

CAPITULO V

5. - MEZCLAS

La composición y proporcionamiento de las mezclas inyectables varían de acuerdo con :

- \* La finalidad que se persiga con el tratamiento.
- \* La ocurrencia de los factores geotécnicos.
- \* Las presiones que se aplicarán en las perforaciones.

Antes de especificar las mezclas que deberán emplearse para un tratamiento en particular, será necesario realizar pruebas de laboratorio con las posibles mezclas a utilizar, teniendo presente que éstas sólo podrán servir como punto de partida para lograr una buena realización de los trabajos en campo. Esto debido a que no es suficiente saber preparar una mezcla para obtener un resultado satisfactorio, se requiere también saber elegir ésta en función del terreno, del resultado que se pretende alcanzar y de la economía de los trabajos.

5.1 Propiedades de las Mezclas

Para utilizar una amplia gama de mezclas, variando los proporcionamientos de algunos elementos básicos, tales como agua, cemento, arena, bentonita y silicato, utilizados aisladamente o combinados, es necesario conocer sus propiedades y las condiciones del suelo o roca que requiera el tratamiento.

Para conocer dichas propiedades y seleccionar la mezcla adecuada para cada tratamiento en particular, es necesario contar con equipo de laboratorio tanto en el lugar en que se elabora el proyecto como en campo.

Este equipo estará constituido básicamente por :  
balanza para densidades; conos para fluidez; filtro-prensa; mezcladoras; probetas; moldes cúbicos; prensa; consistómetro; balanza para pesar; utensilios menores como charolas, espátulas, cápsulas, etc.

#### 5.1.1 Viscosidad.

Para realizar esta medida pueden utilizarse dos clases de viscosímetros: el de circulación y el de cilindros coaxiales.

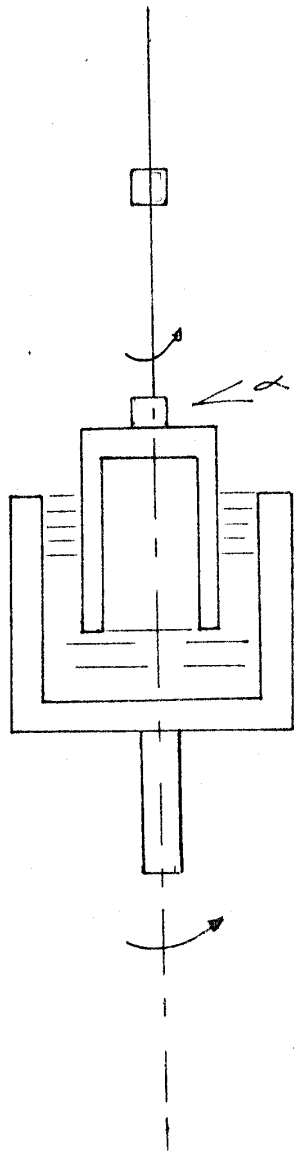
El viscosímetro de cilindros coaxiales permite trazar por puntos la curva que relaciona la desviación del cilindro interior en función del número de vueltas del cilindro exterior Fig. 5.1.1-1 . De estas curvas pueden obtenerse tanto la viscosidad en centipoises como la resistencia en el punto de fluencia.

Los viscosímetros de circulación, más utilizados en la práctica, para diseño de las mezclas, son simples conos calibrados.

En estos se mide el tiempo de circulación de un volumen de mezcla dado. Los resultados dependen de la viscosidad, rigidez y densidad de las mezclas.

