

FUNCION DE TRANSPORTE DE FONDO PARA SEDIMENTOS UNIFORMES
DE GRAN CALIBRE Y FLUJO MACRO-RUGOSO

Luis Ayala Riquelme ¹
Alejandro López Alvarado ²
Rodrigo Valenzuela Muñoz ³

RESUMEN

Se da a conocer los resultados obtenidos en una investigación experimental sobre transporte generalizado de fondo de sedimento grueso uniforme, generado por flujo macro-rugoso, a partir de la cual se propone una relación adimensional simple entre gasto sólido unitario y esfuerzo de corte para este tipo de material.

La relación se basa en los datos experimentales obtenidos en esta investigación para esfuerzos de corte adimensionales $T_* < 0.15$ y aquellos obtenidos por otros investigadores cuyo rango de experimentación se extiende hasta valores de $T_* < 2$ aproximadamente.

- 1 Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.
- 2 Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.
- 3 Ayudante de Investigación del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

FIG 7 DATOS TERR Y METODOS DE CALC

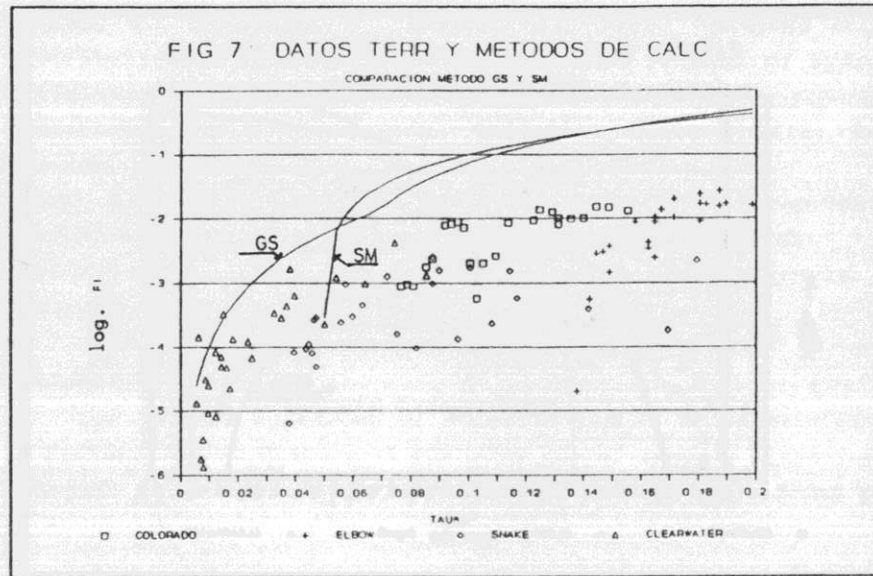
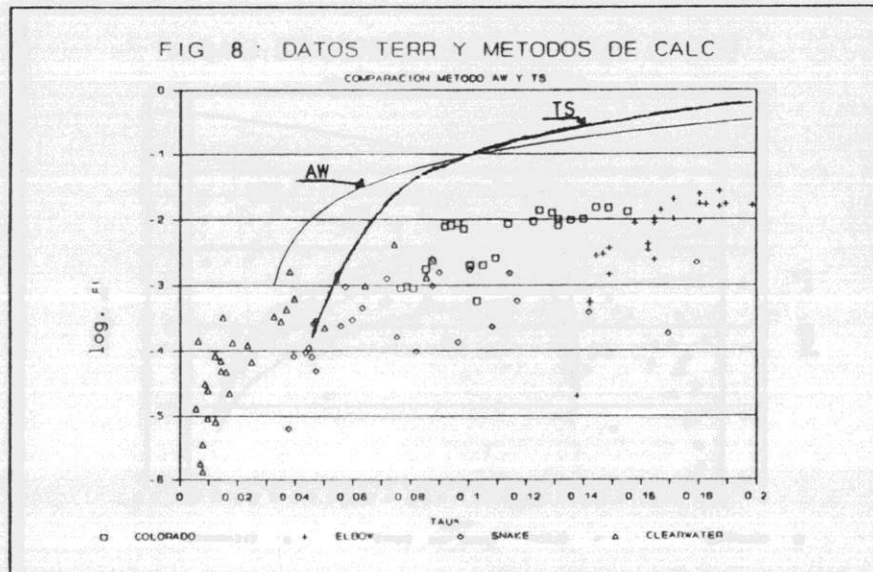


FIG 8 DATOS TERR Y METODOS DE CALC



INTRODUCCION

En la actualidad el comportamiento hidráulico y mecánico fluvial de cauces montañosos que se caracterizan por tener gran pendiente, sedimento grueso y graduado, gran capacidad de arrastre de sedimentos y un régimen de escurrimiento que puede calificarse de macro-rugoso, no ha sido estudiado lo suficiente como para poder cuantificarlo.

Para el desarrollo de la ingeniería fluvial es fundamental conocer las leyes hidráulicas y sedimentológicas que rigen el comportamiento de cursos naturales de agua. Los métodos de análisis y modelos matemáticos que hasta ahora se han utilizados para abordar estos estudios, han sido desarrollados principalmente para ríos de régimen tranquilo y de arrastre de fondo moderado, asociado con lechos finos y cauces simples bien definidos. La aplicación de estas técnicas y metodologías a ríos con fuerte pendiente, alturas relativas cercanas a la unidad y sedimentos de arrastre de granulometría gruesa, como los ríos de montaña arriba indicados, implica realizar extrapolaciones importantes lo que significa obtener resultados poco confiables.

Al existir un lecho de granulometría gruesa y extendida se produce un arrastre selectivo que involucra a las partículas más finas, formando las más gruesas una protección o coraza superficial. Además, si el tamaño de las partículas es grande en comparación a la altura de escurrimiento, la disipación de energía presenta diferencias con respecto al caso de tamaños relativos menores. El resultado de la compleja interacción entre escurrimiento y partículas se refleja en relaciones hidráulicas y leyes de transporte de sedimentos distintas a la de lechos finos y rugosos tradicionales.

En los últimos años se ha venido desarrollando, tanto en Chile como en otros países más desarrollados, investigaciones en terreno y laboratorio de algunos fenómenos hidráulicos y de transporte de sedimentos en lechos fluviales gruesos. Se ha logrado importantes avances, desarrollándose relaciones empíricas y modelos matemáticos más realistas que incorporan conceptos relacionados con la resistencia hidráulica en presencia de macroasperezas, transporte

incipiente y arrastre de fondo de sedimento grueso.

