

ALGUNOS RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES DEL TRANSPORTE DE SAL COMUN SUSPENSA EN FLUJOS DE SALMUERAS SATURADAS

RESUMEN

En el trabajo se exponen algunos resultados de las investigaciones experimentales del acarreo de sal común suspendida en flujos de salmueras saturadas realizados con el objetivo de obtener los parámetros que permitan diseñar una instalación de transporte y su evaluación técnico-económica en condiciones de las salinas cubanas.

En particular se aportan datos sobre las velocidades y pendientes críticas en función de la densidad de hidromezclas, formadas con sal de la salina "Frank País" de Caimanera y salmuera saturada, obtenidas en tubos de 100 mm de diámetro con concentraciones de hasta el 33 % en peso y con partículas clase - 10 + 0 mm y un peso específico de $1\ 830\ \text{kg/m}^3$, así como características físicas del sólido y sus hidromezclas indispensables para el cálculo.

Los resultados han sido generalizados, sobre la base de la experiencia existente en la teoría y práctica del hidrot transporte para tubos de hasta 300-350 mm de diámetro y muestran posibilidades y perspectivas de su aplicación.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРО- ТРАНСПОРТА ПОВАРЕННОЙ СОЛИ, ВЗВЕШЕННОЙ В НАСЫЩЕННЫХ ПОТО- КАХ ИХ РАССОЛОВ

Резюме

В работе приводятся некоторые результаты эксперименталь-
ных исследований гидротранспорта поваренной соли, взвешен-

ной в насыщенных потоках их рассолов, изученных с целью определения параметров для проектирования транспортной установки и её технико-экономической оценки в условиях добычи соли из морской воды на Кубе.

В частности, приводятся данные о критических скоростях и уклонах в зависимости от плотности гидросмесей, образованных солью соляных разработок Франк Паис из Кайманера в насыщенных рассолах, полученные в трубопроводах диаметром 100 мм с весовой концентрацией до 33% с частицами класса - 10 + 0 мм и удельным весом 1830 кг/м³ а также физические свойства твёрдого и гидросмеси, необходимых для расчётов.

На основе теорико-экспериментального опыта были обобщены результаты для гидротранспорта в трубопроводах диаметром до 300-350 мм и была установлена возможность и перспективности их использования.

ALGUNOS RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES
EXPERIMENTALES DE LOS PARAMETROS DEL TRANSPORTE
DE SAL COMUN SUSPENSA EN FLUJOS DE SALMUERAS SATURADAS

Ing. Rafael Pérez Barreto
Candidato a Doctor en Ciencias Técnicas,
Profesor Titular del ISMMMOa

Ing. Sviatlana Maliuk
Docente del Dpto. de Electromecánica del ISMMMOa

La sal común es un producto de nuestra industria minera cuyas necesidades aumentan rápidamente con el desarrollo económico del país. La industria alimentaria, la ganadería, la industria química, etcétera, incrementan cons-

tantemente la demanda de este producto que, por otra parte, en caso de una coyuntura favorable puede convertirse en objeto de exportación. Cuba tiene magníficas condiciones naturales para la utilización integral de las aguas marinas y en particular para la extracción de sus sales por el método solar.

Al triunfo de la Revolución la sal se extraía en forma rudimentaria y en cantidades relativamente pequeñas. La obtención se efectuaba mediante el trabajo penoso de los salineros y dependía de las variaciones climatológicas. La implantación de la mecanización llevada a cabo durante todo el período revolucionario ha aumentado la producción y la productividad del trabajo, lo ha humanizado y ha permitido la variación de los parámetros tecnológicos que disminuyen notablemente la influencia de los factores atmosféricos.

En el ciclo completo de la producción de sal a partir del agua de mar, se pueden diferenciar cuatro procesos característicos, a saber: la obtención, la extracción, el transporte y el procesamiento. Cada uno de estos procesos puede dividirse a su vez en diferentes elementos más o menos estables; por ejemplo, en la obtención se distinguen con facilidad la evaporación, la concentración, la cristalización y el trasiego de salmueras que en las salinas más modernas incluye el almacenamiento en tanques especiales. La extracción consta del arranque, carga, acarreo intenso, descarga y apilado. El procesamiento incluye el lavado, secado, trituración, clasificación, envase, etcétera. Estos elementos poseen sus peculiaridades en función, tanto de la tecnología, como de la plenitud del ciclo en la unidad de producción que se analice.

El acarreo es uno de los elementos básicos en la extracción salinera y la aplicación de un transporte continuo

permitirá garantizar cualquier producción con alta productividad y bajos costos. El transporte hidráulico es una forma de transporte continuo de alta productividad, cuyas características lo hacen перспекivo para aplicarlo en las salinas cubanas, sobre todo en aquellas que lavan y procesan la sal.

Para poder realizar la evaluación técnico-económica que establezca la racionalidad de la aplicación de este tipo de transporte en condiciones concretas, es indispensable el conocimiento de sus parámetros. El estado actual de la teoría del hidrot transporte no permite aún utilizar interrelaciones teóricas para determinarlos, y en el caso particular de la sal el problema se complica por las características de la mezcla sal-salmueras que, a diferencia de las hidromezclas corrientes, constituye un sistema en equilibrio dinámico solución saturada-soluto.

Las metodologías existentes para el cálculo de los parámetros necesarios para proyectar una instalación de transporte hidráulico han sido logradas mediante la generalización de datos experimentales obtenidos en condiciones determinadas. No existe una metodología única y la aplicación de cualquiera de ellas en condiciones diferentes a aquellas para las cuales fueron elaboradas puede provocar serios errores, cuyas consecuencias no sólo son costosas, sino que, además, ponen en peligro la fiabilidad del trabajo de la instalación proyectada. Por otra parte, en el país no existen experiencias en el transporte de sal suspensa en salmueras, ni metodologías de cálculo y se hizo indispensable la ejecución de investigaciones que permitan obtener datos fiables para la realización y evaluación técnico-económica de un proyecto.