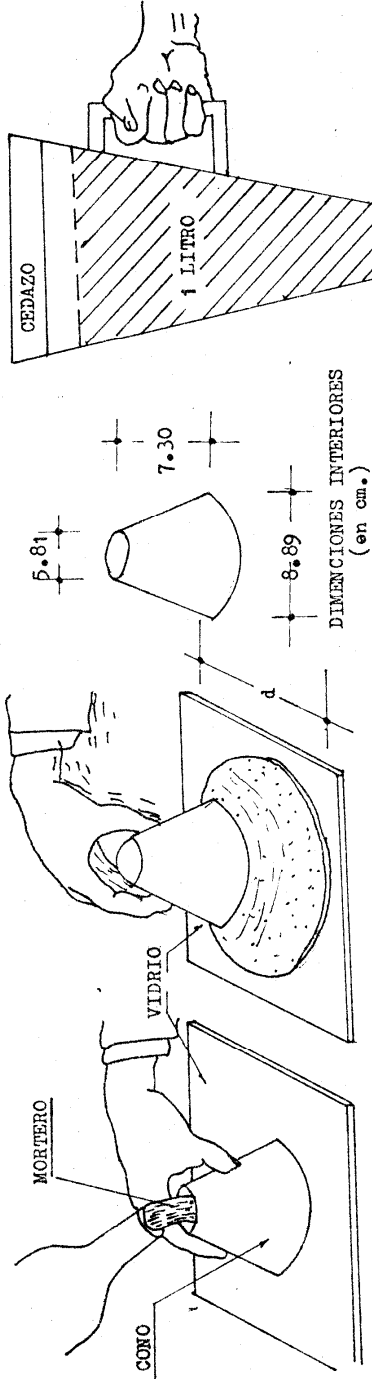
Según la consistencia y los materiales constitutivos de las mezclas, se podrán utilizar cualquiera de los siguientes conos: Marsh, Mecasol o Prepakt.

Para las mezclas elaboradas a base de agua-cemento bentonita, el cono Marsh es el dispositivo más utilizado. Las dimensiones de este cono se presentan en la Fig. 5.1.1-2 y el procedimiento



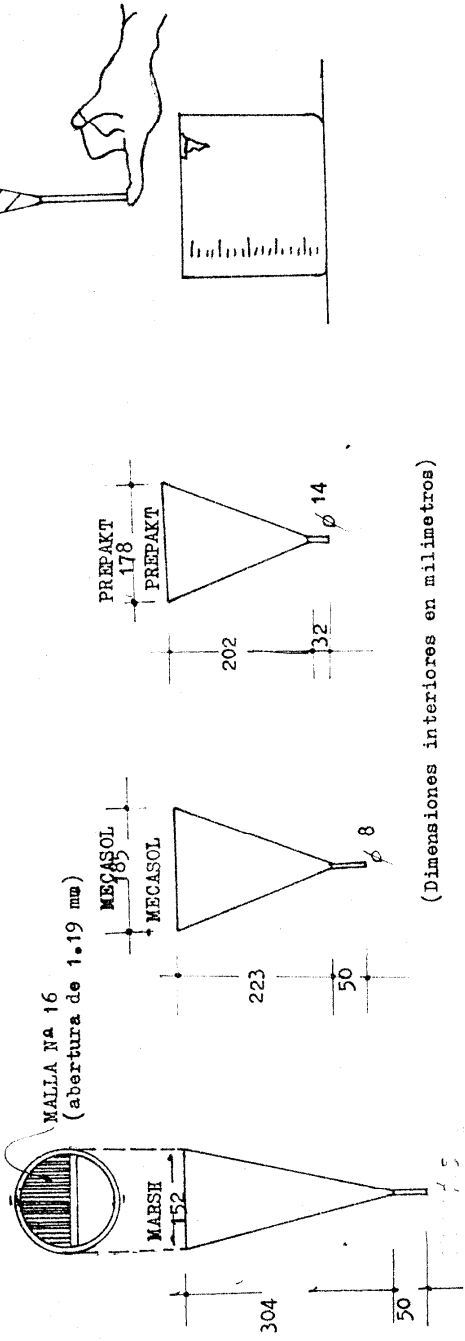
VISCOSIMETRO DE CILINDROS  
COAXIALES

FIG.- 5.1.1-1



LLENADO DEL CONO  
 CONO PARA DETERMINAR EL ES-  
 TADO SATURADO Y SUPERFICIAL-  
 MENTE SECO EN LA ARENA

AL LAVANTAR VERTICALMENTE EL  
 CONO, SE FORMA EL DIAMETRO (d)  
 d máx. = 36 cm.



TIEMPO MINIMO DE  
 FLUJO : 45 Seg.

TIEMPO MINIMO DE  
 FLUJO : t = 16 Seg.

TIEMPO MINIMO DE  
 FLUJO : t = 4.5 Seg.

