

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**“Diseño Hidráulico de un Sistema Gravimétrico para  
Relaves Mineros con un Caudal de 202 m<sup>3</sup>/h y 220 m de  
Desnivel”**

**ANEXOS**

Tesis a fin de optar el Título de **INGENIERO MECÁNICO**, que presenta  
el bachiller:

**JOEL MARTÍN LÓPEZ BONILLA**

**ASESOR: Dr. Luis Ricardo Chirinos García**

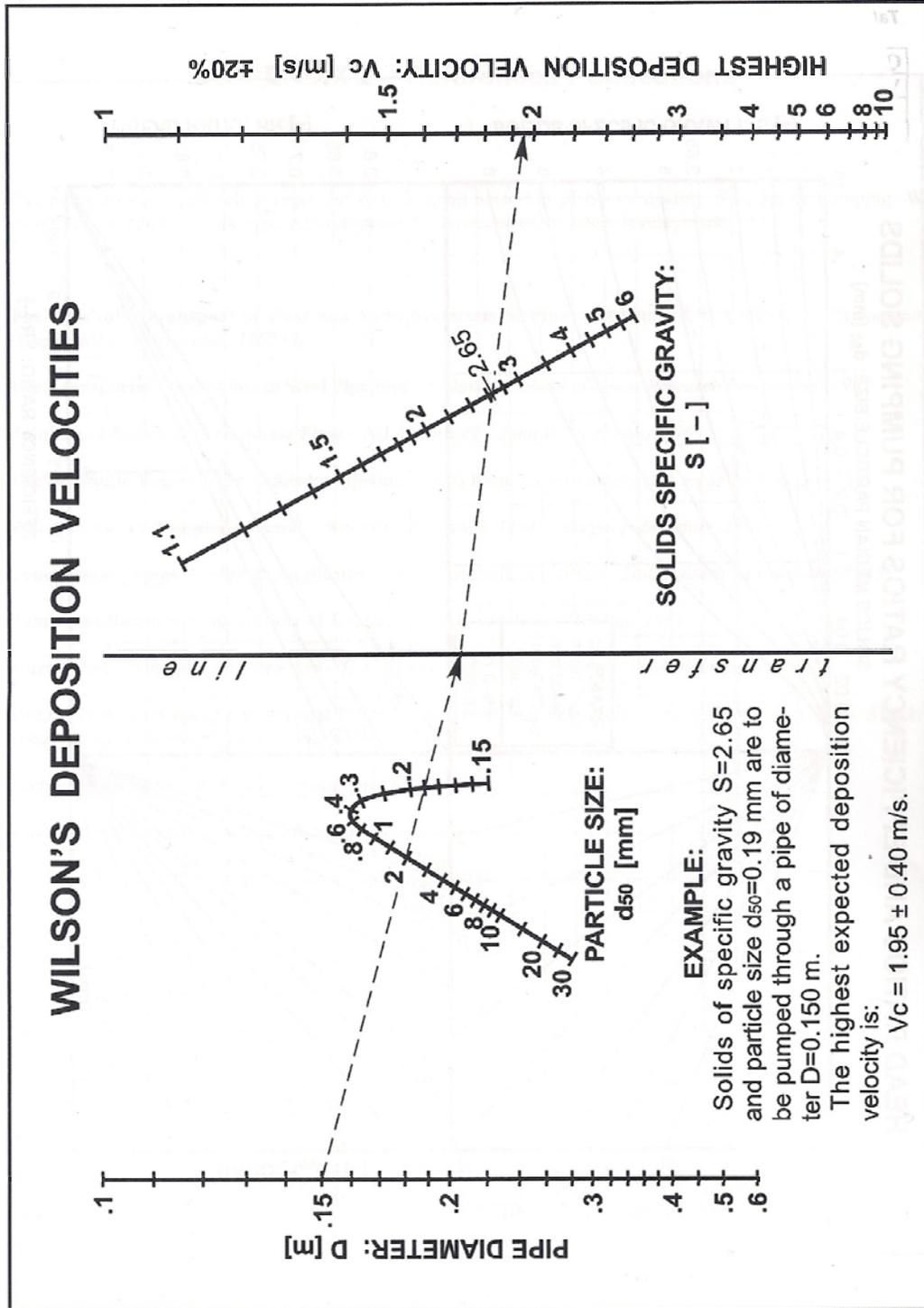
Lima, abril de 2014

## ÍNDICE

Anexo 1: Nomograma de Wilson para Velocidad Crítica de Deposición .....	1
Anexo 2: Tabla de Esfuerzos permisibles para tuberías de acero, ASME B31.11 .....	2
Anexo 3: Propiedades Principales de las Tuberías de Acero Comercial .....	3
Anexo 4: Coeficiente de Pérdidas en Accesorios .....	4
Anexo 5: Análisis Reológico de la Pulpa .....	5
Anexo 6: Análisis de los Modelos de Vel. crítica de deposición y sus Parámetros .....	8
Anexo 7: Cálculo Final Detallado .....	13
Anexo 8: Dimensionamiento del Sistema de Recepción propuesto por la Consultora ..	25
Anexo 9: Ejemplo de Cálculo de Fuerzas Debido al Cambio de Dirección .....	26
Anexo 10: Registro Histórico de la Estación Meteorológica de Pauza – SENAMHI .....	28

Anexo 1

Nomograma de Wilson para Velocidad Crítica de Deposición



Anexo 2

Tabla de Esfuerzos permisibles para tuberías de acero, según ASME B31.11

Table 1102.3.1(a) Tabulation of Examples of Allowable Stresses for Reference Use in Piping Systems Within the Scope of This Code				
Specification No.	Grade	Specified Min. Yield Strength, psi (MPa)	Weld Joint Factor, E	Allowable Stress Value -20°F to 250°F (-30°C to 120°C), psi (MPa)
<b>Seamless</b>				
API 5L	A25	25,000 (172)	1.00	20,000 (138)
API 5L, ASTM A 53, ASTM A 106	A	30,000 (207)	1.00	24,000 (166)
API 5L, ASTM A 53, ASTM A 106	B	35,000 (241)	1.00	28,000 (193)
<b>Electric Fusion Welded</b>				
ASTM A 134	...	...	0.80	...
ASTM A 139	A	30,000 (207)	0.80	24,000 (166)
ASTM A 139	B	35,000 (241)	0.80	28,000 (193)
ASTM A 671	...	Note (1)	1.00 [Notes (2) & (3)]	...
ASTM A 671	...	Note (1)	0.80 Note (4)	...
ASTM A 672	...	Note (1)	1.00 [Notes (2) & (3)]	...
ASTM A 672	...	Note (1)	0.80 Note (4)	...
API 5L	X65	65,000 (448)	1.00	52,000 (358)
API 5L	X70	70,000 (482)	1.00	56,000 (386)
<b>Furnace Butt Welded, Continuous Welded</b>				
ASTM A 53	...	25,000 (172)	0.60	20,000 (138)
API 5L Classes I and II	A25	25,000 (172)	0.60	20,000 (138)
<b>Electric Resistance Welded and Electric Flash Welded</b>				
API 5L	A25	25,000 (172)	1.00	20,000 (138)
API 5L, ASTM A 53, ASTM A 135	A	30,000 (207)	1.00	24,000 (166)
API 5L, ASTM A 53, ASTM A 135	B	35,000 (241)	1.00	28,000 (193)
API 5L	X42	42,000 (289)	1.00	33,600 (231)
API 5L	X46	46,000 (317)	1.00	36,800 (254)
API 5L	X52	52,000 (358)	1.00	41,600 (286)
API 5L	X56	56,000 (386)	1.00	44,800 (309)
API 5L	X60	60,000 (413)	1.00	48,000 (330)
API 5L	X65	65,000 (448)	1.00	52,000 (358)
API 5L	X70	70,000 (482)	1.00	56,000 (386)
ASTM A 333	6	35,000 (241)	1.00	25,000 (174)
<b>Electric Fusion Welded</b>				
ASTM A 134	...	...	0.80	...
ASTM A 139	A	30,000 (207)	0.80	24,000 (166)
ASTM A 139	B	35,000 (241)	0.80	28,000 (193)
ASTM A 671	...	Note (1)	1.00 [Notes (2) & (3)]	...
ASTM A 671	...	Note (1)	0.80 Note (4)	...
ASTM A 672	...	Note (1)	1.00 [Notes (2) & (3)]	...
ASTM A 672	...	Note (1)	0.80 Note (4)	...