Sin embargo, aún la experimentación desarrollada no posibilita una descripción cuantitativa más exacta de los fenómenos físicos asociados al arrastre de fondo, además de cubrir tamaños de sedimentos que, si bien pueden considerarse gruesos, no son lo suficiente como para generar escurrimientos marcadamente macrorrugosos. Este hecho se comenta en otro trabajo presentado por los autores en este mismo Congreso (López et al 1991).

Por estas razones, en el Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile se están desarrollando desde hace algunos años un programa de investigación cuyo objetivo es establecer el comportamiento del fenómeno de arrastre de fondo en lechos de granulometría gruesa bajo condiciones de escurrimiento macro-rugoso, partiendo del análisis de la pérdida de carga, transporte incipiente y transporte generalizado de sedimento grueso uniforme.

En el presente trabajo se presentan los resultados experimentales alcanzados en el estudio del arrastre generalizado en lecho de sedimento uniforme. El tamaño de los sedimentos empleados y las condiciones hidráulicas experimentales han permitido extender el rango del banco de datos existente en la literatura, en cuanto a diámetro de los sedimentos del lecho y macro-rugosidad del escurrimiento.

Con estos antecedentes y con los resultados obtenidos por otros investigadores en rangos próximos a los de este trabajo, se ha propuesto una relación adimensional simple entre gasto sólido unitario y esfuerzo de corte, válida para sedimento grueso uniforme.

ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS

De la revisión bibliográfica efectuada y descrita en el trabajo de López et al ya citado, se consideró como base de comparación con los resultados experimentales efectuados en el Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile y apoyo a las conclusiones obtenidas, el banco de datos correspondiente a los trabajos de Graf y Suszka (1987) y Smart (1984). Las experiencias efectuadas por estos autores abarcan rangos de

experimentación complementarios a los del presente trabajo.

En las siguientes tablas, 1 y 2 se muestra la información correspondiente al trabajo de los autores mencionados.

EXPERIMENTACION DESARROLLADA

La experimentación se llevó a cabo en el Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile, en un canal de 15 metros de largo, 0,49 m de ancho, 0,5 m de alto y cuya pendiente puede variar entre 0 y 7,3%. En la Figura 1 se esquematiza la instalación experimental.

En la experimentación se utilizó 3 tipos de sedimento uniforme, con las características que se indican en la Tabla 3.

TABLA 3. CARACTERISTICAS DEL SEDIMENTO UTILIZADO

	D16 mm	D50 mm	D84 mm	σ D89/D16	Angulo de Reposo θ
Sedimento 1	10,5	15	18,7	1,33	36,1
Sedimento 2	24	31	39	1,25	37,5
Sedimento 3	46	51	58	1,123	37,6

Para los sedimentos 1 y 2 se experimentó con cuatro pendientes: 1%, 3%, 5% y 7%, en un rango de caudales entre 15 y 140 l/s. Las alturas relativas h/D fluctuaron entre 13,13 y 2,13 y los números de Froude entre 0,72 y 1,73. Para el sedimento 3 se experimentó con dos pendientes: 5% y 7%, para pendientes menores que ésta no se producía arrastre de sedimentos. Las alturas relativas (h/D) variaron entre 3,54 y 1,91 y los números de Froude entre 1,14 y 3,54.

El procedimiento experimental consistió en establecer un régimen de equilibrio del arrastre alimentando desde la tolva ubicada en el extremo de aguas arriba del canal, con una tasa igual a la captada aguas abajo, recirculando el sedimento mediante carros de capacidad máxima de 500 lt. Inicialmente la recirculación debió limitarse a pesos no mayores de 250 Kg de material, ya que este

TABLA 1. DATOS EXPERIMENTALES DE GRAF Y SUSZKA (1987)