FIG.- 5.1.1-2

para obtener la viscosidad de la mezcla, expresado en segundos, es el siguiente:

Se vacía un volúmen de 1,500 ml. de mezcla hasta la altura de la malla que retiene impurezas y se registra el tiempo para que pasen 1000 ml. a través del orificio de salida.

Esta medida aproximada al segundo representa la viscosidad Marsh. La viscosidad del agua medida en este dispositivo es de aproximadamente 26 segundos.

Es necesario, para la mayoría de los casos, que las mezclas que se utilicen en los tratamientos de cimentación, tengan una fluidez Marsh que no exceda de 40 segundos.

El procedimiento de prueba en los conos Mecasol y Prepakt, son similares a los de Marsh, sólo que el volúmen inicial es de 1000 ml.; sus dimensiones se presentan en la Fig. 5.1.1-2 .

#### 5.1.2 - Sedimentación.

Se designa como sedimentación a la separación del agua, que se produce en la superficie de una suspensión, después de la precipitación de sus partículas sólidas.

Para la determinación de esta propiedad, se llena con mezcla una probeta graduada de un litro y se anota la altura del agua separada en un tiempo determinado, ya que la separación del agua de la mezcla es muy clara; de esta forma se obtiene el tiempo de estabilización, el porcentaje de agua libre y el porcentaje de sólidos sedimentados.

La sedimentación de la mezcla antes de su fraguado provoca una disminución del contenido de agua en la fase sólida y por consiguiente un aumento en su resistencia.

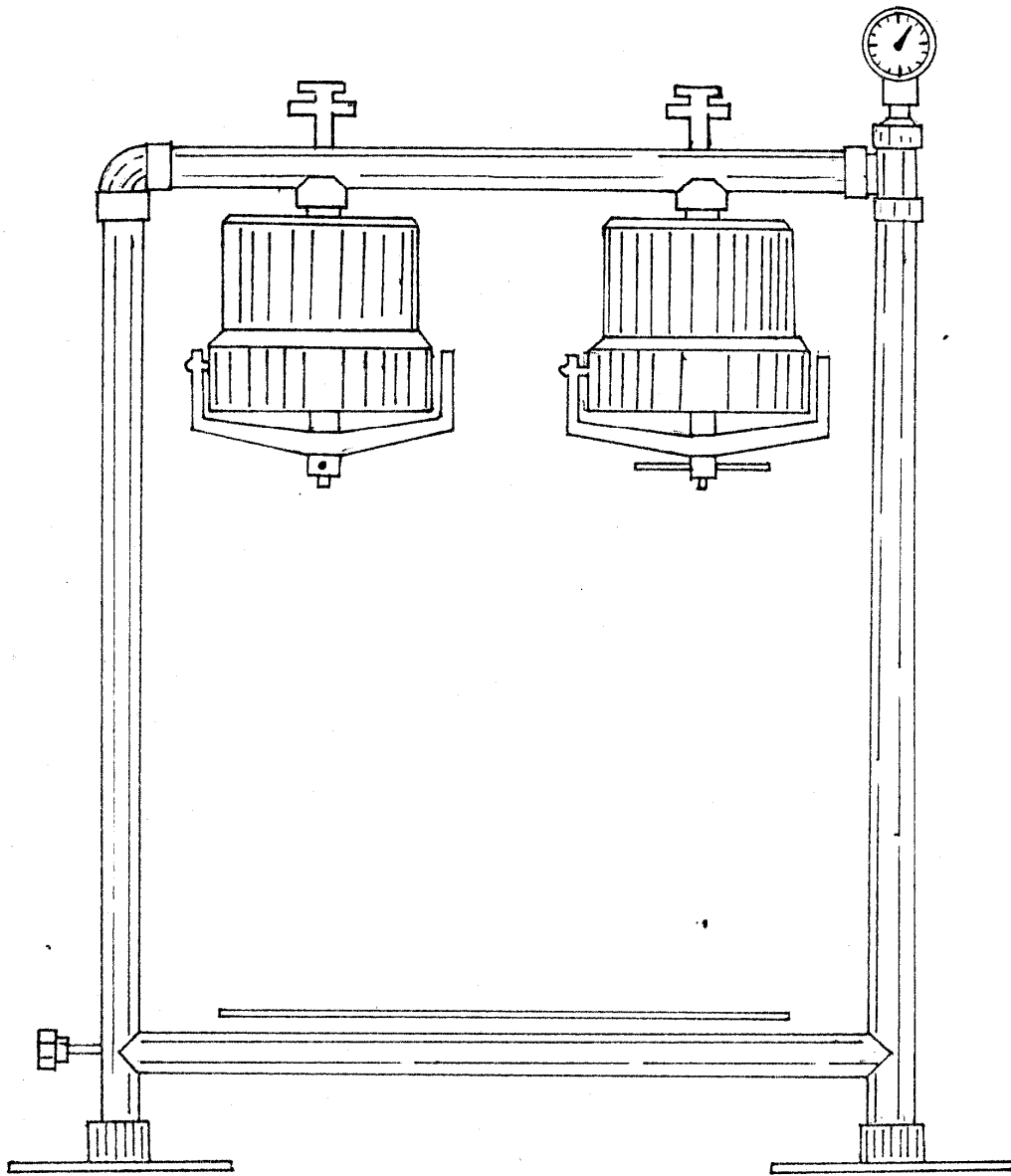
Es conveniente, con objeto de obtener productos estables, que los sólidos finales de las mezclas inyectables sea igual o mayor al 90%.