**Anexo 3**  
**Propiedades Principales de las Tuberías de Acero Comercial**

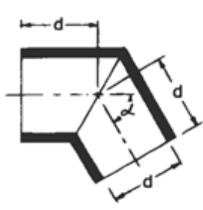
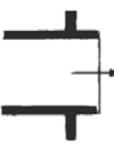
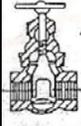
**TABLE E2.1 Principal Properties of Commercial Pipe (in U.S. Customary Units) (Continued)**

Nominal pipe size, outside diam. (in)	Schedule number*			Wall thickness (in)	Inside diam. (in)	Inside area (in <sup>2</sup> )	Metal area (in <sup>2</sup> )	Ft <sup>2</sup> outside surface per ft	Ft <sup>2</sup> inside surface per ft	Weight per ft (lb)†	Weight of water per ft (lb)	Moment of inertia (in <sup>4</sup> )	Elastic section modulus (in <sup>3</sup> )	Radius gyration (in)	Plastic section modulus (in <sup>3</sup> )
	a	b	c												
3 3.500	...	...	5S	0.083	3.334	8.73	0.891	0.916	0.873	3.03	3.78	1.301	0.744	1.208	0.969
	...	...	10S	0.120	3.260	8.35	1.274	0.916	0.853	4.33	3.61	1.822	1.041	1.196	1.372
	40	Std	40S	0.216	3.068	7.39	2.228	0.916	0.803	7.58	3.20	3.02	1.724	1.164	2.333
	80	XS	80S	0.300	2.900	6.61	3.02	0.916	0.759	10.25	2.864	3.90	2.226	1.136	3.081
160	...	...	0.437	2.626	5.42	4.21	0.916	0.687	14.32	2.348	5.03	2.876	1.094	4.128	
...	...	XXS	0.600	2.300	4.15	5.47	0.916	0.602	18.58	1.801	5.99	3.43	1.047	5.118	
4 4.500	...	...	5S	0.083	4.334	14.75	1.152	1.178	1.135	3.92	6.40	2.811	1.249	1.562	1.620
	...	...	10S	0.120	4.260	14.25	1.651	1.178	1.115	5.61	6.17	3.96	1.762	1.549	2.303
	40	Std	40S	0.237	4.026	12.73	3.17	1.178	1.054	10.79	5.51	7.23	3.21	1.510	4.312
	80	XS	80S	0.337	3.826	11.50	4.41	1.178	1.002	14.98	4.98	9.61	4.27	1.477	5.853
120	...	...	0.437	3.626	10.33	5.58	1.178	0.949	18.96	4.48	11.65	5.18	1.445	7.242	
160	...	...	0.531	3.438	9.28	6.62	1.178	0.900	22.51	4.02	13.27	5.90	1.416	8.415	
...	...	XXS	0.674	3.152	7.80	8.10	1.178	0.825	27.54	3.38	15.29	6.79	1.374	9.968	
6 6.625	...	...	5S	0.109	6.407	32.2	2.231	1.734	1.677	5.37	13.98	11.85	3.58	2.304	4.628
	...	...	10S	0.134	6.357	31.7	2.733	1.734	1.664	9.29	13.74	14.40	4.35	2.295	5.647
	40	Std	40S	0.280	6.065	28.89	5.58	1.734	1.588	18.97	12.51	28.14	8.50	2.245	11.280
	80	XS	80S	0.432	5.761	26.07	8.40	1.734	1.508	28.57	11.29	40.5	12.23	2.195	16.600
120	...	...	0.562	5.501	23.77	10.70	1.734	1.440	36.39	10.30	49.6	14.98	2.153	20.718	
160	...	...	0.718	5.189	21.15	13.33	1.734	1.358	45.30	9.16	59.0	17.81	2.104	25.176	
...	...	XXS	0.864	4.897	18.83	15.64	1.734	1.282	53.16	8.17	66.3	20.03	2.060	28.890	
8 8.625	...	...	5S	0.109	8.407	55.5	2.916	2.258	2.201	9.91	24.07	26.45	6.13	3.01	7.905
	...	...	10S	0.148	8.329	54.5	3.94	2.258	2.180	13.40	23.59	35.4	8.21	3.00	10.636
	20	...	...	0.250	8.125	51.8	6.58	2.258	2.127	22.36	22.48	57.7	13.39	2.962	17.540
	30	...	...	0.277	8.071	51.2	7.26	2.258	2.113	24.70	22.18	63.4	14.69	2.953	19.311
40	Std	40S	0.322	7.981	50.0	8.40	2.258	2.089	28.55	21.69	72.5	16.81	2.938	22.210	
60	...	...	0.406	7.813	47.9	10.48	2.258	2.045	35.64	20.79	88.8	20.58	2.909	27.448	
80	XS	80S	0.500	7.625	45.7	12.76	2.258	1.996	43.39	19.80	105.7	24.52	2.878	33.050	
100	...	...	0.593	7.439	43.5	14.96	2.258	1.948	50.87	18.84	121.4	28.14	2.847	38.326	
120	...	...	0.718	7.189	40.6	17.84	2.258	1.882	60.63	17.60	140.6	32.6	2.807	45.013	
140	...	...	0.812	7.001	38.5	19.93	2.258	1.833	67.76	16.69	153.8	35.7	2.777	49.745	
...	...	XXS	0.875	6.875	37.1	21.30	2.258	1.800	72.42	16.09	162.0	37.6	2.757	52.778	
160	...	...	0.906	6.813	36.5	21.97	2.258	1.784	74.69	15.80	165.9	38.5	2.748	54.230	

E.15

**Anexo 4**  
**Coefficiente de Pérdidas en Accesorios**

**Tabla A6.1: Coeficiente K de accesorios.**

Accesorio	Coeficiente de Pérdidas K																														
Codos Mitrados:	<p style="text-align: center;"><b>Codos Mitrados</b></p>  <table border="1" data-bbox="1088 472 1250 714"> <thead> <tr> <th><math>\alpha</math></th> <th>K</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0°</td><td><math>2 f_T</math></td></tr> <tr><td>15°</td><td><math>4 f_T</math></td></tr> <tr><td>30°</td><td><math>8 f_T</math></td></tr> <tr><td>45°</td><td><math>15 f_T</math></td></tr> <tr><td>60°</td><td><math>25 f_T</math></td></tr> <tr><td>75°</td><td><math>40 f_T</math></td></tr> <tr><td>90°</td><td><math>60 f_T</math></td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">(Adaptado de Crane, 2010)</p>	$\alpha$	K	0°	$2 f_T$	15°	$4 f_T$	30°	$8 f_T$	45°	$15 f_T$	60°	$25 f_T$	75°	$40 f_T$	90°	$60 f_T$														
$\alpha$	K																														
0°	$2 f_T$																														
15°	$4 f_T$																														
30°	$8 f_T$																														
45°	$15 f_T$																														
60°	$25 f_T$																														
75°	$40 f_T$																														
90°	$60 f_T$																														
Salidas de Tanque:	<p style="text-align: center;"><b>Salida de Tanque</b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="852 829 950 1039"> <p>Tubería Proyectada</p>  <p><math>K = 0.78</math></p> </div> <div data-bbox="982 850 1128 1018"> <table border="1"> <thead> <tr> <th>r/d</th> <th>K</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00*</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>0.02</td><td>0.28</td></tr> <tr><td>0.04</td><td>0.24</td></tr> <tr><td>0.06</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>0.10</td><td>0.09</td></tr> <tr><td>0.15 &amp; up</td><td>0.04</td></tr> </tbody> </table> <p><small>*Borde agudo.</small></p> </div> <div data-bbox="1161 829 1258 1039"> <p>Al nivel</p>  <p>Para K, ver la tabla.</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">(Adaptado de Crane, 2010)</p>	r/d	K	0.00*	0.5	0.02	0.28	0.04	0.24	0.06	0.15	0.10	0.09	0.15 & up	0.04																
r/d	K																														
0.00*	0.5																														
0.02	0.28																														
0.04	0.24																														
0.06	0.15																														
0.10	0.09																														
0.15 & up	0.04																														
Reducciones excéntricas:	$K = 0.5 \times \left( 1 - \frac{D_1^2}{D_2^2} \right)$ <p style="text-align: center;">(Adaptado de Abulunga, 2002)</p>																														
Salida de Tubería:	<p style="text-align: center;"><b>SALIDA DE TUBERÍA</b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="836 1302 950 1543"> <p>Proyectada</p>  <p><math>K = 1.0</math></p> </div> <div data-bbox="998 1302 1112 1543"> <p>Borde agudo</p>  <p><math>K = 1.0</math></p> </div> <div data-bbox="1161 1302 1291 1543"> <p>Borde Redondeado</p>  <p><math>K = 1.0</math></p> </div> </div> <p style="text-align: center;">(Adaptado de Crane, 2010)</p>																														
Válvula de Compuerta:	 <p style="text-align: center;">ATORNILLADA</p> <p style="text-align: center;">VALVULA DE COMPUERTA</p> <p style="text-align: center;">BRIDADA</p> <div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;"> <table border="1"> <thead> <tr> <th>D</th> <th>K</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.3</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>0.6</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>4.0</td><td>0.07</td></tr> </tbody> </table> </div> <div style="flex: 1;"> <table border="1"> <thead> <tr> <th>D</th> <th>K</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.3</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>0.6</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>4.0</td><td>0.07</td></tr> <tr><td>6.0</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>10.0</td><td>0.04</td></tr> <tr><td>20.0</td><td>0.03</td></tr> </tbody> </table> </div> </div> <p style="text-align: center;">(Adaptado de Assureira, 2012)</p>	D	K	0.3	0.3	0.6	0.2	1.0	0.15	2.0	0.1	4.0	0.07	D	K	0.3	0.3	0.6	0.2	1.0	0.15	2.0	0.1	4.0	0.07	6.0	0.05	10.0	0.04	20.0	0.03
D	K																														
0.3	0.3																														
0.6	0.2																														
1.0	0.15																														
2.0	0.1																														
4.0	0.07																														
D	K																														
0.3	0.3																														
0.6	0.2																														
1.0	0.15																														
2.0	0.1																														
4.0	0.07																														
6.0	0.05																														
10.0	0.04																														
20.0	0.03																														

### Anexo 5 Análisis Reológico de la Pulpa

HOCHSCHILD MINING [COMPANIA MINERA SUYAMARCA S.A.C] / AUSENCO LTD : INMACULADA GOLD/SILVER PROJECT

SLURRY RHEOLOGY TESTWORK : INFLUENCE OF PULP DENSITY ON VISCOSITY

Composite Identity	Grind Size P80 (µm)	Pulp pH	Pulp Temp.	Pulp Density % Solids (w/w)	Bohlin Visco 88 Viscosity @ Shear Rate ( Sec <sup>-1</sup> )							
					4.2 (cps)	7.4 (cps)	13.0 (cps)	21.8 (cps)	38.7 (cps)	67.1 (cps)	118.7 (cps)	209.9 (cps)
					40	50	60	65	53	68	253	495
DOMAIN COMPOSITE #1	50	11.6*	Ambient	40	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	53	48	59
				50	LOW	LOW	29	38	53	68	74	80
				60	2931	1780	1068	681	410	253	159	142
				65	5929	3033	2093	6313	791	495	298	188

\* pH adjusted with hydrated lime.  
Note : All grinding and slurry preparation carried out using Perth tap water.

