



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ACATLÁN**

**CARACTERIZACIÓN DE MORTEROS  
PARA EL RELLENO DE CAVIDADES  
EN EL NORPONIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

**PROYECTO PAPIIT IN108809**

**T E S I S P R O F E S I O N A L**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:**

**SERGIO OLGUÍN PLATA**



**ASESOR DE TESIS:  
Dr. RICARDO ENRIQUE ORTIZ HERMOSILLO**

**ESTADO DE MÉXICO FEBRERO 2012**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A Dios

Por ayudarme a cumplir mis metas y siempre estar presente conmigo, por permitirme llegar a este momento tan importante de mi vida con salud y permitirme poder compartirlo con todas las personas que quiero, especialmente con mis padres y mi hermano.

A mis padres

Victoria y Miguel

Les dedico este título como agradecimiento, mil gracias por su apoyo incondicional, paciencia y sus consejos para que cada día sea una mejor persona.

Nunca podre pagar todos sus desvelos, esfuerzos, ni las cosas que siempre han hecho por mí.

Gracias por darme la vida los amo.



A mi hermano:

Miguel, Gracias por creer en mí, por su ejemplo y todo su apoyo, deseo de todo corazón que siempre cumplas tus metas y que logres siempre tus sueños en la vida, sabes que siempre estaré ahí para apoyarte y cuentas conmigo para todo.

A mis amigos:

Les agradezco por haberme hecho pasar momentos inolvidables y estar conmigo en los momentos buenos y malos, son parte importante de mi vida y espero que siempre sea así, a todos. Muchas gracias.

A la UNAM

Te doy gracias por darme la oportunidad de ingresar y ser parte de la más grande Institución Educativa de nuestro país, de nuestra “Máxima Casa de Estudios”, de lo cual me siento muy orgulloso. Prometo siempre dejar en alto el nombre de la Universidad en cada aspecto tanto profesional como personal.



A mi Asesor

Dr. Ortiz, gracias por concederme el tiempo necesario para realizar este trabajo y mil gracias por su apoyo, consejos y opiniones que me ayudaron a realizar mi tesis.

A la FES – ACATLÁN

Por haberme recibido en tus aulas y darme los conocimientos necesarios para llegar a ser un profesional, por todos los momentos felices que pase con mis amigos en la biblioteca, en los jardines y por supuesto en los salones de clases.

Profesores y Miembros del Jurado  
Por enseñarme lo necesario para el desarrollo de mi vida y de mi carrera profesional, por todas sus clases, conocimientos, opiniones y experiencias, por darme su tiempo y consejos en la revisión de este trabajo, a todos ustedes.

Gracias.



**C A R A C T E R I Z A C I Ó N**  
**D E M O R T E R O S**  
**P A R A E L R E L L E N O**  
**D E C A V I D A D E S E N**  
**E L N O R P O N I E N T E**  
**D E L A C I U D A D D E**  
**M É X I C O**



## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	5
<b>CAPÍTULO 1. INVESTIGACIÓN DE CAVIDADES, ESTABILIDAD Y CIMENTACIÓN DE TERRENOS MINADOS.</b>	7
<b>1.1 Investigación de cavidades</b>	8
1.1.1 Reconocimiento superficial	8
1.1.2 Exploración de minas	8
<b>1.2 Estabilidad de cavidades</b>	22
1.2.1 Clasificación de galerías	22
1.2.2 Deformaciones generadas por explotación de materiales.	26
1.2.3 Migración de cavidades: la erosión y el intemperismo	29
1.2.4 Influencia de los sismos (Rosenblueth, 1975)	30
<b>1.3 Cimentación y tratamientos de terrenos minados</b>	31
1.3.1 Relleno de cavidades e inyección	32
1.3.2 Excavación y relleno compactado	34
1.3.3 Refuerzos de bóvedas y protección contra intemperismo.	36
1.3.4 Cimentaciones profundas	38
1.3.5 Desventajas y aplicación de tratamientos en zonas minadas	40
<b>CAPÍTULO 2. DEFINICIONES, COMPONENTES Y TIPOS DE MORTERO.</b>	41
<b>2.1 Clasificación de morteros de acuerdo a su composición</b>	45
<b>2.2 Clasificación de morteros de acuerdo a su módulo de finura</b>	46
<b>2.3 Clasificación de morteros de acuerdo a su resistencia a la compresión</b>	46
<b>2.4 Clasificación de morteros de acuerdo a su método de fabricación</b>	47
<b>2.5 Clasificación de morteros según el terreno a inyectar</b>	47
2.5.1 Morteros inestables	48
2.5.2 Morteros estables	49
2.5.3 Morteros líquidos a base de productos químicos.	60
2.5.4 Morteros aireados	64
2.5.5 Elección de morteros según el terreno a inyectar	66
<b>2.6 Características de los componentes del mortero</b>	67
2.6.1 Aglomerantes	67



2.6.2	Arena . . . . .	70
2.6.3	Agua . . . . .	75
2.6.4	Aditivos químicos . . . . .	75
2.6.5	Bentonita . . . . .	76
<b>CAPÍTULO 3. RESISTENCIA MECÁNICA Y ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE MORTEROS.</b>		<b>78</b>
3.1	<b>Especificaciones para caracterizar la calidad del cemento de albañilería (mortero)</b> . . . . .	79
3.2	<b>Determinación de la consistencia normal de cementos hidráulicos.</b> . . . . .	80
3.3	<b>Determinación del tiempo de fraguado inicial y final de cementos hidráulicos.</b> . . . . .	82
3.4	<b>Determinación de la sanidad de cementantes hidráulicos.</b>	82
3.5	<b>Determinación de la fluidez de morteros hechos con cementantes hidráulicos.</b> . . . . .	83
3.6	<b>Determinación del contenido de aire de morteros</b> . . . . .	87
3.7	<b>Determinación de la retención de agua en morteros</b> . . . . .	89
3.8	<b>Determinación del peso específico de cementantes hidráulicos</b> . . . . .	92
3.9	<b>Determinación de la granulometría de la arena sílice utilizada para la elaboración de morteros</b> . . . . .	94
3.10	<b>Determinación de la resistencia a compresión de morteros hechos con cementos hidráulicos</b> . . . . .	96
	3.10.1 Ejemplos de resistencias obtenidas en dos tipos diferentes de morteros . . . . .	103
3.11	<b>Especificaciones que deben de cumplir los gabinetes, cuartos húmedos y tanques de almacenamiento para el curado de especímenes de mortero</b> . . . . .	103
3.12	<b>Especificaciones que deben de cumplir las mezclas en el momento de la inyección.</b> . . . . .	105
	3.12.1 Viscosidad . . . . .	105
	3.12.2 Sangrado, decantación o sedimentación . . . . .	107
	3.12.3 Adhesión en placa . . . . .	111
<b>CAPÍTULO 4. INYECCIÓN DE MORTEROS EN CAVIDADES, INTERACCIÓN SUELO-MORTERO</b>		<b>113</b>
4.1	<b>Concepto de inyección</b> . . . . .	114
4.2	<b>Medios inyectables</b> . . . . .	114
4.3	<b>Productos empleados en la inyección</b> . . . . .	115
4.4	<b>Presión de inyección</b> . . . . .	116
	4.4.1 Método de inyección GIN. . . . .	116
4.5	<b>Equipo utilizado para fabricar mezclas de inyección</b> . . . . .	118
	4.5.1 Mezcladores . . . . .	119



4.5.2	Bombas, prensas e inyectoros	122
<b>4.6</b>	<b>Tipos de inyección</b>	<b>124</b>
4.6.1	Inyecciones de impermeabilización	124
4.6.2	Inyecciones de relleno	128
4.6.3	Inyecciones de contacto	128
<b>4.7</b>	<b>Técnicas de inyección</b>	<b>129</b>
4.7.1.	Inyección por impregnación y fractura (Soil Fracture Grouting)	129
4.7.2.	Inyección por compactación (Compaction Grouting)	129
4.7.3.	Inyección por fracturación hidráulica	130
4.7.4.	Inyección por reemplazo (Jet Grouting)	130
<b>ANEXO</b>		
<b>EMPLEO DE CENIZAS DE CÁSCARA DE ARROZ COMO ADICIONES</b>		
<b>EN MORTEROS</b>		<b>131</b>
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES</b>		<b>140</b>
<b>REFERENCIAS</b>		<b>144</b>



## INTRODUCCIÓN

Las cavidades pueden ser de origen natural, o causadas por la explotación de materiales utilizados en la construcción y están presentes sobre todo en zonas de lomas o macizos rocosos.

El trabajo de investigación comprende el norponiente de la ciudad de México abarcando a los municipios de Naucalpan de Juárez, Tlalnepantla de Baz, Atizapán, Cuautitlán Izcalli y Cuautitlán de Romero Rubio, suelos constituidos principalmente por rocas piroclásticas y volcánicas (Chávez, 2008).

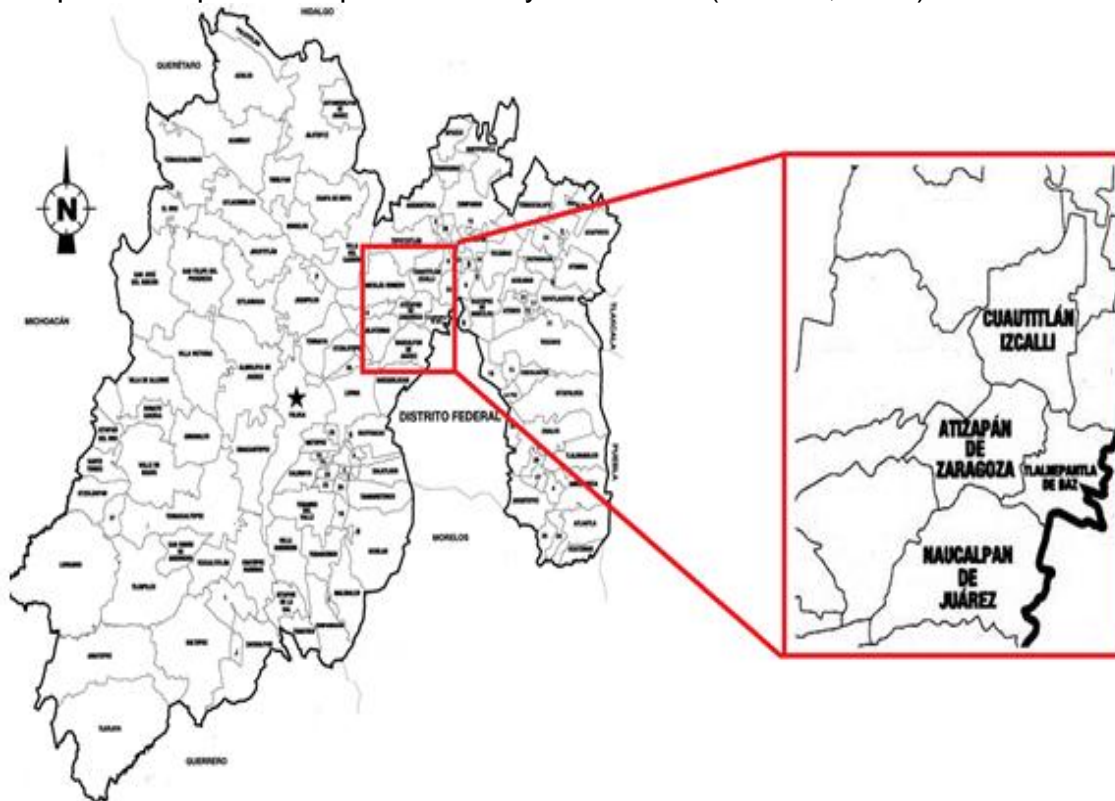


Figura I. Zonificación Geográfica del Norponiente de la ciudad de México

Las cavidades en el subsuelo es un problema actual, que puede encontrarse al inicio del proyecto, en el transcurso o peor aún, cuando se termina el mismo (generando agrietamientos o fallas en el proceso constructivo). Por esta situación, se mencionan diferentes métodos de investigación, los cuales dan la evidencia de la existencia de cavidades antes de la ejecución de cualquier proyecto, evitando con esto sobrecostos que se reflejarán en desperdicios de materiales y tiempos muertos.

Actualmente la inyección en suelos se aplica sobre todo a construcciones de gran importancia, haciendo a un lado los tratamientos para construcciones de menor relevancia. Algunos métodos introducen en el terreno basura, desechos



industriales u otros productos carentes de propiedades que devuelvan resistencia al terreno, y con la única intención de tapar un hueco, lo cual empeora el panorama produciendo con esto alteraciones al terreno y volviendo los proyectos en correctivos y no en preventivos, idea que obviamente se debe corregir.

Es por esto que en este trabajo se exponen métodos para realizar una caracterización de morteros, se mencionan alternativas para investigar sus materiales constituyentes, sus propiedades individuales así como sus propiedades en conjunto y cuando están disueltos en la mezcla. Así mismo, se definen sus propiedades mecánicas, físicas y reológicas; se proporciona de esta manera un criterio sobre cuáles son los tipos de morteros que se pueden utilizar dependiendo del terreno.

En el trabajo de investigación se describen los diferentes métodos utilizados para investigar la existencia de cavidades en el subsuelo. Se describen las propiedades químicas y físicas que tienen los diferentes tipos de morteros, así como sus propiedades mecánicas, hidráulicas y reológicas. De igual manera se detalla el proceso constructivo utilizado para la inyección de cavidades, mencionando el equipo para la inyección, los tipos de inyecciones, así como las presiones a utilizar dependiendo de la profundidad de las cavidades.