SERIE	CAUDAL UNITARIO q(l/s/m)	PENDIENTE PLANO CARGA J	ALTURA MEDIA ESCURR. (m)	GASTO SOLIDO UNITARIO gs(Kg/s/m)	NUMERO FROUDE	ALTURA RELATIVA h/D	ESFUERZO CORTE ADIMENS. TAU*	GASTO SOLIDO UNITARIO ADIMENS. FI
	200	0,0050	0,251	0,088	0,85	20,24	0,0465	5,70E-03
	141	0,0050	0,211	0,016	0,77	17,02	0,0418	1,02E-03
	109	0,0050	0,175	0,002	0,79	14,11	0,0352	1,03E-04
	160	0,0050	0,230	0,029	0,77	18,55	0,0451	1,87E-03
	205	0,0050	0,255	0,115	0,85	20,56	0,0472	7,45E-03
	152	0,0050	0,217	0,027	0,80	17,50	0,0423	1,78E-03
	129	0,0050	0,195	0,005	0,80	15,73	0,0385	3,39E-04
	161	0,0050	0,223	0,033	0,81	17,98	0,0430	2,14E-03
	141	0,0050	0,207	0,012	0,80	16,69	0,0407	8,04E-04
	172	0,0050	0,229	0,036	0,84	18,47	0,0435	2,37E-03
	118	0,0050	0,185	0,003	0,79	14,92	0,0369	1,92E-04
	191	0,0050	0,242	0,071	0,85	19,52	0,0451	4,63E-03
	180	0,0050	0,245	0,055	0,79	19,76	0,0472	3,57E-03
	120	0,0050	0,189	0,004	0,78	15,24	0,0381	2,58E-04
	184	0,0050	0,238	0,060	0,84	19,19	0,0449	3,92E-03
	99	0,0050	0,163	0,001	0,80	13,15	0,0329	5,51E-05
	141	0,0075	0,192	0,084	0,89	15,48	0,0589	5,47E-03
	71	0,0075	0,124	0,001	0,87	10,00	0,0398	3,74E-05
	65	0,0075	0,118	0,000	0,85	9,52	0,0381	1,40E-05
	85	0,0075	0,139	0,004	0,87	11,21	0,0441	2,31E-04
	160	0,0075	0,209	0,152	0,89	16,85	0,0634	9,89E-03
	131	0,0075	0,182	0,052	0,90	14,68	0,0560	3,36E-03
	152	0,0075	0,201	0,123	0,90	16,21	0,0610	7,98E-03
	93	0,0075	0,147	0,007	0,88	11,85	0,0465	4,64E-04
	185	0,0075	0,229	0,242	0,90	18,47	0,0684	1,57E-02
	170	0,0075	0,217	0,178	0,90	17,50	0,0652	1,16E-02
	106	0,0075	0,161	0,018	0,87	12,98	0,0504	1,20E-03
	78	0,0075	0,132	0,001	0,87	10,65	0,0419	4,33E-05
	102	0,0075	0,155	0,013	0,89	12,50	0,0486	8,16E-04
	117	0,0075	0,169	0,035	0,90	13,63	0,0525	2,30E-03
	124	0,0075	0,174	0,044	0,91	14,03	0,0536	2,86E-03
	196	0,0075	0,236	0,280	0,91	19,03	0,0698	1,82E-02
	109	0,0075	0,162	0,023	0,89	13,06	0,0504	1,50E-03
	97	0,0090	0,143	0,054	0,96	11,53	0,0546	3,53E-03
	108	0,0090	0,152	0,089	0,97	12,26	0,0575	5,77E-03
	59	0,0090	0,105	0,001	0,92	8,47	0,0410	6,15E-05
	68	0,0090	0,115	0,004	0,93	9,27	0,0448	2,83E-04
	163	0,0090	0,199	0,274	0,98	16,05	0,0732	1,78E-02
	118	0,0090	0,161	0,127	0,97	12,98	0,0605	8,25E-03
	80	0,0090	0,125	0,017	0,96	10,08	0,0482	1,13E-03
	147	0,0090	0,189	0,204	0,95	15,24	0,0698	1,32E-02
	127	0,0090	0,170	0,154	0,96	13,71	0,0639	1,00E-02
	133	0,0100	0,170	0,211	1,01	13,71	0,0710	1,37E-02
	102	0,0100	0,142	0,086	1,01	11,45	0,0602	5,62E-03
	81	0,0100	0,124	0,037	0,99	10,00	0,0531	2,40E-03
	58	0,0100	0,104	0,003	0,92	8,39	0,0456	1,84E-04
	75	0,0100	0,119	0,026	0,97	9,60	0,0512	1,68E-03
	147	0,0100	0,179	0,304	1,03	14,44	0,0738	1,98E-02
	71	0,0100	0,112	0,016	1,01	9,03	0,0484	1,05E-03
	93	0,0100	0,136	0,060	0,99	10,97	0,0583	3,89E-03
	111	0,0100	0,151	0,131	1,01	12,18	0,0634	8,53E-03
	69	0,0100	0,111	0,014	0,99	8,95	0,0479	8,88E-04
	121	0,0100	0,160	0,172	1,01	12,90	0,0672	1,12E-02
	163	0,0100	0,192	0,372	1,03	15,48	0,0790	2,42E-02
	69	0,0125	0,104	0,064	1,10	8,39	0,0570	4,15E-03
	54	0,0125	0,090	0,017	1,06	7,26	0,0493	1,12E-03
	64	0,0125	0,099	0,042	1,09	7,98	0,0540	2,72E-03
	94	0,0125	0,127	0,205	1,11	10,24	0,0681	1,33E-02
	44	0,0125	0,080	0,003	1,04	6,45	0,0446	2,21E-04
	59	0,0125	0,093	0,024	1,11	7,50	0,0511	1,56E-03

CONTINUACION TABLA 1. DATOS EXPERIMENTALES DE GRAF Y SUSZKA (1987)

SERIE	CAUDAL UNITARIO q(l/s/m)	PENDIENTE PLANO CARGA J	ALTURA MEDIA ESCURR. (m)	GASTO SOLIDO UNITARIO gs(Kg/s/m)	NUMERO FROUDE	ALTURA RELATIVA h/D	ESFUERZO CORTE ADIMENS. TAU*	GASTO SOLIDO UNITARIO ADIMENS. FI
	100	0,0125	0,134	0,251	1,09	10,81	0,0723	1,63E-02
	89	0,0125	0,124	0,202	1,09	10,00	0,0670	1,31E-02
	119	0,0125	0,151	0,391	1,08	12,18	0,0805	2,54E-02
	74	0,0125	0,109	0,091	1,09	8,79	0,0593	5,92E-03
	49	0,0125	0,082	0,004	1,11	6,61	0,0452	2,81E-04
	78	0,0125	0,113	0,130	1,09	9,11	0,0611	8,48E-03
	68	0,0150	0,099	0,205	1,16	7,98	0,0649	1,33E-02
	64	0,0150	0,095	0,130	1,16	7,66	0,0627	8,44E-03
	50	0,0150	0,080	0,053	1,18	6,45	0,0529	3,44E-03
	80	0,0150	0,111	0,264	1,15	8,95	0,0726	1,72E-02
	92	0,0150	0,120	0,407	1,18	9,68	0,0775	2,65E-02
	60	0,0150	0,090	0,117	1,18	7,26	0,0592	7,59E-03
	41	0,0150	0,070	0,011	1,18	5,65	0,0465	7,36E-04
	86	0,0150	0,114	0,312	1,19	9,19	0,0740	2,03E-02
	98	0,0150	0,124	0,475	1,19	10,00	0,0804	3,09E-02
	40	0,0150	0,072	0,011	1,10	5,81	0,0479	6,98E-04
	189	0,0150	0,210	0,268	1,05	8,71	0,0686	6,42E-03
	112	0,0150	0,151	0,003	1,02	6,27	0,0508	7,56E-05
	152	0,0150	0,182	0,048	1,04	7,55	0,0602	1,16E-03
	145	0,0150	0,179	0,035	1,02	7,43	0,0595	8,34E-04
	121	0,0150	0,153	0,009	1,08	6,35	0,0511	2,12E-04
	169	0,0150	0,190	0,129	1,09	7,88	0,0624	3,10E-03
	160	0,0150	0,187	0,094	1,05	7,76	0,0617	2,25E-03
	124	0,0150	0,159	0,008	1,04	6,60	0,0530	1,97E-04
	131	0,0150	0,161	0,013	1,08	6,68	0,0533	3,18E-04
	140	0,0150	0,168	0,021	1,08	6,97	0,0555	5,12E-04
	134	0,0150	0,167	0,025	1,05	6,93	0,0555	6,05E-04
	155	0,0150	0,187	0,067	1,02	7,76	0,0620	1,60E-03
	181	0,0150	0,196	0,185	1,11	8,13	0,0638	4,45E-03
	88	0,0200	0,125	0,006	1,06	5,19	0,0571	1,45E-04
	145	0,0200	0,162	0,388	1,18	6,72	0,0721	9,32E-03
	120	0,0200	0,146	0,118	1,15	6,06	0,0658	2,82E-03
	109	0,0200	0,141	0,054	1,10	5,85	0,0638	1,28E-03
	139	0,0200	0,168	0,350	1,07	6,97	0,0754	8,41E-03
	128	0,0200	0,153	0,207	1,14	6,35	0,0687	4,97E-03
	101	0,0200	0,136	0,023	1,07	5,64	0,0619	5,61E-04
	84	0,0200	0,123	0,006	1,04	5,10	0,0566	1,53E-04
	79	0,0250	0,112	0,051	1,12	4,65	0,0647	1,22E-03
	91	0,0250	0,122	0,173	1,14	5,06	0,0701	4,16E-03
	74	0,0250	0,109	0,034	1,09	4,52	0,0629	8,15E-04
	70	0,0250	0,104	0,012	1,11	4,32	0,0605	2,95E-04
	59	0,0250	0,094	0,001	1,09	3,90	0,0544	2,77E-05
	110	0,0250	0,129	0,511	1,26	5,35	0,0731	1,23E-02
	85	0,0250	0,114	0,078	1,18	4,73	0,0653	1,87E-03
	95	0,0250	0,119	0,220	1,23	4,94	0,0683	5,28E-03
	65	0,0250	0,100	0,002	1,09	4,15	0,0580	5,72E-05