Shear Rate (sec <sup>-1</sup> )	40% solids (w/w)			50% solids (w/w)			60% solids (w/w)			65% solids (w/w)		
	Viscosity		Shear Stress (Pa)									
	(Pa)	(cps)		(Pa)	(cps)		(Pa)	(cps)		(Pa)	(cps)	
4.2	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	2.8	2.931	2931	12.4	5.929	5929	25.5
7.4	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	3.5	1.780	1780	13.2	3.033	3033	26.9
13.0	LOW	LOW	LOW	0.029	29	3.9	1.068	1068	13.8	2.093	2093	28.2
21.8	LOW	LOW	1.3	0.038	38	4.2	0.681	681	14.8	6.313	6313	30.1
38.7	LOW	LOW	1.9	0.053	53	4.7	0.410	410	15.6	0.791	791	32.0
67.1	0.053	53	3.0	0.068	68	5.3	0.253	253	17.3	0.495	495	34.5
118.7	0.048	48	5.8	0.074	74	9.1	0.159	159	19.3	0.298	298	36.9
209.9	0.059	59	12.6	0.080	80	17.3	0.142	142	23.3	0.188	188	40.5

Consultora Metalurgista

Fig. A5.1: Resultados de Muestra 1.

HOCHSCHILD MINING [COMPANIA MINERA SUYAMARCA S.A.C] / AUSENCO LTD : INMACULADA GOLD/SILVER PROJECT  SLURRY RHEOLOGY TESTWORK : INFLUENCE OF PULP DENSITY ON VISCOSITY													
Composite Identity	Grind Size P80 (µm)	Pulp pH	Pulp Temp.	Pulp Density % Solids (w/w)	Bohlin Visco 88 Viscosity @ Shear Rate ( Sec <sup>-1</sup> )								
					4.2 (cps)	7.4 (cps)	13.0 (cps)	21.8 (cps)	38.7 (cps)	67.1 (cps)	118.7 (cps)	209.9 (cps)	
DOMAIN COMPOSITE #2	50	11.6*	Ambient	40	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	32	41	60
				50	LOW	LOW	39	42	57	60	66	82	
				60	2629	1506	653	633	412	265	188	173	
				65	6810	4457	3056	2062	1307	853	541	343	
* pH adjusted with hydrated lime. Note : All grinding and slurry preparation carried out using Perth tap water.													
Shear Rate (sec <sup>-1</sup> )	40% solids (w/w)			50% solids (w/w)			60% solids (w/w)			65% solids (w/w)			
	Viscosity		Shear Stress (Pa)	Viscosity		Shear Stress (Pa)	Viscosity		Shear Stress (Pa)	Viscosity		Shear Stress (Pa)	
	(Pas)	(cps)		(Pa)	(cps)		(Pa)	(cps)		(Pa)	(cps)		(Pa)
4.2	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	0.0	2.629	2629	11.2	6.810	6810	30.2	
7.4	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	0.0	1.506	1506	12.1	4.457	4457	37.8	
13.0	LOW	LOW	LOW	0.039	39	1.7	0.653	653	13.2	3.056	3056	44.5	
21.8	LOW	LOW	LOW	0.042	42	2.2	0.633	633	14.5	2.062	2062	50.3	
38.7	LOW	LOW	1.1	0.057	57	2.7	0.412	412	16.2	1.307	1307	57.6	
67.1	0.032	32	1.9	0.060	60	4.4	0.265	265	18.1	0.853	853	64.1	
118.7	0.041	41	5.0	0.066	66	7.7	0.188	188	21.7	0.541	541	73.3	
209.9	0.060	60	12.7	0.082	82	17.0	0.173	173	38.0	0.343	343	83.1	

Consultora Metalurgista

**Fig. A5.2:** Resultados de Muestra 2.

HOCHSCHILD MINING [COMPANIA MINERA SUYAMARCA S.A.C] / AUSENCO LTD : INMACULADA GOLD/SILVER PROJECT

SLURRY RHEOLOGY TESTWORK : INFLUENCE OF PULP DENSITY ON VISCOSITY

Composite Identity	Grind Size P80 (µm)	Pulp pH	Pulp Temp.	Pulp Density % Solids (w/w)	Bohlin Visco 88							
					Viscosity @ Shear Rate ( Sec <sup>-1</sup> )							
					4.2 (cps)	7.4 (cps)	13.0 (cps)	21.8 (cps)	38.7 (cps)	67.1 (cps)	118.7 (cps)	209.9 (cps)
DOMAIN COMPOSITE #3	50	11.6*	Ambient	40	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	36	47	57
				50	LOW	28	37	41	54	62	66	78
				60	3082	1829	1099	704	431	268	173	157
				65	7667	5553	3691	3546	1351	837	509	312

\* pH adjusted with hydrated lime.

Note : All grinding and slurry preparation carried out using Perth tap water.

Shear Rate (sec <sup>-1</sup> )	40% solids (w/w)			50% solids (w/w)			60% solids (w/w)			65% solids (w/w)		
	Viscosity		Shear Stress (Pa)									
	(Pas)	(cps)		(Pa)	(cps)		(Pa)	(cps)		(Pa)	(cps)	
4.2	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	1.3	3.082	3082	12.9	7.667	7667	34.0
7.4	LOW	LOW	LOW	0.028	28	1.7	1.829	1829	13.7	5.553	5553	43.7
13.0	LOW	LOW	LOW	0.037	37	2.4	1.099	1099	14.3	3.691	3691	47.8
21.8	LOW	LOW	LOW	0.041	41	3.0	0.704	704	15.3	3.546	3546	51.3
38.7	LOW	LOW	1.4	0.054	54	3.6	0.431	431	16.8	1.351	1351	55.4
67.1	0.036	36	2.2	0.062	62	4.6	0.268	268	18.1	0.837	837	61.1
118.7	0.047	47	4.9	0.066	66	8.0	0.173	173	20.8	0.509	509	65.7
209.9	0.057	57	11.6	0.078	78	16.4	0.157	157	32.9	0.312	312	72.5

Consultora Metalurgista

Fig. A5.3: Resultados de Muestra 3.

## Anexo 6

### Análisis de los Modelos de Velocidad crítica de deposición y sus Parámetros

Con la finalidad de observar el fenómeno de la velocidad crítica de deposición respecto de sus parámetros más importantes, se plantea el siguiente análisis donde se muestra la dependencia de dicha velocidad con la concentración en volumen, la densidad específica de los sólidos, el diámetro de partícula y el diámetro de la tubería. Todo esto para cada uno de los modelos descritos en el capítulo 1. Las gráficas mostradas han sido generadas utilizando las ecuaciones de cada modelo, haciendo variar el parámetro que se desea analizar y manteniendo constantes el resto de parámetros. Los valores que se han usado para generar las curvas son similares a los del diseño y se presentan en la tabla A6.1.

$$v_D = f(C_w, S_s, S_L, d_p, D, Cd, \mu_L)$$

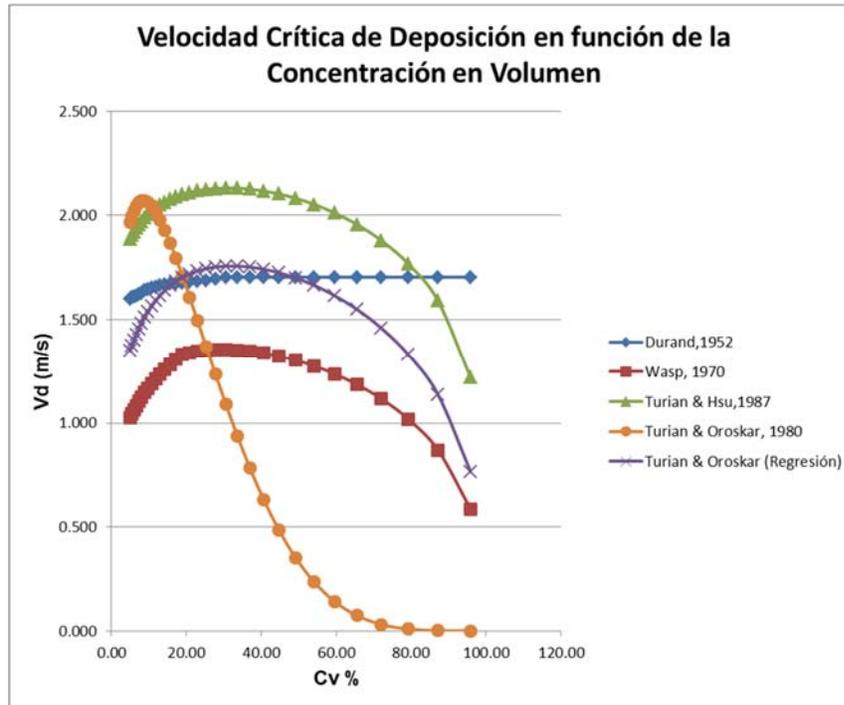
**Tabla A6.1:** Datos del análisis respecto a  $C_v$ .

