sub> d <sub>10</sub> )	d <sub>84</sub> /d <sub>50</sub>	d <sub>50</sub> /d <sub>16</sub>	d <sub>84</sub> /d <sub>16</sub>	[gr./cm <sup>3</sup> ]
1	0,115	0,074	0,079	0,074	0,074	0,074	1,06	0,94	1,56	1,00	1,56	2,81
2	0,152	0,085	0,102	0,074	0,074	0,074	1,38	0,63	1,79	1,15	2,06	2,81
3	0,152	0,122	0,099	0,074	0,074	0,074	1,33	0,46	1,25	1,64	2,06	2,81
4	0,186	0,090	0,110	0,074	0,074	0,074	1,49	0,55	2,06	1,22	2,52	2,81
5	0,115	0,074	0,078	0,074	0,074	0,074	1,05	0,95	1,56	1,00	1,56	2,81
6	0,158	0,086	0,104	0,074	0,074	0,074	1,41	0,61	1,82	1,17	2,13	2,81
7	0,145	0,081	0,093	0,074	0,074	0,074	1,25	0,73	1,79	1,09	1,96	2,81
8	0,181	0,097	0,113	0,074	0,074	0,074	1,52	0,50	1,86	1,31	2,44	2,81
9	0,259	0,132	0,142	0,086	0,074	0,074	1,92	0,40	1,97	1,78	3,50	2,43
10	0,296	0,143	0,165	0,101	0,074	0,074	2,23	0,43	2,07	1,93	4,00	2,43
11	0,153	0,100	0,112	0,074	0,074	0,074	1,51	0,49	1,53	1,35	2,06	2,43
12	0,245	0,122	0,145	0,090	0,074	0,074	1,96	0,46	2,01	1,64	3,30	2,43
13	0,038	0,095	0,110	0,074	0,074	0,074	1,49	0,52	0,40	1,29	0,52	2,43
14	0,260	0,131	0,146	0,104	0,075	0,074	1,97	0,57	1,99	1,75	3,49	2,43
15	0,219	0,109	0,121	0,079	0,074	0,074	1,63	0,48	2,02	1,47	2,96	2,43
16	0,221	0,117	0,133	0,086	0,074	0,074	1,80	0,48	1,88	1,59	2,99	2,43
17	0,138	0,083	0,093	0,074	0,074	0,074	1,26	0,71	1,67	1,12	1,87	2,81
18	0,242	0,109	0,121	0,075	0,074	0,074	1,64	0,42	2,21	1,48	3,27	2,81
19	0,124	0,113	0,094	0,074	0,074	0,074	1,28	0,51	1,10	1,53	1,67	2,81
20	0,123	0,083	0,094	0,074	0,074	0,074	1,27	0,70	1,48	1,13	1,67	2,81
21	0,123	0,083	0,094	0,074	0,074	0,074	1,27	0,70	1,48	1,13	1,67	2,81
22	0,175	0,107	0,119	0,080	0,074	0,074	1,60	0,51	1,63	1,45	2,37	2,81
23	0,124	0,124	0,075	0,074	0,074	0,074	1,01	0,59	1,00	1,67	1,67	2,81
24	0,184	0,105	0,117	0,086	0,074	0,074	1,59	0,60	1,75	1,42	2,48	2,81
25	0,126	0,044	0,076	0,088	0,074	0,074	1,03	2,32	2,85	0,60	1,70	2,43
26	0,251	0,126	0,143	0,110	0,074	0,074	1,93	0,67	1,99	1,71	3,39	2,43
27	0,183	0,108	0,130	0,062	0,062	0,062	2,10	0,27	1,71	1,74	2,96	2,43
28	0,188	0,116	0,130	0,089	0,074	0,074	1,75	0,52	1,62	1,56	2,53	2,43
29	0,210	0,121	0,135	0,104	0,074	0,074	1,83	0,66	1,74	1,64	2,84	2,43
30	0,244	0,135	0,154	0,102	0,079	0,074	2,08	0,50	1,81	1,71	3,10	2,43
31	0,153	0,098	0,111	0,074	0,074	0,074	1,50	0,50	1,57	1,32	2,07	2,43
32	0,313	0,156	0,175	0,116	0,089	0,074	2,36	0,49	2,00	1,76	3,52	2,43
33	0,251	0,127	0,143	0,108	0,084	0,074	1,93	0,64	1,98	1,51	2,99	2,62
34	0,251	0,127	0,143	0,107	0,084	0,074	1,93	0,64	1,99	1,51	3,01	2,62
35	0,254	0,128	0,145	0,108	0,085	0,074	1,95	0,63	1,99	1,51	3,00	2,62
36	0,251	0,126	0,135	0,110	0,082	0,074	1,82	0,71	2,00	1,54	3,08	2,62



**Tabla 6.91** Concentración de plomo, CPB

# corrida	1	2	3	4	5	6	7	8
	WS	WPb	WT	WTA	WPbA	CPbt	CPbA	CPb
	[gr]	[gr]	[gr]	[gr]	[gr]	[%]	[%]	[%]
1	3371	0,67	3371,67	2920	0,674	0,0200%	0,0231%	86,60%
2	6743	1,35	6744,35	5690	1,349	0,0200%	0,0237%	84,37%
3	3371	0,67	3371,67	3030	0,674	0,0200%	0,0223%	89,87%
4	6743	1,35	6744,35	6010	1,349	0,0200%	0,0224%	89,11%
5	3371	0,67	3371,67	2900	0,674	0,0200%	0,0232%	86,01%
6	6743	1,35	6744,35	5710	1,349	0,0200%	0,0236%	84,66%
7	3371	0,67	3371,67	3040	0,674	0,0200%	0,0222%	90,16%
8	6743	1,35	6744,35	5980	1,349	0,0200%	0,0226%	88,67%
9	3616	0,72	3616,72	3120	0,723	0,0200%	0,0232%	86,27%
10	7232	1,45	7233,45	6150	1,446	0,0200%	0,0235%	85,02%
11	3616	0,72	3616,72	3360	0,723	0,0200%	0,0215%	92,90%
12	7232	1,45	7233,45	6500	1,446	0,0200%	0,0223%	89,86%
13	3616	0,72	3616,72	3160	0,723	0,0200%	0,0229%	87,37%
14	7232	1,45	7233,45	6230	1,446	0,0200%	0,0232%	86,13%
15	3616	0,72	3616,72	3370	0,723	0,0200%	0,0215%	93,18%
16	7232	1,45	7233,45	6580	1,446	0,0200%	0,0220%	90,97%
17	3371	0,67	3371,67	2950	0,674	0,0200%	0,0229%	87,49%
18	6743	1,35	6744,35	5710	1,349	0,0200%	0,0236%	84,66%
19	3371	0,67	3371,67	3040	0,674	0,0200%	0,0222%	90,16%
20	6743	1,35	6744,35	5870	1,349	0,0200%	0,0230%	87,04%
21	3371	0,67	3371,67	2980	0,674	0,0200%	0,0226%	88,38%
22	6743	1,35	6744,35	5800	1,349	0,0200%	0,0233%	86,00%
23	3371	0,67	3371,67	3090	0,674	0,0200%	0,0218%	91,65%
24	6743	1,35	6744,35	6150	1,349	0,0200%	0,0219%	91,19%
25	3616	0,72	3616,72	3080	0,723	0,0200%	0,0235%	85,16%
26	7232	1,45	7233,45	6100	1,446	0,0200%	0,0237%	84,33%
27	3616	0,72	3616,72	3360	0,723	0,0200%	0,0215%	92,90%
28	7232	1,45	7233,45	6430	1,446	0,0200%	0,0225%	88,89%
29	3616	0,72	3616,72	3190	0,723	0,0200%	0,0227%	88,20%
30	7232	1,45	7233,45	6190	1,446	0,0200%	0,0234%	85,57%
31	3616	0,72	3616,72	3340	0,723	0,0200%	0,0217%	92,35%
32	7232	1,45	7233,45	6590	1,446	0,0200%	0,0219%	91,10%
33	5848	1,17	5849,17	5090	1,170	0,0200%	0,0230%	87,02%
34	5848	1,17	5849,17	5050	1,170	0,0200%	0,0232%	86,34%
35	5848	1,17	5849,17	5070	1,170	0,0200%	0,0231%	86,68%
36	5848	1,17	5849,17	5080	1,170	0,0200%	0,0230%	86,85%

En la tabla 6.91, se cálculo la concentración de plomo obtenida al finalizar cada ensayo.

Los datos obtenidos son los siguientes:

Columna 1 Peso de sólidos utilizado para cada ensayo en gramos

Columna 2 Peso de plomo total utilizado en gramos

Columna 3 Peso total de sólidos mas plomo en gramos:  $W_s - WP_b$

Columna 4 Peso seco total obtenido en ápex en gramos.

Columna 5 Peso total de plomo saliente por ápex en gramos.

Columna 6 concentraciones de plomo total utilizado para el ensayo:  $CP_{bt}/WT$

Columna 7 concentraciones de plomo total recopilado por ápex:  $WP_{b_A} / WT_A$

Columna 8 concentración final de plomo sobre la muestra arena final.  $CP_{bt}/CP_{b_A}$

**Tabla 6.92** cálculo concentración volumétrica y numero de Restricciones

# corrida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Qs	QL	Cv	Lv	Dc	LN	Dv	DA	DE	NR
	[L/s]	[L/s]		cm	cm		mm	mm	mm	
1	0,00668	1,25	0,53%	15	14,96	1,0027	54,20	17,60	41,95	1,85
2	0,01335	2,18	0,61%	15	14,96	1,0027	54,20	17,60	41,95	1,85
3	0,00668	1,25	0,53%	30	14,96	2,0053	54,20	17,60	41,95	1,85
4	0,01335	2,18	0,61%	30	14,96	2,0053	54,20	17,60	41,95	1,85
5	0,00668	1,25	0,53%	15	14,96	1,0027	54,20	22,55	41,95	1,96
6	0,01335	2,18	0,61%	15	14,96	1,0027	54,20	22,55	41,95	1,96
7	0,00668	1,25	0,53%	30	14,96	2,0053	54,20	22,55	41,95	1,96
8	0,01335	2,18	0,61%	30	14,96	2,0053	54,20	22,55	41,95	1,96
9	0,00828	1,25	0,66%	15	14,96	1,0027	54,20	17,60	41,95	1,85
10	0,01656	2,18	0,75%	15	14,96	1,0027	54,20	17,60	41,95	1,85
11	0,00828	1,25	0,66%	30	14,96	2,0053	54,20	17,60	41,95	1,85
12	0,01656	2,18	0,75%	30	14,96	2,0053	54,20	17,60	41,95	1,85
13	0,00828	1,25	0,66%	15	14,96	1,0027	54,20	22,55	41,95	1,96
14	0,01656	2,18	0,75%	15	14,96	1,0027	54,20	22,55	41,95	1,96
15	0,00828	1,25	0,66%	30	14,96	2,0053	54,20	22,55	41,95	1,96
16	0,01656	2,18	0,75%	30	14,96	2,0053	54,20	22,55	41,95	1,96
17	0,00668	1,25	0,53%	15	14,96	1,0027	54,20	17,60	41,95	1,85
18	0,01335	2,18	0,61%	15	14,96	1,0027	54,20	17,60	41,95	1,85
19	0,00668	1,25	0,53%	30	14,96	2,0053	54,20	17,60	41,95	1,85
20	0,01335	2,18	0,61%	30	14,96	2,0053	54,20	17,60	41,95	1,85
21	0,00668	1,25	0,53%	15	14,96	1,0027	54,20	22,55	41,95	1,96
22	0,01335	2,18	0,61%	15	14,96	1,0027	54,20	22,55	41,95	1,96
23	0,00668	1,25	0,53%	30	14,96	2,0053	54,20	22,55	41,95	1,96
24	0,01335	2,18	0,61%	30	14,96	2,0053	54,20	22,55	41,95	1,96
25	0,00828	1,25	0,66%	15	14,96	1,0027	54,20	17,60	41,95	1,85
26	0,01656	2,18	0,75%	15	14,96	1,0027	54,20	17,60	41,95	1,85
27	0,00828	1,25	0,66%	30	14,96	2,0053	54,20	17,60	41,95	1,85
28	0,01656	2,18	0,75%	30	14,96	2,0053	54,20	17,60	41,95	1,85
29	0,00828	1,25	0,66%	15	14,96	1,0027	54,20	22,55	41,95	1,96
30	0,01656	2,18	0,75%	15	14,96	1,0027	54,20	22,55	41,95	1,96
31	0,00828	1,25	0,66%	30	14,96	2,0053	54,20	22,55	41,95	1,96
32	0,01656	2,18	0,75%	30	14,96	2,0053	54,20	22,55	41,95	1,96
33	0,01238	1,56	0,79%	15	14,96	1,0027	54,20	17,60	41,95	1,85
34	0,01238	1,56	0,79%	15	14,96	1,0027	54,20	17,60	41,95	1,85
35	0,01238	1,56	0,79%	15	14,96	1,0027	54,20	17,60	41,95	1,85
36	0,01238	1,56	0,79%	15	14,96	1,0027	54,20	17,60	41,95	1,85

En la tabla 6.92, se realizaron los cálculos de la concentración volumétrica y el número de Reynolds para cada ensayo realizado en el hidrociclón; los datos recopilados son los siguientes.