Con el objetivo de determinar los parámetros del transporte de sal común suspensa en salmueras y la elaboración

de recomendaciones prácticas para diseñar su instalación en condiciones de las salinas cubanas, se llevaron a cabo una serie de investigaciones que consistieron en determinar experimentalmente las pérdidas específicas de carga, las velocidades críticas, la capacidad de transporte con diferentes concentraciones de hidromezclas formadas con sal solar, en una instalación constituida al efecto y generalizar estos resultados sobre la base de los conocimientos y experiencias existentes, para obtener los datos que permitan establecer el régimen racional de trabajo y elegir los equipos adecuados en cada caso concreto, de tal forma que se pueda realizar el proyecto de una instalación y su evaluación técnico-económica.

En el presente trabajo se exponen algunos resultados de las investigaciones relacionados con ciertas propiedades del sólido y sus hidromezclas indispensables para el cálculo, así como las velocidades y pendientes críticas realizadas con productos de la industria salinera nacional.

Las investigaciones se llevaron a cabo en una instalación semiindustrial, cuyo esquema se muestra en la Figura 1 y consta del tanque 1, la bomba 2, la válvula de regulación 3, las tuberías de succión 4 y de impulsión 5, el venturi 6, los manómetros diferenciales 7 y 8, la ventana de observación 9, las tolvas 10 y 11 y las válvulas auxiliares 12 y 13.

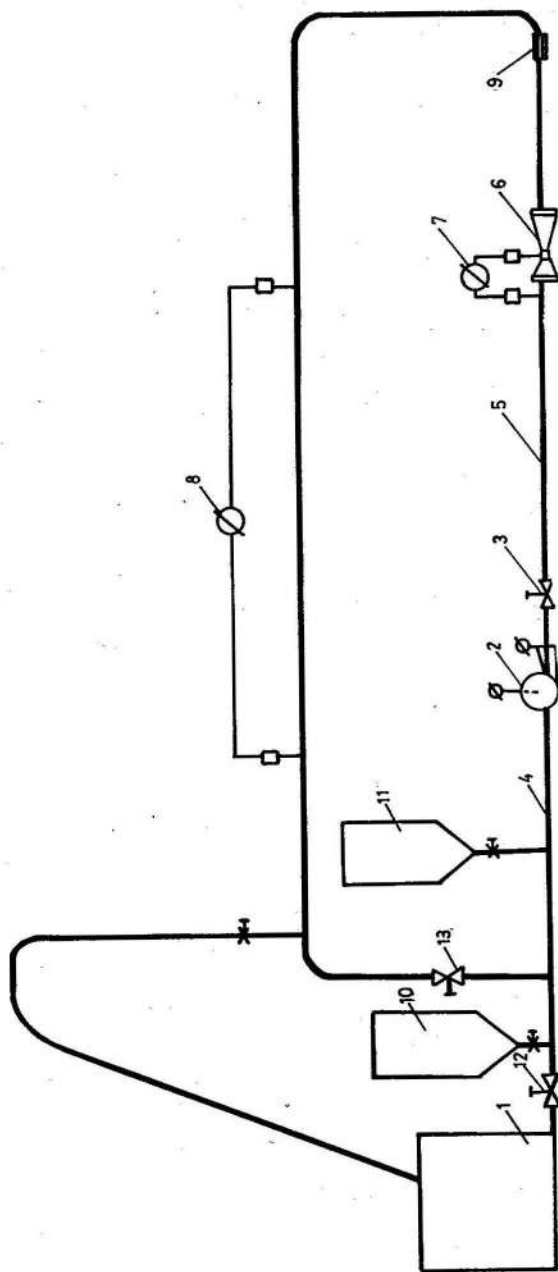


Fig. 1. Esquema de la instalación experimental de transporte hidráulico.

Una bomba del tipo 20 FS-75, de fabricación coreana, impulsa la hidromezcla por un tubo de acero con un diámetro interior de 100 mm, en el cual se ha montado un venturi para determinar el gasto. En el mismo tubo se encuentra la ventana de cristal para observar el flujo. Los parámetros se tomaban de la tubería investigada, así como del venturi por recipientes separadores, que por un lado se comunican con orificios en la misma y por el otro con los instrumentos de medición mediante mangueras de goma de 6-8 mm de diámetro. Los sectores del conducto donde se realizaron las mediciones estaban situados horizontalmente. La longitud del tramo recto del tubo antes y después del venturi era de $30 D^*$ y $20 D$ respectivamente; mientras que en los puntos donde se tomaba la presión para hallar las pérdidas de carga era de $23 D$ y $16 D$. La diferencia de presión se medía con manómetros diferenciales del tipo de columna de tubos en U con mercurio. La distancia entre los puntos donde se tomaba la presión para determinar las pérdidas de carga era de 4 m.

El sistema puede trabajar en circuito cerrado: succión-bomba-impulsión-succión; o abierto: tanque-succión-bomba-impulsión-atmósfera; en este último, durante un tiempo determinado por la capacidad del tanque cuando no se alimenta o indefinidamente si el caudal de las bombas coincide con el caudal de la alimentación.

La capacidad de la tubería era de $0,81 \text{ m}^3$; la de la parte cilíndrica de la tolva con longitud $L = 0,860 \text{ m}$ era de $0,215 \text{ m}^3$ y llevado a dos tercios ($L = 0,55 \text{ m}$) era de $0,137 \text{ m}^3$. La capacidad del cono de la tolva de carga con una altura $h = 0,37 \text{ m}$ era de $0,03 \text{ m}^3$ y la capacidad del tanque de agua era de 2 686 l con una altura de $1,20 \text{ m}$.

*D = diámetro del conducto. (N. del A.)

Para eliminar las posibles entradas de aire a la instalación en el tanque se construyeron trampas mediante las cuales este se expulsaba a la atmósfera. Del sistema el aire se sacaba mediante purgadores especiales colocados en las partes altas de la tubería y en los separadores.

Los experimentos se realizaron con mezclas formadas con sal de la salina "Frank País" de Caimanera y se analizaron hidromezclas con sal de Puerto Padre. El sólido después de pesado se introducía en la instalación a través de la tolva de carga. La concentración alcanzó cerca del 60 % en peso del sólido y la densidad hasta 1 470 kg/m³.

Cuando se realizaron los experimentos primero se determinaban las características de la tubería para el agua; es decir, se establecían las pérdidas de carga i_0 en función de la velocidad del agua V_0 . Los ensayos se efectuaron en ciclo cerrado, con el objeto de evitar errores que pudieran tener lugar debido a la distribución irregular del material relativamente grande a lo largo de la tubería y relacionado con la rápida sedimentación de las partículas sólidas en el tanque intermedio. La utilización de agitadores generalmente está acompañada de la entrada de aire al sistema lo que provoca grandes errores en las indicaciones de los instrumentos de medición.