Es conveniente mencionar que este trabajo corresponde a una primera etapa de investigación. Por lo que en esta tesis se presenta una investigación bibliográfica. La caracterización de morteros en laboratorio se describirá en otro trabajo de investigación; por lo tanto, en este documento no se contempla una investigación experimental, ni tampoco se detallan pruebas físicas de laboratorio; sin embargo, sí se especifican las normas a seguir para la elaboración de morteros.

En el capítulo 1 se describen los diferentes métodos para la investigación de cavidades, se mencionan la estabilidad de los mismos, sus posibles fallas y los problemas que se presentan en las cimentaciones sobre terrenos minados.

En el capítulo 2 se describen las propiedades reológicas relacionadas con la composición de los morteros. Se mencionan diferentes tipos de mortero y su precio relativo.

En el capítulo 3 se analizan las propiedades mecánicas relacionadas con la composición de los morteros y se mencionan las especificaciones que deben cumplir.

En el capítulo 4 se describe el procedimiento constructivo para la inyección de morteros en cavidades.



# CAPÍTULO

## 1.

---

# INVESTIGACIÓN DE CAVIDADES, ESTABILIDAD Y CIMENTACIÓN DE TERRENOS MINADOS.



# CAPÍTULO 1

## INVESTIGACIÓN DE CAVIDADES, ESTABILIDAD Y CIMENTACIÓN DE TERRENOS MINADOS.

En este capítulo se detallan tres aspectos importantes para el desarrollo del presente trabajo, tales como la investigación, estabilidad y problemas de cimentación en terrenos minados.

### 1.1. Investigación de cavidades.

La investigación de cavidades es una actividad a la que se le debe dar mayor énfasis. Una buena investigación del subsuelo puede ayudar a evitar pérdidas económicas y humanas.

A continuación se describen los métodos que se utilizan para la investigación, la detección y la medición de cavidades. Para conocer ejemplos prácticos se recomienda que se consulte el libro *Cimentaciones en zonas minadas de la ciudad de México* (SMMS, 1976).

#### 1.1.1 Reconocimiento superficial.

Para comenzar una investigación del subsuelo se debe realizar un reconocimiento superficial que implica primeramente delimitar la zona a recorrer, la mayoría de las minas tienen desarrollos extensos.

Esta fase inicial, determinará algún parámetro tal que pueda dar la intuición de presencia de cavidades, tales como el tipo de roca, hundimientos, agrietamientos, etc. Esto implica a su vez un recorrido rápido y somero, con el objetivo de determinar los siguientes puntos:

- Determinación de la presencia de barrancas o cortes donde se pueda ver la geología del lugar y determinar si existen materiales tales como grava, arena y piedra pómez, los cuales indicarán la posible presencia de explotación de minas.
- Evidencias de los hundimientos y agrietamientos del terreno, muy probablemente provocados por el colapso de las minas.
- Presencia de algún relleno que pueda reemplazar la presencia de materiales pumíticos de grava o arena.
- Localización de bocaminas y probables fuentes de explotación a través de la interpretación de fotografías aéreas y satelitales.

#### 1.1.2 Exploración de minas

Si el reconocimiento superficial arroja una posible presencia de cavidades, entonces se deberá realizar la exploración más completa, la cual, como se

menciona más adelante, debe aplicarse en combinación de dos o más métodos con el objetivo de realizar una mejor verificación de resultados.

*Primer Método: Métodos Directos.*

Estos métodos consisten en realizar mediciones desde el interior de las cavidades. En el primer paso se debe efectuar un levantamiento topográfico, de preferencia, con tránsito y cinta o con estaciones topográficas.

En caso de que en la investigación se deduzca que las minas sí afectan a la estructura se deberá de realizar un levantamiento minucioso, donde se deberá detallar el contorno de las cavidades en las zonas que interesen y se efectuará una nivelación cuidadosa del piso. Por otra parte se inspeccionarán las características de los materiales localizados en el piso, en las paredes y en el techo de las minas.

Como ejemplo se presenta una mina en Atizapán de Zaragoza, donde el método directo puede aplicarse, determinándose la geología así como un levantamiento topográfico e indicándose sus propiedades geométricas tanto en planta y en perfil.

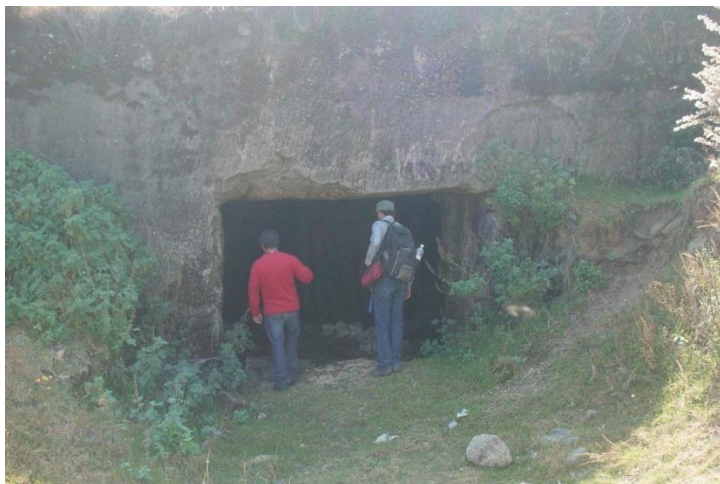


Figura 1.1. Bocaminas en Atizapán de Zaragoza



Figura 1.2. Interior de una mina en Atizapán de Zaragoza

Si los resultados efectuados durante las mediciones indican que no existen problemas para la estabilidad de las estructuras se podrá concluir la exploración de cavidades, en caso contrario se continuará con el estudio.

*Segundo Método: Métodos Semidirectos.*

Estos métodos se aplican cuando los levantamientos no pueden hacerse en el interior de la mina y consisten en sondeos de diámetros convencionales, efectuados desde la superficie del terreno. Su aplicación generalmente se realiza:

- a) Cuando los predios son de dimensiones reducidas y están limitados por colindancias.
- b) Cuando se desea estudiar la cimentación de futuras construcciones.
- c) Para averiguar anomalías encontradas por los métodos indirectos.
- d) En predios en los que mediante un reconocimiento superficial se hayan encontrado hundimientos o grietas en la superficie.
- e) Para investigar el mal comportamiento o daños en estructuras ya construidas.

Los sondeos para detectar cavidades podrán realizarse sin recuperar muestras, de preferencia empleando equipo rotario y brocas tricónicas de 7.5 cm (3 ") de diámetro y del tipo recomendado para perforar materiales de dureza media. También se requerirá el uso de barriles con brocas de diamante o de carburo de tungsteno para perforar fragmentos de roca dura.

Otro tipo de sondeo que se utiliza para la localización de cavidades es la penetración estándar, cuya función consiste en la detección de rellenos superficiales y minas derrumbadas y/o rellenas, pues es común que estos materiales se encuentren en estado suelto, disminuyendo notablemente su resistencia con relación a los materiales naturales intactos cuya resistencia generalmente es alta.

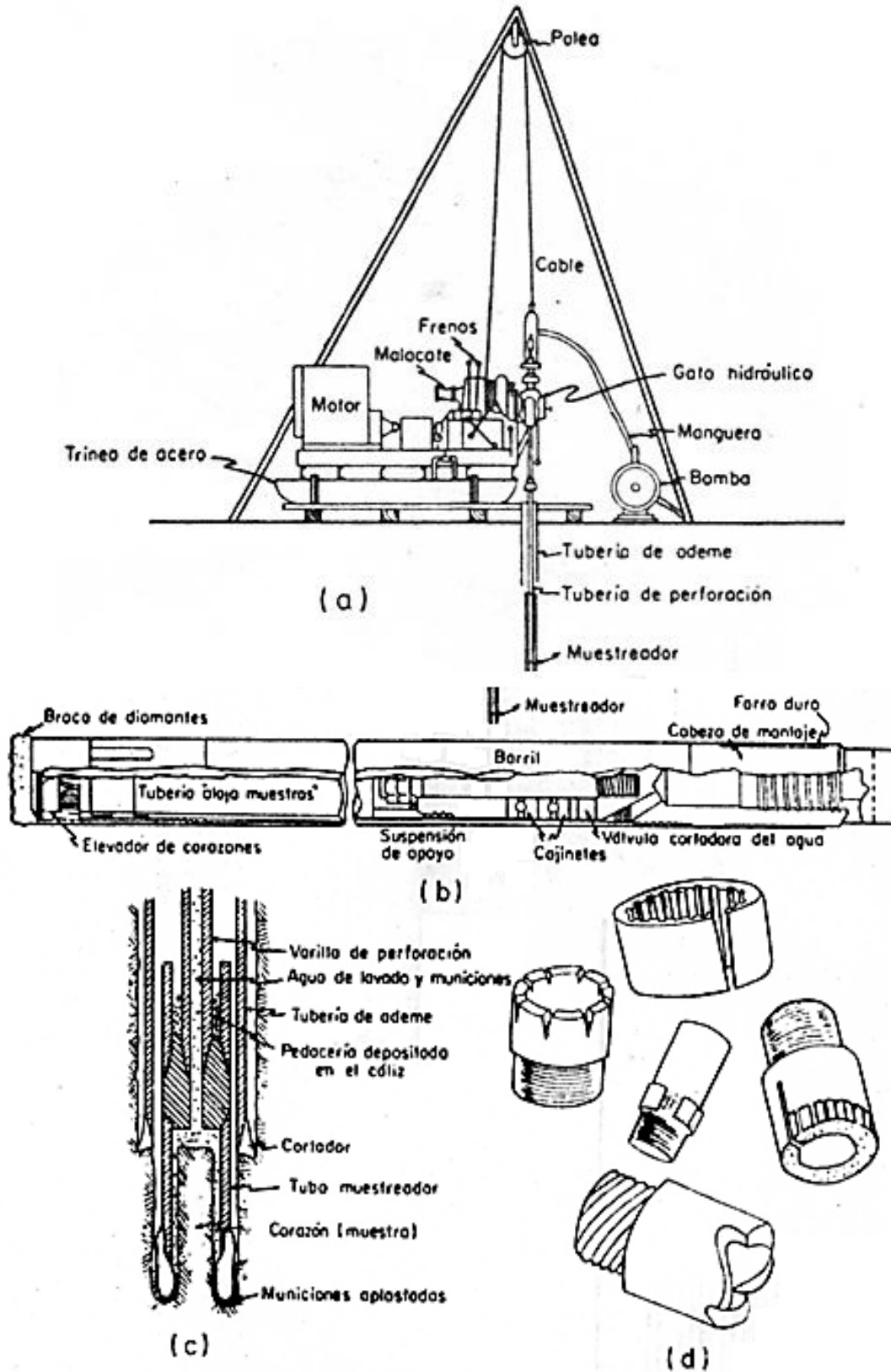


Figura 1.3. Equipo utilizado para la perforación en rocas a) Máquina perforadora b) Muestreador para broca de diamante, c) Muestreador tipo cáliz, d) Tipos de brocas (Juárez y Rico, 2007)



Tabla 1.1. Diámetro de coronas y tuberías convencionales utilizadas en sondeos rotatorios (Gonzales, 2002)

Sistema	Coronas			Tuberías de revestimiento			
	Tamaño (mm)	Diámetro de perforación (mm)	Diámetro testigo (mm)	Tamaño (mm)	Diámetro exterior (mm)	Diámetro interior (mm)	Peso (kg/m)
Sistema métrico de Craelius	36	36	22	35	35	29	1.4
	46	46	32	44	44	37	3.5
	56	56	42	54	54	47	4.4
	66	66	52	64	64	57	5.2
	76	76	62	74	74	67	6.3
	86	86	72	84	84	77	7.2
	101	101	84	98	98	89	10.5
	116	116	86	113	113	104	12.4
	131	131	101	128	128	119	13.8
	146	146	116	143	143	134	15.4
Sistema americano Diamond core drill manuf. Assoc. Of USA	EX	37.7	21.4	----	----	----	----
	AX	48.0	30.1	EX	46.0	38.1	4.1
	BX	60.0	42.0	AX	57.2	48.4	4.5
	NX	75.5	54.7	BX	73.0	60.3	9.0
	HX	99.2	76.2	NX	88.9	76.2	11.8
	23/4" x 3 7/8"	98.4	68.3	4"	129.0	102.0	16
	4' x 5 1/2"	139.6	100.8	6"	187.0	154.0	30
	6" x 7 3/4"	196.9	151.6	8"	239.0	203.0	39
	Wire Line						
	AQ	48.0	27.0	EX	46.0	38.1	4.1
	BQ	60.0	36.5	AX	57.2	48.4	4.5
	NQ	75.7	47.6	BX	73.0	60.3	9.0
	HQ	96.0	63.5	NX	88.9	76.2	11.8

Para efectuar las mediciones en minas con altura libre reducida se colocan un periscopio o una cámara fotográfica en sondeos convenientemente situados. Con base en las fotografías y en señales luminosas colocadas en otros sondeos se construye una triangulación para apoyar la fotointerpretación, con lo que el procedimiento alcanza una precisión aceptable. Lamentablemente la investigación mediante este método tiene la desventaja que depende de la densidad de sondeos por unidad de área, por lo que este método debe realizarse en combinación con otros.