Columna 1 Caudal de sólidos en litros por segundo

Columna 2 Caudal de líquido en litros por segundo

Columna 3 Concentración volumétrica  $\frac{Q_s}{Q_s + Q_L}$

Columna 4 Altura del hidrociclón en centímetros

Columna 5 Diámetro del hidrociclón en centímetros

Columna 6 Longitud normalizada:  $\frac{L_v}{D_c}$

Columna 7 Diámetro de Vortex en milímetros

Columna 8 diámetro de ápex en milímetros

Columna 9 diámetro de entrada en milímetros

Columna 10 Número de Restricciones  $\frac{DV^2 + DA^2}{DE^2}$

**Tabla 6.93** Calculo número de Deam y Euler

# corrida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	T [°]	$\square$ cm2/s	$\square$ m Kg/m3	P m	A cm2	QT cm3/s	$V_m$ m/s	DE cm	DC cm	De	Eu
1	15,8	0,0113	1002,18	0,64	13,82	1250	0,904	4,2	14,96	17799	15,199
2	16,5	0,0111	1002,56	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,840
3	15,8	0,0113	1002,18	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,199
4	16,5	0,0111	1002,56	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,840
5	15,8	0,0113	1002,18	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,199
6	16,5	0,0111	1002,56	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,840
7	15,8	0,0113	1002,18	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,199
8	16,5	0,0111	1002,56	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,840
9	15,8	0,0113	1002,63	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,193
10	16,5	0,0111	1003,07	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,836
11	15,8	0,0113	1002,63	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,193
12	16,5	0,0111	1003,07	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,836
13	15,8	0,0113	1002,63	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,193
14	16,5	0,0111	1003,07	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,836
15	15,8	0,0113	1002,63	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,193
16	16,5	0,0111	1003,07	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,836
17	15,8	0,0113	1002,18	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,199
18	16,5	0,0111	1002,56	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,840
19	15,8	0,0113	1002,18	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,199
20	16,5	0,0111	1002,56	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,840
21	15,8	0,0113	1002,18	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,199
22	16,5	0,0111	1002,56	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,840
23	15,8	0,0113	1002,18	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,199
24	16,5	0,0111	1002,56	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,840
25	15,8	0,0113	1002,63	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,193
26	16,5	0,0111	1003,07	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,836
27	15,8	0,0113	1002,63	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,193
28	16,5	0,0111	1003,07	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,836
29	15,8	0,0113	1002,63	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,193
30	16,5	0,0111	1003,07	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,836
31	15,8	0,0113	1002,63	0,64	13,82	1250	0,90	4,2	14,96	17799	15,193
32	16,5	0,0111	1003,07	1,00	13,82	2184	1,58	4,2	14,96	31653	7,836
33	16,0	0,0112	1003,62	0,85	13,82	1558	1,13	4,2	14,96	22299	13,078
34	16,0	0,0112	1003,62	0,85	13,82	1558	1,13	4,2	14,96	22299	13,078
35	16,0	0,0112	1003,62	0,85	13,82	1558	1,13	4,2	14,96	22299	13,078
36	16,0	0,0112	1003,62	0,85	13,82	1558	1,13	4,2	14,96	22299	13,078

Los cálculos realizados en la tabla 6.93, son el número de Deam y Euler se tuvo en cuenta las siguientes variables:

Columna 1 Temperatura del agua en grados centígrados

Columna 2 viscosidad del agua en centímetro cuadrado por segundo

Columna 3 densidad de la muestra [ $\text{Kg. /m}^3$ ]

Columna 4 Presión del agua a la entrada del hidrociclón en metros.

Columna 5 Área del tubo de entrada del ciclón en centímetro cuadrado

Columna 6 Caudal en centímetro cúbico por segundo

Columna 7 Velocidad de mezcla [ $\text{m/s}$ ]

Columna 8 Diámetro de entrada en centímetros

Columna 9 Diámetro del ciclón en centímetros

Columna 10 Número de Deam con la ecuación 8.5

Columna 11 Número de Euler con la ecuación 8.6

**Tabla 6.94** cálculo de las propiedades de los sedimentos con variación de la concentración

# Corrida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Tipo de Muestra	d <sub>50</sub> [mm]	C [mm]	T° [%]	γ <sub>w</sub> [°C]	ρ <sub>w</sub> [Kg./m <sup>3</sup> ]	ρ <sub>s</sub> [Kg./m <sup>3</sup> ]	ρ <sub>m</sub> [Kg./m <sup>3</sup> ]	G <sub>s</sub> [gr./cm <sup>3</sup> ]	Δ	V <sub>w</sub> [m <sup>2</sup> /s]
	1	Arena gris	0,12	0,53	15,8	998,75	998,7	2805,1	1002,2	2,805	1,809
2	Arena gris	0,12	0,61	16,5	998,63	998,6	2805,1	1002,6	2,805	1,809	1,109E-06
3	Arena gris	0,12	0,53	15,8	998,75	998,7	2805,1	1002,2	2,805	1,809	1,129E-06
4	Arena gris	0,12	0,61	16,5	998,63	998,6	2805,1	1002,6	2,805	1,809	1,109E-06
5	Arena gris	0,12	0,53	15,8	998,75	998,7	2805,1	1002,2	2,805	1,809	1,129E-06
6	Arena gris	0,12	0,61	16,5	998,63	998,6	2805,1	1002,6	2,805	1,809	1,109E-06
7	Arena gris	0,12	0,53	15,8	998,75	998,7	2805,1	1002,2	2,805	1,809	1,129E-06
8	Arena gris	0,12	0,61	16,5	998,63	998,6	2805,1	1002,6	2,805	1,809	1,109E-06
9	Arena Café	0,35	0,66	15,8	998,75	998,7	2426,9	1002,6	2,427	1,430	1,129E-06
10	Arena Café	0,35	0,75	16,5	998,63	998,6	2426,9	1003,1	2,427	1,430	1,109E-06
11	Arena Café	0,35	0,66	15,8	998,75	998,7	2426,9	1002,6	2,427	1,430	1,129E-06
12	Arena Café	0,35	0,75	16,5	998,63	998,6	2426,9	1003,1	2,427	1,430	1,109E-06
13	Arena Café	0,35	0,66	15,8	998,75	998,7	2426,9	1002,6	2,427	1,430	1,129E-06
14	Arena Café	0,35	0,75	16,5	998,63	998,6	2426,9	1003,1	2,427	1,430	1,109E-06
15	Arena Café	0,35	0,66	15,8	998,75	998,7	2426,9	1002,6	2,427	1,430	1,129E-06
16	Arena Café	0,35	0,75	16,5	998,63	998,6	2426,9	1003,1	2,427	1,430	1,109E-06
17	Arena gris	0,12	0,53	15,8	998,75	998,7	2805,1	1002,2	2,805	1,809	1,129E-06
18	Arena gris	0,12	0,61	16,5	998,63	998,6	2805,1	1002,6	2,805	1,809	1,109E-06
19	Arena gris	0,12	0,53	15,8	998,75	998,7	2805,1	1002,2	2,805	1,809	1,129E-06
20	Arena gris	0,12	0,61	16,5	998,63	998,6	2805,1	1002,6	2,805	1,809	1,109E-06
21	Arena gris	0,12	0,53	15,8	998,75	998,7	2805,1	1002,2	2,805	1,809	1,129E-06
22	Arena gris	0,12	0,61	16,5	998,63	998,6	2805,1	1002,6	2,805	1,809	1,109E-06
23	Arena gris	0,12	0,53	15,8	998,75	998,7	2805,1	1002,2	2,805	1,809	1,129E-06
24	Arena gris	0,12	0,61	16,5	998,63	998,6	2805,1	1002,6	2,805	1,809	1,109E-06
25	Arena Café	0,35	0,66	15,8	998,75	998,7	2426,9	1002,6	2,427	1,430	1,129E-06
26	Arena Café	0,35	0,75	16,5	998,63	998,6	2426,9	1003,1	2,427	1,430	1,109E-06
27	Arena Café	0,35	0,66	15,8	998,75	998,7	2426,9	1002,6	2,427	1,430	1,129E-06
28	Arena Café	0,35	0,75	16,5	998,63	998,6	2426,9	1003,1	2,427	1,430	1,109E-06
29	Arena Café	0,35	0,66	15,8	998,75	998,7	2426,9	1002,6	2,427	1,430	1,129E-06
30	Arena Café	0,35	0,75	16,5	998,63	998,6	2426,9	1003,1	2,427	1,430	1,109E-06
31	Arena Café	0,35	0,66	15,8	998,75	998,7	2426,9	1002,6	2,427	1,430	1,129E-06
32	Arena Café	0,35	0,75	16,5	998,63	998,6	2426,9	1003,1	2,427	1,430	1,109E-06
33	Arena Negra	0,20	0,79	16,0	998,72	998,7	2624,3	1003,6	2,624	1,628	1,123E-06
34	Arena Negra	0,20	0,79	16,0	998,72	998,7	2624,3	1003,6	2,624	1,628	1,123E-06
35	Arena Negra	0,201	0,8	16,0	998,72	998,7	2624,3	1003,6	2,624	1,628	1,123E-06
36	Arena Negra	0,20	0,79	16,0	998,72	998,7	2624,3	1003,6	2,624	1,628	1,123E-06

Continuación **Tabla 6.94** cálculo de las propiedades de los Sedimentos con variación de la concentración