### 5.1.3 Exprimido.

Es la separación del agua de una mezcla que se filtra a través de un medio poroso cuando está sometida a una presión de inyectado. Este fenómeno se puede modelar en laboratorio por medio del filtro-prensa, Fig. 5.1.3.-1, en el que se coloca una mezcla de volumen conocido en un cilindro provisto de un filtro y se aplica una presión constante, que puede ser hasta de 9 Kg/cm<sup>2</sup>.

De las mezclas que tienen alta resistencia al exprimido se puede comentar que :

- 1) Conservan más o menos la misma homogeneidad - - durante casi todo el desarrollo del inyectado - - y como consecuencia la estabilidad se mantiene durante un tiempo considerable.
- 2) La sedimentación de los granos debe ser reducida, con lo que se evitará la ocurrencia de obturaciones o taponamientos a la entrada de grietas de la roca o en los vacíos que existen en los materiales granulares.



F I L T R O   P R E N S A

FIG.- 5.1.3-1

Para que lo anterior se cumpla las mezclas deberán tener un tiempo de exprimido mínimo de 60 seg. a 6.0 Kg/cm<sup>2</sup>.

#### 5.1.4 - Densidad.

La densidad de una mezcla se mide pesando un volumen conocido de ella y leyendo directamente en la escala el valor de la densidad. El aparato más simple y preciso es la balanza de lodos, - Fig. 5.1.4-1.

Cabe mencionar que las mezclas menos densas proporcionan productos más porosos y por lo mismo menos resistentes. Por otra parte, el conocimiento de la densidad permite tener una idea sobre el proporcionamiento de las mezclas y se puede considerar como una característica básica para el control de calidad de las mezclas.

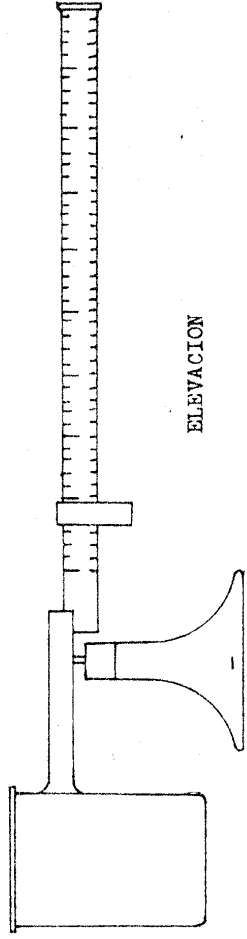
En ensayos de laboratorio se ha observado que mezclas con densidades superiores a 1300 Kg/m<sup>3</sup>, producen resultados satisfactorios.

#### 5.1.5 - Resistencia a la comprensión.

Una de las principales condicionantes para el diseño de mezclas, es la resistencia de éstas a las cargas producidas por la estructura y al gradiente hidráulico que se genera en la cimentación por el efecto del embalse, que puede provocar la erosión o tubificación de los productos inyectados y, con ello, el paso franco del agua a través de la barrera impermeable.