TABLA 2. DATOS EXPERIMENTALES DE SMART (1984)

SERIE	CAUDAL UNITARIO q(l/s/m)	PENDIENTE PLANO CARGA J	ALTURA MEDIA ESCURR. (m)	GASTO SOLIDO UNITARIO gs(Kg/s/m)	NUMERO FROUDE	ALTURA RELATIVA h/D	ESFUERZO CORTE ADIMENS. TAU*	GASTO SOLIDO UNITARIO ADIMENS. FI
I (D=4 mm)	84	0,0300	0,068	1,760	1,50	16,19	0,2944	5,88E-01
	84	0,0500	0,055	4,240	2,09	13,10	0,3968	1,42E+00
	45	0,0500	0,041	2,170	1,74	9,76	0,2958	7,26E-01
	87	0,0700	0,055	7,840	2,16	13,10	0,5556	2,62E+00
	24	0,1000	0,031	3,780	1,42	7,38	0,4473	1,26E+00
	129	0,1000	0,065	21,430	2,49	15,48	0,9380	7,17E+00
	111	0,1000	0,062	18,190	2,29	14,76	0,8947	6,08E+00
	47	0,1000	0,040	7,520	1,87	9,52	0,5772	2,51E+00
	69	0,1000	0,049	11,180	2,03	11,67	0,7071	3,74E+00
	90	0,1000	0,054	14,630	2,28	12,86	0,7792	4,89E+00
	93	0,1500	0,061	29,900	1,97	14,52	1,3203	1,00E+01
	95	0,2000	0,064	48,790	1,87	15,24	1,8470	1,63E+01
	49	0,2000	0,054	24,980	1,24	12,86	1,5584	8,35E+00
	25	0,2000	0,034	12,430	1,25	8,10	0,9812	4,16E+00
	II (D=11 mm)	64	0,0340	0,051	0,990	1,76	4,86	0,1001
85		0,0360	0,066	1,830	1,60	6,29	0,1371	1,55E-01
88		0,0500	0,066	3,690	1,65	6,29	0,1905	3,12E-01
129		0,0700	0,078	10,640	1,90	7,43	0,3152	9,00E-01
47		0,0700	0,045	3,360	1,56	4,29	0,1818	2,84E-01
68		0,0700	0,054	5,150	1,73	5,14	0,2182	4,36E-01
110		0,0700	0,072	8,930	1,82	6,86	0,2909	7,55E-01
87		0,0740	0,052	7,280	2,34	4,95	0,2221	6,16E-01
70		0,1000	0,059	10,440	1,57	5,62	0,3405	8,83E-01
90		0,1000	0,054	13,120	2,28	5,14	0,3117	1,11E+00
48		0,1000	0,048	6,830	1,45	4,57	0,2771	5,78E-01
133		0,1000	0,075	20,370	2,07	7,14	0,4329	1,72E+00
113		0,1000	0,072	17,260	1,87	6,86	0,4156	1,46E+00
24		0,1050	0,029	3,360	1,56	2,76	0,1758	2,84E-01
116		0,1500	0,074	35,540	1,84	7,05	0,6407	3,01E+00
71		0,1500	0,057	21,360	1,67	5,43	0,4935	1,81E+00
48		0,1500	0,046	14,130	1,56	4,38	0,3983	1,20E+00
95		0,1500	0,072	28,850	1,56	6,86	0,6234	2,44E+00
136	0,1500	0,073	41,570	2,21	6,95	0,6320	3,52E+00	
24	0,1500	0,019	5,910	2,89	1,81	0,1645	5,00E-01	
73	0,2000	0,066	35,660	1,37	6,29	0,7619	3,02E+00	
96	0,2000	0,073	47,270	1,55	6,95	0,8427	4,00E+00	
118	0,2000	0,075	58,380	1,83	7,14	0,8658	4,94E+00	
140	0,2000	0,079	69,350	2,01	7,52	0,9120	5,87E+00	
25	0,2000	0,037	11,670	1,10	3,52	0,4271	9,87E-01	
49	0,2000	0,059	23,920	1,09	5,62	0,6811	2,02E+00	

peso, más el del carro (130 Kg) debía elevarse mediante un tecele manual a una altura de 6 m para recargar permanentemente la tolva alimentadora. Posteriormente se instaló un tecele eléctrico de 500 Kg la que posibilitó aumentar a 350 Kg el peso a elevar.

Para establecer la condición de equilibrio se registró durante un lapso de tiempo los pesos del material captado a intervalos de tiempo prefijado, hasta que el peso/tiempo se hiciera aproximadamente constante e igual al de alimentación. Este procedimiento, previo a las mediciones a efectuar, duraba alrededor de 2 horas. Conseguido el estado de régimen, se medía el eje hidráulico y de fondo en tres verticales, en 10 secciones de control a lo largo de 10 m. de canal. Para asegurarse que las condiciones experimentales se mantuvieran constantes, las mediciones se realizaban al comienzo del período de control y a su término.