# de Corrida	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	$v_m$ por C [m <sup>2</sup> /s]	$d^*$	$d^{*1}$	$R_s$	$R_m$	$n$	$V_s$ [m/s]	$V_m$ [m/s]	$C_D$	$C'_D$
1	1,138E-06	2,9	2,8	0,9	0,8	4,855	0,008	0,008	42,00	43,11
2	1,119E-06	2,9	2,9	0,9	0,9	4,845	0,008	0,008	40,75	41,98
3	1,138E-06	2,9	2,8	0,9	0,8	4,855	0,008	0,008	42,00	43,11
4	1,119E-06	2,9	2,9	0,9	0,9	4,845	0,008	0,008	40,75	41,98
5	1,138E-06	2,9	2,8	0,9	0,8	4,855	0,008	0,008	42,00	43,11
6	1,119E-06	2,9	2,9	0,9	0,9	4,845	0,008	0,008	40,75	41,98
7	1,138E-06	2,9	2,8	0,9	0,8	4,855	0,008	0,008	42,00	43,11
8	1,119E-06	2,9	2,9	0,9	0,9	4,845	0,008	0,008	40,75	41,98
9	1,140E-06	7,8	7,7	10,8	10,6	3,585	0,035	0,034	5,35	5,45
10	1,121E-06	7,9	7,8	11,1	10,8	3,573	0,035	0,034	5,25	5,36
11	1,140E-06	7,8	7,7	10,8	10,6	3,585	0,035	0,034	5,35	5,45
12	1,121E-06	7,9	7,8	11,1	10,8	3,573	0,035	0,034	5,25	5,36
13	1,140E-06	7,8	7,7	10,8	10,6	3,585	0,035	0,034	5,35	5,45
14	1,121E-06	7,9	7,8	11,1	10,8	3,573	0,035	0,034	5,25	5,36
15	1,140E-06	7,8	7,7	10,8	10,6	3,585	0,035	0,034	5,35	5,45
16	1,121E-06	7,9	7,8	11,1	10,8	3,573	0,035	0,034	5,25	5,36
17	1,138E-06	2,9	2,8	0,9	0,8	4,855	0,008	0,008	42,00	43,11
18	1,119E-06	2,9	2,9	0,9	0,9	4,845	0,008	0,008	40,75	41,98
19	1,138E-06	2,9	2,8	0,9	0,8	4,855	0,008	0,008	42,00	43,11
20	1,119E-06	2,9	2,9	0,9	0,9	4,845	0,008	0,008	40,75	41,98
21	1,138E-06	2,9	2,8	0,9	0,8	4,855	0,008	0,008	42,00	43,11
22	1,119E-06	2,9	2,9	0,9	0,9	4,845	0,008	0,008	40,75	41,98
23	1,138E-06	2,9	2,8	0,9	0,8	4,855	0,008	0,008	42,00	43,11
24	1,119E-06	2,9	2,9	0,9	0,9	4,845	0,008	0,008	40,75	41,98
25	1,140E-06	7,8	7,7	10,8	10,6	3,585	0,035	0,034	5,35	5,45
26	1,121E-06	7,9	7,8	11,1	10,8	3,573	0,035	0,034	5,25	5,36
27	1,140E-06	7,8	7,7	10,8	10,6	3,585	0,035	0,034	5,35	5,45
28	1,121E-06	7,9	7,8	11,1	10,8	3,573	0,035	0,034	5,25	5,36
29	1,140E-06	7,8	7,7	10,8	10,6	3,585	0,035	0,034	5,35	5,45
30	1,121E-06	7,9	7,8	11,1	10,8	3,573	0,035	0,034	5,25	5,36
31	1,140E-06	7,8	7,7	10,8	10,6	3,585	0,035	0,034	5,35	5,45
32	1,121E-06	7,9	7,8	11,1	10,8	3,573	0,035	0,034	5,25	5,36
33	1,136E-06	4,7	4,6	3,2	3,1	4,273	0,018	0,017	13,45	13,87
34	1,136E-06	4,7	4,6	3,2	3,1	4,273	0,018	0,017	13,45	13,87
35	1,136E-06	4,685	4,6	3,186	3,068	4,273	0,0178	0,0172	13,45	13,87
36	1,136E-06	4,7	4,6	3,2	3,1	4,273	0,018	0,017	13,45	13,87



Los cálculos realizados en la tabla 6.94, de las propiedades de los sedimentos con variación de la concentración se los realizo de la siguiente manera:

Columna 1 Tipo de arena o muestra utilizada en el ensayo

Columna 2  $d_{50}$  de los sólidos [mm]

Columna 3 Concentración volumétrica [%]

Columna 4 Temperatura del agua [°C]

Columna 5 peso específico del agua a temperatura Kg. /m<sup>3</sup>

$$\gamma_w = 10^{-5}T^3 - 0,0055T^2 + 0,0002T + 1000,08$$

Columna 6 densidad del Agua Kg. /m<sup>3</sup>

Columna 7 densidad del sólido Kg. /m<sup>3</sup>

Columna 8 densidad de la muestra

$$\rho_m = \frac{\rho_w}{1 - C \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} \right)}$$

Columna 9 Peso específico de los sólidos gr. /cm<sup>3</sup>

Columna 10 Gravedad específica sumergida

Columna 11 Viscosidad cinemática del agua m<sup>2</sup>/s

$$\nu_w = \frac{0,000001792}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2}$$

Columna 12 viscosidad cinemática de la mezcla m<sup>2</sup>/s

$$\nu_m = \frac{2\nu_w}{2 - 3C}$$

Columna 13 diámetro adimensional de partícula

$$d^* = \left( \frac{\Delta g}{\nu_w^2} \right)^{1/3} * \frac{d_{50}}{1000}$$

Columna 14 diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla

$$d^{* *} = \left[ \frac{(1 - C)(2 - 3C)}{4(1 + C\Delta)} \right]^{1/3} d^*$$

Columna 15 número de Reynolds de la partícula para sedimentos naturales

$$Rs = \left[ (25 + 1.2d^{*2})^{0.5} - 5 \right]^{1.5}$$

Columna 16 número de Reynolds de partículas afectadas por la mezcla

$$Rm = \left[ (25 + 1.2d'^{*2})^{0.5} - 5 \right]^{1.5}$$

Columna 17 exponente que cuantifica el efecto de la concentración sobre la velocidad de asentamiento de las partículas

$$n = \frac{\text{Log}\left(\frac{2-2C}{2-3C}\right) + \text{Log}\left(\frac{Rm}{Rs}\right)}{\text{Log}(1-C)}$$

Columna 18 Velocidad de sólido [m/s]

$$Vs = \frac{Rs v_w}{d_{50} 10^{-3}}$$

Columna 19 velocidad promedio de la mezcla [m/s]

$$Vm = Vs(1-C)^n$$

Columna 20 coeficiente de arrastre de las partículas

$$C_D = \left[ \left( \frac{32}{Rs} \right)^{2/3} + 1 \right]^{1.5}$$

Columna 21 coeficiente de arrastre de las partículas afectadas por la mezcla

$$C'_D = \left[ \left( \frac{32}{Rm} \right)^{2/3} + 1 \right]^{1.5}$$

**Tabla 6.95** Valores Iniciales Regresión Lineal Múltiple

No Ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8
	De [a <sub>1</sub> ]	NR [a <sub>2</sub> ]	LN[a <sub>3</sub> ]	CV [a <sub>4</sub> ]	C <sub>D</sub> [a <sub>5</sub> ]	CPb [y]	PA	RA
1	17799	1,85	1,00	0,0053	43,11	0,866	0,6765	0,8662
2	31653	1,85	1,00	0,0061	41,98	0,844	0,8736	0,8438
3	17799	1,85	2,01	0,0053	43,11	0,899	0,6765	0,8988
4	31653	1,85	2,01	0,0061	41,98	0,891	0,8736	0,8913
5	17799	1,96	1,00	0,0053	43,11	0,860	0,6765	0,8603
6	31653	1,96	1,00	0,0061	41,98	0,847	0,8736	0,8468
7	17799	1,96	2,01	0,0053	43,11	0,902	0,6765	0,9018
8	31653	1,96	2,01	0,0061	41,98	0,887	0,8736	0,8868
9	17799	1,85	1,00	0,0066	5,45	0,863	0,6765	0,8628
10	31653	1,85	1,00	0,0075	5,36	0,850	0,8736	0,8504
11	17799	1,85	2,01	0,0066	5,45	0,929	0,6765	0,9292
12	31653	1,85	2,01	0,0075	5,36	0,899	0,8736	0,8988
13	17799	1,96	1,00	0,0066	5,45	0,874	0,6765	0,8739
14	31653	1,96	1,00	0,0075	5,36	0,861	0,8736	0,8614
15	17799	1,96	2,01	0,0066	5,45	0,932	0,6765	0,9320
16	31653	1,96	2,01	0,0075	5,36	0,910	0,8736	0,9098
17	17799	1,85	1,00	0,0053	43,11	0,875	0,6765	0,8751
18	31653	1,85	1,00	0,0061	41,98	0,847	0,8736	0,8468
19	17799	1,85	2,01	0,0053	43,11	0,902	0,6765	0,9018
20	31653	1,85	2,01	0,0061	41,98	0,870	0,8736	0,8705
21	17799	1,96	1,00	0,0053	43,11	0,884	0,6765	0,8840
22	31653	1,96	1,00	0,0061	41,98	0,860	0,8736	0,8602
23	17799	1,96	2,01	0,0053	43,11	0,916	0,6765	0,9166
24	31653	1,96	2,01	0,0061	41,98	0,912	0,8736	0,9121
25	17799	1,85	1,00	0,0066	5,45	0,852	0,6765	0,8518
26	31653	1,85	1,00	0,0075	5,36	0,843	0,8736	0,8435
27	17799	1,85	2,01	0,0066	5,45	0,929	0,6765	0,9292
28	31653	1,85	2,01	0,0075	5,36	0,889	0,8736	0,8891
29	17799	1,96	1,00	0,0066	5,45	0,882	0,6765	0,8822
30	31653	1,96	1,00	0,0075	5,36	0,856	0,8736	0,8559
31	17799	1,96	2,01	0,0066	5,45	0,923	0,6765	0,9237
32	31653	1,96	2,01	0,0075	5,36	0,911	0,8736	0,9112
33	22299	1,85	1,00	0,0079	13,87	0,870	0,8023	0,8704
34	22299	1,85	1,00	0,0079	13,87	0,863	0,8023	0,8635
35	22299	1,85	1,00	0,0079	13,87	0,867	0,8023	0,8670
36	22299	1,85	1,00	0,0079	13,87	0,868	0,8023	0,8687

De los valores establecidos en la tabla 6.95, se aplica la Regresión Lineal Múltiple matricialmente por medio de Excel y se obtienen los valores de las variables  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $a_5$  y "Y" como variable dependiente y se reemplaza en la ecuación 8.4, para calcular la Concentración de plomo teórica. (Ver Anexo 1A).

$$a_1 = -0.050044$$

$$a_2 = 0.202853$$

$$a_3 = 0.075226$$

$$a_4 = 0.050924$$

$$a_5 = 0.000527$$

$$b = 0.208178$$

$$r^2 = 0.898$$

$$CPb = 10^{0.208178} [De]^{-0.050044} [N_R]^{0.202853} [L_N]^{0.075226} [C_V]^{0.050924} [C_D]^{0.000527} \quad [EC 6.1]$$

Aplicando la ecuación 6.1, se calculan los valores de CPb en la tabla 6.94, se calculan los valores teóricos y su porcentaje de error teórico experimental obtenidos por los diferentes ensayos.