Después de determinar las características de la tubería para el agua, se investigaban las hidromezclas. Los ensayos comenzaban con las características más pequeñas. El paso a concentraciones mayores se realizaba agregando sólido por la tolva de carga, después de pesado. La densidad de la hidromezcla se hallaba por el método peso-volumen y se controlaba tomando muestras. Todos los resultados se apuntaban en la libreta de ensayos y se elaboraron en forma de tablas.

El comienzo de la sedimentación de las partículas para hallar la velocidad crítica se determinaba visualmente y se comprobaba con el gráfico de las curvas $i = f(V)$ donde coincidía con el mínimo.

Las dimensiones de las partículas influyen en los parámetros del transporte y la clasificación de las hidromezclas. En la industria salinera nacional se obtienen materiales de diferentes tamaños en función de las condiciones concretas de cristalización en cada salina e incluso, en una misma, se han observado variaciones en el tamaño del grano cuando han cambiado las condiciones de obtención. La sal de la salina "Frank País" de Caimanera, analizada en nuestros laboratorios se encontraba en un intervalo - 10 + 0 mm. La composición granulométrica de esta sal se muestra en la Tabla 1. Su tamaño medio ponderado es de 5,21 mm. La de la salina Puerto Padre resultó ser más gruesa en el intervalo - 31,5 + 0 con un tamaño medio ponderado de 12,85 mm. En la Tabla 2 se muestra la composición granulométrica de esta sal determinada en nuestros laboratorios.

TABLA 1. Composición granulométrica de la sal de Caimanera.

No.	Clase mm	% en peso	% acumulativo del cernido
1	+ 10,00	0,00	100,00
2	- 10,00 + 8,00	8,66	91,34
3	- 8,00 + 6,30	11,77	79,57
4	- 6,30 + 5,00	14,78	64,79
5	- 5,00 + 4,00	13,86	50,93
6	- 4,00 + 3,36	5,10	45,83
7	- 3,36 + 2,00	20,46	25,37
8	- 2,00 + 1,00	20,40	4,97
9	- 1,00 + 0,00	4,97	0,00
Total		100,00 %	0,00 %

TABLA 2. Composición granulométrica de la sal de Puerto Padre.

No.	Clase mm	% en peso	% acumulativo del cernido
1	+ 31,5	0,00	100,00
2	- 31,5 + 20,00	12,23	87,77
3	- 20,0 + 16,0	11,93	75,84
4	- 16,0 + 12,5	17,75	59,09
5	- 12,5 + 10,0	17,36	40,73
6	- 10,0 + 8,0	9,66	32,07
7	- 8,0 + 6,3	8,68	22,39
8	- 6,3 + 4,0	12,03	10,36
9	- 4,0 + 2,0	6,51	3,85
10	- 2,0 + 0,0	3,85	0,00
Total		100,00 %	0,00 %

El peso específico del material se determinó por la cantidad de queroseno desplazado en una probeta graduada cuando se introducía en la misma un peso conocido de sal, y su valor medio fue de 1 830 kg/m³. Los resultados parciales de varias mediciones se relacionan en la Tabla 3. El peso específico de la halita es de 2 100-2 200 kg/m³. En búsqueda de una posible porosidad interna que pueda provocar un resultado disminuido se hicieron pruebas con partículas - 0,5 (- 0,3) mm. Sin embargo, los resultados no variaron y el peso específico promedio para estas partículas también fue de 1 830 kg/m³. Con respecto al peso específico de la sal de Puerto Padre prácticamente coincide con la de "Frank País".

TABLA 3. Resultados de la determinación del peso específico de la sal.

Volumen ml	8,9	5,5	3,2	5,5	5,5	5,5	6	10,2
Peso g	7	10	6	10,4	10,2	10,2	11	5,6
Peso Espec. kg/m ³	1,79	1,81	1,81	1,89	1,85	1,85	1,83	1,83
Promedio 1,83 t/m ³								

Se puede concluir que, conforme al tamaño de las partículas la sal de la salina "Frank País" forma hidromezclas heterogéneas entre los tipos cercanas gruesas y gruesas dispersas; mientras que la de Puerto Padre forma hidromezclas prácticamente gruesas. Estas características se mantienen cuando el transporte se realiza a cortas distancias. En el proceso de transportación las partículas se degradan, es decir, pierden tamaño y este fenómeno es mucho más intenso cuanto mayor sea la distancia. Algunos problemas de la degradación de las partículas de sal serán analizados en un próximo trabajo.

La solubilidad del cloruro de sodio puro en el agua en función de la temperatura es conocido y se muestra en la Figura 2. Como se ve la variación de la solubilidad en función de la temperatura es pequeña, sobre todo si se compara con otras sales. A temperaturas de 23-30 °C la concentración en peso de la solución saturada es de 26,48-26,56 %, es decir, en 100 ml de agua se pueden disolver aproximadamente unos 36,6 g de cloruro de sodio, después de lo cual la solución se satura.

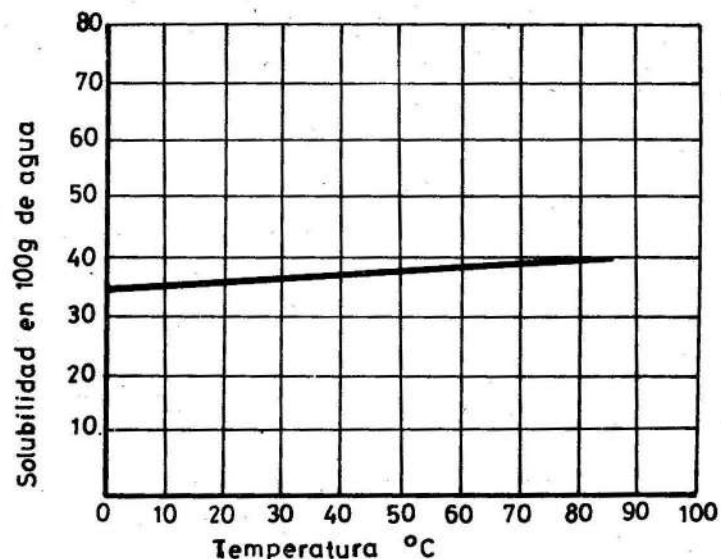


Fig. 2. Curva de solubilidad del cloruro de sodio en el agua en función de la temperatura.