El rango de arrastre sólido cubierto por las experiencias se iniciaba con arrastre incipiente hasta el máximo posible de obtener o de medir, para la pendiente ensayada, el máximo alcanzado fue de 31 Kg/min para las pendientes mayores, del orden del 7%.

En total se efectuaron 79 experiencias, 28 con el sedimento tipo 1, 27 con el tipo 2 y 24 con el tipo 3. Filmaciones de video complementaron las observaciones.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Información Básica Obtenida

Los datos obtenidos a partir de las 3 series de ensayos realizadas han sido resumidas en la Tabla N°4, consignándose en ella los parámetros hidráulicos y de transporte más relevantes.

En la Tabla N°4 se ha incluido los parámetros adimensionales T, y que se definen a partir de las siguientes expresiones.

Esfuerzo Corte Adimensional:

TABLA 4. DATOS BASICOS DE LA INVESTIGACION

SERIE	CAUDAL UNITARIO q(l/s/m)	PENDIENTE PLANO CARGA J	ALTURA MEDIA ESCURR. (m)	GASTO SOLIDO UNITARIO gs(Kg/s/m)	NUMERO FROUDE	ALTURA RELATIVA h/D	ESFUERZO CORTE ADIMENS. TAU*	GASTO SOLIDO UNITARIO ADIMENS. FI
I (D=15 mm)	160	0,0132	0,171	0,019	0,72	11,40	0,08488	0,00097
	276	0,0132	0,197	0,230	1,01	13,13	0,09225	0,01175
	220	0,0140	0,172	0,012	0,99	11,47	0,08732	0,00061
	90	0,0298	0,083	0,229	1,20	5,53	0,09549	0,01170
	82	0,0305	0,080	0,183	1,16	5,33	0,09461	0,00935
	65	0,0308	0,068	0,030	1,17	4,53	0,08155	0,00153
	95	0,0311	0,086	0,288	1,20	5,73	0,10330	0,01471
	80	0,0313	0,079	0,146	1,15	5,27	0,09603	0,00746
	116	0,0321	0,096	0,571	1,25	6,40	0,11844	0,02917
	128	0,0323	0,106	0,717	1,18	7,07	0,13164	0,03663
	108	0,0325	0,094	0,571	1,20	6,27	0,11789	0,02917
	76	0,0329	0,070	0,058	1,31	4,67	0,08922	0,00296
	120	0,0333	0,104	0,717	1,14	6,93	0,13372	0,03663
	134	0,0334	0,112	0,880	1,14	7,47	0,14411	0,04495
	40	0,0374	0,052	0,012	1,08	3,47	0,07678	0,00061
	60	0,0390	0,068	0,362	1,08	4,53	0,10427	0,01849
	58	0,0454	0,069	0,720	1,02	4,60	0,12376	0,03678
	42	0,0482	0,060	0,454	0,91	4,00	0,11493	0,02319
	36	0,0485	0,052	0,288	0,97	3,47	0,10026	0,01471
	34	0,0490	0,046	0,073	1,10	3,07	0,08948	0,00373
35	0,0500	0,048	0,178	1,06	3,20	0,09534	0,00909	
28	0,0507	0,042	0,030	1,04	2,80	0,08477	0,00153	
40	0,0509	0,055	0,365	0,99	3,67	0,11124	0,01864	
56	0,0515	0,063	0,717	1,13	4,20	0,12824	0,03663	
39	0,0527	0,048	0,362	1,18	3,20	0,10028	0,01849	
31	0,0687	0,032	0,116	1,73	2,13	0,08710	0,00593	
30	0,0719	0,033	0,073	1,60	2,20	0,09422	0,00373	
II (D=31 mm)	260	0,0256	0,164	0,097	1,25	5,29	0,07507	0,00167
	250	0,0259	0,161	0,077	1,24	5,19	0,07482	0,00132
	222	0,0261	0,153	0,010	1,18	4,94	0,07227	0,00017
	268	0,0264	0,167	0,154	1,25	5,39	0,07889	0,00265
	244	0,0268	0,160	0,048	1,22	5,16	0,07730	0,00083
	280	0,0269	0,173	0,195	1,24	5,58	0,08329	0,00335
	110	0,0436	0,085	0,010	1,42	2,74	0,06941	0,00017
	140	0,0440	0,099	0,097	1,44	3,19	0,08114	0,00167
	146	0,0441	0,100	0,154	1,47	3,23	0,08197	0,00265
	134	0,0452	0,092	0,077	1,53	2,97	0,07739	0,00132
	152	0,0458	0,102	0,195	1,49	3,29	0,08604	0,00335
	128	0,0459	0,092	0,030	1,47	2,97	0,07888	0,00052
158	0,0465	0,107	0,200	1,44	3,45	0,09261	0,00344	
120	0,0475	0,086	0,015	1,52	2,77	0,07638	0,00026	