Para calcular el porcentaje de error de concentración de plomo se aplica la ecuación 6.2.

$$\% \text{ error} = \frac{CPb_{ex} - CPb_{teo}}{CPb_{ex}} \times 100 \quad [EC 6.2]$$

Para calcular el valor de la concentración de plomo de ápex se aplica la ecuación 6.3, se ubica los valores en la tabla 6.94.

$$CPb_A = \frac{CPbt}{CPb_{teor}} \quad [EC 6.3]$$

**Tabla 6.96** cálculo CPb teórico por medio de Regresión Lineal Múltiple

No Datos	a <sub>1</sub> Log(De)	a <sub>2</sub> LOG(NR)	a <sub>3</sub> LOG(LN)	a <sub>4</sub> LOG(C)	a <sub>5</sub> LOG(C'D)	y LOG(CPb)	(CPb) ec. TEOR	error	(CPb <sub>A</sub> ) ec. TEOR	error
1	4,2504	0,2661	0,0012	-2,2747	1,6346	-0,0625	0,860	0,7%	0,0232%	0,7%
2	4,5004	0,2661	0,0012	-2,2162	1,6231	-0,0738	0,841	0,3%	0,0238%	0,3%
3	4,2504	0,2661	0,3022	-2,2747	1,6346	-0,0464	0,906	0,8%	0,0221%	0,8%
4	4,5004	0,2661	0,3022	-2,2162	1,6231	-0,0501	0,886	0,5%	0,0226%	0,5%
5	4,2504	0,2919	0,0012	-2,2747	1,6346	-0,0654	0,871	1,2%	0,0230%	1,2%
6	4,5004	0,2919	0,0012	-2,2162	1,6231	-0,0723	0,852	0,6%	0,0235%	0,6%
7	4,2504	0,2919	0,3022	-2,2747	1,6346	-0,0450	0,917	1,7%	0,0218%	1,7%
8	4,5004	0,2919	0,3022	-2,2162	1,6231	-0,0522	0,897	1,2%	0,0223%	1,2%
9	4,2504	0,2661	0,0012	-2,1819	0,7360	-0,0642	0,869	0,7%	0,0230%	0,7%
10	4,5004	0,2661	0,0012	-2,1235	0,7292	-0,0705	0,850	0,1%	0,0235%	0,1%
11	4,2504	0,2661	0,3022	-2,1819	0,7360	-0,0320	0,915	1,5%	0,0219%	1,5%
12	4,5004	0,2661	0,3022	-2,1235	0,7292	-0,0464	0,895	0,4%	0,0223%	0,4%
13	4,2504	0,2919	0,0012	-2,1819	0,7360	-0,0586	0,879	0,6%	0,0227%	0,6%
14	4,5004	0,2919	0,0012	-2,1235	0,7292	-0,0649	0,860	0,1%	0,0233%	0,1%
15	4,2504	0,2919	0,3022	-2,1819	0,7360	-0,0307	0,926	0,6%	0,0216%	0,6%
16	4,5004	0,2919	0,3022	-2,1235	0,7292	-0,0411	0,906	0,4%	0,0221%	0,4%
17	4,2504	0,2661	0,0012	-2,2747	1,6346	-0,0580	0,860	1,7%	0,0232%	1,7%
18	4,5004	0,2661	0,0012	-2,2162	1,6231	-0,0723	0,841	0,6%	0,0238%	0,6%
19	4,2504	0,2661	0,3022	-2,2747	1,6346	-0,0450	0,906	0,5%	0,0221%	0,5%
20	4,5004	0,2661	0,3022	-2,2162	1,6231	-0,0603	0,886	1,9%	0,0226%	1,8%
21	4,2504	0,2919	0,0012	-2,2747	1,6346	-0,0536	0,871	1,5%	0,0230%	1,5%
22	4,5004	0,2919	0,0012	-2,2162	1,6231	-0,0655	0,852	1,0%	0,0235%	1,0%
23	4,2504	0,2919	0,3022	-2,2747	1,6346	-0,0379	0,917	0,1%	0,0218%	0,1%
24	4,5004	0,2919	0,3022	-2,2162	1,6231	-0,0401	0,897	1,6%	0,0223%	1,6%
25	4,2504	0,2661	0,0012	-2,1819	0,7360	-0,0698	0,869	2,0%	0,0230%	2,0%
26	4,5004	0,2661	0,0012	-2,1235	0,7292	-0,0740	0,850	0,8%	0,0235%	0,8%
27	4,2504	0,2661	0,3022	-2,1819	0,7360	-0,0320	0,915	1,5%	0,0219%	1,5%
28	4,5004	0,2661	0,3022	-2,1235	0,7292	-0,0511	0,895	0,7%	0,0223%	0,7%
29	4,2504	0,2919	0,0012	-2,1819	0,7360	-0,0545	0,879	0,3%	0,0227%	0,3%
30	4,5004	0,2919	0,0012	-2,1235	0,7292	-0,0677	0,860	0,5%	0,0233%	0,5%
31	4,2504	0,2919	0,3022	-2,1819	0,7360	-0,0346	0,926	0,3%	0,0216%	0,3%
32	4,5004	0,2919	0,3022	-2,1235	0,7292	-0,0405	0,906	0,6%	0,0221%	0,6%
33	4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	-0,0604	0,867	0,3%	0,0231%	0,3%
34	4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	-0,0638	0,867	0,4%	0,0231%	0,4%
35	4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	-0,0621	0,867	0,0%	0,0231%	0,0%
36	4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	-0,0612	0,867	0,1%	0,0231%	0,1%

El valor promedio de error de los datos obtenido es de 0.77 % para el valor de CPb Y CPb<sub>A</sub> el cual es un valor pequeño comparado con la magnitud de todos los ensayos realizados.

**Tabla 6.97** Correlación Matemática para La pérdida de energía, H.

a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	y	(Eu) ec. TEOR	Error (Eu) ec. TEOR
Log(De)	LOG(NR)	LOG(LN)	LOG(C)	LOG(C'D)	LOG(Eu)		
4,2504	0,2661	0,0012	-2,2747	1,6346	1,1818	15	0,01%
4,5004	0,2661	0,0012	-2,2162	1,6231	0,8943	8	0,01%
4,2504	0,2661	0,3022	-2,2747	1,6346	1,1818	15	0,01%
4,5004	0,2661	0,3022	-2,2162	1,6231	0,8943	8	0,01%
4,2504	0,2919	0,0012	-2,2747	1,6346	1,1818	15	0,01%
4,5004	0,2919	0,0012	-2,2162	1,6231	0,8943	8	0,01%
4,2504	0,2919	0,3022	-2,2747	1,6346	1,1818	15	0,01%
4,5004	0,2919	0,3022	-2,2162	1,6231	0,8943	8	0,01%
4,2504	0,2661	0,0012	-2,1819	0,7360	1,1816	15	0,01%
4,5004	0,2661	0,0012	-2,1235	0,7292	0,8941	8	0,01%
4,2504	0,2661	0,3022	-2,1819	0,7360	1,1816	15	0,01%
4,5004	0,2661	0,3022	-2,1235	0,7292	0,8941	8	0,01%
4,2504	0,2919	0,0012	-2,1819	0,7360	1,1816	15	0,01%
4,5004	0,2919	0,0012	-2,1235	0,7292	0,8941	8	0,01%
4,2504	0,2919	0,3022	-2,1819	0,7360	1,1816	15	0,01%
4,5004	0,2919	0,3022	-2,1235	0,7292	0,8941	8	0,01%
4,2504	0,2661	0,0012	-2,2747	1,6346	1,1818	15	0,01%
4,5004	0,2661	0,0012	-2,2162	1,6231	0,8943	8	0,01%
4,2504	0,2661	0,3022	-2,2747	1,6346	1,1818	15	0,01%
4,5004	0,2661	0,3022	-2,2162	1,6231	0,8943	8	0,01%
4,2504	0,2919	0,0012	-2,2747	1,6346	1,1818	15	0,01%
4,5004	0,2919	0,0012	-2,2162	1,6231	0,8943	8	0,01%
4,2504	0,2919	0,3022	-2,2747	1,6346	1,1818	15	0,01%
4,5004	0,2919	0,3022	-2,2162	1,6231	0,8943	8	0,01%
4,2504	0,2661	0,0012	-2,1819	0,7360	1,1816	15	0,01%
4,5004	0,2661	0,0012	-2,1235	0,7292	0,8941	8	0,01%
4,2504	0,2919	0,0012	-2,1819	0,7360	1,1816	15	0,01%
4,5004	0,2919	0,0012	-2,1235	0,7292	0,8941	8	0,01%
4,2504	0,2919	0,3022	-2,1819	0,7360	1,1816	15	0,01%
4,5004	0,2919	0,3022	-2,1235	0,7292	0,8941	8	0,01%
4,2504	0,2661	0,0012	-2,1819	0,7360	1,1816	15	0,01%
4,5004	0,2661	0,0012	-2,1235	0,7292	0,8941	8	0,01%
4,2504	0,2919	0,0012	-2,1819	0,7360	1,1816	15	0,01%
4,5004	0,2919	0,0012	-2,1235	0,7292	0,8941	8	0,01%
4,2504	0,2919	0,3022	-2,1819	0,7360	1,1816	15	0,01%
4,5004	0,2919	0,3022	-2,1235	0,7292	0,8941	8	0,01%
4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	1,1165	13	0,00%
4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	1,1165	13	0,00%
4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	1,1165	13	0,00%
4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	1,1165	13	0,00%

El valor promedio de error fue de 0.01% valor extremadamente bajo.

En la tabla 6.97, se reemplaza el valor de CPb por el número de Euler (Eu) para realizar la regresión lineal múltiple y se calculan las siguientes variables: (ver anexo 2A).

$$a_1 = -1.2609$$

$$a_2 = 0.0000$$

$$a_3 = 0.0000$$

$$a_4 = 0.48317$$

$$a_5 = 0.05023$$

$$b = 7.5583$$

$$r^2 = 1.00$$

Para calcular el número de Euler teórico se reemplaza los valores calculados en la ecuación 8.11 y quedaría así:

$$Eu = 10^{7.5583} [De]^{-1.2609} [N_R]^0 [L_N]^0 [C_V]^{0.48317} [C_D']^{0.05023} \quad [EC 6.4]$$

El porcentaje de error de Eu se calcula con la ecuación 6.2.

Debido al exponente cero la ecuación se reduce a:

$$Eu = 10^{7.5583} [De]^{-1.2609} [C_V]^{0.48317} [C_D']^{0.05023} \quad [EC 6.4B]$$

El cual se recomendaría no tener en cuenta el número de restricciones y longitud normalizada para el cálculo del número de Euler.

**Tabla 6.98** Correlación matemática para la Partición de Agua, PA.

No Datos	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	y	(PA) ec. TEOR	Error (PA) ec. TEOR
	Log(De)	LOG(NR)	LOG(LN)	LOG(C)	LOG(C'D)	LOG(PA)		
1	4,2504	0,2661	0,0012	-2,2747	1,6346	-0,1698	0,677	0,01%
2	4,5004	0,2661	0,0012	-2,2162	1,6231	-0,0587	0,874	0,0%
3	4,2504	0,2661	0,3022	-2,2747	1,6346	-0,1698	0,677	0,0%
4	4,5004	0,2661	0,3022	-2,2162	1,6231	-0,0587	0,874	0,0%
5	4,2504	0,2919	0,0012	-2,2747	1,6346	-0,1698	0,677	0,0%
6	4,5004	0,2919	0,0012	-2,2162	1,6231	-0,0587	0,874	0,0%
7	4,2504	0,2919	0,3022	-2,2747	1,6346	-0,1698	0,677	0,0%
8	4,5004	0,2919	0,3022	-2,2162	1,6231	-0,0587	0,874	0,0%
9	4,2504	0,2661	0,0012	-2,1819	0,7360	-0,1698	0,676	0,0%
10	4,5004	0,2661	0,0012	-2,1235	0,7292	-0,0587	0,874	0,0%
11	4,2504	0,2661	0,3022	-2,1819	0,7360	-0,1698	0,676	0,0%
12	4,5004	0,2661	0,3022	-2,1235	0,7292	-0,0587	0,874	0,0%
13	4,2504	0,2919	0,0012	-2,1819	0,7360	-0,1698	0,676	0,0%
14	4,5004	0,2919	0,0012	-2,1235	0,7292	-0,0587	0,874	0,0%
15	4,2504	0,2919	0,3022	-2,1819	0,7360	-0,1698	0,676	0,0%
16	4,5004	0,2919	0,3022	-2,1235	0,7292	-0,0587	0,874	0,0%
17	4,2504	0,2661	0,0012	-2,2747	1,6346	-0,1698	0,677	0,0%
18	4,5004	0,2661	0,0012	-2,2162	1,6231	-0,0587	0,874	0,0%
19	4,2504	0,2661	0,3022	-2,2747	1,6346	-0,1698	0,677	0,0%
20	4,5004	0,2661	0,3022	-2,2162	1,6231	-0,0587	0,874	0,0%
21	4,2504	0,2919	0,0012	-2,2747	1,6346	-0,1698	0,677	0,0%
22	4,5004	0,2919	0,0012	-2,2162	1,6231	-0,0587	0,874	0,0%
23	4,2504	0,2919	0,3022	-2,2747	1,6346	-0,1698	0,677	0,0%
24	4,5004	0,2919	0,3022	-2,2162	1,6231	-0,0587	0,874	0,0%
25	4,2504	0,2661	0,0012	-2,1819	0,7360	-0,1698	0,676	0,0%
26	4,5004	0,2661	0,0012	-2,1235	0,7292	-0,0587	0,874	0,0%
27	4,2504	0,2661	0,3022	-2,1819	0,7360	-0,1698	0,676	0,0%
28	4,5004	0,2661	0,3022	-2,1235	0,7292	-0,0587	0,874	0,0%
29	4,2504	0,2919	0,0012	-2,1819	0,7360	-0,1698	0,676	0,0%
30	4,5004	0,2919	0,0012	-2,1235	0,7292	-0,0587	0,874	0,0%
31	4,2504	0,2919	0,3022	-2,1819	0,7360	-0,1698	0,676	0,0%
32	4,5004	0,2919	0,3022	-2,1235	0,7292	-0,0587	0,874	0,0%
33	4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	-0,0957	0,802	0,0%
34	4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	-0,0957	0,802	0,0%
35	4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	-0,0957	80,23%	0,0%
36	4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	-0,0957	0,802	0,0%

El valor de error promedio de todos los ensayos fue de 0.0 %



En la tabla 6.98, se reemplaza el valor de CPB por el número de partición de agua (PA) para realizar la regresión lineal múltiple y se calculan las siguientes variables: (ver Anexo 3A).

$$a_1 = 0.3724$$

$$a_2 = 0.0000$$

$$a_3 = 0.0000$$

$$a_4 = 0.31232$$

$$a_5 = 0.03232$$

$$b = -1.0948$$

$$r^2 = 1.00$$

Para calcular el número de partición de agua se reemplaza los valores calculados en la ecuación 4.13 y quedaría así:

$$PA = 10^{-1.0948} [De]^{0.3724} [N_R]^0 [L_N]^0 [C_V]^{0.31232} [C_D']^{0.03232} \quad [EC 6.5]$$

El porcentaje de error de PA se calcula con la ecuación 6.2.