Con respecto a la sal de la salina "Frank País" se logró disolver cerca de 36 g de sal en 100 ml de agua mediante la agitación intensiva de la solución con una temperatura de 28,5 %. Es decir, que la concentración máxima alcanzada de las salmueras a la temperatura mencionada preparadas con la propia sal que debe transportarse no sobrepasa los 26,5 %. Como base de cálculo se ha tomado la concentración de saturación de 26,4 % máxima alcanzada en el laboratorio a la temperatura de 28,5 %.

En el proceso de obtención de la sal común, junto con esta sedimentan otras sales; principalmente de magnesio, que contaminan el producto final disminuyendo su calidad. Sin embargo, estas sales de magnesio se disuelven en soluciones saturadas de cloruro de sodio a la temperatura ambiente y por lo tanto se crea la posibilidad de su eliminación en el proceso de transporte. Al mismo tiempo, con la

extracción se mezclan con la sal gran cantidad de partículas insolubles, contaminantes del producto que obligan a lavarlo. El transporte hidráulico crea condiciones favorables para la separación de estas partículas.

En la Figura 3 se muestra la relación entre la concentración y la densidad de las salmueras formadas con la sal de la salina "Frank País" obtenida en nuestros laboratorios con una temperatura de 28,5 %. Los datos obtenidos a pesar de las impurezas se diferencian muy poco de los de la literatura.

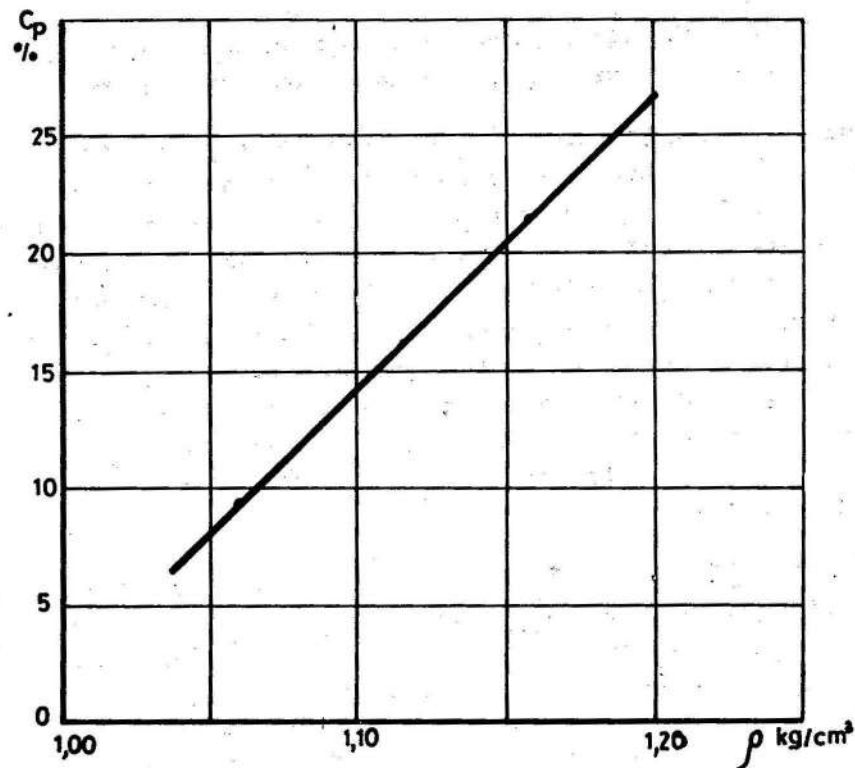


Fig. 3. Gráfico de la relación entre la densidad y la concentración de las salmueras formadas con sal de la salina "Frank País"; $t = 28,5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

En la producción como unidad de medida de la densidad de las salmueras, tradicionalmente se ha utilizado el grado Baumé que se relaciona con la densidad mediante la siguiente fórmula empírica:

$$\rho = \frac{44,3}{144,3 - N}$$

donde:

ρ - densidad de la salmuera; t/m³

N - grados Baumé

Esta fórmula es válida para una temperatura de 15,5 °C (60 °F) a la cual ha sido graduado el areómetro Baumé.

Cuando se trata de soluciones a otra temperatura, tanto en los resultados obtenidos mediante la fórmula como en las mediciones directas es necesario introducir las conexiones pertinentes. Conforme a esta fórmula una solución saturada de cloruro de sodio a 15,56 °C con una densidad de la salmuera de 1 204 kg/m³ equivale a 24,5 grados Baumé, por debajo de la graduación de las salmueras marinas que comienzan a sedimentar el cloruro de sodio a 25,5 grados Baumé. Esto se explica por la presencia en las salmueras marinas de otras sales de mayor solubilidad, así como por la diferencia de temperatura.

La viscosidad de la salmuera saturada determinada en un viscosímetro de Hopler era aproximadamente de 2 cP. En algunas oportunidades se observaron a trasluz pequeñas partículas en suspensión, no disueltas.

La caída libre de las partículas de tamaño medio de las sales analizadas en sus soluciones saturadas tiene lugar

en régimen turbulento. Para este caso la velocidad de caída libre W se puede determinar por la siguiente fórmula:

$$W = a \sqrt{d (\rho_{sol.} - \rho_o)} ; \text{ cm/s}$$

donde:

a - coeficiente experimental

d - diámetro de la partícula, cm

$\rho_{sol.}$ - densidad del sólido, g/cm³

ρ_o - densidad del líquido, g/cm³

Para las partículas de sal de la salina "Frank-País" que caen libremente en una solución saturada de la misma en régimen turbulento se obtuvo a = 26-29.

Para determinar las velocidades críticas los experimentos se llevaron a cabo en tubos de 100 mm, diámetro industrial mínimo que permite la generalización basada en los conocimientos acumulados, hasta diámetros de 300-350 mm, con resultados satisfactorios para la práctica. Tanto el diseño de la instalación como la elección del material a investigar fueron realizados de tal forma que permiten una generalización y aplicación en las condiciones de las diferentes salinas cubanas.