*Tercer Método: Métodos Indirectos.*

Son apropiados para la exploración de grandes áreas, con estos métodos se determina la geología y los posibles espesores de los rellenos que como se comentó anteriormente, son indicadores de la demolición de minas.

Los métodos indirectos se clasifican tal y como se ve en el diagrama de la figura 1.4.



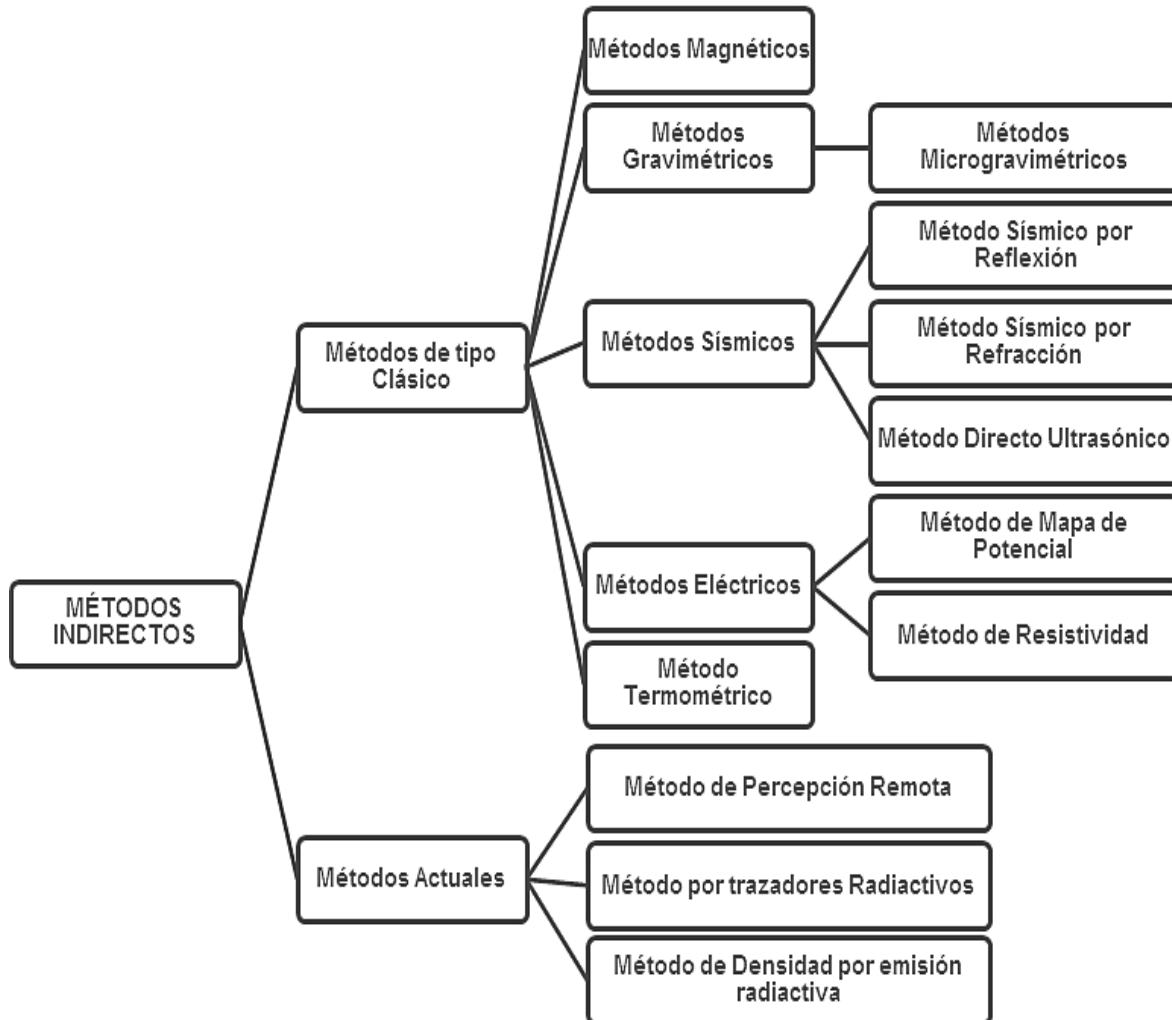


Figura 1.4. Métodos Indirectos

1. **Métodos Magnéticos:** Se basan en la teoría clásica de la mecánica newtoniana; obedecen la ley de Coulomb, que consiste en la atracción o repulsión de dos masas proporcionalmente a ellas e inversamente al cuadrado de su distancia. Sin embargo, para aplicar este método es necesario que los materiales circundantes del suelo tengan propiedades magnéticas o electromagnéticas muy marcadas, es decir, si el suelo en el que se encuentran cavernas está rodeado de materiales volcánicos es prácticamente imposible la detección de cavidades pues las propiedades de estos materiales son nulas, al igual que las del aire. Los aparatos utilizados para su medición son el magnetómetro portátil de tipo flux-gate de precisión nuclear y los equipos electromagnéticos de polarización inducida. La aplicación del método es barata pero sus resultados son muy dudosos (debido a variaciones que pueden ser causadas por susceptibilidad magnética entre diferentes capas o estratos, inclusiones o presencia de NAF). Por lo que este método sólo deberá utilizarse en combinación con otro o cuando exista total seguridad del contraste electromagnético entre la caverna y el material que lo rodea.

2. Métodos Gravimétricos: Se basan también en la teoría clásica de la mecánica newtoniana, desarrollada principalmente por Laplace y Poisson. A través de una serie de deducciones, se obtiene la ecuación de una anomalía gravitacional (diferencia entre el espacio homogéneo y el espacio de la caverna).

$$\Delta g = g - g_0 = -\frac{4}{3}\gamma\pi\rho\frac{R^3}{D^2} \quad (1)$$

Donde  $\Delta g$ , es la anomalía gravimétrica;  $\gamma$ , es la constante de la gravitación universal, cuyo valor aproximado es  $6.673 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}\cdot\text{s}^2$ ;  $\rho$ , es la densidad del terreno;  $R$ , es el radio de la caverna y  $D$  es la profundidad del terreno.

Los aparatos utilizados son los gravímetros portátiles de tipo Worden o Lacoste. Sin embargo, este método tiene varias limitaciones como por ejemplo, no sirve cuando la densidad del terreno es menor o igual a  $2 \text{ g/cm}^3$ , lo cual sucede sobre todo en tobas ya que este material produce un efecto de enmascaramiento, tampoco es útil cuando las cavernas son irregulares o pequeñas, ni cuando los terrenos son topográficamente irregulares.

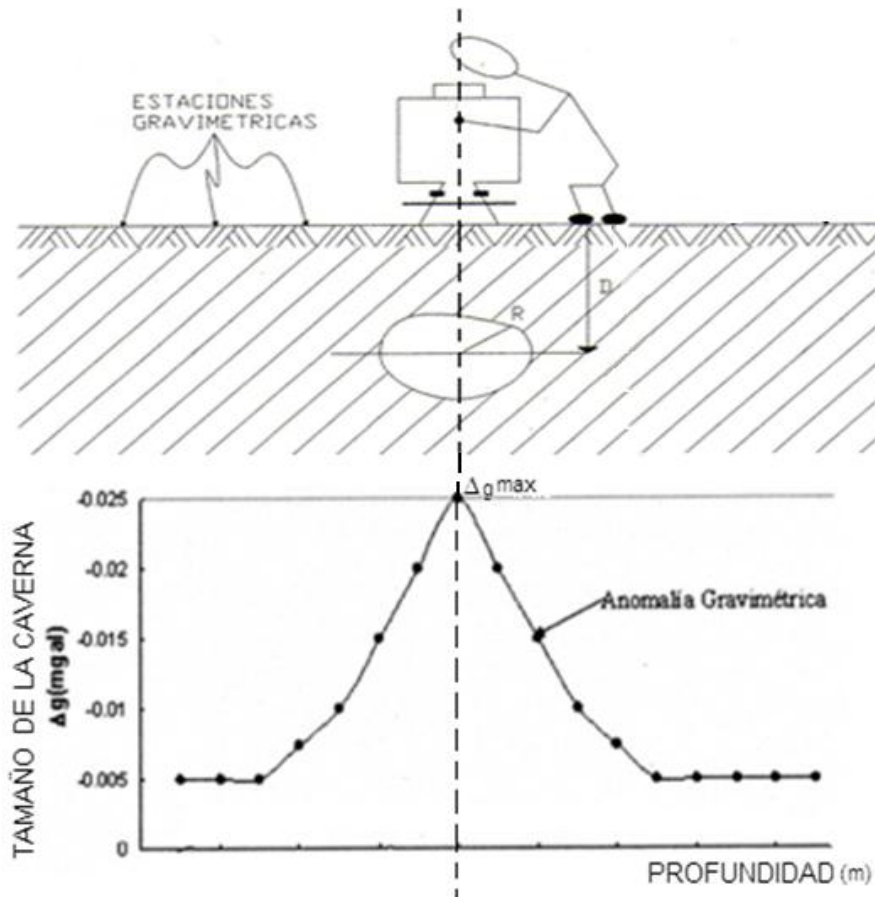


Figura 1.5. Método Gravimétrico y detección de una anomalía gravimétrica (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

Dentro de estos métodos se encuentra uno de utilización reciente, denominado microgravimetría. Sólo se ha utilizado en Francia, al parecer con muy buenos resultados y utiliza un aparato gravimétrico Lacoste que es muy eficiente en terrenos planos. Además, es de fácil interpretación puesto que cuando aparece una anomalía negativa acampanada indica una presencia de deficiencia de masa del terreno (cavidad); cuando su valor es mayor indica un gran tamaño de la caverna y entre más ancha, más profunda será.

- Métodos Sísmicos: Consisten en pasar oscilaciones a través de un punto en el suelo, cuyo movimiento se trasmite en forma de vibraciones llamadas sísmicas o sismoelásticas. La prospección física en la que se basan los métodos sísmicos, es la variación de la velocidad de transmisión de ondas elásticas en diferentes variaciones geológicas.

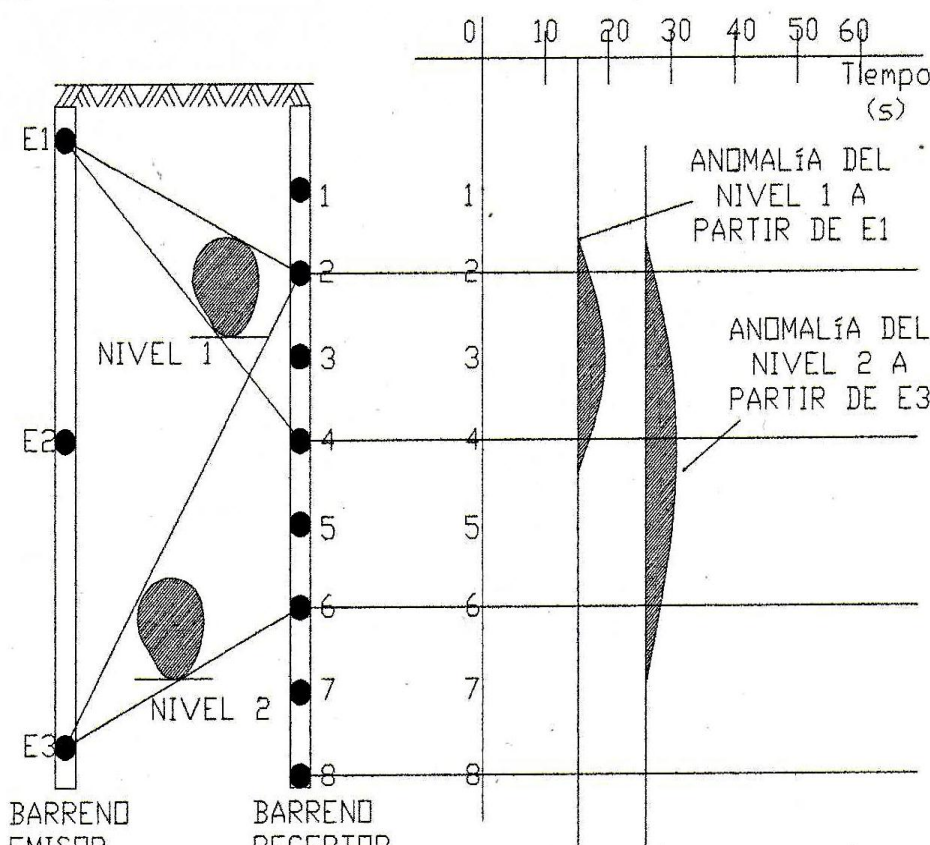
Tabla 1.2. Clasificación de los Métodos Sísmicos

Método Sísmico	Características
Método Sísmico de Reflexión.	<p>Consiste en medir el tiempo que tarda una onda en recorrer el trayecto entre el punto de origen de las oscilaciones y el receptor (sismógrafo). Aunque el procedimiento en teoría se describe sencillo, en la práctica se necesita una maquinaria bastante complicada. El tiempo que tarda una onda en recorrer se puede medir mediante:</p> $t = \frac{2}{v_l} \sqrt{h^2 + \frac{x^2}{4}} \quad (2)$ <p>Donde t, es el tiempo de ida y vuelta de la onda; v<sub>l</sub>, es la velocidad longitudinal; h, la profundidad de la onda y x, es la distancia entre la emisión y recepción de la onda. En casos particulares (cuando el suelo es homogéneo, isótropo y semi-infinito) da buenos resultados.</p>
Método Sísmico de Refracción	<p>El método por refracción se asocia con la Ley de Snell, la cual enseña que el cociente de velocidad de propagación a través de dos medios consecutivos homogéneos paralelos e isótropos, es proporcional al cociente de los senos de los ángulos de incidencia y de salida de las ondas sobre el plano de separación de ambos medios.</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p>Figura 1.6. índice de Refracción (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)</p> $\frac{\text{sen} \alpha}{\text{sen} \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n \quad (3)$