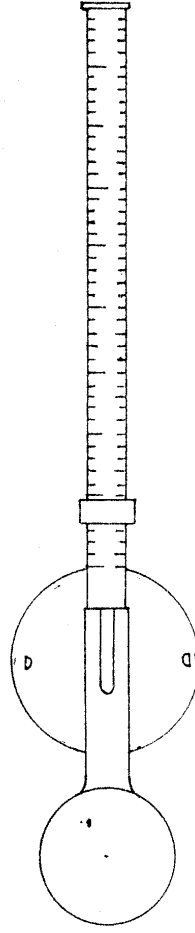


P E S A



ELEVACION

P E S A



PLANTA

B A L A N Z A D E L O D O S

FIG.- 5.1.4-1

Para evitar lo anterior, es necesario que la resistencia mínima de las mezclas a los 28 días - sea de 30 Kg/cm<sup>2</sup>.

En el laboratorio la determinación de la resistencia a la compresión simple se efectúa aplicando cargas axiales en cubos de 5.0 cm. de lado, previamente sumergidos en agua, ensayados a distintas edades.

Sin embargo, es probable que las resistencias reales de las mezclas en el campo sean mayores que las obtenidas en el laboratorio, debido a que por el efecto de la presión aplicada se reduzca su relación agua-cemento.

## 5.2 - Tipos de Mezclas.

Las mezclas que se utilizan para los diferentes trabajos en los que se requiera el empleo de inyecciones, se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Inestables
- Estables
- Líquidas

### 5.2.1 - Mezclas inestables ( agua-cemento ) .

Una mezcla inestable es aquella que por su propia naturaleza no mantiene a sus partículas sólidas en suspensión, más que por agitación; si ésta cesa, las partículas se sedimentan.

Como se mencionó en el inciso 5.1.2 una mezcla inestable es aquella en la que su porcentaje final de sólidos sedimentados es menor a 90%.

---

Las mezclas agua-cemento son el prototipo de las mezclas inestables, siempre y cuando el cemento que la constituye esté suficientemente diluido.

El límite de la dilución es difícil de precisar porque depende de la naturaleza del cemento.

El agua libre separada del material sedimentado varía con el tipo de cemento, con el proporcionamiento de la mezcla y con la energía de batido del mezclador.

Las mezclas inestables de agua-cemento se podrán utilizar para casos excepcionales, previa determinación de sus características físicas en laboratorio; algunos de estos casos podrían ser:

- 1) Tratamiento de macizo rocoso con fisuras de abertura muy pequeña (menor a 0.5 mm).
- 2) Sistemas de anclajes en macizos rocosos, como relleno de las perforaciones en donde quedarán alojadas las anclas.
- 3) También se podrían utilizar adicionando arena para fracturas muy abiertas.

En la práctica, se ha tratado de evitar este tipo de mezclas en los tratamientos de cimentación, ya que además de tener una alta sedimentación y por consecuencia una baja eficiencia en el relleno de oquedades, el costo del volumen inyectado es grande por su gran recorrido.

En la tabla No. 5.2.1-1 se presentan algunas mezclas con sus características físicas principales.

### 5.2.2 - Mezclas Estables.

Las mezclas estables son las que no producen sedimentación considerable durante el proceso de inyectado y tienen una contextura tal que no se forman taponamientos al llegar a las pequeñas fisuras, por su alta penetrabilidad. En la práctica se establece que el porcentaje de agua libre sea menor al 10%.

#### 1) Agua-cemento-arcilla.

Una mezcla de agua-arcilla, aún siendo un producto estable, si no presenta características tixotropicas (propiedad de las mezclas de agua-arcilla que depende de sus características físico-químicas y que tienen particularidad de que son líquidas cuando se les agita y en reposo adquieren una cierta rigidez), corre el riesgo de ser deslavada en el transcurso de la inyección.

Añadiendo cemento a la mezcla se logra un aumento en su resistencia mecánica y en la de deslave, pero disminuirá su propiedad tixotrópicas ya que a los granos muy pequeños de la arcilla se le aumentarían granos más grandes de cemento.

Para tener una fluidez conveniente, las mezclas de agua-cemento-arcilla están en general debidamente dosificadas en cemento y fuertemente en arcilla. Para una arcilla seca la cantidad será menor a mayor límite líquido (50 a 150 por ciento), ya que será mayor la eficiencia de la dispersión e hidra

tación de las arcillas antes de añadir el cemento.