Las concentraciones en peso y las densidades de algunas de las hidromezclas investigadas se relacionan en la Tabla 4 en la cual se puede apreciar el intervalo de concentraciones y densidades investigadas que alcanzó hasta cerca del 60 % en peso y de 1 420 g/m³, respectivamente.

TABLA 4. Concentraciones en peso y densidades de las hidromezclas investigadas.

No. de orden	Concentraciones en peso		Densidades kg/m ³
	Fraciones	%	
1	0,1031	10,31	1 070
2	0,2035	20,35	1 144
3	0,2645	26,45	1 196
4	0,3156	31,56	1 221
5	0,3623	36,23	1 253
6	0,3731	37,31	1 260
7	0,4133	41,33	1 289
8	0,4501	45,01	1 317
9	0,4837	48,37	1 355
10	0,4851	48,51	1 357
11	0,5158	51,58	1 385
12	0,5441	54,41	1 414
13	0,5938	59,38	1 369

Por velocidad crítica se comprende la velocidad media del flujo que corresponde al comienzo de la sedimentación de las partículas precisada visualmente, mientras que la velocidad media se determina por la diferencia de presión en el venturi.

Los valores de la velocidad crítica para diferentes densidades obtenidos de esta manera se relacionan en la Tabla 5. En la Figura 4 se muestran estos resultados en forma de puntos experimentales a través de los cuales se ha trazado la curva de la velocidad crítica en función de la densidad (concentración) de la hidromezcla $v_{crit} = f(\rho_m)$.

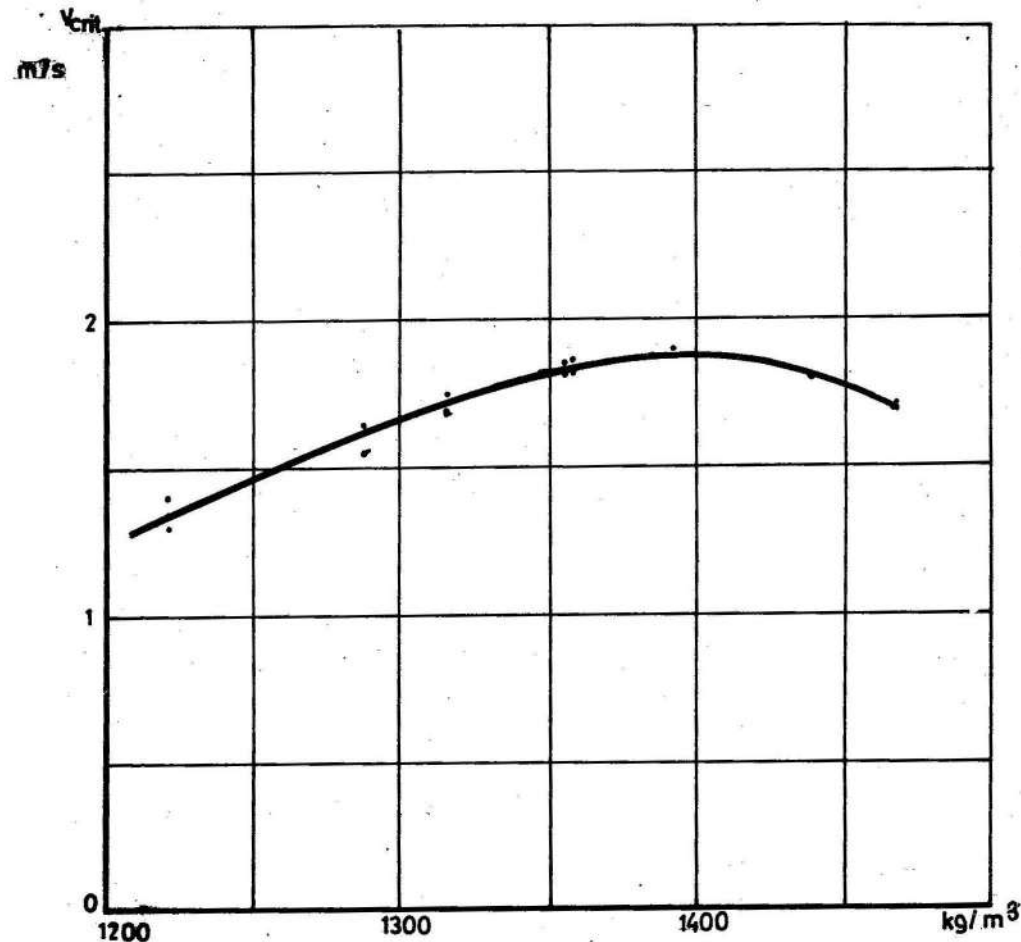


Fig. 4. Gráfico de la velocidad crítica en función de la densidad de las hidromezclas. Diametro del tubo D = 100 mm; material: sal; $d_m = 5,15$ mm; $\rho = 1,83$ kg/cm³.

Por pendiente crítica se comprende las pérdidas específicas de carga que corresponden a la velocidad crítica. Los valores de la pendiente crítica para diferentes densidades obtenidas experimentalmente se relacionan en la Tabla 5. En la Figura 5 se muestran estos resultados en forma de puntos experimentales a través de los cuales se ha trazado la curva $i_{crit} = f(\rho_m)$.