La ecuación se reduce a:

$$PA = 10^{-1.0948} [De]^{0.3724} [C_V]^{0.31232} [C_D']^{0.03232} \quad [EC 6.5B]$$

El cual se recomienda quitar del sistema número de restricciones y longitud normalizada para el cálculo de la partición de agua.

**Tabla 6.99** Correlación Matemática para la Remoción de Arena.

No Datos	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	y	(RA) ec. TEOR	Error (RA) ec. TEOR
	Log(De)	LOG(NR)	LOG(LN)	LOG(C)	LOG(C'D)	LOG(RA)		
1	4,2504	0,2661	0,0012	-2,2747	1,6346	-0,0624	0,860	0,7%
2	4,5004	0,2661	0,0012	-2,2162	1,6231	-0,0737	0,842	0,3%
3	4,2504	0,2661	0,3022	-2,2747	1,6346	-0,0463	0,906	0,8%
4	4,5004	0,2661	0,3022	-2,2162	1,6231	-0,0500	0,887	0,5%
5	4,2504	0,2919	0,0012	-2,2747	1,6346	-0,0654	0,871	1,2%
6	4,5004	0,2919	0,0012	-2,2162	1,6231	-0,0722	0,852	0,6%
7	4,2504	0,2919	0,3022	-2,2747	1,6346	-0,0449	0,917	1,7%
8	4,5004	0,2919	0,3022	-2,2162	1,6231	-0,0522	0,897	1,2%
9	4,2504	0,2661	0,0012	-2,1819	0,7360	-0,0641	0,869	0,7%
10	4,5004	0,2661	0,0012	-2,1235	0,7292	-0,0704	0,850	0,1%
11	4,2504	0,2661	0,3022	-2,1819	0,7360	-0,0319	0,915	1,5%
12	4,5004	0,2661	0,3022	-2,1235	0,7292	-0,0463	0,895	0,4%
13	4,2504	0,2919	0,0012	-2,1819	0,7360	-0,0585	0,879	0,6%
14	4,5004	0,2919	0,0012	-2,1235	0,7292	-0,0648	0,860	0,1%
15	4,2504	0,2919	0,3022	-2,1819	0,7360	-0,0306	0,926	0,6%
16	4,5004	0,2919	0,3022	-2,1235	0,7292	-0,0410	0,906	0,4%
17	4,2504	0,2661	0,0012	-2,2747	1,6346	-0,0579	0,860	1,7%
18	4,5004	0,2661	0,0012	-2,2162	1,6231	-0,0722	0,842	0,6%
19	4,2504	0,2661	0,3022	-2,2747	1,6346	-0,0449	0,906	0,5%
20	4,5004	0,2661	0,3022	-2,2162	1,6231	-0,0602	0,887	1,9%
21	4,2504	0,2919	0,0012	-2,2747	1,6346	-0,0535	0,871	1,5%
22	4,5004	0,2919	0,0012	-2,2162	1,6231	-0,0654	0,852	1,0%
23	4,2504	0,2919	0,3022	-2,2747	1,6346	-0,0378	0,917	0,1%
24	4,5004	0,2919	0,3022	-2,2162	1,6231	-0,0400	0,897	1,6%
25	4,2504	0,2661	0,0012	-2,1819	0,7360	-0,0697	0,869	2,0%
26	4,5004	0,2661	0,0012	-2,1235	0,7292	-0,0739	0,850	0,8%
27	4,2504	0,2661	0,3022	-2,1819	0,7360	-0,0319	0,915	1,5%
28	4,5004	0,2661	0,3022	-2,1235	0,7292	-0,0510	0,895	0,7%
29	4,2504	0,2919	0,0012	-2,1819	0,7360	-0,0544	0,879	0,3%
30	4,5004	0,2919	0,0012	-2,1235	0,7292	-0,0676	0,860	0,5%
31	4,2504	0,2919	0,3022	-2,1819	0,7360	-0,0345	0,926	0,3%
32	4,5004	0,2919	0,3022	-2,1235	0,7292	-0,0404	0,906	0,6%
33	4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	-0,0603	0,867	0,3%
34	4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	-0,0637	0,867	0,4%
35	4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	-0,0620	86,74%	0,0%
36	4,3483	0,2661	0,0012	-2,1033	1,1422	-0,0611	0,867	0,1%

El valor de error promedio de todos los ensayos fue de 0.77 %

En la tabla 8.99, se reemplaza el valor de CPB por el número de remoción de arena (RA) para realizar la regresión lineal múltiple y se calculan las siguientes variables: (ver Anexo 4A).

$$a_1 = -0.0500$$

$$a_2 = 0.2029$$

$$a_3 = 0.0752$$

$$a_4 = 0.05092$$

$$a_5 = 0.00053$$

$$b = 0.2083$$

$$r^2 = 0.898$$

Para calcular el número de remoción de arena se reemplaza los valores calculados en la ecuación 4.12 y quedaría así:

$$RA = 10^{0.2083} [De]^{-0.05} [N_R]^{0.2029} [L_N]^{0.0752} [C_V]^{0.05092} [C'_D]^{0.00053} \quad [EC 6.6]$$

El porcentaje de error de RA se calcula con la ecuación 6.2

## 7 METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL HIDROCICLÓN

### 7.1 DISEÑO TEORICO

#### 7.1.1 Datos iniciales

- ✓ Caudal sólido :  $Q_s$
- ✓ Caudal líquido :  $Q_L$
- ✓ Concentración en peso del plomo a la entrada:  $CP_{bt}$
- ✓ Concentración en peso del plomo a la salida por el ápex:  $CP_{b_A}$
- ✓ Peso específico del sólido:  $G_s$
- ✓ Diámetro  $d_{50}$  de los sólidos: mm
- ✓ Longitud del hidrociclón:  $L_v$
- ✓ Diámetro de entrada:  $DE$
- ✓ Diámetro del vortex finder:  $DV$
- ✓ Diámetro del ápex:  $DA$
- ✓ Temperatura:  $T$

**7.1.2 diámetro del hidrociclón:** A partir de la ecuación 7.1 que se presenta a continuación se realiza la metodología:

$$CPb = 10^{0.208178} [De]^{-0.050044} [N_R]^{0.202853} [L_N]^{0.075226} [Cv]^{0.050924} [C_D']^{0.000527}$$

$$[De]^{0.050044} = CPb^{-1} 10^{0.208178} [N_R]^{0.202853} [L_N]^{0.075226} [Cv]^{0.050924} [C_D']^{0.000527}$$

De la ecuación 8.5 se iguala el número de Deam y se despeja el diámetro del hidrociclón:

$$De = \frac{VD_E}{\nu} \sqrt{\frac{D_E}{D_C}}$$

$$D_C = \left\{ \frac{10^{0.208178}}{CPb} \left( \frac{VD_E}{v} \right)^{-0.050044} \frac{[Lv]^{0.075226}}{[\sqrt{D_E}]^{0.050044}} [N_R]^{0.202853} [C_V]^{0.050924} [C'_D]^{0.000527} \right\}^{\frac{1}{0.050203}} \quad [\text{EC 7.1}]$$

**7.1.3 Pérdida de energía:** a partir de la ecuación 10.4B se despeje el número de Euler y se iguala a la ecuación 8.6 para luego despejar la pérdida de energía en el hidrociclón:

$$Eu = 10^{7.5583} [De]^{-1.2609} [C_V]^{0.48317} [C'_D]^{0.05023}$$

$$Eu = \frac{2P}{\rho_m V_m^2}$$

$$\frac{2P}{\rho_s v^2} = 10^{7.5583} [De]^{-1.2609} [C_V]^{0.48317} [C'_D]^{0.05023}$$

$$P = 0.5 \rho_s v^2 10^{7.5583} [De]^{-1.2609} [C_V]^{0.48317} [C'_D]^{0.05023} \quad [\text{EC 7.2}]$$

## 7.2 CALCULOS

De esta forma se puede decir que las variables a encontrar son:

### 7.2.1 Concentración de plomo CPb

Con los datos de entrada CPbt y CPb<sub>A</sub> se calcula CPb con la ecuación 4.3.

### 7.2.2 velocidad de entrada al hidrociclón:

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad [\text{EC 7.3}]$$

### 7.2.3 Peso específico del agua

$$\nu_w = \frac{0.000001792}{1 + 0.0337T^\circ + 0.000221T^2} \quad [\text{EC 7.4}]$$

**7.2.4** Número de Restricciones se lo calcula con la ecuación 6.7

**7.2.5** Concentración volumétrica

$$CV = \frac{Q_s}{Q_s + Q_L} \quad [\text{EC 7.5}]$$

**7.2.6** Número del coeficiente de arrastre de las partículas afectadas por la mezcla se lo calcula así:

✓ Peso específico del agua a temperatura T°

$$r_w = 10^{-5} T^3 - 0,0055 T^2 + 0,0002 T + 1000,08 \quad [\text{EC 7.6}]$$

✓ Densidad de la muestra

$$\rho_m = \frac{\rho_w}{1 - C \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} \right)} \quad [\text{EC 7.7}]$$

✓ Gravedad específica sumergida

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \quad [\text{EC 7.8}]$$

✓ Diámetro adimensional de partícula

$$d_* = \left( \frac{\Delta g}{\nu w^2} \right)^{1/3} \frac{d_{50}}{1000} \quad [\text{EC 7.9}]$$

✓ Diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla

$$d_*' = \left[ \frac{(1 - Cv)(2 - 3Cv)^2}{4(1 + Cv\Delta)^{1/3}} \right]^{1/3} d_* \quad [\text{EC 7.10}]$$

✓ Número de Reynolds de partícula para sólidos

$$R_s = \left[ (25 + 1.2d^{*2})^{0.5} - 5 \right]^{1.5}$$

- ✓ Número de Reynolds de partículas afectadas por la mezcla

$$R_m = \left( (25 + 1.2d_*'^2)^{0.5} - 5 \right)^{1.5} \quad [\text{EC 7.11}]$$

- ✓ Velocidad de sólido

$$V_s = \frac{R_s v_w}{d_{50} 10^{-3}} \quad [\text{EC 7.12}]$$

- ✓ Exponente que cuantifica el efecto de la concentración sobre la velocidad de asentamiento de las partículas

$$n = \frac{\text{Log}\left(\frac{2-2C}{2-3C}\right) + \text{Log}\left(\frac{R_m}{R_s}\right)}{\text{Log}(1-C)} \quad [\text{EC 7.13}]$$