Datos para el análisis respecto a $C_v$	
Concentración en Volumen	30%
Densidad específica de los Sólidos	2.7
Densidad específica de la Líquido	1.00
Viscosidad del agua (Pa.s)	0.001
Diámetro de Partícula $D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	27
Viscosidad de la Pulpa (Pa.s)	0.0749
Diámetro de tubería (mm)	200

#### 1. Respecto de la Concentración en Volumen:

Como se puede ver en la figura A6.1, el comportamiento de la velocidad crítica de deposición con respecto a la concentración volumétrica es similar a una parábola invertida. Al parecer, esto se debe a que luego de un incremento lógico de  $V_D$  al aumentar  $C_v$ , se llega a un punto máximo, donde la concentración es tal, que la interacción entre las partículas provocan su propia sustentación y con ello, mientras mayor sea la concentración, la velocidad necesaria para que las partículas ingresen a la corriente será menor; sin embargo, cuando la concentración es muy alta, la interacción entre las partículas se hace nula y el transporte de la pulpa se vuelve imposible.

Las curvas de la figura A6.1 han sido generadas con los datos de la tabla A6.1, pero la concentración ha variado de 5 a 95%.



**Fig. A6.1:** Modelos de velocidad crítica de deposición vs Concentración en volumen. (Elaboración propia)

Para cuantificar esta dependencia, se puede utilizar la regresión no lineal y obtener una ecuación que relacione directamente la velocidad crítica de deposición con la concentración en volumen. Esta ecuación tiene la forma de la Ec. A6.1, donde los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $c$  dependen de cada modelo y se muestran en la tabla A6.2.

$$V_D = a \times (Cv + b)^2 + c \tag{Ec.A6.1}$$

**Tabla A6.2:** Coeficientes para Ec. A3.1, según Modelo.

Modelo	a	b	c
Durand	$-3 \times 10^{-5}$	-60	1.71
Wasp	$-2 \times 10^{-4}$	-46.8	1.44
Turian & Hsu	$-2 \times 10^{-4}$	-42.3	2.20
Turian & Oroskar	$-3 \times 10^{-4}$	-39	1.77

**2. Respecto del tamaño de partícula y la densidad específica de los sólidos:**

En función a estos dos parámetros, la tendencia es creciente según la figura A6.2. Esto debido a que mientras más grandes o pesadas sean las partículas, mayor será la fuerza gravitatoria que lleva las partículas hacia el fondo de la tubería, entonces mayor será la velocidad mínima para que no se depositen. Los valores para generar las curvas de las figuras A6.2 y A6.3 han sido tomado de la tabla A6.1, pero

haciendo variar la densidad específica de los sólidos de 1.53 a 4.53 y el tamaño de partícula de 27  $\mu\text{m}$  a 266  $\mu\text{m}$ .

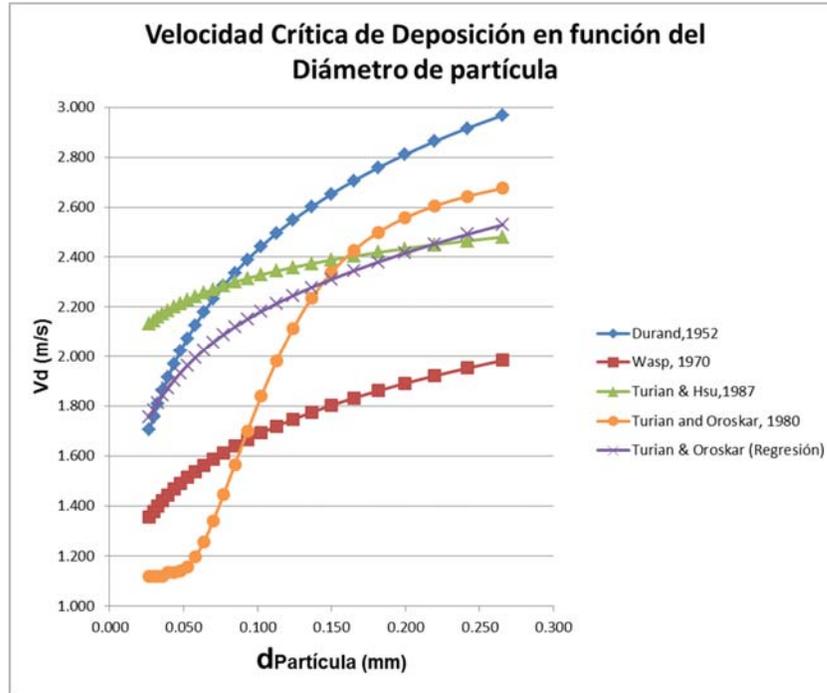


Fig. A6.2: Modelos de velocidad crítica de deposición vs Diámetro de partícula. (Elaboración propia)

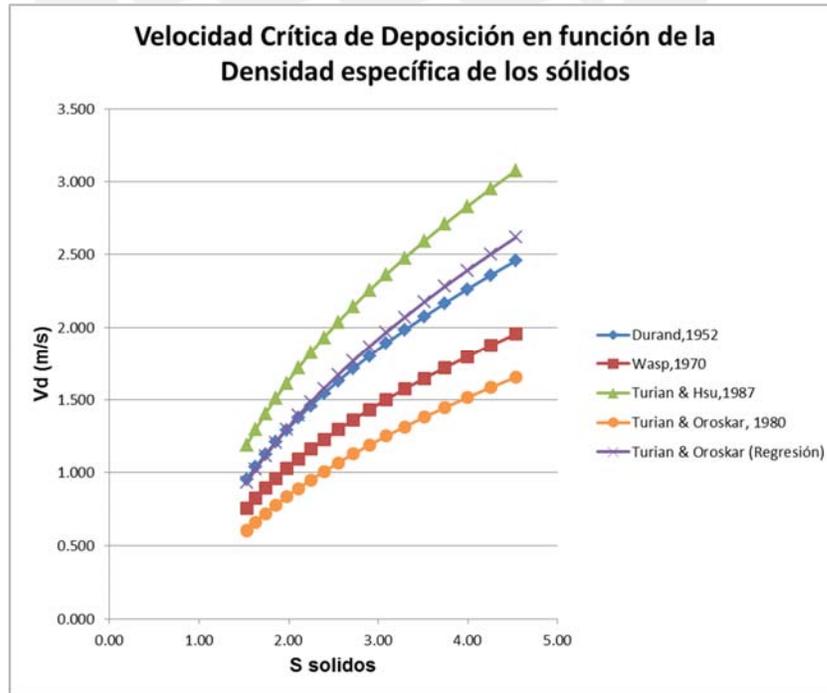


Fig. A6.3: Modelos de velocidad crítica de deposición vs Densidad específica de Sólidos. (Elaboración propia)

De la misma manera que el caso anterior, para cuantificar la dependencia se muestran las ecuaciones A6.2 y A6.3, donde los coeficientes a, b y c dependen de cada modelo y se muestran en las tablas A6.2 y A6.3 respectivamente.

$$V_D = a \times d_{partícula}^b \tag{Ec.A6.2}$$

**Tabla A6.2:** Coeficientes para Ec. A6.2, según Modelo.

Modelo	a	b
Durand	4.17	0.24
Wasp	2.47	0.16
Turian & Hsu	2.70	0.06
Turian & Oroskar	3.12	0.15

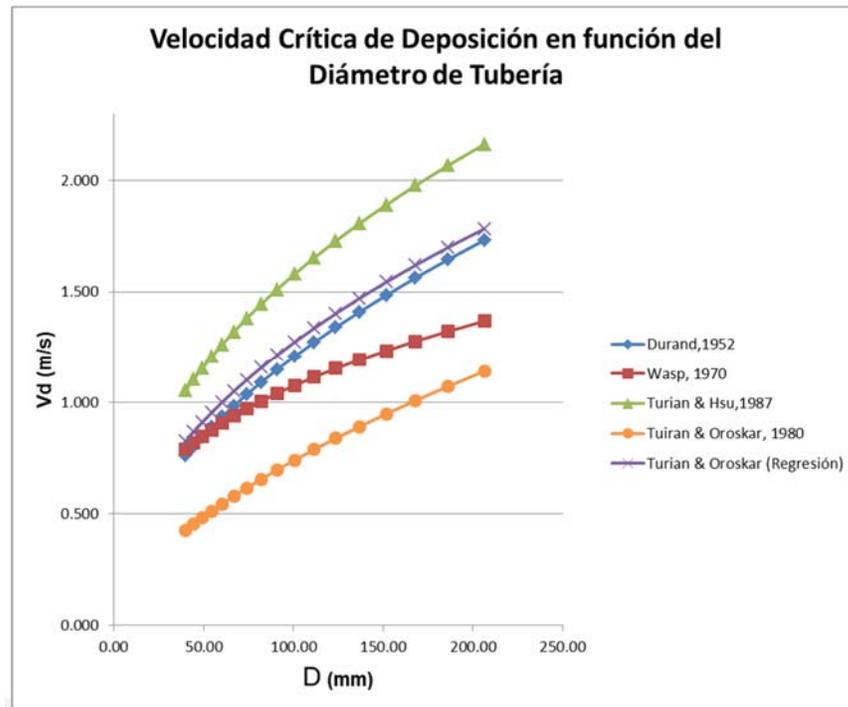
$$V_D = a \times (S_s + b)^2 + c \tag{Ec.A6.3}$$

**Tabla A6.3:** Coeficientes para Ec. A6.3, según Modelo.

Modelo	a	b	c
Durand	-0.071	-6.43	2.69
Wasp	-0.056	-6.43	2.14
Turian & Hsu	-0.892	-6.43	3.37
Turian & Oroskar	-0.046	-6.69	1.86
Turian & Oroskar - Regresión	-0.072	-6.78	2.96

### 3. Respecto del Diámetro de la tubería:

Con respecto al diámetro de la tubería, se muestra un comportamiento creciente según la figura A6.3. Esto pues mientras mayor sea el diámetro de la tubería, el volumen de líquido sobre las partículas es mayor y entonces efecto de la deposición es más intenso y por tanto la velocidad necesaria para mantener la suspensión será mayor. Los valores para generar las curvas han sido tomados de la tabla A6.1, pero haciendo variar el diámetro de 40 mm a 206 mm.