Tabla 1.2. Clasificación de los Métodos Sísmicos

Método Sísmico	Características
<b>Método Sísmico de Refracción</b>	<p>Este método también maneja dos velocidades que dependen de las propiedades físicas del medio emisor. Tales velocidades se generan a través de ondas longitudinales o transversales y se expresan de la siguiente manera.</p> $v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (4)$ $v_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\sigma)}} \quad (5)$ <p>Donde <math>v_l</math> es la velocidad longitudinal; <math>v_t</math> es la velocidad transversal; E, representa el modulo elástico; <math>\rho</math>, el peso específico y <math>\sigma</math> es el coeficiente de Poisson.</p> <p>La obtención de las lecturas se realiza obteniendo el tiempo que tarda en propagarse una onda sísmica desde el punto de origen de las oscilaciones a unos receptores (geófonos o sismógrafos, colocados a cierta distancia). Con ellos se obtienen unos diagramas denominados domocrónicas, en los que se traza la distancia contra el tiempo. Los aparatos utilizados son los galvanómetros, osciloscopios y los tubos contadores, siendo los más seguros los dos primeros por tener un sistema de impresión sobre el papel.</p> <p>Los resultados arrojados muestran que entre más sea el retraso de una onda en llegar a la presencia de cavidades es más evidente; sin embargo, este método tiene la desventaja que mientras el diámetro del túnel (<math>\phi</math>) sea menor a la altura de su techo (<math>h</math>) el aparato tiende a dar un tiempo de retraso muy pequeño, y por lo tanto no registra cavidad.</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p>Figura 1.7. Método Sísmico por Refracción (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)</p>

Tabla 1.2. Clasificación de los Métodos Sísmicos

Método Sísmico	Características
<b>Método Directo Ultrasonónico</b>	<p>Para la aplicación de este método es necesario disponer de perforaciones que alcancen una profundidad mayor que las oquedades supuestas. La medida, es parecida a la que se obtiene por medio de la fotointerpretación, pero a diferencia de ésta, aquí se introduce en un barreno un sistema provocador de oscilaciones que se baja en forma gradual, y en otro más cercano se coloca una celda receptora del mismo nivel con el fin de medir los tiempos directos de propagación.</p> <p>La detección de cavidades se debe a que entre más cerca se encuentre la oquedad del origen de vibraciones, más amplia será la influencia de la anomalía.</p>  <p>The diagram illustrates the direct ultrasonic method. It shows two vertical boreholes: a 'BARRENO EMISOR' (emitter borehole) on the left and a 'BARRENO RECEPTOR' (receiver borehole) on the right. The emitter borehole has three points labeled E1, E2, and E3. The receiver borehole has eight points labeled 1 through 8. Two shaded regions represent 'NIVEL 1' and 'NIVEL 2' (Level 1 and Level 2). Lines connect E1 to level 1 and level 2, and E3 to level 1 and level 2. To the right, a graph plots 'Tiempo (s)' (Time in seconds) on the x-axis (0 to 60) against the borehole levels. Two shaded regions on the graph represent 'ANOMALÍA DEL NIVEL 1 A PARTIR DE E1' and 'ANOMALÍA DEL NIVEL 2 A PARTIR DE E3', showing time delays at specific levels.</p> <p>Figura 1.8. Método Ultrasonónico (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)</p>

- Métodos eléctricos: Se basan en el estudio de la distribución en el subsuelo del campo eléctrico potencial, ocasionado por una corriente de intensidad conocida. La conductibilidad de un material depende del número y ubicación de los poros contenidos en él, del volumen de poros llenos de agua ( $V_e$ ) y la conductibilidad del agua intersticial ( $\sigma_e$ ). Por lo que la conductividad de un material estará dada por la expresión 6.

$$\sigma_s = \frac{V_e \sigma_e}{c} \quad (6)$$

Donde c, es una constante para una disposición definida de poros y  $\sigma_s$ , es la conductibilidad del material.

Dentro de la multitud de variantes que ofrece este método, en realidad sólo son dos los apropiados para detectar cavidades.

Tabla 1.3. Clasificación de los Métodos Eléctricos

Método Eléctrico	Características
Métodos de mapas de Potencial	<p>Consiste en medir el valor de la diferencia de potencial del terreno, a través de dos electrodos previamente clavados. Dicho valor siempre es muy pequeño (milivoltios). El método de medición, consiste en inyectar una intensidad de corriente conocida y constante, por medio de dos electrodos situados fuera del área en estudio, midiendo la diferencia de potencial entre las dos estaciones. A partir de estas medidas realizadas en campo se trazan las curvas de igual potencial o equipotenciales y finalmente se interpretan con el único objetivo de estudiar las anomalías de potencial detectadas.</p> <p>Con este método se pueden llegar a detectar minas puesto que cuando existen, tienden a tener mayor masa resistente (por estar llena de aire) y su interpretación en los mapas arrojan anomalías muy acusadas de poca extensión, mientras que cuando el suelo es homogéneo es menor su masa resistente y los resultados arrojados indican anomalías menos acusadas pero de mayor extensión, tal como se muestra en la figura 1.9.</p> <div style="text-align: center;"> <p>— — — LINEAS EQUIPOTENCIALES — — — LINEAS DE CORRIENTE</p> </div> <p>Figura 1.9. Método de mapas de Potencial (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)</p>

Tabla 1.3. Clasificación de los Métodos Eléctricos

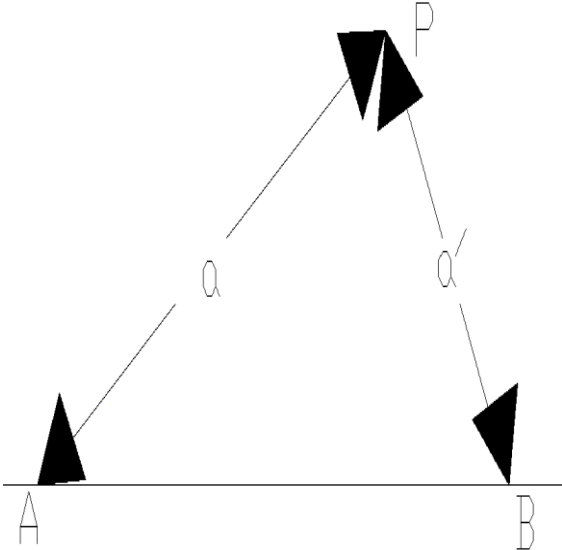
Método Eléctrico	Características
Métodos de Resistividad	<p>Se basa en la distribución del campo eléctrico en el subsuelo. En este método, al igual que el anterior, se pasa una corriente de un electrodo A a un electrodo B, con lo que existe una diferencia de potencial positiva de la forma:</p> $V_A - V_B > 0 \quad (7)$ <p>Si se considera lo anterior el potencial en un punto P está dado por:</p> $V = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{a'} \right) \quad (8)$ <p>Donde I, es la corriente que atraviesa el subsuelo; <math>\rho</math> es la resistividad del medio; a y a' las distancias relativas del punto P a A y B respectivamente.</p>  <p>Figura 1.10. Potencial en un punto P (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)</p> <p>Si se consideran los puntos A y B a una mayor distancia, esto permite medir una mejor diferencia de potencial, obteniendo la siguiente fórmula:</p> $V = 2\pi K \frac{\Delta V}{I} \quad (9)$ <p>Donde I, es la corriente que atraviesa el subsuelo; y K es función de los espacios entre los electrodos <math>a_1</math>, <math>a_2</math>, y <math>a_3</math>.</p>

Tabla 1.3. Clasificación de los Métodos Eléctricos

Método Eléctrico	Características
<b>Métodos de Resistividad</b>	<div style="text-align: center;"> </div> <p data-bbox="407 747 1382 810">Figura 1.11. Potencial en un punto P con los puntos M y N (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)</p> <p data-bbox="386 848 1401 1031">Posteriormente se van desplazando todos los electrodos en forma creciente y según una misma dirección. Para cada estación sucesiva se define una resistividad. El siguiente paso es obtener varias prospecciones eléctricas verticales, las cuales al juntarse se correlacionan las medidas, se interpretan y se define la estructura.</p> <p data-bbox="386 1066 1401 1249">Las anomalías obtenidas se interpretan de la misma manera que los mapas de potencial, pero a diferencia de este último, este método permite delimitar tanto en planta como en perfil el área que ocupa la oquedad. Un ejemplo de una anomalía detectada se muestra en la figura 1.12.</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p data-bbox="435 1829 1352 1892">Figura 1.12. Interpretación del método de resistividad (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)</p>





5. Métodos Termométricos: Se basan también en la teoría clásica y consisten en la medida de temperatura del subsuelo, utilizando los conceptos de grado geotérmico y gradiente vertical. El primero se refiere a la profundidad que se debe aumentar para que la temperatura suba un grado mientras que el segundo representa al cociente de la diferencia de temperaturas entre la diferencia de profundidad de dos puntos, tal y como se muestra en la expresión 10.

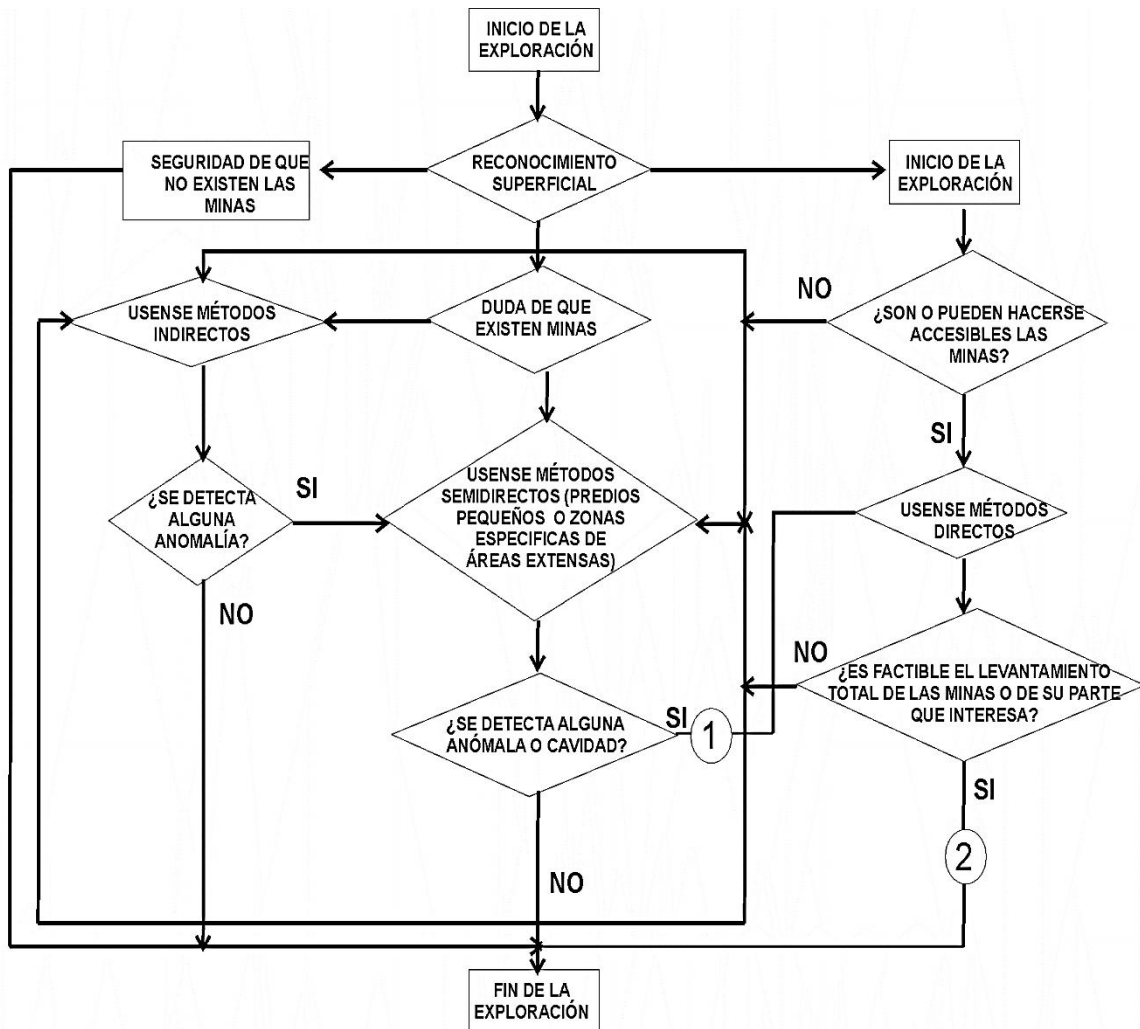
$$Grad = \frac{\theta_B - \theta_A}{h_B - h_A} \quad (10)$$

Una vez que se obtienen las medidas termométricas de campo, se realiza una corrección y se procede a la interpretación. Para esto se utilizan por lo menos dos series de medidas en épocas diferentes del año y se superponen los diagramas obtenidos. La diferencia obtenida se asocia a anomalías geológicas del subsuelo que se calientan y enfrían.