- ✓ velocidad promedio de la mezcla

$$V_m = V_s(1-C)^n \quad [\text{EC 7.14}]$$

- ✓ Coeficiente de arrastre de las partículas afectadas por la mezcla

$$C'_D = \left( \left( \frac{32}{R_m} \right)^{2/3} + 1 \right)^{3/2} \quad [\text{EC 7.15}]$$

**7.2.7** Diámetro del hidrociclón con la ecuación 7.1

**7.2.8** Numero Longitud Normalizada del “Vortex Finder” se lo calcula con la ecuación 7.8

**7.2.9** Numero de Deam se lo calcula con la ecuación 4.5

**7.2.10** Pérdida de energía se calcula con la ecuación 7.2

### **7.3 CORRELACIÓN MATEMÁTICA PARA:**

**7.3.1** Remoción de arena con la ecuación 6.6

**7.3.2** Partición de Agua con la ecuación 6.5B

## 7.4 EJEMPLO DE DISEÑO

### 7.4.1 datos iniciales:

Q<sub>s</sub>: 0.01238 l/s

QL: 1.56 l/s

CPb<sub>t</sub>: 0.020 %

CPbA: 0.0231 %

G<sub>s</sub>: 2.624 gr. /cm<sup>3</sup>

d<sub>50</sub>: 0.201 mm

L<sub>v</sub>: 15 cm

DE: 41.95 mm

DV: 54.2 mm

DA: 17.6 mm

T: 16.°C

### 7.4.2 cálculos

#### 1 Concentración de plomo CPb

$$CPb = \frac{0.020\%}{0.0231\%} = 0.8668 = 86.68\%$$

#### 2 velocidad de entrada al hidrociclón:

$$V = \frac{4 \times 1558 \text{ cm}^3 / \text{s}}{\pi [4.195 \text{ cm}]^2} = 112.723 \text{ cm/s} = 1.12723 \text{ m/s}$$

#### 3 viscosidad cinemática del fluido

$$\nu_w = \frac{0.000001792}{1 + 0.0337(16) + 0.000221(16)^2} * 100^2 = 0.0123 \text{ cm}^2/\text{s}$$



#### 4 Número de Restricciones

$$N_R = \frac{54.2^2 + 17.6^2}{41.95^2} = 1.84532$$

#### 5 Concentración volumétrica

$$CV = \frac{0.01238}{0.01238 + 1.56} = \mathbf{0.79\%}$$

#### 6 Número del coeficiente de arrastre de las partículas afectadas por la mezcla se lo calcula así:

- ✓ Peso específico del agua a temperatura T°

$$r_w = 10^{-5} [16]^3 - 0,0055 [16]^2 + 0,0002 [16] + 1000,08 = 998.72 \text{ Kg./m}^3$$

- ✓ densidad de la muestra

$$\rho_m = \frac{998.72 \text{ Kg./m}^3}{1 - 0.0079 \left( \frac{2624 - 998.7}{2624} \right)} = 1003.6 \text{ Kg./m}^3$$

- ✓ Gravedad específica sumergida

$$\Delta = \frac{2624.33 - 998.72}{998.72} = 1.628$$

- ✓ Diámetro adimensional de partícula

$$d_* = \left( \frac{1.628 \times 9.8066}{(1.123 \times 10^{-6})^2} \right)^{1/3} \frac{0.201}{1000} = 4.685$$

- ✓ Diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla

$$d'_* = \left( \frac{(1 - 0.0079)(2 - 3 * 0.0079)^2}{4 * (1 + 0.0079 * 1.628)} \right)^{1/3} 4.685 = 4.616$$

- ✓ Número de Reynolds de partícula para sólidos

$$Rs = \left[ (25 + 1.2 * 4.685^2)^{0.5} - 5 \right]^{1.5} = 3.186$$

- ✓ Número de Reynolds de partículas afectadas por la mezcla

$$Rm = \left( (25 + 1.2(4.616)^2)^{0.5} - 5 \right)^{1.5} = 3.068$$

- ✓ Velocidad de sólido

$$Vs = \frac{3.186 * 1.123 * 10^{-6} m^2 / s}{0.201 * 10^{-3} m} = 0.0178 \text{ m/s}$$

- ✓ Exponente que cuantifica el efecto de la concentración sobre la velocidad de asentamiento de las partículas

$$n = \frac{\text{Log} \left( \frac{2 - 2 * 0.0079}{2 - 3 * 0.0079} \right) + \text{Log} \left( \frac{3.068}{3.186} \right)}{\text{Log}(1 - 0.0079)} = 4.273$$

- ✓ Velocidad promedio de la mezcla

$$Vm = 0.0178(1 - 0.0079)^{4.273} = 0.0172 \text{ m/s}$$

- ✓ Coeficiente de arrastre de las partículas afectadas por la mezcla

$$C'_D = \left( \left( \frac{32}{3.068} \right)^{2/3} + 1 \right)^{3/2} = 13.87$$

## 7 Diámetro del hidrociclón con la ecuación 11.1

$$D_c = \left\{ \frac{10^{0.208178} \left( \frac{112.72 * 4.195}{0.0112} \right)^{-0.050044} \left[ \frac{15 \right]^{0.075226}}{\left[ \sqrt{4.195} \right]^{0.050044}} \left[ 1.85 \right]^{0.202853} \left[ 0.0079 \right]^{0.050924} \left[ 13.87 \right]^{0.000527} \right\}^{\frac{1}{0.050203}}$$

$$DC = 15 \text{ cm}$$

## 8 Número Longitud Normalizada del "Vortex Finder"

$$LN = \frac{15}{14.96} = 1.003$$

## 9 Número de Deam

$$De = \frac{112.72 * 4.195}{0.01123} \sqrt{\frac{4.195}{14.96}} = 22299$$

## 10 Pérdida de energía

$$P = 0.5 * 1003.6 * 1.13^2 * 10^{7.5583} [22299]^{-1.2609} [0.0079]^{0.48317} [13.87]^{0.05023}$$

$$P = 8.34 \text{ KPa}$$

$$\text{Como 1 M.C.A} = 9.81 \text{ KPa}$$

$$P = 0.85 \text{ cm.}$$

## 11 Correlación matemática:

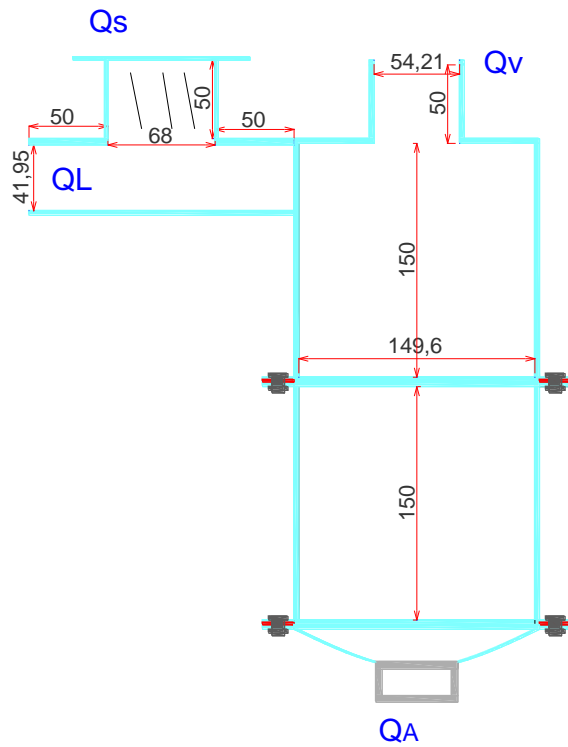
✓ Remoción de arena.

$$RA = 10^{0.2083} [22299]^{-0.05} [1.85]^{0.2029} [1]^{0.0752} [0.052]^{0.05092} [16.62]^{0.00053} = 86.74\%$$

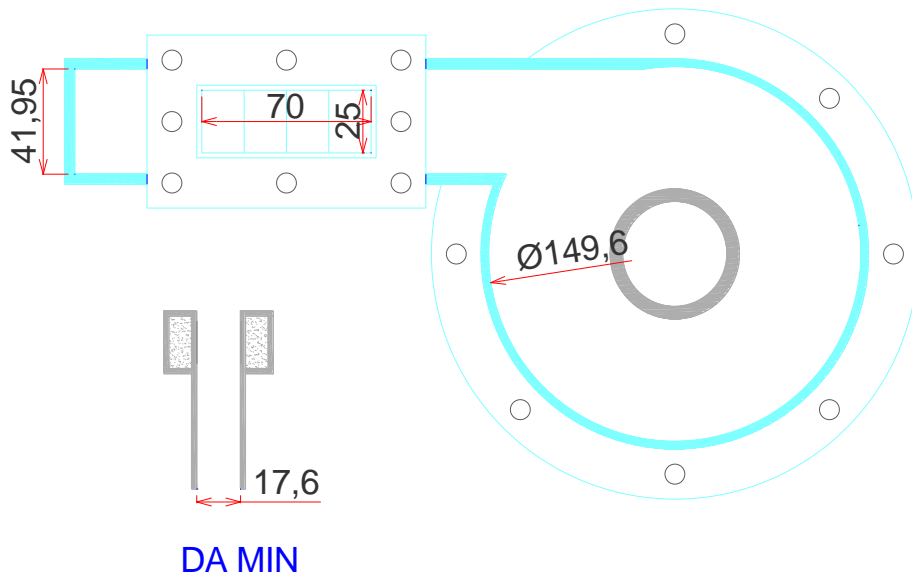
✓ Partición de agua

$$PA = 10^{-1.0948} [22299]^{0.3724} [0.052]^{0.31232} [16.62]^{0.03232} = 80.23\%$$

Con los cálculos anteriormente realizados se obtiene el esquema de hidrociclón final como se muestra en las figura 7.1 y figura 7.2.



**Figura 7. 1** dimensiones internas reales del Hidrociclón estudiado



**Figura 7.2** dimensiones internas reales del hidrociclón Y salidas ápex

## 8 PRESUPUESTO

**TABLA 8.1** Lista de precios

MATERIAL	PRECIO	CANTIDAD
Arena negra:	10000	Bulto
Arena gris:	10000	Bulto
Arena Café:	10000	Bulto
Marco:	5000	Unidad
Tela:	5000	m <sup>2</sup>
Hidrociclón convencional:	300000	Unidad
hidrociclón fondo plano:	300000	Unidad
Buje 1 1/2" - 1"	1300	Unidad
Buje 1 1/2" - 3/4"	1300	Unidad
Buje 1 1/2" - 1/2"	1300	Unidad
Codo PVC 2"	4000	Unidad
Unión PVC 1 1/2"	900	Unidad
Empaques □ 15 cm	5000	Unidad
Empaque 3 x 7 cm	2500	Unidad
base de refuerzo:	50000	Unidad
Codo PVC 1/2"	950	Unidad
Codo PVC 1"	950	Unidad
Macho PVC 3/4"	900	Unidad
Cinta Teflón	600	Unidad
Tuvo PVC 2"	6200	m
Llave de cortina 2"	50000	Unidad
Adaptador macro CPVC 1/2"	600	Unidad
Codo CPVC 1/2"	500	Unidad
Unión PVC 2"	3000	Unidad
Tee PVC 2"	5000	Unidad
Llave de bola 1/2"	8000	Unidad
Buje 2 1/2" - 2"	4000	Unidad
Buje de 2 1/2" - 1 1/2"	3000	Unidad
Tuvo acrílico	20000	m
Refuerzo ciclón convencional	50000	Unidad
Codo PVC 1 1/2"	2000	Unidad
Plomo	150	gr.
Precio Ayudante:	20000	Día
Granulometría	58100	Ensayo
Peso específico:	16000	Punto