En la práctica se ha podido comprobar que este tipo de mezcla es difícil de elaborar y además costoso, pues requiere de material que cumpla con las características prefijadas en laboratorio. Además, si la arcilla se encuentra húmeda se deberá secar y apisonar hasta que no presente grumos que puedan ocasionar un taponamiento tanto en el equipo como en las fisuras por inyectar.

Si el volúmen por utilizar es pequeño, su costo de mano de obra y transporte lo hacen incosteable.

Solo se deberá utilizar este tipo de mezclas cuando las características del proyecto lo ameriten y se prevean grandes consumos de ellas.

En la tabla No. 5.2.1-1 se presentan algunas mezclas de este tipo y sus características principales.

## 2) Agua-Cemento-Bentonita.

De acuerdo con los resultados obtenidos en laboratorio, con dosificaciones de bentonita relativamente bajas se pueden estabilizar las mezclas de agua-cemento.

Dichas dosificaciones dependen de la calidad de la bentonita y de la relación agua-cemento; es decir a un mayor límite líquido será menor la cantidad de bentonita para

para lograr la estabilidad y mientras mayor sea la relación agua-cemento, será necesario aumentar la cantidad de bentonita.

Al adicionar bentonita a una mezcla de agua-cemento se logrará un aumento en la fluidez, tiempo de exprimido y resistencia al deslave; asimismo, disminuirá su sedimentación y resistencia a la comprensión simple.

Los rangos en la dosificación de la bentonita varían del 2 al 8% para obtener mezclas estables y geológicamente adecuadas.

Es frecuente que para la utilización de estas mezclas en macizos rocosos que presenten un porcentaje grande de vacíos, cavernas o grandes fracturas, se adicione cierta cantidad de arena para aumentar el contenido de sólidos.

La arena por utilizar deberá ser limpia, redondeada, dura y con un módulo de finura entre 1.35 y 2.25.

Este tipo de mezclas es el más usado actualmente para los trabajos de inyectado. En estas mezclas es común el uso de una bentonita sólida como límite líquido entre 220 y 240%.

En la tabla No. 5.2.2-2 se presentan algunas de estas mezclas y sus características principales.

3) Agua-Cemento-Bentonita-Silicato.

Al adicionar silicato de sodio a las mezclas de cemento se incrementa el grado de impermea-



proporción base en peso	REL A/C	FLUIDEZ MARSH (seg.)	DENSIDAD APARENTE DE LODOS (kg/m <sup>3</sup> )	SEDIMENTACION		PRUEBA DE EXPRIMIDO			RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE (kg/cm <sup>2</sup> )						
				tiempo de estabilización (horas)	agua libre %	P. 3.0kg/cm <sup>2</sup> T. seg.	P. 6.0kg/cm <sup>2</sup> T. seg.	P. 9.0kg/cm <sup>2</sup> T. seg.	7 días	14 días	28 días				
1.0	4.0	31	1161	2:30	54	46	118	218	74	222	63	224	2	4	6
1.0	4.0	30	1169	1:30	50	50	86	213	61	216	53	226	3	5	8
1.0	3.0	31	1217	2:30	64	36	110	197	87	208	59	208	5	7	9
1.0	3.0	31	1214	2:30	62	38	88	205	59	206	51	224	6	7	9
1.0	3.0	31	1214	2:30	53	47	69	193	47	193	38	200	7	10	14
1.0	2.0	34	1294	3:30	80	20	120	166	72	178	59	188	11	13	15
1.0	2.0	34	1307	2:30	73	27	84	182	57	189	47	193	10	12	16
1.0	2.0	33	1298	1:30	65	35	68	179	46	182	34	182	15	20	30
1.0	1.0	56	1528	2:30	93	7	70	116	48	128	36	131	36	44	53
1.0	1.0	40	1531	2:00	82	18	57	126	42	129	32	141	60	70	86
1.0	0.8	57	1621	2:00	93	7	65	119	44	119	31	119	85	103	110
1.0	0.7	40	1674	1:30	94	6	48	106	32	113	25	120	90	110	122



bilidad de las mismas, obteniendo como características adicionales que al permanecer en reposo mejora la estabilidad y la rigidez de la mezcla aumenta con el tiempo, es decir, acelera su fraguado; en contra posición tiene el inconveniente de que el producto final no es una mezcla homogénea, pues el silicato tiende a formar grumos que para suprimirlos es necesario un mayor tiempo de agitación lo que eleva el costo de operación.