Sin embargo, este método presenta varios inconvenientes como por ejemplo se necesita de perforaciones previas (lo que encarece el estudio) y de sus colocaciones a 3 ó 4 metros de distancia de la cavidad, revelando únicamente la vertical de la cavidad sin indicar la profundidad de la misma. Además se debe mencionar que este método tiene la desventaja, que por tener que realizarlo dos veces al año, tiende a retrasar y a encarecer el estudio.

6. Método de percepción remota: Éste y los métodos que a continuación se mencionan son de utilización reciente. Se basa en el estudio de fotografías del suelo obtenidas a partir de satélites o vuelos de baja altura. Generalmente estas fotos son en blanco y negro infrarrojo, emulsiones de color y color infrarrojo. Desafortunadamente, presenta el inconveniente de no permitir distinguir la presencia de cavernas en las fotografías, debido a la combinación de anomalías térmicas con anomalías superficiales tales como casas, calles, rellenos artificiales y basura.
7. Método por trazadores radiactivos. Se utiliza cuando las cavidades se encuentran concatenadas y en circulaciones accesibles de agua.
8. Método de densidad por emisión radiactiva. Sólo es útil para la detección de cavidades muy pequeñas y superficiales con radios de alrededor de decímetros hasta centímetros

En la figura 1.13 se presenta un diagrama resumen de los métodos utilizados para detectar la presencia de cavidades.



① EJECUCIÓN DE EXCAVACIONES O PERFORACIONES DE GRAN DIÁMETRO PARA BAJAR A UN HOMBRE. COMO ALTERNATIVA INTERMEDIA, USO DE PERISCOPIOS Y CÁMARAS FOTOGRÁFICAS O DE TELEVISIÓN

② EJECUCIÓN DE EXCAVACIONES O PERFORACIONES SOLO PARA VERIFICAR EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Figura 1.13. Diagrama de Flujo de la exploración de minas subterráneas (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

## 1.2 Estabilidad de cavidades.

La estabilidad de cavidades es un problema de difícil investigación, puesto que en él intervienen un gran número de variables complejas de evaluar y de datos que en la mayoría de los casos no son confiables; tales como su geometría, profundidad, materiales constituyentes, migración de cavidades, etc.

### 1.2.1 Clasificación de galerías

Uno de los factores que afecta la estabilidad de cavidades, está en función de su geometría. En la Ciudad de México se pueden encontrar dos tipos de galerías, las galerías aisladas y el grupo de galerías.

- a) Galerías aisladas: Son aquellas que tienen una distancia suficiente entre sí de tal manera que entre una y otra no existe una interacción apreciable de esfuerzos. Generalmente se presentan en zonas mineras o cuando el material se aloja en franjas de anchura y espesor reducidos; ejemplos de este tipo de galerías se representan en la figura 1.14.

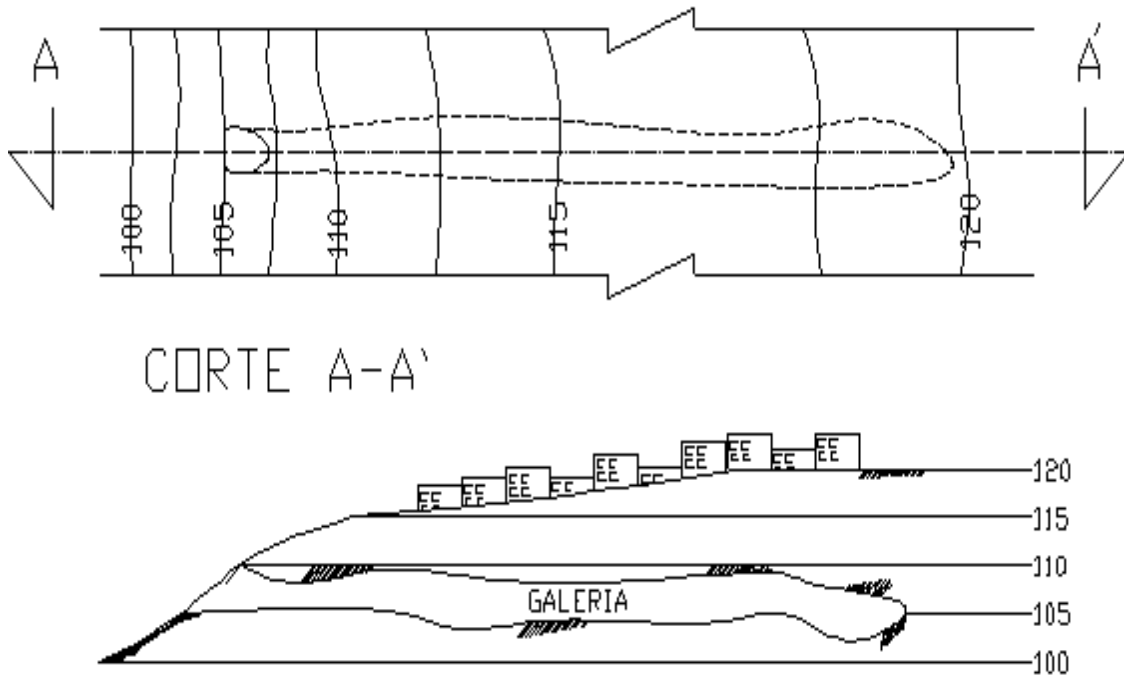


Figura 1.14. Galería Aislada (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

Para calcular los esfuerzos generados sobre este tipo de galerías se pueden utilizar condiciones similares al caso de túneles, donde con base a la teoría de la elasticidad, se puede explicar cómo se redistribuyen los esfuerzos alrededor de una excavación.

Para túneles profundos Terzaghi considera un medio elástico semi-infinito, y emplea las fórmulas de Lamé (1852), para calcular el estado de esfuerzos en túneles circulares de pared gruesa sujetos a presión interna. Las siguientes formulas están en función de la geometría, de la profundidad, del peso volumétrico, de  $K_0$  y de la distancia a las paredes de la galería.

$$\sigma_r = D\gamma \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \quad (11)$$

$$\sigma_\theta = D\gamma \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \quad \text{para } K_0=1 \quad (12)$$

Donde  $\sigma_r$ , es el esfuerzo radial;  $\sigma_\theta$ , es el esfuerzo circunferencial;  $D$ , la profundidad media del túnel;  $r_0$ , el radio del túnel ( $D \gg r_0$ );  $r$ , el radio en el punto donde se analiza el esfuerzo;  $\gamma$ , el peso volumétrico y  $K_0$ , la relación entre el esfuerzo horizontal y vertical.

**ANTES                      DESPUES**

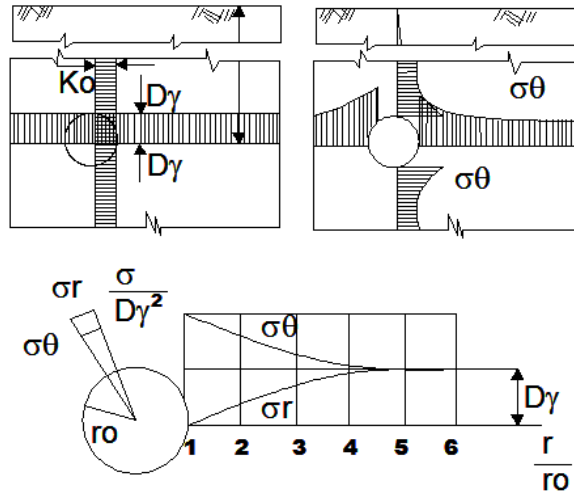


Figura 1.15. Variación de esfuerzos al excavar un túnel circular cuando  $K_0 = 1$  (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

Pero si  $K_0 \neq 1$ , las fórmulas se modifican y los esfuerzos  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  dependerán del ángulo que se midan. La figura 1.16 muestra la variación de los esfuerzos circunferenciales  $\sigma_\theta$  en función de  $K_0$  y para dos puntos de un túnel circular, cuando su clave es  $\theta = 90^\circ$  y su línea es  $\theta = 0^\circ$

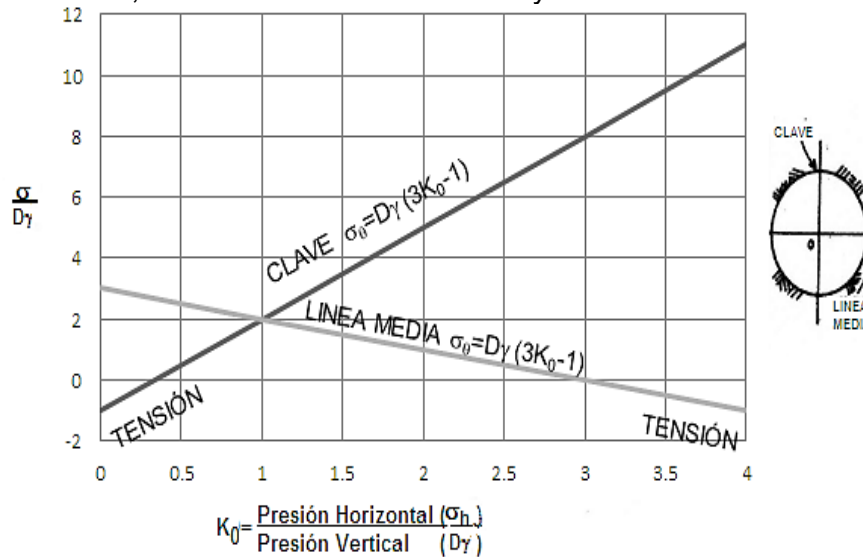


Figura 1.16. Variación de esfuerzos circunferenciales para un túnel circular en relación con  $K_0$  (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

Para túneles a poca profundidad las ecuaciones 13 y 14 se pueden utilizar son

$$L = \sqrt{\frac{2\sigma T}{\gamma}} \quad (13)$$

$$\sigma = \frac{\gamma L^2}{2T} \quad (14)$$

Donde  $L$ , es el claro propuesto que puede soportar en forma estable una galería;  $\sigma$ , es el esfuerzo de la tensión máxima en la “viga de roca”;  $T$ , el espesor de la viga y  $\gamma$  es el peso volumétrico de la roca.

b) Grupo de Galerías: Generalmente se presenta en zonas donde el material de interés tiene características razonablemente homogéneas. Se produce cuando cada una de las galerías causa su propio esfuerzo, dando como resultado esfuerzos de interferencia mutuos.

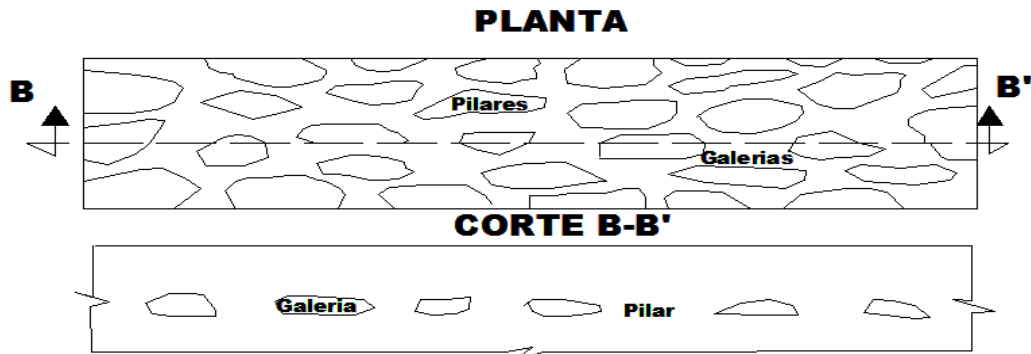


Figura 1.17. Grupo de galerías (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

En este tipo de galerías la transmisión de esfuerzos, tiene lugar a través de los pilares que los transmiten íntegramente al piso. Esto a su vez tiene la problemática que debido a heterogeneidades del suelo (en cuanto a la geometría de los pilares, propiedades mecánicas del suelo, etc.) algunos pilares cargan más que otros, derrumbándose algunos primero y ocasionando finalmente el derrumbe de la bóveda. Para determinar sus esfuerzos es necesario revisar la capacidad de los pilares, teniendo en mente que estos carecen de confinamiento y que su capacidad portante está ligada directamente con la resistencia a compresión simple del suelo que forma cada pilar.

Ejemplo de este tipo de galerías en el municipio de Atizapán de Zaragoza se muestran en la figura 1.18.