SERIE	CAUDAL UNITARIO q(l/s/m)	PENDIENTE PLANO CARGA J	ALTURA MEDIA ESCURR. (m)	GASTO SOLIDO UNITARIO gs(Kg/s/m)	NUMERO FROUDE	ALTURA RELATIVA h/D	ESFUERZO CORTE ADIMENS. TAU*	GASTO SOLIDO UNITARIO ADIMENS. FI
II (D=31 mm)	96	0,0475	0,075	0,004	1,49	2,42	0,06696	0,00007
	109	0,0606	0,096	0,800	1,17	3,10	0,11068	0,01375
	88	0,0610	0,076	0,130	1,34	2,45	0,08815	0,00224
	111	0,0613	0,125	1,030	0,80	4,03	0,14698	0,01771
	110	0,0626	0,102	1,000	1,08	3,29	0,12179	0,01719
	111	0,0630	0,118	1,080	0,87	3,81	0,14243	0,01857
	110	0,0640	0,109	1,010	0,98	3,52	0,13341	0,01737
	100	0,0641	0,079	0,390	1,44	2,55	0,09604	0,00671
	94	0,0643	0,074	0,310	1,49	2,39	0,09024	0,00533
	102	0,0646	0,080	0,400	1,44	2,58	0,09800	0,00688
	84	0,0647	0,067	0,122	1,55	2,16	0,08227	0,00210
	106	0,0655	0,086	0,620	1,34	2,77	0,10701	0,01066
	108	0,0664	0,091	0,790	1,26	2,94	0,11499	0,01358
	104	0,0678	0,081	0,490	1,44	2,61	0,10424	0,00842
III (D=51 mm)	219	0,0442	0,149	0,105	1,24	2,91	0,07459	0,00086
	246	0,0450	0,156	0,211	1,28	3,05	0,07915	0,00172
	289	0,0461	0,181	0,993	1,21	3,54	0,09413	0,00809
	259	0,0461	0,164	0,381	1,25	3,21	0,08548	0,00310
	161	0,0463	0,120	0,007	1,23	2,35	0,06322	0,00006
	204	0,0463	0,144	0,051	1,19	2,82	0,07593	0,00042
	186	0,0488	0,131	0,054	1,30	2,57	0,07249	0,00044
	158	0,0497	0,117	0,031	1,26	2,29	0,06615	0,00025
	240	0,0509	0,160	0,303	1,20	3,14	0,09193	0,00247
	286	0,0517	0,162	0,602	1,43	3,18	0,09400	0,00491
	266	0,0518	0,160	0,282	1,33	3,13	0,09295	0,00230
	152	0,0521	0,116	0,007	1,23	2,27	0,06873	0,00006
	274	0,0539	0,170	0,864	1,25	3,34	0,10317	0,00704
	163	0,0564	0,119	0,252	1,28	2,33	0,07711	0,00205
	176	0,0570	0,127	0,609	1,26	2,49	0,08326	0,00496
	182	0,0594	0,130	1,041	1,25	2,55	0,08826	0,00848
	148	0,0602	0,114	0,204	1,22	2,24	0,07941	0,00166
	180	0,0610	0,128	0,680	1,26	2,50	0,08988	0,00554
	137	0,0617	0,111	0,092	1,18	2,18	0,07920	0,00075
168	0,0624	0,120	0,347	1,29	2,35	0,08597	0,00283	
109	0,0638	0,097	0,007	1,14	1,91	0,07207	0,00006	
181	0,0651	0,130	0,786	1,24	2,54	0,09663	0,00640	
182	0,0652	0,130	1,769	1,24	2,55	0,09760	0,01441	
194	0,0673	0,131	3,020	1,31	2,57	0,10076	0,02461	

el radio hidráulico de fondo R_f (descontando el efecto de paredes) y el diámetro D del sedimento. τ_s y τ corresponden a los pesos específicos de los sólidos y del agua, respectivamente.

Gasto Sólido Unitario Adimensional:

$$\phi = \frac{g_s}{\gamma_s ((s-1)g D^3)^{0.5}} \quad (2)$$

Como se aprecia del contenido de la Tabla 4, los ensayos realizados abarcan escurrimientos del régimen subcrítico y supercrítico, pero los primeros corresponden a números de Froude que se aproximan a la unidad. Por otro lado, las alturas relativas son en general inferiores a 10, teniendo mayoritariamente el conjunto de valores inferiores a 3 lo que pone de manifiesto el carácter marcadamente macro-rugoso de los flujos investigados.

Presentación de los Resultados

La información adimensional consignada en la Tabla 4 fue analizada y comparada con otros bancos de datos a fin de visualizar el comportamiento general de la relación

$$\phi = \phi(T_s) \quad (3)$$

En la Fig. 2 se ha graficado los datos correspondientes a las series I, II y III indicándose con distintos símbolos los puntos experimentales de cada serie. El gráfico ha sido dibujado con \log_{10} (ϕ) en ordenadas y T_s en abscisa, en el rango experimental $0,06 < T_s < 0,15$. Puede apreciarse que si bien existe una tendencia general bastante clara del conjunto de los puntos experimentales, también se evidencia una dispersión que podría ser atribuible a causas diferentes a las experimentales. Sin embargo, los análisis realizados incorporando otras variables tales como pendiente, número de Froude y alturas relativas, revelaron que la dispersión no obedecía a patrones de comportamiento diferentes según estos parámetros.

Como una forma alternativa de analizar la dispersión constatada en la figura, se procedió a comparar estos datos con los

de Graf y Suszka (1987) que se refieren a condiciones experimentales esencialmente iguales a las de la presente investigación. En la Fig. 3 se muestra gráficamente la comparación realizada, pudiéndose observar que la dispersión del conjunto de datos aumenta significativamente. Los datos de estos autores revelan sin embargo, tasas de arrastre sorprendentemente altas para esfuerzos de corte incluso inferiores a 0,05. Las experiencias de la presente investigación mostraron, sin lugar a dudas, que se produce escaso o ningún movimiento de sólidos para esfuerzos $T_* < 0,060$, lo cual llevó a revisar los datos básicos de los anteriores autores. Se constató que para condiciones similares, estos investigadores reportan alturas de escurrimiento y por consecuencia, esfuerzos de corte, muy por debajo de los medidos en los presentes ensayos, lo cual arroja dudas sobre el conjunto de datos obtenidos por ellos.

Dado que en el rango de experimentación $T_* < 0,15$ no existe otro banco de datos y como otra alternativa de verificación de la información experimental obtenida en esta investigación, se procedió a comparar los datos con los obtenidos por Smart (1984) que abarcan el rango superior desde $T_* = 0,10$ hasta $T_* = 1,8$ aproximadamente.

La Fig. 4 muestra la comparación gráfica realizada, pudiéndose observar que existe una razonable concordancia entre la tendencia de los puntos de la presente investigación con los presentados por Smart.

Proposición de una Función de Transporte

Sobre la base de la información experimental obtenida y aquella recopilada en la presente investigación del trabajo de Smart (1984) se procedió a realizar el ajuste de la función que aparece graficada en la Fig. 5.

Se puede apreciar que para lograr un ajuste mejor es necesario distinguir dos tendencias de los puntos experimentales separándolos en $T_* = 0,18$. Bajo este valor la función P crece muy rápidamente con T_* , en tanto en el rango superior se produce un gradual decrecimiento de dicha función con el esfuerzo de corte

adimensional T_* .