La adición de bentonita retarda el fraguado y disminuye la resistencia mecánica pero proporciona una mezcla homogénea y tixotrópica, en tanto que el silicato, por su parte, acelera el fraguado, aunque produce grumos, por lo que es conveniente combinar estos productos para tener una mezcla homogénea, con una rigidez inicial alta, con un comportamiento claramente tixotrópico y con resistencias mecánicas relativamente altas.

Esta mezcla es aconsejable utilizarla cuando exista circulación de agua en el subsuelo y sea necesario un fraguado rápido para evitar el deslave de la misma.

El tipo de silicato de sodio que actualmente se emplea es el tipo "N" con una concentración de 38 a 40° Baumé.

En la tabla No. 5.2.2-3 se presentan algunas de estas mezclas y sus características principales.

DEFINICION DE BENTONITA :

" La Bentonita es una roca blanca parecida a la arcilla, compuesta en gran parte de sílica coloidal y mentmorillonita, y caracterizada por su capacidad para absorber grandes cantidades de agua, con lo que adquiere propiedades especiales de variada y muy útil aplicación. En algunos lugares los yacimientos proceden de la alteración de tobas volcánicas".

" La Bentonita es una arcilla esmética dotada de gran poder descolorante y abosorbente (puede absorber agua hasta 12 veces su propio volúmen)".

El estudio de algunas bentonitas (sódicas) ha indicado unas características físicas semejantes a las siguientes:

Límite Líquido	390 %
Indice de Plasticidad	80 %
Límite Plástico	310 %
Viscosidad	Mayor de 8 centipoises
Finura (Maya #200)	Mayor de 90%
Expresión (Filtrado)	Menor de 15 cc. en 30 min.
Finura Húmeda	98 % Mínima
Peso vol. suelto	0.780 ton/m <sup>3</sup>
Peso vol. compactado (cajoniza).	1,000 ton/m <sup>3</sup>
Contracción volumétrica	12 a 16 %
Peso vol. Opt. Próctor	1 250 Kg/m <sup>3</sup>
Humedad Opt. Próctor	40 %
Expansión Libre	800 a 1 200 %
Densidad	1.01 a 1.10

proporcion base en peso				REL A/C	FLUIDEZ MARSH ( seg. )	DENSIDAD APARENTE BALANZA DE LODOS (kg/cm3)	SEDI MENTACION		PRUEBA DE EXPRIMIDO				RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE					
Cemento	Bentonita	** Arena	*** Silicato				Agua Libre %	sólidos	tiempo de estabiliza cion (hrs.)	P. 3. $\text{O.kg/cm}^2$	P. 6. $\text{O.kg/cm}^2$	P. 9. $\text{O.kg/cm}^2$	T. seg/cm <sup>3</sup>	T. seg/cm <sup>3</sup>	T. seg/cm <sup>3</sup>	T. seg/cm <sup>3</sup>	14 dias	28 dias
1.0	0.03	1.0		2.5	32	1406	62	2:00	38	79	188	51	190	41	192	9	14	21
1.0	0.02	1.5		2.0	32	1418	70	1:15	30	65	164	41	170	35	170	12	18	22
1.0	0.02	0.5		1.5	35	1458	81	2:00	19	50	144	35	152	26	155	23	31	42
1.0	0.02	2.0		1.5	39	1746	88	1:15	12	43	102	26	108	21	114	23	30	40
1.0	0.02	1.0		1.0	54	1770	92	2:00	8	67	92	46	101	36	108	40	59	73
ARENA CON MÓDULO DE FINURA COMPRENDIDO 1.35 Y 2.25																		
1.0	0.03		0.02	3.0	32	1219	67	2:00	33	164	197	115	200	91	200	4	5	7
1.0	0.02		0.02	2.0	33	1304	75	1:30	25	121	174	89	183	72	187	9	11	16
1.0	0.01		0.01	1.0	41	1530	92	2:30	8	77	127	47	131	10	141	45	57	80
1.0	0.01		0.01	0.8	55	1625	96	2:00	4	78	104	53	114	40	119	60	78	107
				***	SILICATO DE SODIO SOLUBLE CONCENTRACION 38 A 40° BAUME													

### 5.2.3 MEZCLAS LIQUIDAS

Las mezclas líquidas son aquellas que se fabrican a base de productos químicos que tienen las características de cristalizar dentro de los huecos que se encuentran en una masa sólida.