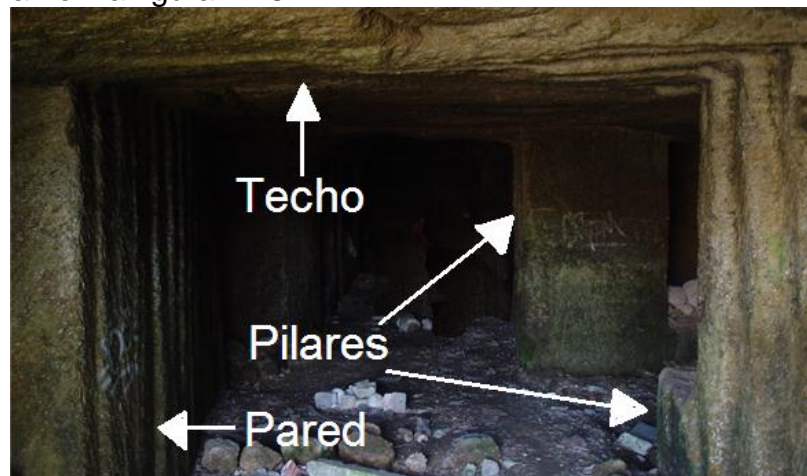


Figura 1.18 Grupo de galerías en Atizapán de Zaragoza

### 1.2.2. Deformaciones generadas por explotación de materiales

En la estabilidad de los terrenos minados intervienen factores geométricos, propiedades del terreno y agentes externos. Los primeros detallan la dimensión, profundidad, número de niveles y la altura libre de las cavidades, parámetros proporcionados por su exploración. Los segundos describen la baja resistencia y la alta deformabilidad de los materiales que constituyen las bóvedas y pilares. El último factor específica a todos aquellos agentes externos al medio que ocasionan alteraciones en las propiedades mecánicas de los materiales, además de modificar las dimensiones originales de las cavidades, tales como sobrecargas, sismos, erosión e intemperismo.

Cuando se extrae un material y se dejan cavidades en el subsuelo provoca deformaciones que generan movimientos, tales como asentamientos o desplazamientos verticales ( $s$ ), inclinación o volteo producido por asentamientos diferenciales ( $g$ ), curvatura o inclinación diferencial, desplazamiento horizontal ( $v$ ) y deformaciones por compresión o tensión.

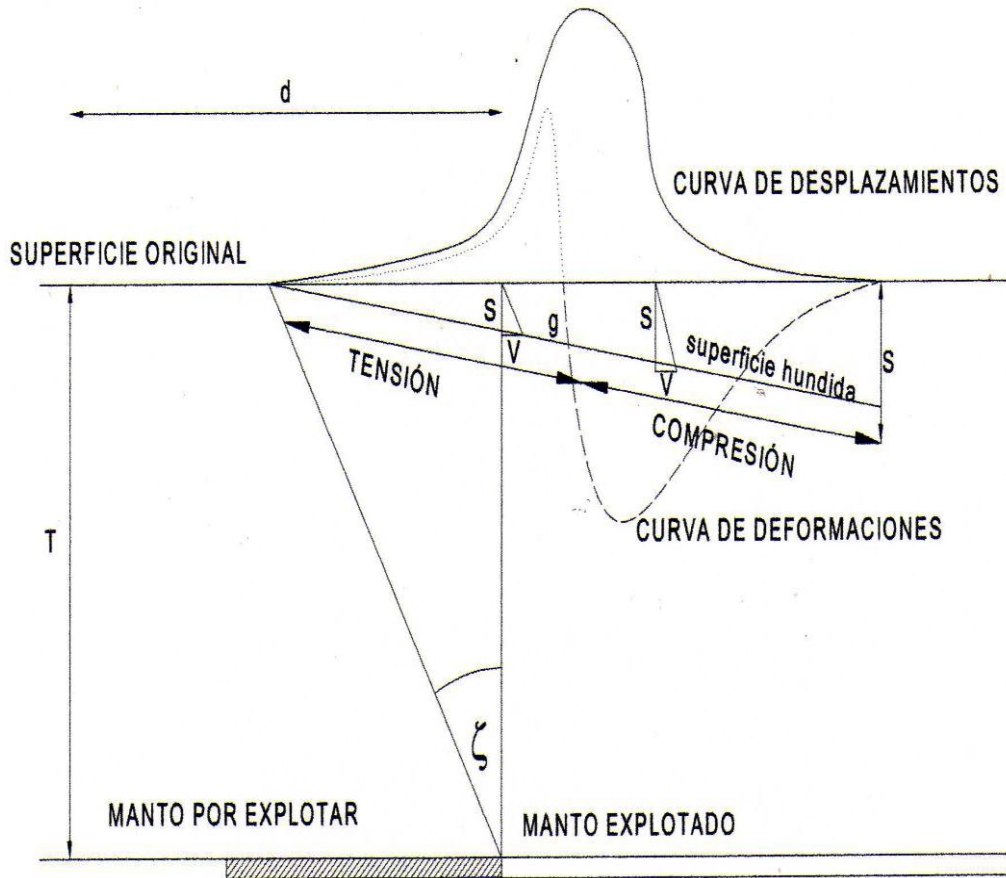


Figura 1.19. Movimientos del terreno (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

Como se muestra en la figura 1.19, los movimientos en el terreno se deben al ángulo influencia ( $\zeta$ ), indicador de suma importancia que muestra que el área afectada siempre es mayor a la que circunscribe el área explotada.

Desafortunadamente en nuestro país, no se ha hecho mucha investigación sobre este parámetro, en cambio, en países como Gran Bretaña han determinado que su valor aproximado es  $35^\circ$ , por lo que la máxima distancia en que se originan los movimientos llega a ser igual a  $0.7.T$ , donde T es el techo o espesor de la bóveda. Para fines prácticos esta distancia suele determinarse como la mitad de la profundidad de la bóveda.

En Alemania se originó un concepto para estudiar asentamientos, denominado "área crítica". Se define como la base imaginaria que proyecta un cono bajo el punto P, su forma es aproximadamente circular y su diámetro es igual a 1.4 veces el techo de la mina (T).

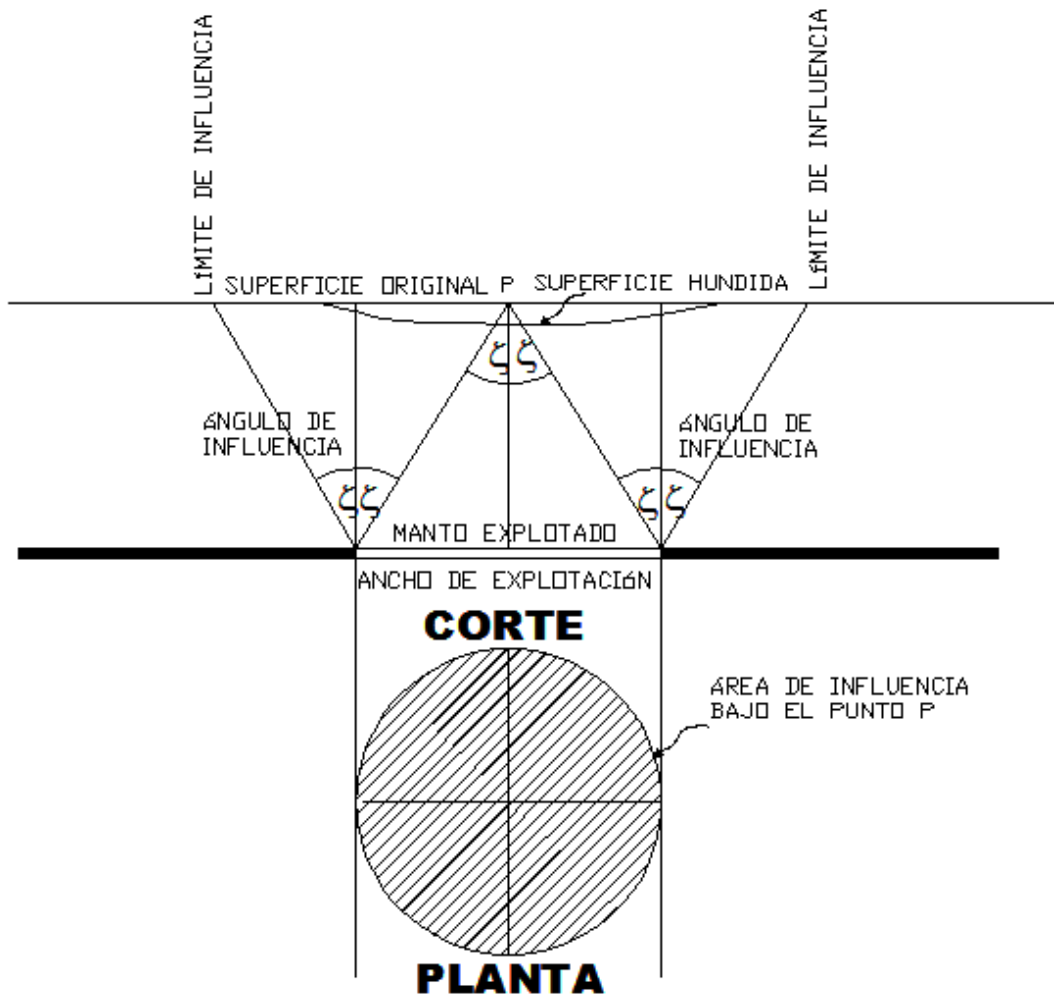


Figura 1.20. Área crítica para asentamientos (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

El asentamiento está en función del porcentaje del espesor explotado. Si las explotaciones se realizan abarcando toda el área crítica, mayores serán los asentamientos en el punto P, a medida que la fracción explotada de esa área, sea menor, el mismo asentamiento disminuirá. La magnitud que provocan los asentamientos sobre el terreno se clasifican según la tabla 1.4.

Tabla 1.4. Hundimientos de la superficie según el ancho de explotación (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

TIPO DE HUNDIMIENTO	EJEMPLO DE HUNDIMIENTO
<p><b>SUBCRÍTICO</b>            Cuando el ancho de explotación <math>W_1</math> es menor que el diámetro del área crítica (D)  <math>W_1 &lt; D</math></p>	
<p><b>CRÍTICO</b>            Cuando el ancho de explotación <math>W_2</math> es igual que el diámetro del área crítica (D)  <math>W_2 = D</math></p>	
<p><b>SUPERCRÍTICO</b>            Cuando el ancho de explotación <math>W_3</math> es mayor que el diámetro del área crítica (D)  <math>W_3 &gt; D</math></p>	

La figura 1.21 muestra esquemáticamente ejemplos de asentamientos y agrietamientos ocasionados sobre edificaciones y avenidas de circulación.



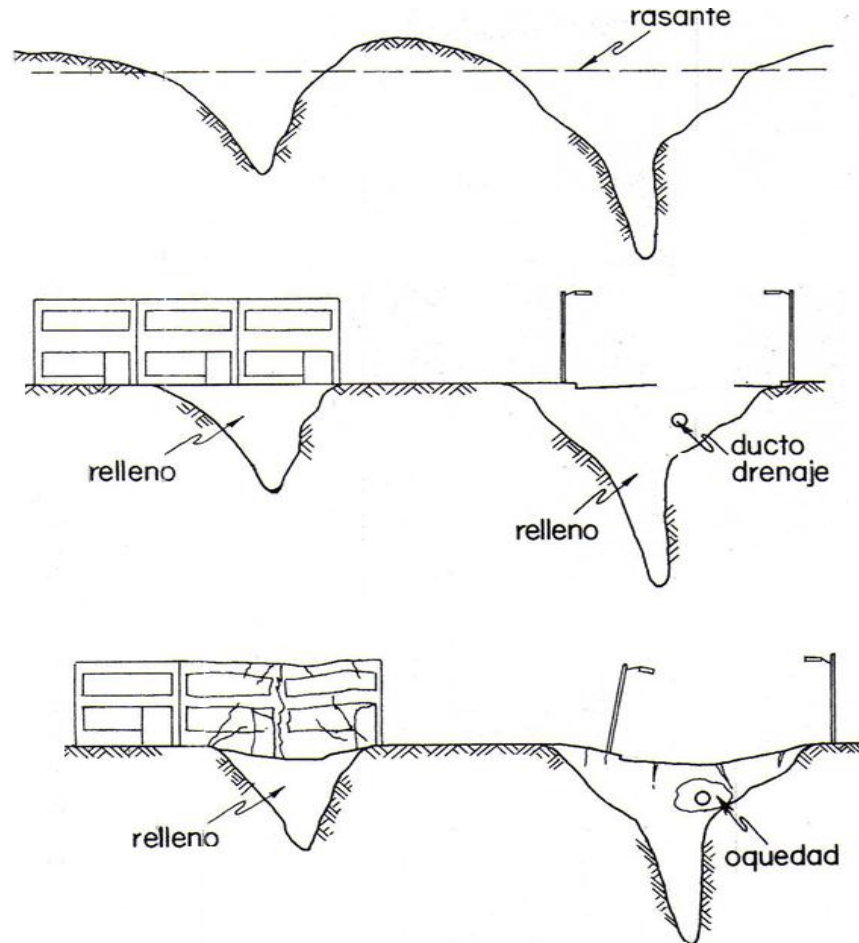


Figura 1.21. Detalle de fallas por asentamientos en terrenos minados (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

### 1.2.3 Migración de cavidades: la erosión y el intemperismo

La migración de cavidades, se define como el desplazamiento o ampliación de una cavidad, en forma de arco, hacia la superficie del terreno, debido a la acción del intemperismo y erosión. Este fenómeno, se presenta a través de la desintegración progresiva de los materiales (generalmente deleznales), que cubren a la bóveda, y se acelera más cuando a estos se le suman filtraciones, dando como resultado el reblandecimiento del suelo.

La altura que pueden alcanzar las migraciones, suponiendo que el material desprendido queda en el lugar en donde cae, puede calcularse a través de la expresión 15.

$$h = H \left( \frac{\gamma_1}{\gamma - \gamma_1} \right) \quad (15)$$

Donde  $h$ , es la altura total de migración;  $H$ , es la altura libre de la cavidad original;  $\gamma_1$ , peso volumétrico del material desprendido siendo igual a  $1.5 \text{ t/m}^3$  y  $\gamma$  es el peso volumétrico del material que forma la bóveda en estado natural siendo igual a  $1.70 \text{ t/m}^3$ .