**Fig. A6.3:** Modelos de velocidad crítica de deposición vs Diámetro de la tubería. (Elaboración propia)

La cuantificación de esta dependencia viene dada por la ecuación A6.4, donde los coeficientes a, b y c dependen de cada modelo y se muestran en la tabla A6.4.

$$V_D = a \times D^b \tag{Ec.A6.4}$$

**Tabla A6.4:** Coeficientes para Ec. A6.4, según Modelo.

Modelo	a	b
Durand	0.12	0.5
Wasp	0.23	0.33
Turian & Hsu	0.21	0.43
Turian & Oroskar	0.04	0.60
Turian & Oroskar - Regresión	0.14	0.46

## Anexo 7 Cálculo Final Detallado

Las condiciones de borde para iniciar el cálculo final son las obtenidas en el cálculo preliminar y se puede ver en la tabla A7.1.

Tabla A7.1: Datos de entrada para el cálculo final.

Parámetro	Símbolo	Unidades	Tramo I (0 – 190 m)	Tramo II (190 – 970 m)
Caudal	$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /h	202	
Diámetro nominal	$\Phi$	In	8	6
Schedule	Sch	-	40	40
Espesor de la tubería	t	In	0.322	0.28
Espesor de revestimiento	t <sub>r</sub>	mm	6	
Espesor Efectivo	t <sub>ef</sub>	mm	14.77	13.11
Diámetro interno	D	mm	190.71	142.05

### 1. Cálculo de la Velocidad Media:

De acuerdo al diagrama de flujo de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el primer paso para comenzar el cálculo final, es determinar la velocidad media. Para esto, es necesario determinar el área de la sección de paso mediante la ecuación A7.1 y determinar la velocidad media según la ecuación 1.19:

$$A = \frac{\pi}{4} \times D^2 \quad (\text{Ec. A7.1})$$

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \quad (\text{Ec. 1.19})$$

Tramo I:

$$A = \frac{\pi}{4} \times (0.19071 \text{ m})^2 = 0.028565 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{202 \text{ m}^3/\text{h}}{0.028565 \text{ m}^2} \times \left( \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = 1.96 \text{ m/s}$$

Tramo II:

$$A = \frac{\pi}{4} \times (0.14205 \text{ m})^2 = 0.015847 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{202 \text{ m}^3/\text{h}}{0.015847 \text{ m}^2} \times \left( \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = 3.54 \text{ m/s}$$

## 2. Determinación el Régimen:

Se determina el régimen según el número de Reynolds, según la ecuación 1.16. Tomando en cuenta la caracterización de la pulpa, en la tabla **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \quad (\text{Ec. 1.16})$$

Tramo I:

$$Re = \frac{1500 \frac{kg}{m^3} \times 1.96 \frac{m}{s} \times 0.19071 m}{0.0749 Pa.s} = 7485$$

Entonces se puede decir que la pulpa se transporta en régimen turbulento.

Tramo II:

$$Re = \frac{1500 \frac{kg}{m^3} \times 3.54 \frac{m}{s} \times 0.14205 m}{0.0749 Pa.s} = 10070$$

Entonces se puede decir que la pulpa se transporta en régimen turbulento.

## 3. Cálculo de la Velocidad Crítica de Deposición:

Este parámetro se calcula usando el modelo de Oroskar y Turian, 1980. El cual se expresa mediante la ecuación 1.60.

$$\frac{v_D}{\sqrt{g d_p (S_S - 1)}} = \left[ 5 C_V (1 - C_V)^{2n-1} \left( \frac{D}{d_p} \right)^{\frac{1}{x}} \right]^{8/15} \left[ \frac{\rho_L D \sqrt{g d_p (S_S - 1)}}{\mu_L} \right]^{1/15} \quad (\text{Ec. 1.60})$$

Donde:

$\mu_L$  = Viscosidad dinámica del líquido (Pa.s).

$C_V$  = Concentración de sólidos en volumen.

$d_p$  = Diámetro de la partícula (m).

$D$  = Diámetro de la tubería (m).

$\rho_L$  = Densidad del líquido (kg/m<sup>3</sup>).

$S_S$  = Densidad específica de los sólidos.

$g$  = Gravedad (m/s<sup>2</sup>).

$n$  = Factor de interrupción en la velocidad terminal de la partícula. (Ec. 1.55)

$x$  = Factor de corrección por disipación de energía turbulenta. (Ec. 1.61)

Entonces se procederá a calcular siguiendo el flujo de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se calculan todos los parámetros necesarios para determinar la velocidad crítica de deposición.

### 3.1. Número de Karamanév:

Tomando los datos de la caracterización de la pulpa, según la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la ecuación 1.52, se tiene lo siguiente:

$$\varphi = \frac{4(\rho_S - \rho_L)\rho_L g d^3}{3\mu_L^2} \quad (\text{Ec. 1.52})$$

$$\varphi = \frac{4(2710 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3) \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \times (27 \times 10^{-6})^3}{3(0.001 \text{ Pa.s})^2}$$

$$\varphi = 0.4402$$

### 3.2. Coeficiente de Arrastre:

Utilizando el número de Karamanév y la ecuación 1.53, se determina el coeficiente de arrastre de la partícula.

$$C_D = \frac{432}{\varphi} (1 + 0.047\varphi^{0.66}) + \frac{0.517}{1 + 154\varphi^{-0.33}} \quad (\text{Ec. 1.53})$$

$$C_D = \frac{432}{0.4402} (1 + 0.047 \times 0.4402^{0.66}) + \frac{0.517}{1 + 154 \times 0.4402^{-0.33}}$$

$$C_D = 1008.21$$

### 3.3. Reynolds de la Partícula:

Conociendo del coeficiente de arrastre y el número de Karamanév se determina el número de Reynolds para la partícula.

$$\varphi = C_D Re_p^2 \quad (\text{Ec. 1.52})$$

En otros términos:

$$Re_p = \sqrt{\frac{\varphi}{C_D}}$$

Reemplazando los valores obtenidos:

$$Re_p = \sqrt{\frac{0.4402}{1008.21}} = 0.02089$$

### 3.4. Factor de Interrupción:

Este factor se determina mediante la ecuación 1.55 de la siguiente manera:

$$Re_p < 0.05, \quad n = 4.6289$$

$$0.05 \leq Re_p \leq 22.66,$$

$$n = 0.1754 \text{Log}(Re_p)^6 - 0.1916 \text{Log}(Re_p)^5 - 0.574 \text{Log}(Re_p)^4 \\ + 0.828 \text{Log}(Re_p)^3$$

$$+ 0.569 \text{Log}(Re_p)^2 - 1.7142 \text{Log}(Re_p) + 3.3388$$

$$Re_p > 22.66, \quad n = 2.3962$$

(Ec.1.55)

Dado que el  $Re_p$  de la partícula es menor a 0.05, entonces el factor de interrupción:

$$n = 4.6289.$$

### 3.5. $V_s^*/V_s$ :

En este punto se determina el ratio de la Velocidad terminal en un medio interrumpido por las otras partículas y la velocidad terminal de una partícula en un medio libre, según la ecuación 1.54.

$$V_s^* = V_s(1 - C_V)^n \quad (\text{Ec. 1.54})$$

En otros términos sería:

$$\frac{V_s^*}{V_s} = (1 - C_V)^n$$

Reemplazando con el valor de  $n$  y la concentración en volumen de 29%, se tiene:

$$\frac{V_s^*}{V_s} = (1 - 0.29)^{4.6289}$$

$$\frac{V_s^*}{V_s} = 0.2048$$

**3.6. Factor de Corrección por energía turbulenta:**

Por último, se determina el factor X, utilizando el ratio  $V_s^*/V_s$ , según la ecuación 1.61.

$$x = -0.2006 \left(\frac{V_s^*}{V_D}\right)^5 + 1.0496 \left(\frac{V_s^*}{V_D}\right)^4 - 1.598 \left(\frac{V_s^*}{V_D}\right)^3 + 0.4403 \left(\frac{V_s^*}{V_D}\right)^2 - 0.1675 \left(\frac{V_s^*}{V_D}\right) + 1.0004 \quad (\text{Ec. 1.61})$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$x = -0.2006(0.2048)^5 + 1.0496(0.2048)^4 - 1.598(0.2048)^3 + 0.4403(0.2048)^2 - 0.1675(0.2048) + 1.0004$$

$$x = 0.9541$$

Con todos estos parámetros calculados y mostrados en la tabla A7.2 se procede a determinar el valor de la velocidad crítica de deposición.