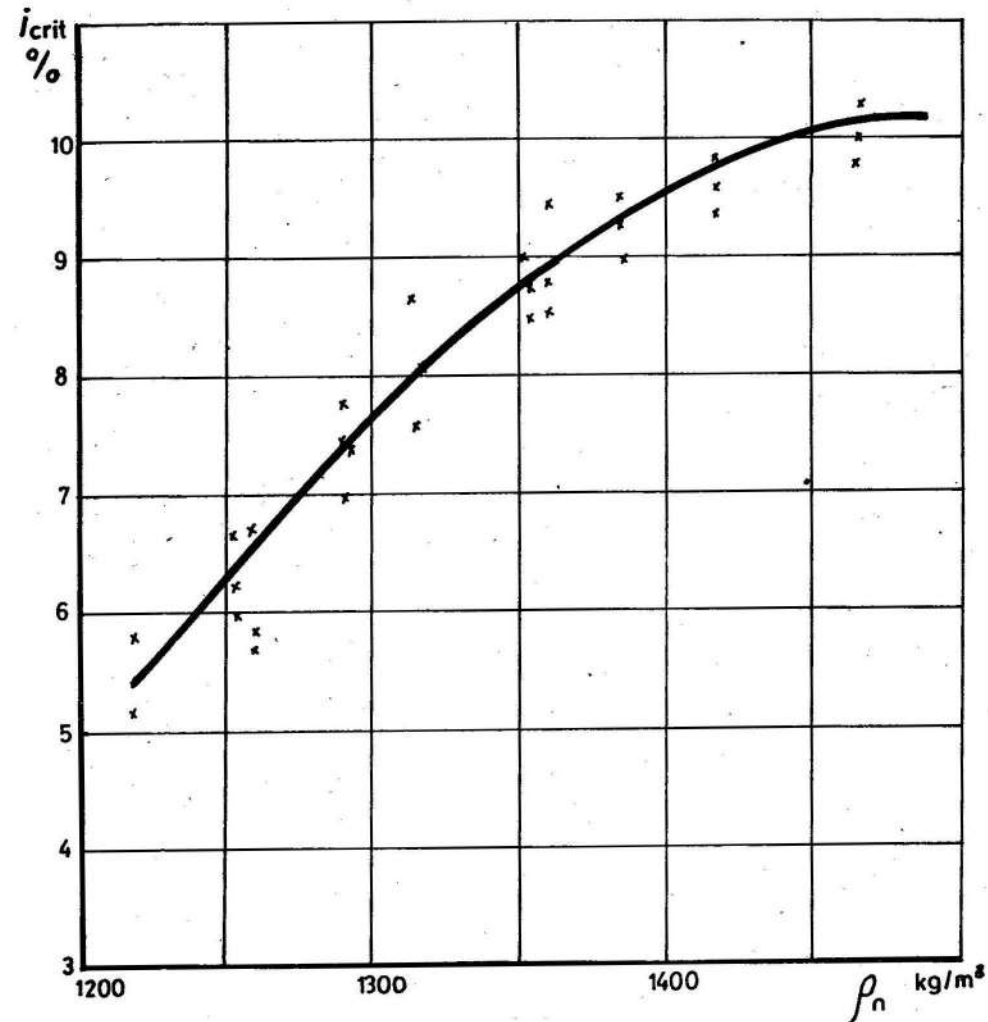


Fig 5. Gráfico de la pendiente crítica en función de la densidad de las hidromezclas en tubos de 100 mm de diámetro. Material: sal; $d_m = 5,15$ mm; $\rho = 1,83$ kg/cm³.

TABLA 5. Velocidades y pendientes críticas.

No. de orden	Densidad kg/m ³	Concentración en peso, %	Velocidad crítica, m/s	Pendientes críticas, %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	1 070	10,31	-	-
2	1 144	20,35	-	-
3	1 196	26,45	1,10	3,4
4	1 221	31,56	1,36	5,8
			1,32	5,4
			1,30	5,1
5	1 253	36,23	1,44	6,30
			1,50	6,30
			1,43	6,25
6	1 260	37,31	1,53	6,5
			1,49	5,7
			1,45	5,8
7	1 289	41,33	1,61	7,5
			1,64	7,8
			1,56	7,0
8	1 317	45,01	1,74	8,7
			1,72	8,0
			1,68	7,6
9	1 355	48,37	1,82	8,5
			1,79	8,8
			1,84	9,5
10	1 357	48,51	1,80	8,5
			1,79	8,8
			1,84	9,5
11	1 385	51,58	1,85	9,0
			1,90	9,5
			1,84	9,2
12	1 414	54,51	1,85	9,4
			1,84	9,4
			1,86	9,6
13	1 469	59,38	1,70	9,6
			1,65	10,0
			1,74	10,3

En los ensayos las partículas sólidas se transportaban suspensas a velocidades medias y deslizándose por el fondo del tubo (partículas mayores) o parcialmente suspensas (partículas menores) a la velocidad crítica. A esta velocidad se notaba a simple vista que las concentraciones en la sección inferior de la tubería eran evidentemente mayores que en la sección superior. Las hidromezclas, tal y como se suponía, se comportaron como hidromezclas gruesas o más bien gruesas dispersas. Como es conocido en estos casos el tamaño de las partículas no influye considerablemente en el valor de la velocidad crítica y por tanto se puede despreciar. Por otra parte, el tamaño medio de las partículas de sal era de 5,15 mm, que se encuentra dentro del intervalo al cual corresponden las pérdidas de carga máxima. Estas propiedades del material ensayado y las características del transporte bien conocidas [3] permiten generalizar los resultados para tubos hasta 300-350 mm, tomando en consideración que múltiples experimentos demuestran que la velocidad crítica es proporcional a la raíz cuadrada del diámetro de la tubería $V_{crit} \sim \sqrt{D}$.

En la Tabla 6 se relacionan las velocidades críticas en función del diámetro de la tubería para concentraciones de 36,4; 41,4; 46,4; 51,4 y 56,4 % en peso con respecto a toda la hidromezcla, lo que equivale a un transporte de sal de 10,5, 20, 25 y 30 % en peso, respectivamente, obtenidos generalizando los resultados experimentales. En la Figura 6 se han construido con estos datos las curvas $U_{crit} = f(D)$ para concentraciones de 36,4; 41,4; 46,4 y 51,4 %.