Las expresiones obtenidas en cada caso son:

$$\phi = 100 e^{-(1,518 T_*^{0,792})} ; T_* < 0,18 \quad (4)$$

$$\phi = 100 e^{-(2,845 T_*^{0,435})} ; T_* \geq 0,18 \quad (5)$$

CONCLUSIONES

A partir de la información experimental obtenida de ensayos realizados con sedimento uniforme de $D_{50} = 15$ mm, $D_{50} = 31$ mm y $D_{50} = 51$ mm, para condiciones de escurrimiento macro-rugoso, que determinan un rango de esfuerzos de corte adimensional T_* entre 0,060 y 0,18 aproximadamente, y datos obtenidos por otro autor en el rango $0,10 < T_* < 1,8$, se ha definido una relación $P = P(T_*)$ que permite determinar el gasto sólido de fondo de sedimentos uniformes de gran calibre transportados por el fondo por un flujo macro-rugoso.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- LOPEZ A., AYALA L. y DOMEYKO A., 1991. Arrastre de Fondo en Lechos de Alta Pendiente y con Sedimento Grueso. Revisión y Análisis de Metodologías Recientes de Cálculo. X Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. Viña de Mar.
- GRAF, W.H. and SUSZKA, L., 1987. Sediment Transport in Steep Channels. Journal of Hydro Science and Hydraulic Engineering. Vol. 5 N°1 pp 11-26, July.
- SMART, G.H., 1984. Sediment Transport Formula for Steep Channels. Journal of Hydraulics Engineering. Vol. 110 N°3, March.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y al FONDECYT por el financiamiento proporcionado a esta investigación a través del Proyecto FONDECYT N° 397 año 1989.

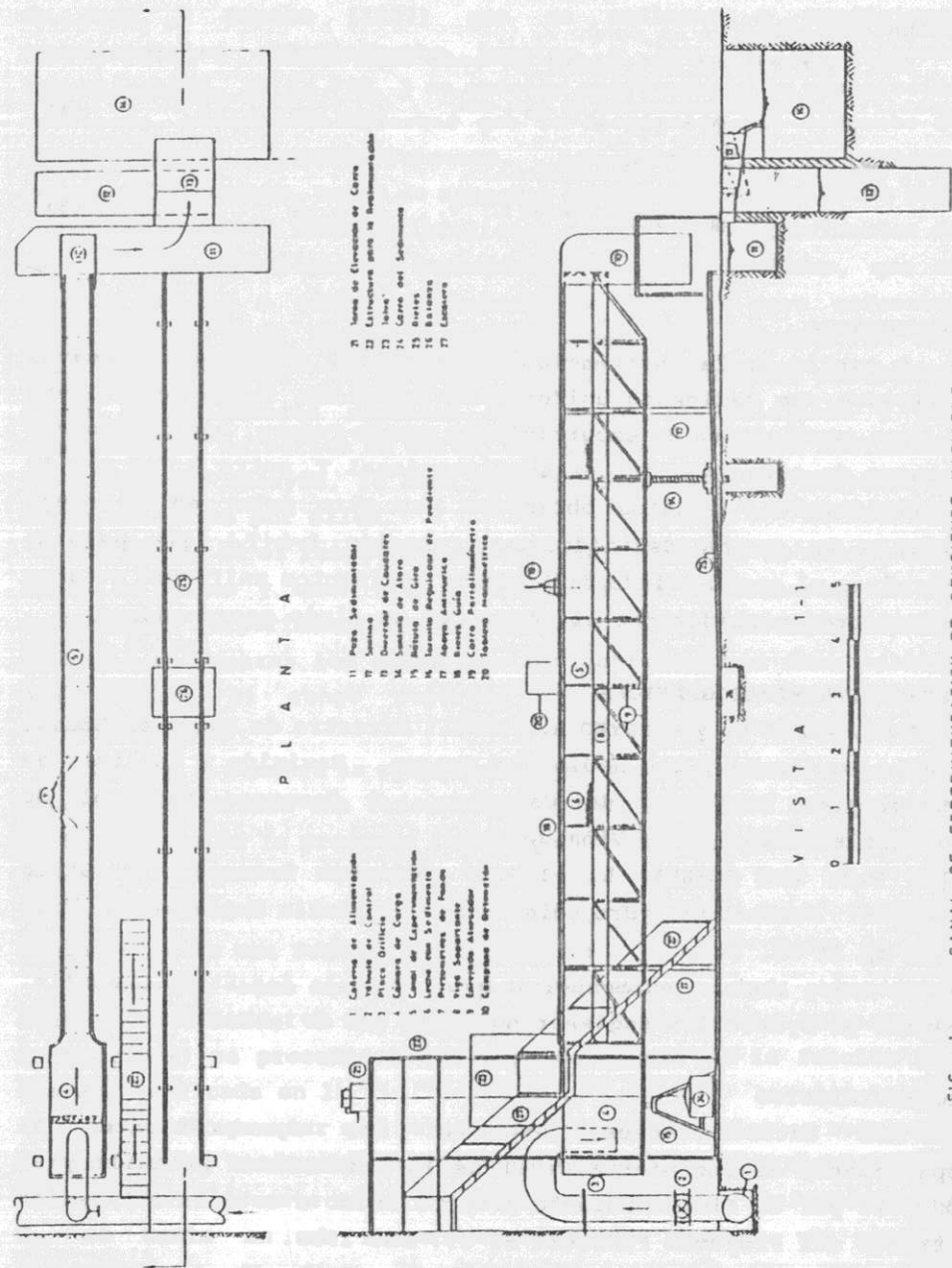


FIG. 1. CANAL DE EXPERIMENTACION DE PENDIENTE VARIABLE.