**Tabla A7.2:** Resumen de parámetros para Velocidad Crítica de Deposición.

Parámetro	Símbolo	Valor
Número de Karamanev	$\phi$	0.4402
Coficiente de Arrastre	$C_D$	1008.21
Reynolds de la partícula	$Re_p$	0.02089
Factor de interrupción	$n$	4.6289
$V_s^*/V_s$	-	0.2048
Factor de corrección por E. turbulenta	x	0.9541

Tramo I

$$V_D = \left[ 5C_V(1 - C_V)^{2n-1} \left(\frac{D}{d_p}\right) \frac{1}{x} \right]^{8/15} \left[ \frac{\rho_L D \sqrt{g d_p (S_s - 1)}}{\mu_L} \right]^{1/15} \sqrt{g d_p (S_s - 1)}$$

$$V_D = \left[ 5(0.29)(1 - 0.29)^{2 \times 4.6289 - 1} \left(\frac{190.71 \text{ mm}}{0.027 \text{ mm}}\right) \frac{1}{0.9541} \right]^{8/15} \times$$

$$\left[ \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.19071 \text{ m} \times \sqrt{(9.81 \text{ m/s}^2) \times (27 \times 10^{-6} \text{ m}) \times (2.71 - 1)}}{0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}} \right]^{1/15} \times$$

$$\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 \times (27 \times 10^{-6} \text{ m}) \times (2.71 - 1)}$$

$$V_D = 1.14 \text{ m/s}$$

El factor de seguridad para la deposición sería el siguiente:

$$\frac{v}{V_D} = \frac{1.96 \text{ m/s}}{1.14 \text{ m/s}} = 1.71$$

### Tramo II

$$V_D = \left[ 5C_V(1 - C_V)^{2n-1} \left( \frac{D}{d_p} \right) \frac{1}{x} \right]^{8/15} \left[ \frac{\rho_L D \sqrt{g d_p (S_S - 1)}}{\mu_L} \right]^{1/15} \sqrt{g d_p (S_S - 1)}$$

$$V_D = \left[ 5(0.29)(1 - 0.29)^{2 \times 4.6289 - 1} \left( \frac{142.05 \text{ mm}}{0.027 \text{ mm}} \right) \frac{1}{0.9541} \right]^{8/15} \times$$

$$\left[ \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.14205 \text{ m} \times \sqrt{(9.81 \text{ m/s}^2) \times (27 \times 10^{-6} \text{ m}) \times (2.71 - 1)}}{0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}} \right]^{1/15} \times$$

$$\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 \times (27 \times 10^{-6} \text{ m}) \times (2.71 - 1)}$$

$$V_D = 0.95 \text{ m/s}$$

El factor de seguridad para la deposición sería el siguiente:

$$\frac{v}{V_D} = \frac{3.54 \text{ m/s}}{0.95 \text{ m/s}} = 3.54$$

## 4. Determinación de Caída de Presión:

### 4.1. Determinación de Factor de Fricción:

Como se ha visto en el punto 4.4.7, para el cálculo de caída de presión se utilizará el modelo de Darby, siguiendo la metodología planteada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se tiene:

#### Tramo I

- **Número de Henrios:** Utilizando el número de Reynolds para el fluido, calculado líneas arriba y los datos de la caracterización de la pulpa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se procede a determinar el número de Henrios, según la ecuación 1.22.

$$He = \frac{D^2 \rho_m \tau_o}{\eta^2} \quad (\text{Ec. 1.22})$$

$$He = \frac{(0.19071 \text{ m})^2 \left(1500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (3.8516 \text{ Pa})}{(0.0749 \text{ Pa} \cdot \text{s})^2} = 37458.41$$

Como se trata de un flujo en régimen turbulento, se sigue la metodología para dicho régimen:

- **Factor de Fricción  $f_{NL}$ :** Según la ecuación 1.37, se tiene:

$$f_{NL} = \frac{16}{Re} \left(1 + \frac{He}{6 \times Re} - \frac{He^4}{3 \times f_{NL}^3 \times Re^7}\right) \quad (\text{Ec. 1.37})$$

Este valor necesita iteración para poder ser calculado:

Primera iteración:

$$f_{NL} = \frac{16}{7485} \left(1 + \frac{37458.41}{6 \times 7485}\right) = 0.003908$$

Segunda iteración:

$$f_{NL} = \frac{16}{7485} \left(1 + \frac{37458.41}{6 \times 7485} - \frac{37458.41^4}{3 \times 0.003908^3 \times 7485^7}\right) = 0.00389$$

Tercera iteración:

$$f_{NL} = \frac{16}{7485} \left(1 + \frac{37458.41}{6 \times 7485} - \frac{37458.41^4}{3 \times 0.00389^3 \times 7485^7}\right)$$

$$f_{NL} = 0.00388$$

- **Factor de Fricción  $f_{NT}$ :** Según la ecuación 1.38, se tiene:

$$f_{NT} = 10^a \times Re^b \quad (\text{Ec. 1.38})$$

Donde:

$$a = -1.47 \times (1 + 0.146 \times e^{-2.9 \times 10^{-5} \times He})$$

$$b = -0.193$$

Reemplazando con los valores obtenidos:

$$a = -1.47 \times (1 + 0.146 \times e^{-2.9 \times 10^{-5} \times 37458.41})$$

$$a = -1.542$$

$$b = -0.193$$

Reemplazando en la ecuación 1.38, se tiene:

$$f_{NT} = 10^{-1.542} \times 7485^{-0.193} = 0.00512$$

• **Factor de Fricción  $f_N$**

Con estos dos valores  $f_{NL}$  y  $f_{NT}$ , se calcula el valor del coeficiente de fricción, usando la ecuación 1.39:

$$f_N = 4 \times (f_{NL}^m + f_{NT}^m)^{1/m} \quad (\text{Ec. 1.39})$$

Donde:

$f_{NL}$  = Factor de fricción en régimen laminar.

$f_{NT}$  = Factor de fricción en régimen turbulento.

$$m = 1.7 + 40000/Re$$

$$m = 1.7 + \frac{40000}{7485} = 7.03$$

Reemplazando en la ecuación 1.39 se tiene:

$$f_N = 4 \times (0.00388^{7.03} + (0.00512^m)^{1/7.03}) = 0.0209$$

Tramo II

El cálculo para el factor de fricción en este tramo es análoga al anterior, entonces solo se muestra el resultado en la tabla resumen A73.

**Tabla A7.3:** Resumen de Factor de fricción,

Parámetro	Símbolo	Tramo I	Tramo II
Número de Henrios	$He$	37458.41	20780.56
Factor de fricción laminar	$f_{NL}$	0.00388	0.00213
	$a$	-1.543	-1.587
Factor de fricción turbulento	$f_{NT}$	0.00512	0.00436
	$m$	7.031	5.671
Factor de fricción real	$f_N$	0.0209	0.0175

**4.2. Determinación de Pérdidas de Presión principal:**

Con el objetivo de ligar las pérdidas solo a la longitud de la tubería se procede a determinar el gradiente de pérdidas ( $i_m$ ), según la ecuación 1.24:

$$h_f = f_D \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2} \times \rho_m \quad (\text{Pa}) \quad (\text{Ec. 1.24})$$

$$i_m = f_D \times \frac{v^2}{2 \times D} \times \rho_m \quad (\text{Pa / m})$$

Tramo I:

$$i_m = 0.0209 \times \frac{\left(1.96 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 0.19071 \text{ m}} \times 1500 \frac{kg}{m^3}$$

$$i_m = 316.99 \text{ Pa/m}$$

Tramo II:

$$i_m = 0.0175 \times \frac{\left(3.54 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 142.05 m} \times 1500 \frac{kg}{m^3}$$
$$i_m = 1158.91 Pa/m$$

Para esta etapa del cálculo es necesario conocer el trazado de la línea. Este trazado, que se puede ver en los planos 2 y 3, viene dividido en secciones. Entonces, se calculará la caída de presión en cada sección para obtener el total de pérdidas principales, que será la sumará todas las pérdidas por sección. Entonces, la pérdida de presión en cada tramo se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$h_p = i_m \times L \quad (\text{Pa})$$

En la tabla A7.4, se muestra las pérdidas en cada sección, en los tramos de la línea, y la pérdida principal de toda la línea.

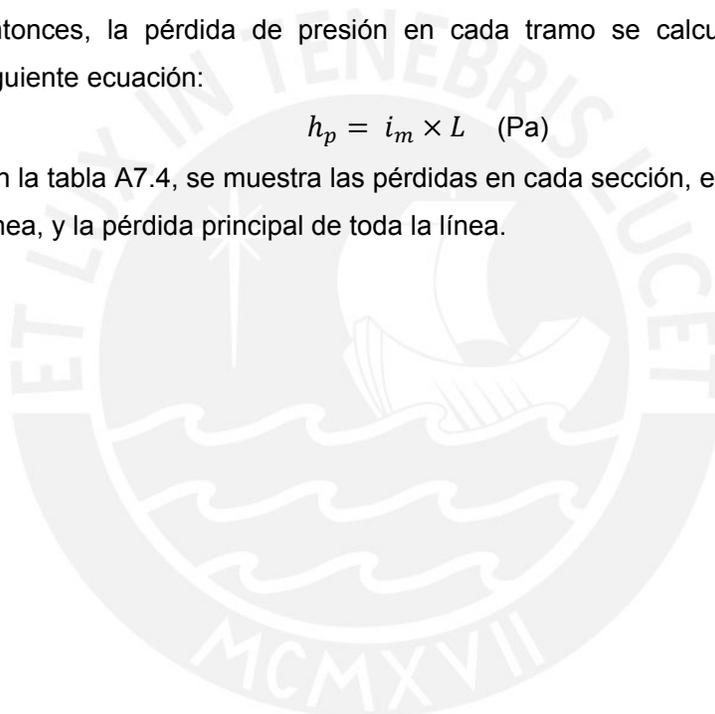


Tabla A7.7: Pérdida de Presión Principal

Sección	Descripción del Material	im (Pa/m)	Longitud del tramo (m)	Hs = im x L (kPa)
1	8" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	316.99	62.956	19.96
2	8" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	316.99	37.766	11.97
3	8" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	316.99	89.843	28.48
4	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	13.933	16.15
5	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	9.087	10.53
6	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	4.846	5.62
7	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	40.75	47.23
8	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	52.884	61.29
9	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	3.245	3.76
10	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	8.774	10.17
11	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	12.019	13.93
12	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	21.756	25.21
13	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	11.968	13.87
14	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	11.968	13.87
15	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	92.397	107.08
16	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	3.051	3.54
17	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	48.069	55.71
18	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	6.629	7.68
19	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	113.104	131.08
20	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	49.648	57.54
21	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	15.89	18.42
22	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	17.457	20.23
23	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	33.347	38.65
24	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	22.021	25.52
25	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	55.668	64.51
26	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	70.467	81.67
27	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	61.274	71.01
Pérdida de Presión Principal				964.65

#### 4.3. Determinación de Pérdidas de Presión secundaria:

En este caso se trabajará con el método de la longitud equivalente, la cual se determinará con el coeficiente de pérdidas de cada accesorio (ver anexo 4). La longitud equivalente se determina mediante la ecuación 1.41.

$$Leq = \frac{K \times D}{f} \quad \text{Ec.1.41}$$

En la tabla A7.8, se muestra cada accesorio con su respectivo coeficiente de pérdidas K y con la pérdida que ocasionan.