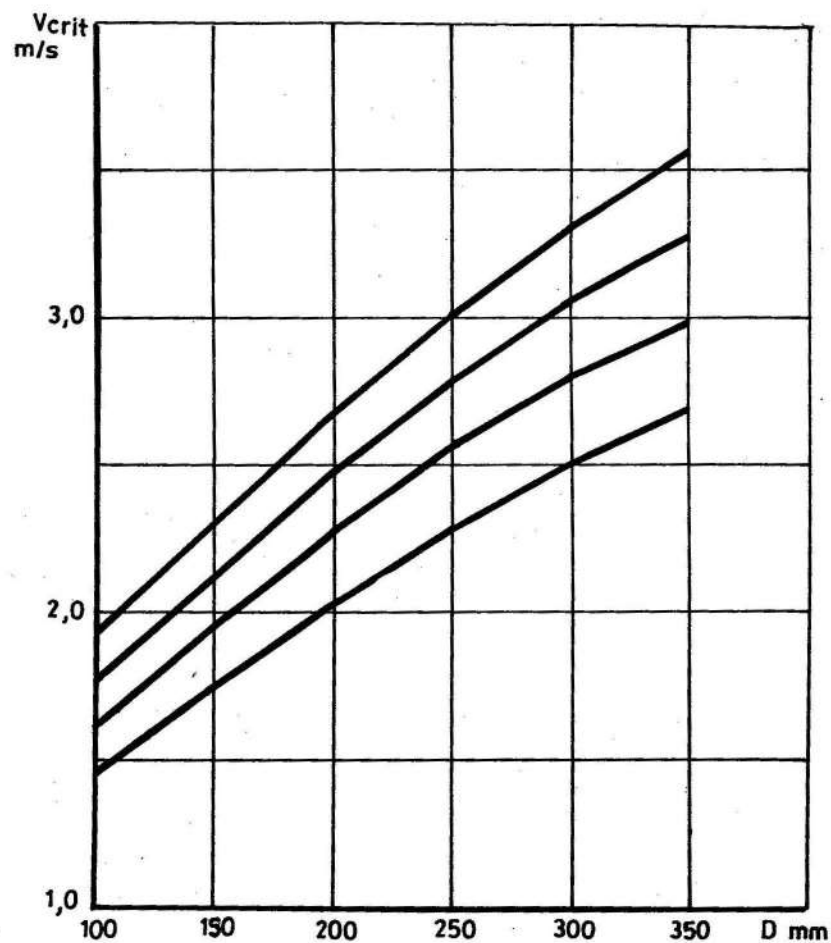


Fig. 6. Gráfico de la velocidad crítica de las hidromezclas formadas con sal común en función del diámetro del tubo.

1. $C_p = 36,4$; 2. $C_p = 41,4$; 3. $C_p = 46,4$; 4. $C_p = 51,4$ %.

TABLA 6. Velocidades críticas en función del diámetro del conductor.

Díámetro del conductor, mm	Concentración, %	Sólido, %	Velocidad crítica, m/s
100	26,3	10	1,44
	41,4	15	1,60
	46,4	20	1,76
	51,4	25	1,96
	56,4	30	1,84
150	36,4	10	1,76
	41,4	15	1,95
	46,4	20	2,15
	51,4	25	2,32
	56,4	30	2,24
200	36,4	10	2,03
	41,4	15	2,26
	46,4	20	2,48
	51,4	25	2,68
	56,4	30	2,59
250	36,4	10	2,28
	41,4	15	2,53
	46,4	20	2,78
	51,4	25	3,00
	56,4	30	2,91
300	36,4	10	2,49
	41,4	15	2,77
	46,4	20	3,04
	51,4	25	3,29
	56,4	30	3,18
350	36,4	10	2,70
	41,4	15	2,99
	46,4	20	3,30
	51,4	25	3,55
	56,4	30	3,44

Para la determinación de las pérdidas de carga en el movimiento de hidromezclas han sido propuestas múltiples formas de cálculo por diferentes autores. Estas experiencias son aplicables a las pendientes críticas. En forma general las pérdidas en el desplazamiento de las hidromezclas se puede expresar de la siguiente manera:

$$i = i_0 \frac{\rho_m}{\rho_0} + \Delta i$$

donde:

i_0 = pérdidas específicas de carga para el agua

ρ_m = densidad de la hidromezcla

ρ_0 = densidad del agua

Δi = pérdidas de carga complementaria relacionadas con el transporte de las partículas sólidas

$$i_0 = \lambda \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g}$$

donde:

λ = coeficiente de pérdidas longitudinales para el agua

l = longitud de la tubería; para las pérdidas específicas $l = 1m$

D = diámetro de la tubería

v = velocidad media del flujo

g = aceleración gravitacional

Para generalizar las pendientes críticas se tomó en consideración que las pérdidas complementarias son proporcionales a la raíz cuadrada del diámetro de la tubería e inversamente proporcionales a la velocidad media del flujo (fórmulas de Durand, francés y Traynis, soviético) de lo

que se deduce que las pérdidas complementarias para las pendientes críticas no dependen del diámetro de la tubería; en efecto:

$$\Delta i = \frac{K \sqrt{D}}{v}; \quad v = v_{crit} \sim \sqrt{D}$$

de donde:

$$\Delta i = \frac{K \sqrt{D}}{C' \sqrt{D}} = C$$

K , C' y C = constantes para una misma hidromezcla

En la Tabla 7 se relacionan los valores de las pendientes críticas para diámetros de hasta 350 mm, límites fiables de la generalización de acuerdo con las experiencias existentes; para hidromezclas de 36,4; 41,4; 46,4; 51,4 y 56,4 % en peso o sea 10, 15, 20, 25 y 30 % en peso neto de sal suspensa, obtenidas mediante cálculo. En la Figura 7 se han construido con estos datos las curvas $i_{crit} = f(D)$ para las mencionadas concentraciones.