**TABLA 8. 2** Precios unitarios de accesorios

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>V. unitario</b>	<b>V. total</b>
Buje 1 1/2" - 1"	Unidad	1	1300	1300
Buje 1 1/2" - 3/4"	Unidad	1	1300	1300
Buje 1 1/2" - 1/2"	Unidad	1	1300	1300
Codo PVC 2"	Unidad	1	4000	4000
Unión PVC 1 1/2"	Unidad	2	900	1800
Empaques □ 15 cm	Unidad	2	5000	10000
Empaque 3 x 7 cm	Unidad	2	2500	5000
Codo PVC 1/2"	Unidad	1	950	950
Codo PVC 1"	Unidad	1	950	950
Macho PVC 3/4"	Unidad	4	900	3600
Cinta Teflón	Unidad	15	600	9000
Tuvo PVC 2"	metro	3	6200	18600
Llave de cortina 2"	Unidad	1	50000	50000
Adaptador macro CPVC 1/2"	Unidad	2	600	1200
Codo CPVC 1/2"	Unidad	1	500	500
Unión PVC 2"	Unidad	1	3000	3000
Tee PVC 2"	Unidad	1	5000	5000
Llave de bola 1/2"	Unidad	1	8000	8000
Buje 2 1/2" - 2"	Unidad	1	4000	4000
Buje de 2 1/2" - 1 1/2"	Unidad	2	3000	6000
Tuvo acrílico	metro	1	20000	20000
Codo PVC 1 1/2"	Unidad	3	2000	6000
<b>subtotal</b>				161500
Costos indirectos	%	1	1615	<b>1615</b>
<b>sub. Total Accesorios</b>				163115

**TABLA 8. 3** Precios unitarios de equipos

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>V. unitario</b>	<b>V. total</b>
Hidrociclón convencional	Unidad	1	300000	300000
hidrociclón fondo plano	Unidad	1	300000	300000
Base fondo plano	Unidad	1	50000	50000
Refuerzo hidrociclón convencional	Unidad	1	50000	50000
Marco	Unidad	3	5000	15000
Tela	m <sup>2</sup>	1,5	5000	7500
<b>subtotal</b>				722500
Costos indirectos	%	1	7225	<b>7225</b>
<b>Sub Total Equipos</b>				729725

**TABLA 8. 4** Precios unitarios de materiales

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>V. unitario</b>	<b>V. total</b>
Arena negra	Saca	3	10000	30000
Arena Café	Saca	3	10000	30000
Arena gris	Saca	3	10000	30000
Plomo	Gramo	200	150	30000
<b>Mano de Obra</b>				
Transporte	Pasaje	156	1000	156000
Técnico	Hora	144	6250	900000
Ayudante	Hora	144	3125	450000
<b>subtotal</b>				1626000
Costos indirectos	%	1	16260	<b>16260</b>
<b>sub. Total Materiales</b>				1642260

**TABLA 8. 5** Precios unitarios de puntos hidráulicos

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>V. unitario</b>	<b>V. total</b>
<b>ALIMENTACION LV +</b>				
Codo PVC11/ 2"	Unidad	2	670	1340
Tee PVC 11/2"	Unidad	1	670	670
Unión PVC 11/2"	Unidad	1	670	670
Tubería PVC 2"	Unidad	1,5	670	1005
<b>ALIMENTACION LV -</b>				
Codo PVC11/ 2"	Unidad	3	670	2010
Tee PVC 11/2"	Unidad	1	670	670
Unión PVC 11/2"	Unidad	1	670	670
Tubería PVC 11/2"	Unidad	1,7	670	1139
<b>VORTEX</b>				
Codo PVC 2"	Unidad	2	670	1340
Tee PVC 2"	Unidad	1	670	670
Tubería PVC 2"	ml	1	670	670
<b>Apex</b>				
Codo PVC 3/4"	Unidad	2	500	1000
Machos PVC 3/4"	Unidad	2	500	1000
Válvula de bola 3/4"	Unidad	1	500	500
Reducción PVC 11/2" a 3/4"	Unidad	1	500	500
Tubería PVC 3/4"	ml	0,95	500	475
Codo PVC 1/2"	Unidad	2	500	1000
Machos PVC 1/2"	Unidad	2	500	1000
Válvula de bola 1/2"	Unidad	1	500	500
Reducción PVC 11/2" a 1/2"	Unidad	1	500	500
Tubería PVC 1/2"	ml	1,25	500	626,5



<b>Tolva alimentación material</b>				
Machos PVC 3/4"	Unidad	2	500	1000
Válvula de cortina 3/4"	Unidad	1	500	500
Reducción PVC 1 1/2" a 3/4"	Unidad	1	500	500
Tubería PVC 3/4"	ml	0,60	500	300
<b>Sub. Total Puntos Hidráulicos</b>				<b>20458</b>

**TABLA 8. 6** Precios unitarios de ensayos de agregados

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>V. unitario</b>	<b>V. total</b>
Granulometría	Ensayos	76	58100	4415600
Peso específico Arena gris	Puntos	2	16000	32000
Peso específico Arena café	Puntos	2	16000	32000
Peso específico Arena Negra	Puntos	2	16000	32000
<b>subtotal</b>				<b>4511600</b>
Costos indirectos	%	<b>-10</b>	45116	<b>-451160</b>
<b>sub. Total Ensayos</b>				<b>4060440</b>

**TABLA 8. 7** Precios totales en hidrociclón

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>V. unitario</b>	<b>V. total</b>
Accesorios	Unidades	1	163115	163115
Equipos	Unidades	1	729725	729725
Materiales	Unidades	1	1642260	1642260
Puntos Hidráulicos	Unidades	1	20458	20458,055
Ensayos Agregados	Unidades	1	4060440	4060440
<b>Total Gastos Generales</b>				<b>6'615.998,06</b>

## 9 IMPACTOS ESPERADOS

Los impactos esperados son:

El número de empresas mineras que adopten los resultados de la investigación para implementar sistemas de minería limpia en la separación de metales pesados.

Disminución del impacto ambiental negativo generado por el uso de mercurio y cianuro en las empresas mineras. Seguimiento que se puede llevar a cabo en coordinación con los centros ambientales mineros (CAM).

El uso del dispositivo propuesto en áreas como el tratamiento de aguas residuales y plantas de purificación.

Mejoramiento de la calidad de vida de los pequeños mineros por la implantación de sistemas de extracción de mayor rendimiento que los tradicionales.

## 10 CONCLUSIONES

- ✓ Al ensayar el hidrociclón se encontró que cuando es sometido a una presión alta, de al menos 2 m.c.a, antes de la entrada del hidrociclón, el vórtice interno es tan grande que no existe salida de fluido por el ápex, si no que existe succión total por el Vortex.
- ✓ Para que el hidrociclón sea de utilidad, el diámetro de tamaños del material aluvial debe ser inferior al diámetro de corte **dc**. Teniendo en cuenta que el material aluvial que se encuentra en las corrientes naturales, por lo general es mayor al diámetro de corte que puede proporcionar un hidrociclón, La única manera de lograr que el hidrociclón sea eficiente, es que el material aluvial sea triturado, para reducir el tamaño de partículas, hasta tal punto que el diámetro máximo se igual al diámetro de corte, en este punto se obtendría la máxima eficiencia en recuperar el metal pesado.
- ✓ Se determinó el efecto causado por el plomo mediante el hidrociclón, se observo como gira dentro del tanque del hidrociclón, luego de ello se separan las partículas de agregados finos y se sedimentan las de mayor diámetro por la salida del ápex del hidrociclón aumentando la concentración de plomo sobre la muestra inicial.
- ✓ Se mejoro la eficiencia de separación de material aluvial y plomo por medio del hidrociclón realizando dos tipos de equipos de Hidrociclones, uno convencional y uno de fondo plano, hasta concluir que el de mejor separación es el hidrociclón de fondo plano.
- ✓ Se mejoro la matriz de cálculo teórica y se planteo una experimental, por medio de una serie de ensayos con el hidrociclón, se determino que la eficiencia de separación del hidrociclón es para tamaños de partícula sumamente pequeños.

## 11 BIBLIOGRAFÍA

- BOUSO, Juan Luis. Hitos históricos en el desarrollo de la clasificación. IX simposium sobre procesamiento de minerales Moly- Cop 2001. Puyehue, Chile
- CHENG, N.-S. (1997a) "Simplified settling velocity formula for sediment particle". Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 123. No 2. February. 1997a. ASCE. Tech.
- ENERGY & MINING. [En línea]. <http://www.dani2989.com/gold/prod707es.htm>
- PAVEZ, Oswaldo (1987) "Concentración Gravimétrica". Universidad de Atacama. [en línea]. [www.ex-alumnos.uda.cl/metalurgia/402/concentracion.minerales.2/01.-.Concentracion.Gravimetrica.pdf](http://www.ex-alumnos.uda.cl/metalurgia/402/concentracion.minerales.2/01.-.Concentracion.Gravimetrica.pdf). Citado el 20 de agosto de 2008.
- TRAWINSKI, Helmut. Aplicaciones y funcionamiento práctico de los hidrociclones. Adaptación: Juan Luis Bouso Aragonés, Director General de ERAL, Equipos y Procesos, S.A. [En línea]. [www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun\\_Prac\\_Hidrociclones.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun_Prac_Hidrociclones.pdf) -
- UPME. (2007) Unidad de Planeación Minero Energética. "Producción más limpia en la minería del oro en Colombia". Ministerio de Minas y Energía. Subdirección de Planeación Minera. Bogotá. Oct. 2007. [en línea]. [www.upme.gov.co/Docs/Mineria\\_limpia.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Mineria_limpia.pdf). Citado el 20 de agosto de 2008.
- YANG, Ted Chih. "Sediment Transport: Theory and Practice". McGraw.Hill. Series in Water Resources and Environmental Engineering. New York. 1996. Pg 1.18.

## ANEXO A

### 1A. Análisis de regresión múltiple concentración de plomo

Variable dependiente: CPb

Parámetro	Error Estimación	Estadístico estándar	T	P-Valor
CONSTANTE	0,208204	0,0825615	2,52181	0,0172
De	-0,0500459	0,00863822	-5,79355	0,0000
NR	0,202987	0,0619858	3,27474	0,0027
LN	0,0752062	0,00531307	14,1549	0,0000
CV	0,0509645	0,0271227	1,87903	0,0700
C'D	0,0005448	0,00336569	0,16187	0,8725

#### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	0,00540231	5	0,00108046	52,81	0,0000
Residuo	0,000613812	30	0,0000204604		

Total (Corr.)      0,00601612    35

R-cuadrado = 89,7972 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 88,0967 porcentaje

Error estándar de est. = 0,00452332

Error absoluto medio = 0,0033572

Estadístico de Durbin-Watson = 1,94147 (P=0,3324)

Autocorrelación residual en Lag 1 = 0,0218316

El StatAdvisor

-----

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CPb y 5 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{CPb} = 0,208204 - 0,0500459*\text{De} + 0,202987*\text{NR} + 0,0752062*\text{LN} + 0,0509645*\text{CV} + 0,000544803*\text{C'D}$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 89,7972% de la variabilidad en CPb. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 88,0967%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0,00452332. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 0,0033572 es el valor medio de los residuos. El estadístico

Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es superior a 0.05, no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

Para decidir la simplificación del modelo, tenga en cuenta que el p-valor más alto en las variables independientes es 0,8725, perteneciendo a C'D. Puesto que el p-valor es superior o igual a 0.10, este término no es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 90% o superior. Por tanto, debería considerar quitar C'D del modelo.