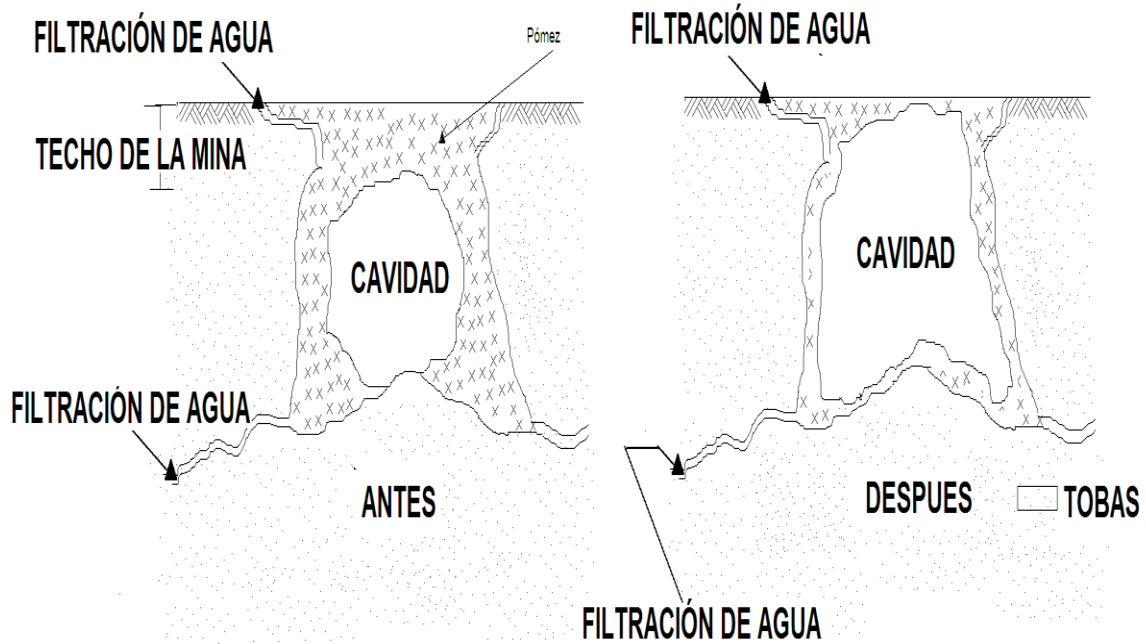


Figura 1.22. Migración de cavidades por filtración de agua



Figura 1.23. Bloques caídos y desintegración de materiales constituyentes de minas en Atizapán de Zaragoza

#### 1.2.4 Influencia de los sismos (Rosenblueth, 1975)

La energía sísmica es menor en el subsuelo que en la superficie, afectan menos a las galerías porque cuando existen cavernas tanto la masa media como la rigidez



en ciertos estratos disminuye, siendo la segunda mayor en su magnitud, ocasionando amplificaciones de sus ordenadas espectrales en la vecindad de ciertos periodos de vibración. Los esfuerzos directos que se generan en las cavernas, idealizando las ondas como planas, se pueden obtener a través de las expresiones 16 y 17.

$$X \pm c_p t \quad (16)$$

$$X \pm c_s t \quad (17)$$

Donde  $X$ , es la ordenada espacial;  $c_p$ , es la velocidad de propagación de la onda P;  $c_s$ , es la velocidad de propagación de la onda S y  $t$  es el tiempo, siendo las deformaciones unitarias las ecuaciones 18 y 19.

$$\delta_x \pm \frac{\dot{x}}{c_p} \quad (18)$$

$$\delta_y \pm \frac{\dot{y}}{c_s} \quad (19)$$

Donde  $\delta_x$ , es la deformación unitaria normal en la dirección X;  $\delta_y$ , es la deformación unitaria al corte;  $\dot{x}$ , es la velocidad de propagación de la onda en la fase P y  $\dot{y}$ , es la velocidad de propagación de la onda en la fase S.

Por otro lado; si se decide construir en zonas minadas el factor más crítico a estudiar es el momento de volteo, que duplica las cargas de columnas en edificios esbeltos o provistos de muros. También tiene que tomarse en cuenta factores que se desprecian en un análisis elemental en zonas sin minas, pero que en este tipo de zonas adquieren mayor relevancia, tales como son la torsión accidental por rotación de la base de un edificio respecto a un eje vertical, así como rotaciones en la base respecto a ejes horizontales.

Ocasionalmente los sismos han producido daños parciales en la estabilidad de los pilares y desprendimientos de las bóvedas en el interior de las minas. Por fortuna sólo se ha notado un asentamiento a causa de estos y ocurrió en Estados Unidos, cuando se estableció que los daños generados sobre la construcción habían sido causa de la falla de pilares de las minas de carbón y por lo tanto de un asentamiento en las formaciones superiores, concluyéndose de esta manera que los sismos no implican un riesgo notable en zonas sobre terrenos minados, porque una caverna con o sin presencia de fuerzas externas se hubiera colapsado al poco tiempo después.

### 1.3 Cimentación y tratamientos de terrenos minados

Cuando no existe presencia de cavidades en el subsuelo las principales formas de cimentación son las zapatas aisladas y corridas, pero si se logran detectar, sea antes de la construcción o cuando se está construyendo, se deberá utilizar algún tratamiento para terrenos minados, dichos métodos son el relleno de cavidades e inyección, excavación y relleno compactado, refuerzo de techos, protección contra el intemperismo y cimentaciones profundas. Las soluciones anteriores dependen



de la extensión del área, características del terreno minado y del tipo de obras a erigir o de las existentes.

La cimentación planteada deberá tomar en consideración las siguientes variables:

1. Características geométricas y estructurales del edificio a construirse
2. Espesor del techo de la caverna y sus propiedades índice y mecánicas.
3. Altura libre de la caverna.
4. Propiedades índices y mecánicas del piso de la caverna.
5. Expectativas del intemperismo de los techos durante la vida útil de las obras.
6. Número de niveles de cavidades bajo el subsuelo

### 1.3.1 Relleno de cavidades e inyección

Su objetivo es devolverle a la superficie del terreno su continuidad y resistencia que tenía antes de quitarle sus materiales constituyentes. El relleno debe procurar el confinamiento necesario para las paredes y pilares de tal manera que con ello aumente su capacidad portante. Sin embargo, es muy común que el material de relleno disminuya su volumen, es decir, se contraiga por lo que es necesario complementar el tratamiento con inyección a presión e inclusive emplear aditivos expansores en la última etapa del llenado. El procedimiento se lleva a través de las siguientes cuatro etapas:

1. *Limitar el área a rellenar:* En esta etapa deben llevarse a cabo diques, muros o represas cuya función será evitar la fuga de materiales.
2. *Colocar la mayor cantidad de material sobre el piso de la bóveda:* En la siguiente etapa, se deben colocar materiales sanos producto del derrumbe de bóvedas o cualquier otro material fácil de introducir o acomodar eliminando toda basura, lodo, materia orgánica u otro material que no cumpla con la resistencia adecuada.
3. *Verter desde el interior un relleno fluido:* Posteriormente se debe colocar un relleno fluido que al fraguar adquiera la resistencia adecuada, procurando que llene primero las partes más profundas y bajas de las galerías. Entre los agregados para formar mezclas fluidas se encuentran: el cemento, cal, puzolana, mortero, grava, arena, tepetate, suelo del lugar, bentonita, aditivos fluidizantes, etc. Para mejorar su control deberá conocerse la densidad de los sólidos, su peso volumétrico aparente y el porcentaje de humedad de sus materiales, Además para la resistencia final de la mezcla se deberá controlar su viscosidad, y su estabilidad. Sus proporciones suelen calcularse por peso o por volumen de tal manera que formen mezclas que garanticen la resistencia adecuada y al mismo tiempo sean lo más económicas posible.

4. *Inyección a presión con aditivos expansores*: En esta última etapa se debe de inyectar lechadas a presión, para sellar los huecos dejados por el relleno fluido al contraerse, cuidando de no colocarse en exceso para no provocar en el terreno desplazamientos o agrietamientos no deseados.

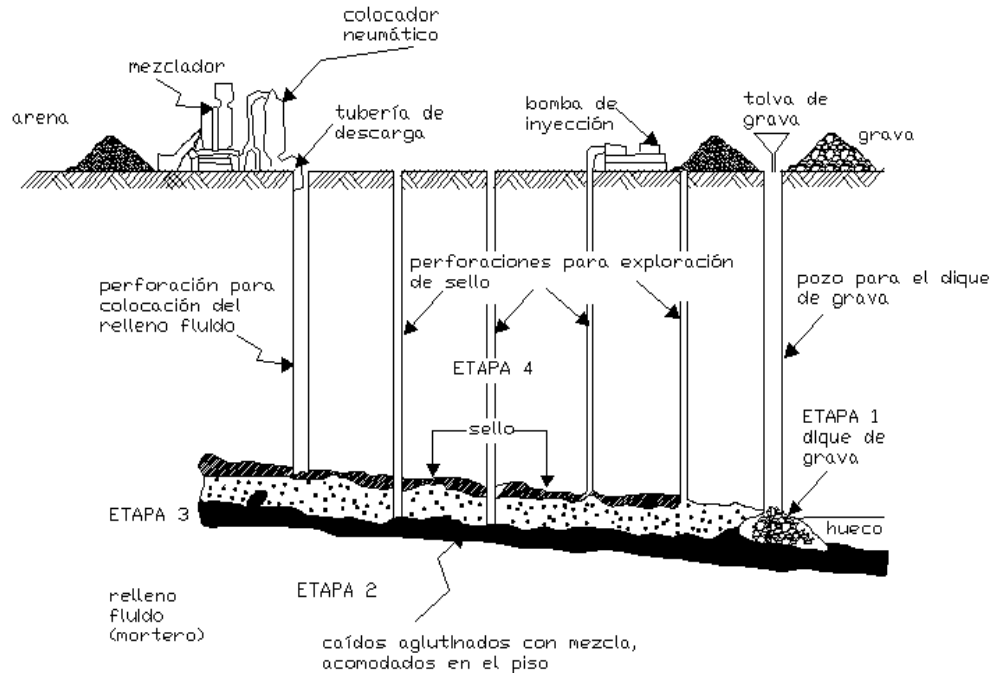


Figura 1.24. Etapas para el relleno e inyección de una cavidad, desde su superficie (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

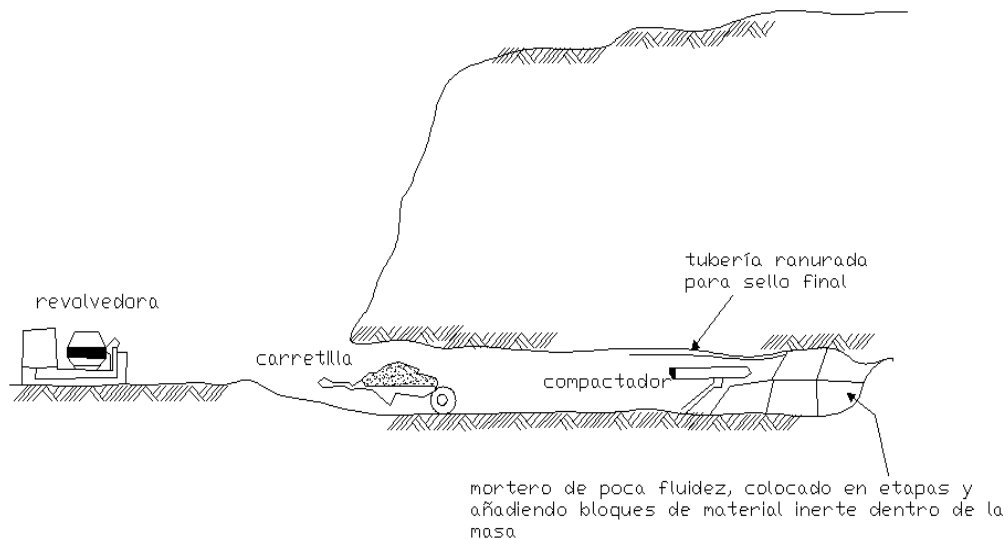


Figura 1.25. Etapas para el relleno e inyección de una cavidad con acceso en ella (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

Los dos elementos principales que afectan al costo de la inyección a través de los rellenos son el precio de los materiales a utilizar y las instalaciones requeridas (como por ejemplo equipos de mezclado, agitado e inyección a presión) las cuales aumentarán el costo a medida que los volúmenes de inyección sean menores.

### 1.3.2 Excavación y relleno compactado

La excavación de minas y su relleno a través de compactación de materiales, se aplica cuando existen minas superficiales o a poca profundidad. La compactación se debe realizar bajo una estricta supervisión, puesto que si existen deficiencias tanto en los procedimientos constructivos como en la elección de materiales a compactar, generarán el mal comportamiento de las cimentaciones apoyadas en los rellenos.

El procedimiento utilizado consiste primero en detallar las cavidades mediante un levantamiento topográfico que las muestre en planta y en perfil, a continuación se deberá realizar un despalme del predio y trazar en la superficie el contorno respectivo de las cavidades. Posteriormente se deberá derrumbar el techo de las minas, con un tractor equipado con arado, colocando el material a un lado de las mismas, empezando por excavar una pequeña fracción del área hasta alcanzar el piso de la cavidad, procediendo a demoler el techo de abajo hacia arriba con ataque frontal.