FIG. 2 GASTO SOLIDO-ESFUERZO DE CORTE

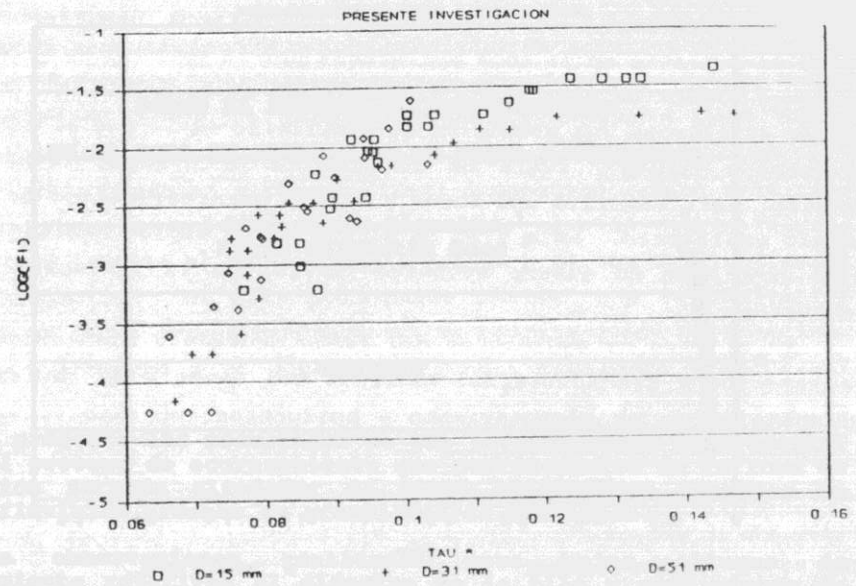


FIG. 3 GASTO SOLIDO-ESFUERZO DE CORTE

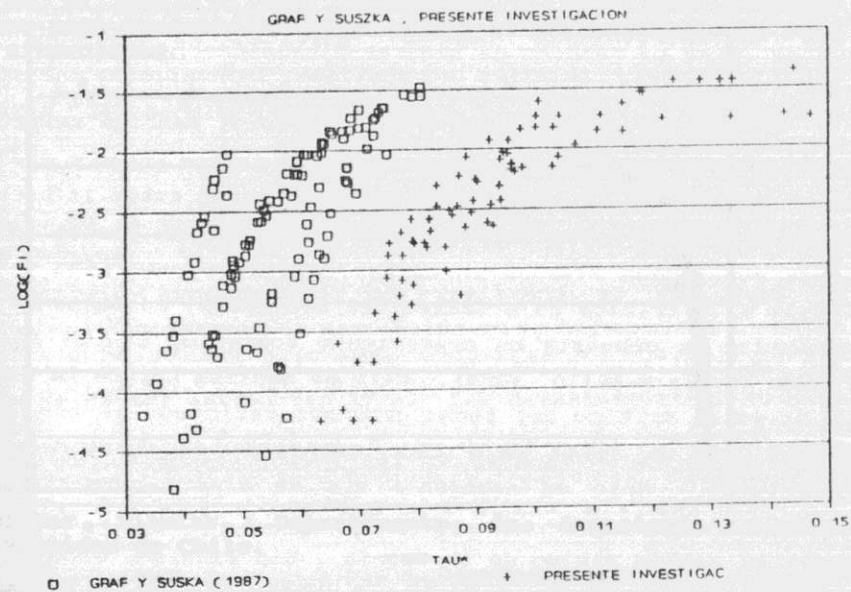


FIG. 4 GASTO SOLIDO-ESFUERZO DE CORTE

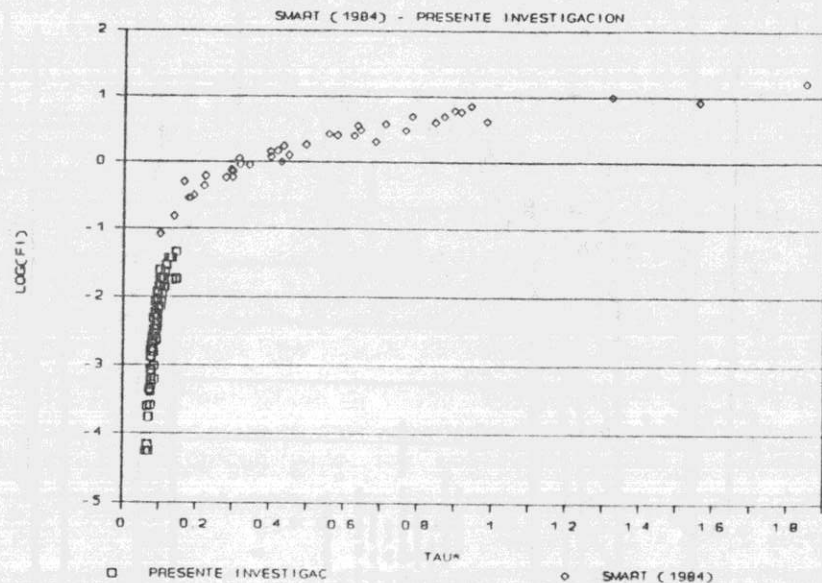
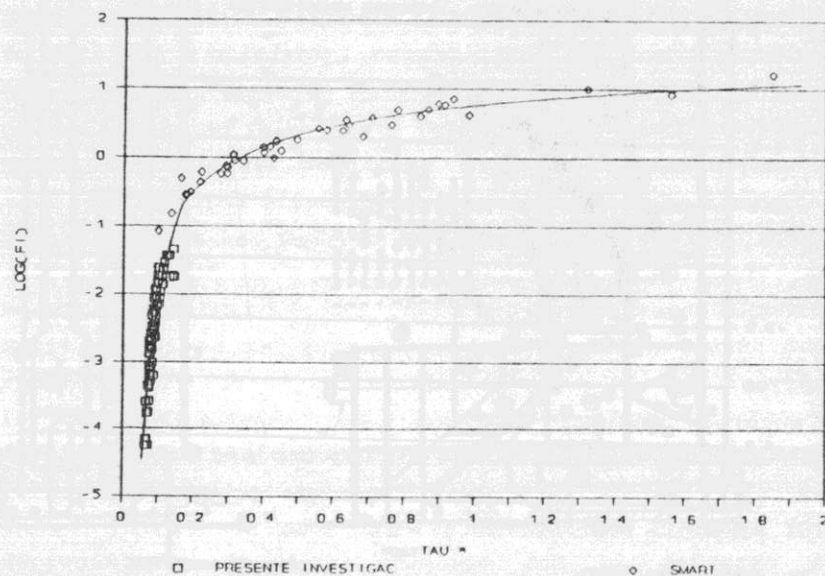


FIG. 5 RELACION PROPUESTA



SOBRE EL PROCESO DE ACORAZAMIENTO
DE LA FOSA DE SOCAVACION EN TORNO A CILINDROS

Luis Ayala Riquelme ¹
Mario Balbontin Bozo ²

RESUMEN

Se presenta los resultados de una investigación experimental sobre el proceso de acorazamiento que ocurre dentro de la fosa de socavación formada alrededor de pilas cilíndricas insertas en lechos fluviales gruesos de granulometría extendida.

Las observaciones realizadas para bajas alturas de escurrimiento relativas al diámetro de la pila y condiciones de transporte incipiente, permiten caracterizar la forma y dimensiones de la fosa así como relacionar la coraza del lecho no perturbado con la de la fosa, lo cual constituye la base para proponer relaciones para predecir la socavación y el acorazamiento en este tipo de situaciones.

¹ Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

² Ayudante de Investigación, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.