## 2A. ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE NUMERO DE EULER

Variable dependiente: EU

Parámetro	Error Estimación	Estadístico estándar	T	P-Valor
CONSTANTE	7,56013	0,000885371	8538,93	0,0000
De	-1,2612	0,0000926344	-13614,8	0,0000
NR	-0,00000358789	0,000664723	-0,005397	0,9957
LN	-3,07534E-7	0,0000569762	-0,005397	0,9957
CV	0,483499	0,000290858	1662,32	0,0000
C'D	0,0502586	0,0000360929	1392,48	0,0000

### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	0,683188	5	0,1366385807106	5,66	0,0000
Residuo	7,05882E-8	30	2,35294E-9		

Total (Corr.) 0,683188 35

R-cuadrado = 100,0 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 100,0 porcentaje

Error estándar de est. = 0,0000485071

Error absoluto medio = 0,000041789

Estadístico de Durbin-Watson = 3,53178 (P=0,0000)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,781531

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre EU y 5 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$EU = 7,56013 - 1,2612*De - 0,00000358789*NR - 3,07534E-7*LN + 0,483499*CV + 0,0502586*C'D$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 100,0% de la variabilidad en EU. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferente números de variables independientes, es 100,0%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0,0000485071. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 0,000041789 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es inferior a 0.05, hay indicio de una posible correlación serial. Represente los residuos frente al orden de fila para ver si hay algún modelo que pueda verse.

Para decidir la simplificación del modelo, tenga en cuenta que el p-valor más alto en las variables independientes es 0,9957, perteneciendo a LN. Puesto que el p-valor es superior o igual a 0.10, este término no es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 90% o superior. Por tanto, debería considerar quitar LN del modelo.



### 3A. ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE PARTICIÓN DE AGUA

Variable dependiente: PA

Parámetro	Error Estimación	Estadístico estándar	T	P-Valor
CONSTANTE	-1,09637	0,000523197	-2095,52	0,0000
De	0,372612	0,0000547909	6800,62	0,0000
CV	0,312105	0,000163608	1907,64	0,0000
C'D	0,0322985	0,000020974	1539,93	0,0000

#### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	0,0999691	3	0,0333233666205	4,05	0,0000
Residuo	2,90856E-8	32	9,08925E-10		
Total (Corr.)	0,0999692	35			

R-cuadrado = 100,0 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 100,0 porcentaje

Error estándar de est. = 0,0000301484

Error absoluto medio = 0,0000268247

Estadístico de Durbin-Watson = 3,53191 (P=0,0000)

Auto correlación residual en Lag 1 = -0,781534

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre PA y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$PA = -1,09637 + 0,372612*De + 0,312105*CV + 0,0322985*C'D$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 100,0% de la variabilidad en PA. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferente números de variables independientes, es 100,0%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0,0000301484. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 0,0000268247 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es inferior a 0.05, hay indicio de una posible correlación serial. Represente los residuos frente al orden de fila para ver si hay algún modelo que pueda verse.

Para decidir la simplificación del modelo, tenga en cuenta que el p-valor más alto en las variables independientes es 0,0000, perteneciendo a De. Puesto que el p-valor es inferior a 0.01, el término de orden superior es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 99%. Por tanto, probablemente no quiera quitar ninguna variable del modelo.

#### 4A. ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE REMOCIÓN DE ARENA

Variable dependiente: RA

Parámetro	Error Estimación	Estadístico estándar	T	P-Valor
CONSTANTE	0,208435	0,0827008	2,52035	0,0173
De	-0,0500452	0,00865279	-5,7837	0,0000
NR	0,202503	0,0620904	3,26142	0,0028
LN	0,0752062	0,00532204	14,1311	0,0000
CV	0,0509589	0,0271685	1,87566	0,0705
C'D	0,000530274	0,00337137	0,157287	0,8761

#### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	0,00540177	5	0,00108035	52,62	0,0000
Residuo	0,000615886	30	0,0000205295		

Total (Corr.) 0,00601766 35

R-cuadrado = 89,7654 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 88,0596 porcentaje

Error estándar de est. = 0,00453095

Error absoluto medio = 0,0033624

Estadístico de Durbin-Watson = 1,93959 (P=0,3304)

Autocorrelación residual en Lag 1 = 0,0227678

El StatAdvisor

-----

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre RA y 5 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$RA = 0,208435 - 0,0500452*De + 0,202503*NR + 0,0752062*LN + 0,0509589*CV + 0,000530274*C'D$$

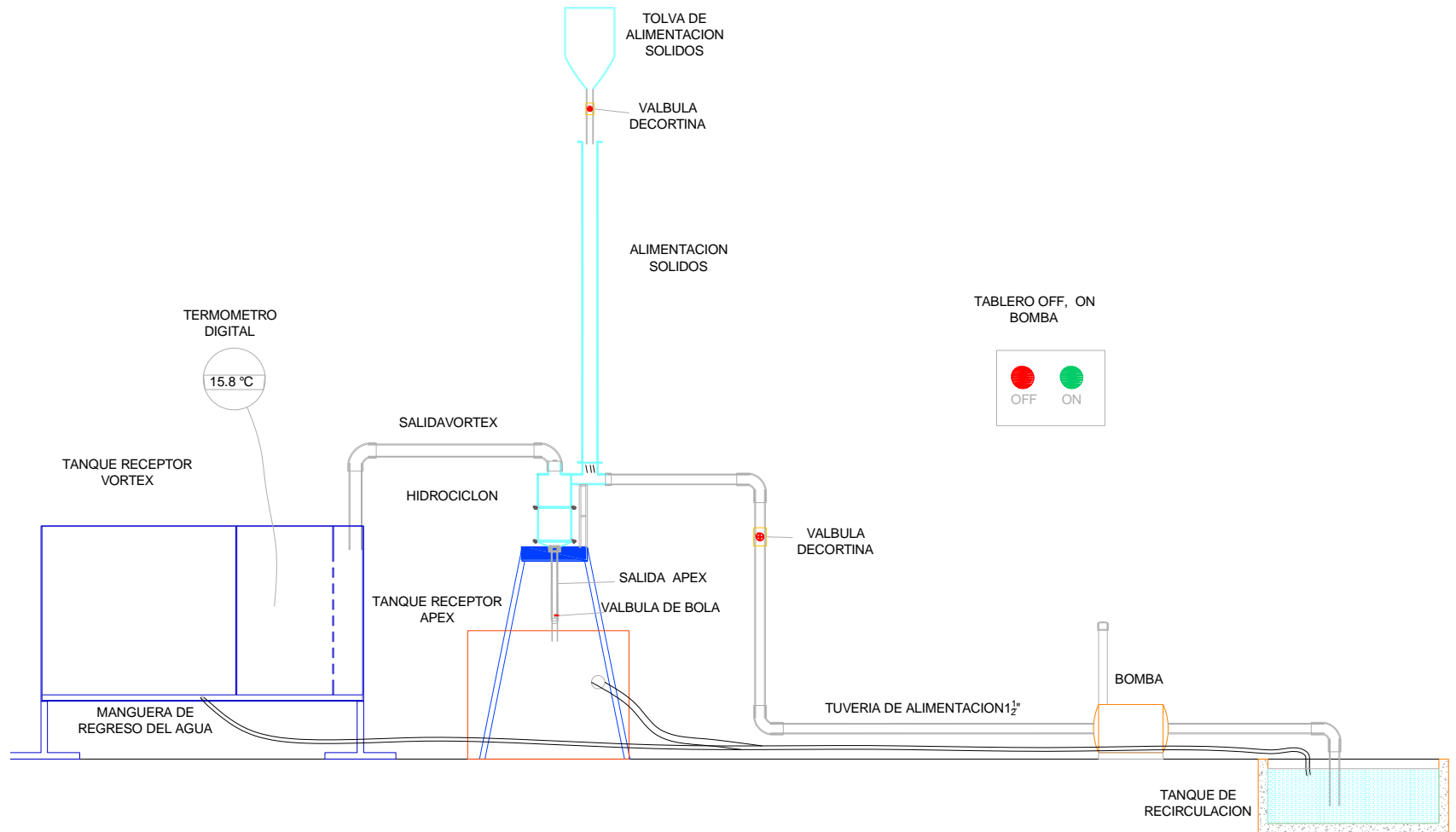
Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 89,7654% de la variabilidad en RA. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 88,0596%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0,00453095. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 0,0033624 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es superior a 0.05, no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

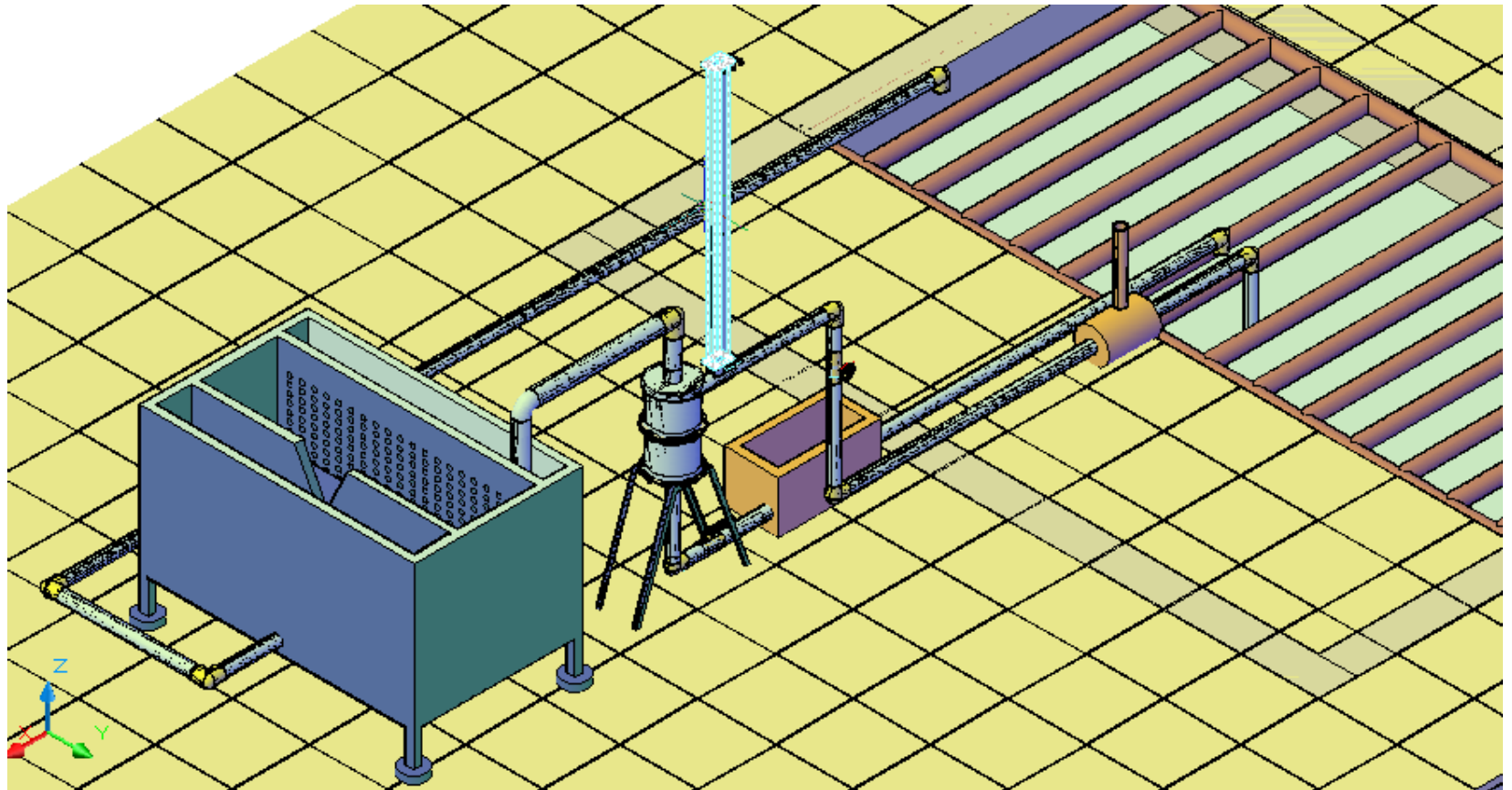
Para decidir la simplificación del modelo, tenga en cuenta que el p-valor más alto en las variables independientes es 0,8761, perteneciendo a C'D. Puesto que el p-valor es superior o igual a 0.10, este término no es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 90% o superior. Por tanto, debería considerar quitar C'D del modelo.

# ANEXO B

## 1B. PLANOS 2D



## 2B. PLANOS 3D



## PLANOS 3D