**Tabla A7.8:** Pérdida de Presión Secundaria.

Sección	Accesorio	K	Leq (m)	im (Pa/m)	Hs = im x Leq (kPa)
1	Salida de Sistema de Recepción.	0.78	0.076	316.99	0.024
3	Reducción excéntrica	0.223	2.030	1158.91	0.644
5	Codo de Inglete 1	0.007	0.570	1158.91	0.658
15	Codo de Inglete 2	0.007	0.570	1158.91	0.658
18	Codo de Inglete 3	0.007	0.570	1158.91	0.658
27	Salida de Tubería	1	8.11	1158.91	9.401
Pérdida de Presión Secundaria					12.019
26	Estación de Choque	212	1719.840	1158.91	1993.14

**4.4. Pérdida de Presión Total:**

La pérdida de presión total será la suma de las pérdidas primarias con las secundarias. Se muestra el resumen en la tabla A7.9.

**Tabla A7.8:** Pérdida de Presión Total.

Sección	Descripción del Material	im (Pa/m)	Longitud del tramo (m)	Hp = im x L (kPa)	Leq (m)	Hs = im x Leq (kPa)	Hm = Hp+Hs (kPa)
1	8" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	316.99	62.956	19.96	0.076	0.024	19.96
2	8" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	316.99	37.766	11.97			11.97
3	8" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	316.99	89.843	28.48	2.03	0.644	29.12
4	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	13.933	16.15			16.15
5	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	9.087	10.53	0.57	0.658	11.19
6	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	4.846	5.62			5.62
7	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	40.75	47.23			47.23
8	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	52.884	61.29			61.29
9	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	3.245	3.76			3.76
10	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	8.774	10.17			10.17
11	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	12.019	13.93			13.93
12	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	21.756	25.21			25.21
13	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	11.968	13.87			13.87
14	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	11.968	13.87			13.87
15	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	92.397	107.08	0.57	0.658	107.74
16	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	3.051	3.54			3.54
17	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	48.069	55.71			55.71
18	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	6.629	7.68	0.57	0.658	8.34
19	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	113.104	131.08			131.08
20	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	49.648	57.54			57.54
21	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	15.89	18.42			18.42
22	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	17.457	20.23			20.23
23	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	33.347	38.65			38.65
24	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	22.021	25.52			25.52
25	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	55.668	64.51			64.51
26	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	70.467	81.67	1719.840	1993.14	2074.81
27	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	1158.91	61.274	71.01	8.11243	9.401	80.41
Pérdida de Presión Secundaria							2969.81

### 5. Cálculo de la Presión Interna:

Este cálculo sigue la metodología del punto 4.4.5. Usando dicha metodología, se determina la presión de operación en cada sección, a lo largo de toda la línea. Entonces, según la ecuación 4.1 y el esquema de la figura 4.5 se tiene:

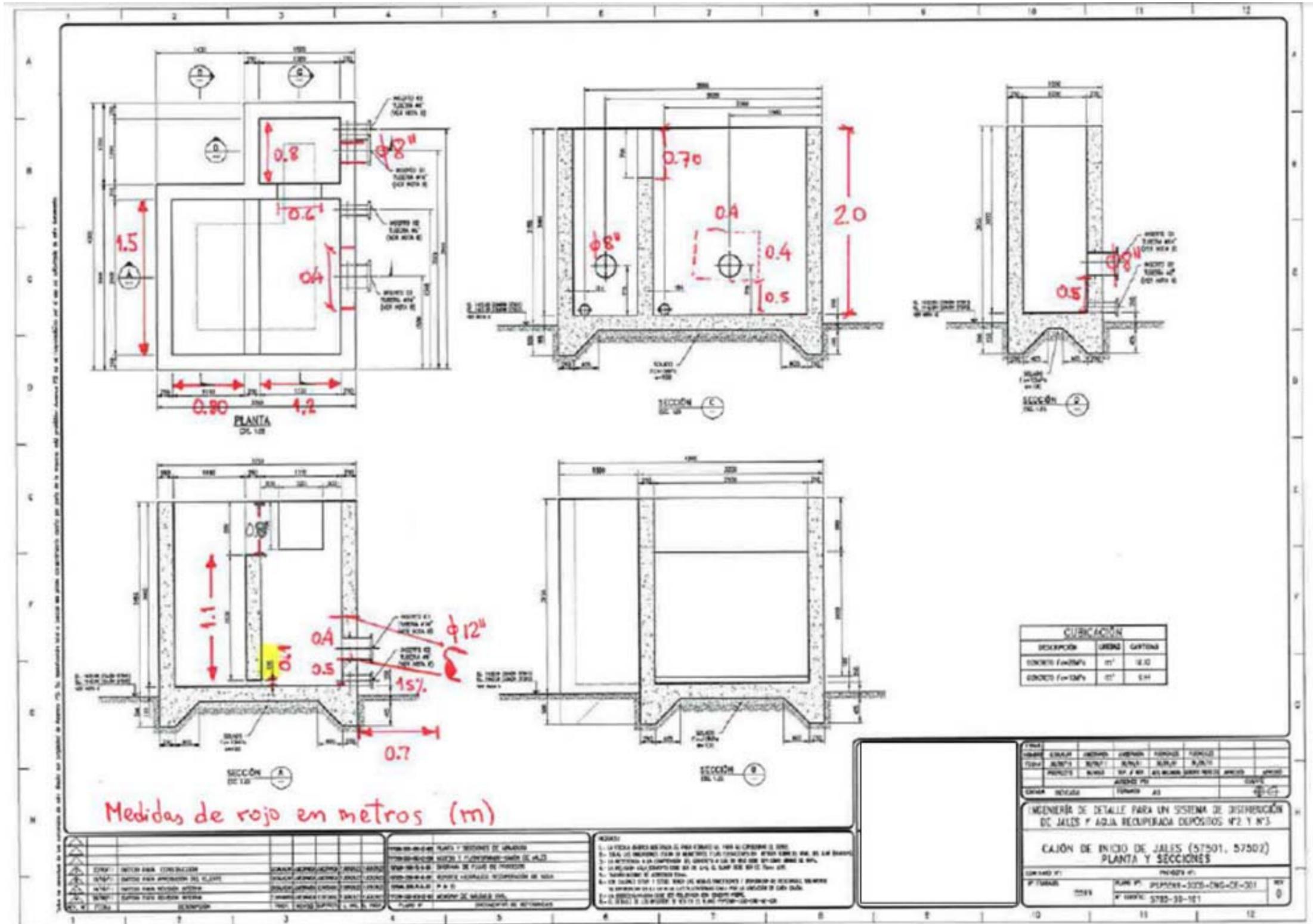
$$p_x = (Z_1 - Z_2 - H_m + H_r) \cdot \rho g \quad (\text{Ec.4.1})$$

Según el dimensionamiento del sistema de recepción, la altura sobre la salida de la pulpa es de 0.639 m, la cual genera una presión remanente (Hr) al inicio de la línea. En la tabla A7.9 se muestra la altura a la que se encuentra cada sección y mediante la ecuación 4.1.

**Tabla A7.9:** Cálculo de Presión Interna de Operación

Sección	Descripción del Material	Altitud (m.s.n.m)	Hm (kPa)	Hm (m.c.pulpa)	Presión de Operación (m.c.pulpa)	Presión de Operación (kPa)
0	8" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4724.354	0	0	0.639	9.403
1	8" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4723.218	19.96	1.356	0.419	6.162
2	8" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4722.097	11.97	0.814	0.726	10.686
3	8" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4717.527	29.12	1.979	3.317	48.810
4	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4716.726	16.15	1.097	3.021	44.449
5	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4716.203	11.19	0.760	2.783	40.956
6	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4714.851	5.62	0.382	3.754	55.234
7	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4703.487	47.23	3.209	11.908	175.230
8	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4688.738	61.29	4.165	22.492	330.973
9	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4687.833	3.76	0.256	23.142	340.530
10	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4685.147	10.17	0.691	25.137	369.886
11	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4681.468	13.93	0.947	27.869	410.093
12	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4674.807	25.21	1.713	32.817	482.897
13	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4671.144	13.87	0.943	35.537	522.928
14	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4667.48	13.87	0.943	38.258	562.974
15	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4639.194	107.74	7.322	59.223	871.464
16	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4639.035	3.54	0.240	59.142	870.267
17	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4636.524	55.71	3.786	57.867	851.509
18	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4636.178	8.34	0.567	57.646	848.259
19	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4602.057	131.08	8.908	82.859	1219.272
20	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4582.729	57.54	3.910	98.277	1446.146
21	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4576.543	18.42	1.251	103.212	1518.758
22	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4572.242	20.23	1.375	106.138	1561.816
23	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4564.026	38.65	2.626	111.727	1644.068
24	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4558.6	25.52	1.734	115.419	1698.391
25	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4537.726	64.51	4.384	131.909	1941.038
26	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4512.196	2074.81	140.999	16.439	241.906
27	6" CS API 5L - Gr B - STD, 0.280"	4498.159	80.41	5.465	25.012	368.048