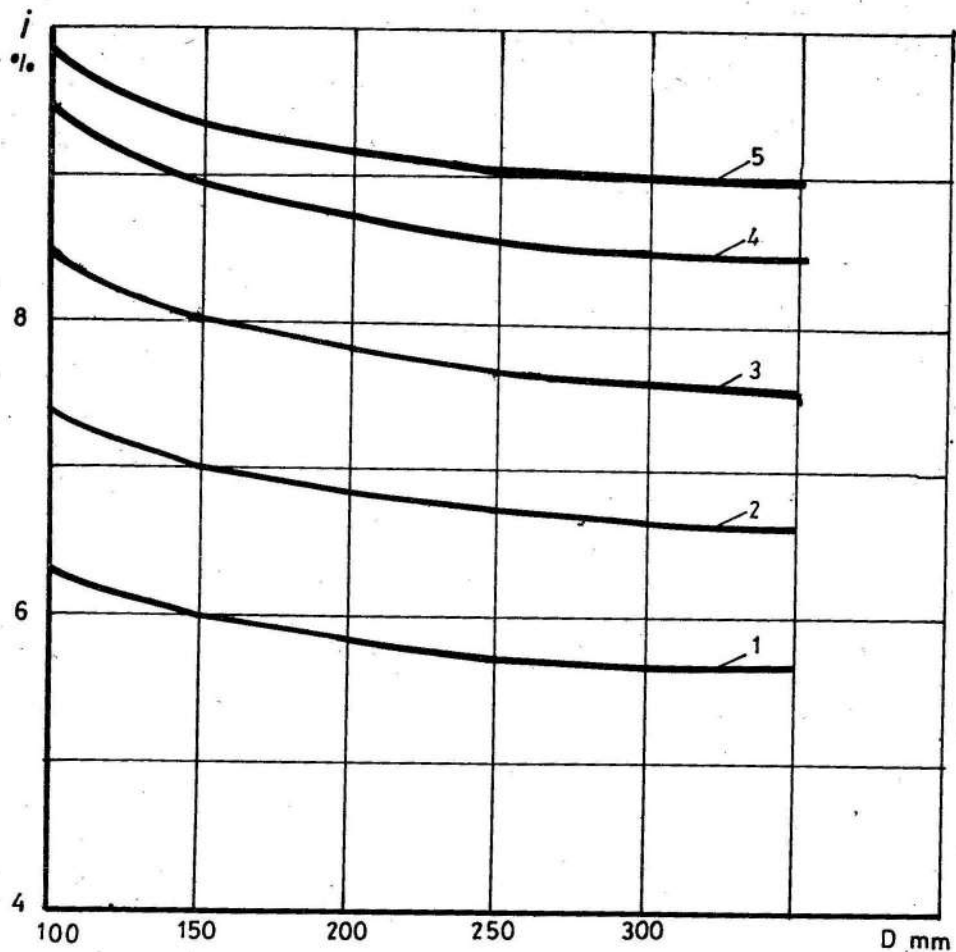


Fig. 7. Gráfico de la pendiente crítica en función del diámetro del conducto.

1. $\rho = 1\,250\text{ kg/m}^3$ $C_p = 36,4\%$
2. $\rho = 1\,295\text{ kg/m}^3$ $C_p = 41,4\%$
3. $\rho = 1\,340\text{ kg/m}^3$ $C_p = 46,4\%$
4. $\rho = 1\,385\text{ kg/m}^3$ $C_p = 51,4\%$
5. $\rho = 1\,430\text{ kg/m}^3$ $C_p = 56,4\%$

TABLA 7. Pendientes críticas en función del diámetro del conductor.

Concentración en peso %	Densidad, kg/m^3	Velocidad, Crit. m/s	λ	$i_0 \frac{\rho_m}{\rho_0}$	Δi	Pendientes críticas, %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
D = 100 mm						
36,4	1 250	1,44	0,0165	2,18	4,12	6,30
41,4	1 295	1,60	0,0162	2,73	4,67	7,40
46,4	1 340	1,76	0,0168	3,35	5,15	8,50
51,4	1 385	1,90	0,0156	3,97	5,53	9,50
56,4	1 430	1,84	0,0157	3,83	6,83	9,90
D = 150 mm						
36,4	1 250	1,76	0,0144	1,89	-	6,01
41,4	1 295	1,95	0,0139	2,23	-	7,00
46,4	1 340	2,15	0,0136	2,88	-	8,03
51,4	1 385	2,32	0,0133	3,39	-	8,92
56,4	1 430	2,24	0,0134	3,28	-	9,35
D = 200 mm						
36,4	1 250	2,03	0,0132	1,73	-	5,85
41,4	1 295	2,06	0,0131	2,20	-	6,87
46,4	1 340	2,48	0,0130	2,73	-	7,88
51,4	1 385	2,68	0,0125	3,27	-	8,80
56,4	1 430	2,59	0,0129	3,15	-	9,22
D = 250 mm						
36,4	1 250	2,28	0,0128	1,69	-	5,81
41,4	1 295	2,53	0,0125	2,10	-	6,77
46,4	1 340	2,78	0,0124	2,67	-	7,82
51,4	1 385	3,00	0,0122	3,10	-	8,63
56,4	1 430	2,91	0,0123	3,03	-	9,10
D = 300 mm						
36,4	1 250	2,45	0,0123	1,62	-	5,74
41,4	1 295	2,77	0,0120	2,62	-	6,69
46,4	1 340	3,04	0,0119	2,50	-	7,65
51,4	1 385	3,29	0,0117	2,98	-	8,51
56,4	1 430	3,18	0,0118	3,00	-	9,07
36,4	1 250	2,70	0,0119	1,58	-	5,70
41,4	1 295	2,99	0,0118	1,98	-	6,65
46,4	1 340	3,30	0,0117	2,49	-	7,64
51,4	1 385	3,55	0,0116	2,95	-	8,48
56,4	1 430	3,44	0,0117	2,90	-	8,97

CONCLUSIONES

1. El desarrollo de la industria salinera sobre la base de la mecanización y automatización completa de los procesos productivos que permite aumentar la producción, elevar la productividad, disminuir los costos y mejorar las condiciones de trabajo es un problema actual en la presente etapa de la construcción socialista de nuestra patria. El transporte hidráulico es uno de los elementos perspectivas y progresivos en la solución de esta tarea.
2. El análisis de los materiales acumulados en la teoría y la práctica del transporte hidráulico mostró la necesidad de realizar investigaciones experimentales con el objeto de obtener los datos necesarios para fundamentar proyectos y evaluar las instalaciones de transporte de sales suspendas en salmueras saturadas.
3. En el presente artículo se exponen algunos resultados de las investigaciones realizadas, en particular se determinaron experimentalmente las velocidades y pendientes críticas en función de la densidad de hidromezclas formadas con sal de la salina "Frank País" y salmueras saturadas que se desplazan en tubos de 100 mm de diámetro. Las concentraciones alcanzaron hasta el 33 % en peso, con partículas clase - 12 + 0 mm y con un peso específico de 1 830 kg/m³. Al mismo tiempo se obtuvieron características físicas del sólido y sus hidromezclas indispensables para el cálculo de una instalación de transporte hidráulico.
4. La generalización de los datos obtenidos sobre la base de las experiencias existentes en el cálculo, proyección y explotación de las instalaciones de transporte hidráulico afines y de los resultados de investigaciones anteriores permitió establecer las velocidades y

pendientes críticas y las concentraciones de las hidromezclas indispensables para fundamentar y evaluar una instalación de transporte hidráulico de sal en tubos hasta de 350 mm de diámetro.

5. Los resultados de las investigaciones, parte de los cuales se expresan en el presente trabajo, aportan los datos necesarios para la realización y evaluación de un proyecto de instalación y muestran las posibilidades y ventajas reales de la utilización de este tipo de transporte en la industria salinera nacional.