Se utilizan para el inyectado en rocas con fisuras muy pequeñas (menores a 0.5 mm) y en aluviones con espacios intergranulares muy reducidos.

Económicamente no se pueden utilizar más que en tratamientos muy especiales y de volúmen limitado. Además, es necesario una gran experiencia para realizar el inyectado adecuado y económico.

Los productos más utilizados actualmente son :

- Geles a base de silicato de sodio.
- Resinas orgánicas.

1) Geles a base de silicato de sodio y reactivo.

Se obtienen por coagulación retardada de una mezcla única que conserva su estado líquido en el transcurso del inyectado.

Para su fabricación se utilizan reactivos minerales, mientras que para las condiciones de fraguado son necesarios reactivos orgánicos para obtener geles duros.

Debido a que su cohesión es sensiblemente baja, no se recomienda su empleo más que para tratamientos especiales de impermeabilización; tal es el caso de los aluviones constituidos por arenas finas, en los que por las características de alta fluidez y penetración de estas mezclas se obtienen resultados altamente satisfactorios.

Una dificultad en estas mezclas es el control del tiempo de fraguado o gelificación.

Para evaluar este tiempo se vierte el recipiente que contenga el gel y cuando éste deje de verter se habrá alcanzado el fraguado; otra forma es por medio de la siguiente relación empírica:

$$t = e^{-kc}$$

en donde :

- t = tiempo de fraguado del gel.
- e = base de logaritmo natural
- k = constante que depende de la calidad del silicato, dado por la relación  $SiO_2/Na_2O$  de su disolución y de su temperatura.
- c = La concentración de reactivos en el suelo.

Cuando se tenga aumento en la temperatura el tiempo de fraguado disminuye del orden de la mitad, cada vez que la temperatura se eleva unos 10°.

Es importante verificar la permeabilidad de los geles en laboratorio, ya que estos pueden ser deslavados por las aguas de filtración.

## 2) Resinas Orgánicas.

Las resinas orgánicas que se presentan en forma líquida se polimerizan al cabo de cierto tiempo para dar un sólido más o menos resistente.

Estos pueden utilizarse como mezclas de - - inyección siendo necesario que el líquido no sea demasiado viscoso para que la inyección pueda efectuarse con facilidad.

Existen varios tipos de resinas de los que el más empleado en la aplicación práctica es el AM9 o Acrilamina, que se obtiene de la hidratación del grupo nitrilo del ácido cianhídrico.

El AM9 se emplea diluyéndolo en agua en concentraciones que pueden variar del 3 al 10%. Como consecuencia de su fuerte dilución, alcanza una viscosidad de 3 a 4 centipoises, es decir, un poco más que la del agua; debido a esto puede penetrar por todos los lugares donde el agua circule, siendo su viscosidad constante hasta el momento del fraguado.

El tiempo de fraguado es perfectamente regulable desde unos minutos hasta varias horas dependiendo de la dosificación, los reactivos y la temperatura.

Aprovechando la elasticidad del producto, podría mezclarse con un polvo fino, arcilla o arena muy fina, con objeto de obtener cuerpos elásticos a la vez económicos y resistentes.

Para el empleo del producto AM9 es necesario adoptar algunas precauciones y proporcionar a los obreros guantes, gafas y trajes especiales.

Existen también mezclas a base de aglomerantes hidrocarburos, tales como el alquitrán y el betún, pero su empleo es muy limitado debido a que son muy viscosos y flexibles, tienen alto costo y su colocación en la obra es muy complicada.

Puede utilizarse una gran variedad de mezclas líquidas pero en este trabajo sólo se trata de dar una introducción muy general de los dos tipos más usados. Su aplicación en México es muy limitada debido a su alto costo y complejidad en su aplicación.