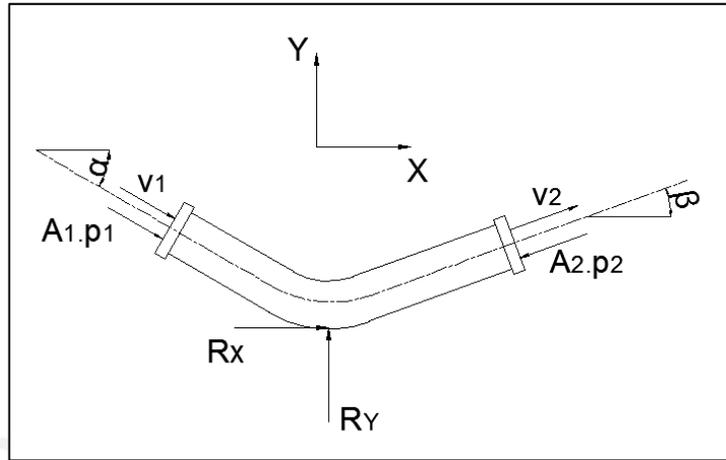
Anexo 8  
Dimensionamiento del Sistema de Recepción propuesto por la Consultora Independiente



**Anexo 9**

**Ejemplo de Cálculo de Fuerzas Debido al Cambio de Dirección**

Como ejemplo de cálculo se tomará el primer cambio de dirección, ubicado a 63 m del inicio de la línea, dado el diagrama de cuerpo libre:



**Fig. A9.1:** DCL de un flujo que atraviesa un codo.

En primer lugar identificamos las condiciones de borde:

- El diámetro nominal de la tubería: 8 in
- Área de la sección transversal:  $A_1 = \frac{\pi}{4} \times D_i^2 = \frac{\pi}{4} \times (190.71 \text{ mm})^2 = 0.02856 \text{ m}^2$
- En este tramo, la sección es constante, entonces:  $A_1 = A_2 = 0.02856 \text{ m}^2$
- La inclinación  $\alpha = 36^\circ$  y  $\beta = 44^\circ$ .
- El flujo volumétrico transportado  $\dot{V} = 202 \text{ m}^3/h$  y el flujo másico  $\dot{M} = 83.9 \text{ kg/s}$ .
- La velocidad media, tanto a la entrada como a la salida es la misma, por tanto  $v_1 = v_2 = 1.96 \text{ m/s}$
- La presión a la entrada del codo es:  $P_1 = 6.162 \text{ kPa}$ .
- La presión a la salida es:  $P_2 = 5.920 \text{ kPa}$ .

Dado el DCL y la ecuación 1.66, se determina la fuerza externa neta en cada una de las direcciones X e Y.

$$F_X = \rho \times \dot{V} \times (v_{2X} - v_{1X}) \quad (\text{Ec. 1.70})$$

$$F_Y = \rho \times \dot{V} \times (v_{2Y} - v_{1Y}) \quad (\text{Ec. 1.71})$$

Pero se sabe que en el eje X:

$$F_X = A_1 \times P_1 \times \cos(\alpha) - A_2 \times P_2 \times \cos(\beta) + R_X \quad (\text{Ec. 1.72})$$

$$v_{1X} = v_1 \times \cos(\alpha) = 1.96 \times \cos(36^\circ) = 1.59 \text{ m/s} \quad (\text{Ec. 1.73})$$

$$v_{2X} = v_2 \times \cos(\beta) = 1.96 \times \cos(44^\circ) = 1.41 \text{ m/s} \quad (\text{Ec. 1.74})$$

Análogamente, en el eje Y:

$$F_Y = -A_1 \times P_1 \times \sin(\alpha) - A_2 \times P_2 \times \sin(\beta) + R_Y \quad (\text{Ec. 1.75})$$

$$v_{1Y} = -v_1 \times \sin(\alpha) = -1.96 \times \sin(36^\circ) = -1.14 \text{ m/s} \quad (\text{Ec. 1.76})$$

$$v_{2Y} = v_2 \times \sin(\beta) = 1.96 \times \sin(44^\circ) = 1.36 \text{ m/s} \quad (\text{Ec. 1.77})$$

Por lo tanto, reemplazando y despendo en cada eje se tiene:

En el eje X:

$$R_X = -A_1 \times P_1 \times \cos(\alpha) + A_2 \times P_2 \times \cos(\beta) + \dot{M} \times (v_{2X} - v_{1X})$$

$$R_X = -0.02856 \text{ m}^2 \times 6.162 \text{ kPa} \times \cos(36^\circ) + 0.02856 \text{ m}^2 \times 5.92 \text{ kPa} \times \cos(44^\circ) \\ + 83.9 \text{ kg/s} \times (1.41 \text{ m/s} - 1.59 \text{ m/s})$$

$$R_X = -36.05 \text{ N}$$

En el eje Y:

$$R_Y = A_1 \times P_1 \times \sin(\alpha) + A_2 \times P_2 \times \sin(\beta) + \dot{M} \times (v_{2Y} + v_{1Y})$$

$$R_Y = 0.02856 \text{ m}^2 \times 6.162 \text{ kPa} \times \sin(36^\circ) + 0.02856 \text{ m}^2 \times 5.92 \text{ kPa} \times \sin(44^\circ) \\ + 83.9 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times (1.36 \text{ m/s} - 1.14 \text{ m/s})$$

$$R_Y = 238.28 \text{ N}$$

De esta manera, se tienen determinadas las reacciones necesarias en los codos para mantener en equilibrio el sistema. La reacción resultante se determina mediante la ecuación 1.70.

$$R = \sqrt{R_X^2 + R_Y^2} = \sqrt{(-36.05 \text{ N})^2 + (238.28 \text{ N})^2} = 240.99 \text{ N}$$

## Anexo 10

## Registro Histórico de la Estación Meteorológica de Pauza – SENAMHI

Tabla A10.1: Resumen de registro histórico. (Tomado de SENAMHI)

Año	Mes	Día	T min. (°C)	T max. (°C)	$\Delta T$ (°C)
2008	7	21	25.6	3.7	21.9
		22	24.8	2	22.8
	12	10	26.6	8.6	18
		16	22.4	5.8	16.6
2009	1	8	22.6	7.5	15.1
		11	24.6	9.6	15
	6	5	26.5	6.2	20.3
		21	23	2.4	20.6
	12	9	20.8	7.5	13.3
		21	27	9.8	17.2
2010	1	5	23.6	7	16.6
		30	26.2	11.4	14.8
	6	7	24.6	2.8	21.8
		12	23.5	1.2	22.3
	7	21	24.5	-6	30.5
		22	24.6	-1	25.6
	12	14	21.9	6.6	15.3
		28	25.3	10.3	15
2011	1	5	22.6	8.4	14.2
		17	25	10.8	14.2
	6	9	24.5	4.5	20
		11	26.2	7.8	18.4
	12	5	22.3	6.3	16
		27	26.2	12.8	13.4
2013	4	25	26.5	8.3	18.2
		28	22	5.7	16.3
	5	4	25	8.9	16.1
		30	22.1	4.9	17.2
	7	1	20.8	5.6	15.2
		16	26.3	12.1	14.2
	9	3	24.9	6.1	18.8
		17	26.5	8.1	18.4
Máximo $\Delta T$					30.5

Departamento : AYACUCHO		Provincia : PAUCAR DEL SARA SARA		Distrito : PAUSA		Ir : 2010-07 ▾						
Latitud : 15° 17' 17"		Longitud : 73° 21' 21"		Altitud : 2652								
Día/mes/año	Temperatura Max (°c)	Temperatura Min (°c)	Temperatura Bulbo Seco (°c)			Temperatura Bulbo Humedo (°c)			Precipitacion (mm)		Direccion del Viento 13h	Velocidad del Viento 13h (m/s)
			07	13	19	07	13	19	07	19		
21-Jul-2010	24.4	-6	9.2	24	15.6	3.6	10.4	7.2	0	0	NW	2.5
22-Jul-2010	24.6	-1	6.4	23.6	14.8	5.2	10	6.4	0	0	NW	2.5
23-Jul-2010	22.4	1	9.6	21.4	16.2	7.8	9.6	8.4	0	0	NW	2.5
24-Jul-2010	21	3.2	9.8	20.6	15.4	6.4	10.2	7	0	0	NW	2.5
25-Jul-2010	21.6	4.6	10.4	21.2	16.6	8.2	9.4	7.8	0	0	NW	2.5
26-Jul-2010	22.4	2	10	20.6	16.4	5.8	10.2	7.6	0	0	NW	2.5
27-Jul-2010	22.4	3.6	10.2	21.4	15.6	6.4	10.6	8	0	0	NW	2.5
28-Jul-2010	21.6	2.4	8.2	20.4	16.6	5.4	9.2	7.8	0	0	NW	2.5
29-Jul-2010	21.2	3.6	12.6	20.4	14	7.4	10.2	10	0	0	NW	4.4
30-Jul-2010	22.4	2.6	9.2	21.6	15.4	5.4	9.2	6	0	0	NW	2.5
31-Jul-2010	21	3.2	10.8	19.4	14.2	6	9.6	7.4	0	0	NW	2.5

Fig. A10.1: Registro de julio de 2010. (Tomado de SENAMHI)