Finalmente se deberá limpiar el piso de la mina y compactar el material de relleno en capas (el cual deberá investigarse su calidad a través de pruebas de laboratorio). Dicha compactación deberá garantizar por lo menos el 95% del Peso Volumétrico Seco Máximo (PVSM) de la prueba Proctor, puesto que entre mayor sea la compactación menores serán los asentamientos causados por una cimentación.

Desafortunadamente en la ciudad de México se han tomado decisiones que han implicado el relleno de cavidades con materiales heterogéneos, tales como la colocación de bloques superpuestos, desprendidos del techo original de las minas. Aunado a esto se han relleno con basura los huecos que dejan entre si los bloques. Lo que trae consigo, enjutas debido a la acción de filtraciones e intemperismo, además de causar alteraciones al medio ambiente.

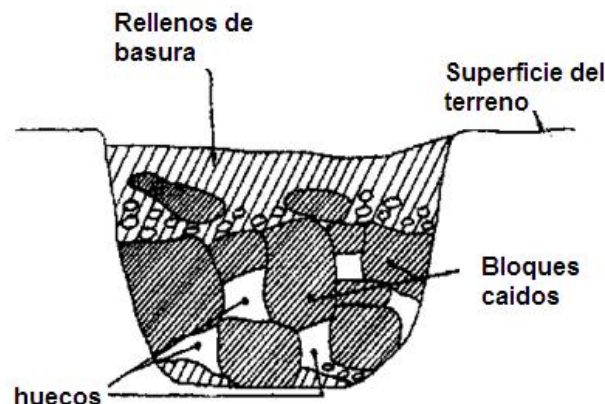


Figura 1.26. Relleno heterogéneo (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

Ante malos rellenos como el anterior caso, se pueden tomar medidas como colocar cimientos bajo rellenos o colocar una trabe de tal manera que la misma trabaje como puente.

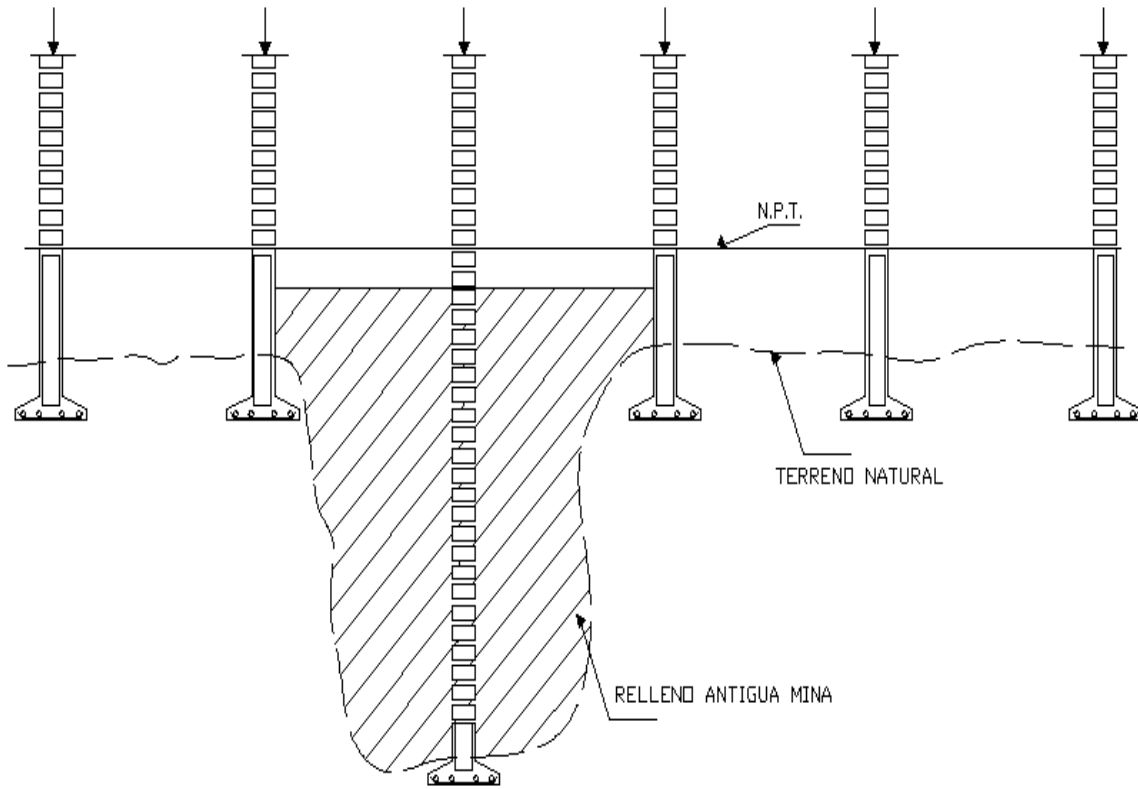


Figura 1.27. Desplante de una zapata bajo un relleno (Sociedad Mexicana de Suelos, 1976)

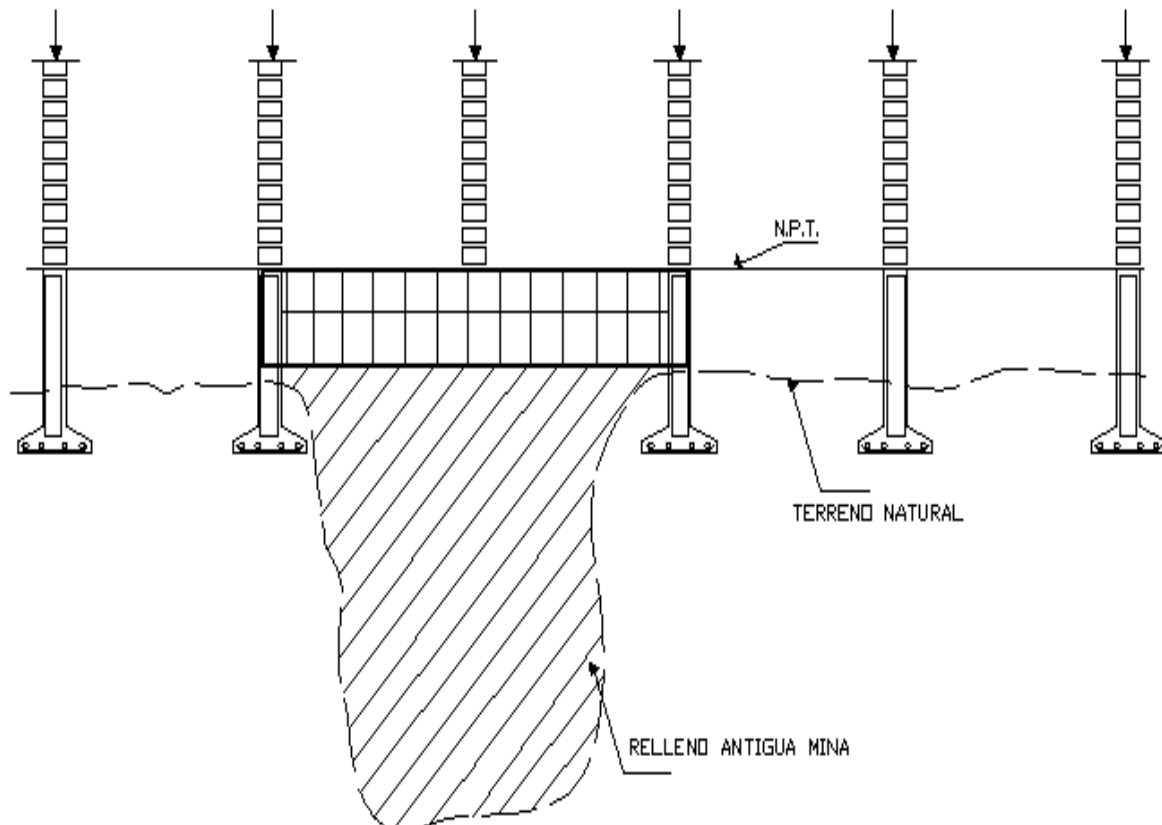


Figura 1.28. Trabe utilizada como puente para librar el relleno (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

El cálculo de los costos para la excavación y el relleno compactado está en función de la profundidad de las cavidades, de la longitud del techo y del volumen del material a compactar. En dicho método, se tiene que tomar en cuenta el tiempo requerido para desalojar fuertes volúmenes del material excavado, además de estudiar la estabilidad de los cortes que generalmente son de gran altura.

### 1.3.3 Refuerzos de bóvedas y protección contra intemperismo

El refuerzo de bóvedas se utiliza en galerías aisladas, es decir en cavernas angostas, cuyos materiales constituyentes no sufran de intemperismo. Tal refuerzo consiste en utilizar arcos de concreto reforzado o muros de mampostería recubiertos, con el fin de garantizar una mejor resistencia para paredes y techos de las cavidades.

El refuerzo de bóvedas mediante muros de mampostería, reduce el claro libre de cualquier cavidad, soportando una menor magnitud de cargas. Los muros y techos de las galerías, se pueden reforzar mediante el uso de mortero con aditivos expansores y piedras, durante su proceso constructivo se deberá de poner atención en recubrir las paredes y techo mediante muros de tabique, uso de losas precoladas o de concreto lanzado, evitando así la acción del intemperismo sobre la bóveda.

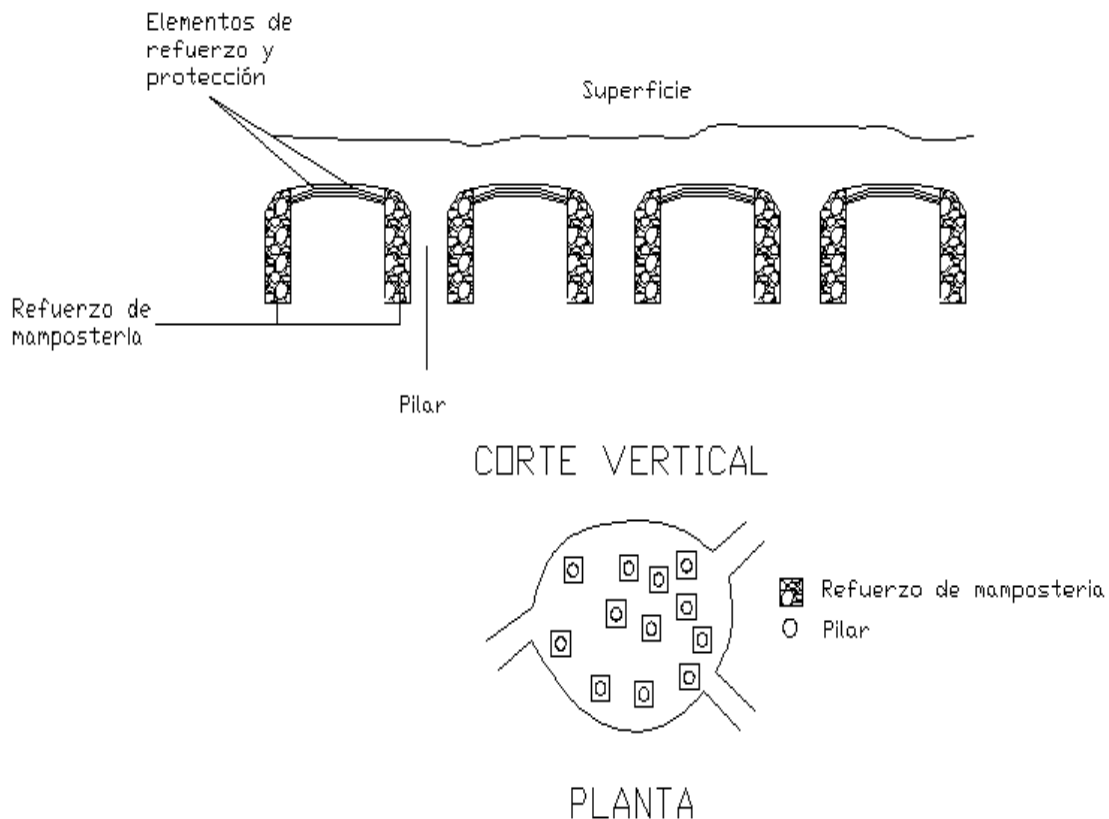


Figura 1.29. Refuerzo de pilares con mampostería para evitar el intemperismo (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)



La segunda opción representa el refuerzo mediante arcos o bóvedas de concreto, que sirve para soportar las cargas debidas a las estructuras y el techo del terreno natural. Para evaluar la carga a que estarán sujetos se pueden utilizar las expresiones 20 y 21 similares para el cálculo de ademes, que aplican el criterio de Terzaghi.

$$P_b = B_1 \frac{\gamma - c}{K \tan \phi} \left( 1 - e^{-K \tan \phi \frac{T}{B_1}} \right) \quad (20)$$

$$B_1 = \frac{1}{2} B + H \tan \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (21)$$

Donde  $P_b$ , es la presión vertical sobre el ademe;  $B_1$ , es la mitad del ancho de la curva de asentamientos;  $B$ , es la anchura de la cavidad;  $H$ , la altura de la cavidad;  $\gamma$ , el peso volumétrico del material;  $c$ , la cohesión del material del techo;  $K$ , coeficiente empírico (que es aproximadamente 1);  $\phi$ , el ángulo de fricción interna del material del techo y  $T$ , el techo. En la figura 1.30 se muestra la distribución de esfuerzos en una galería según Terzaghi.

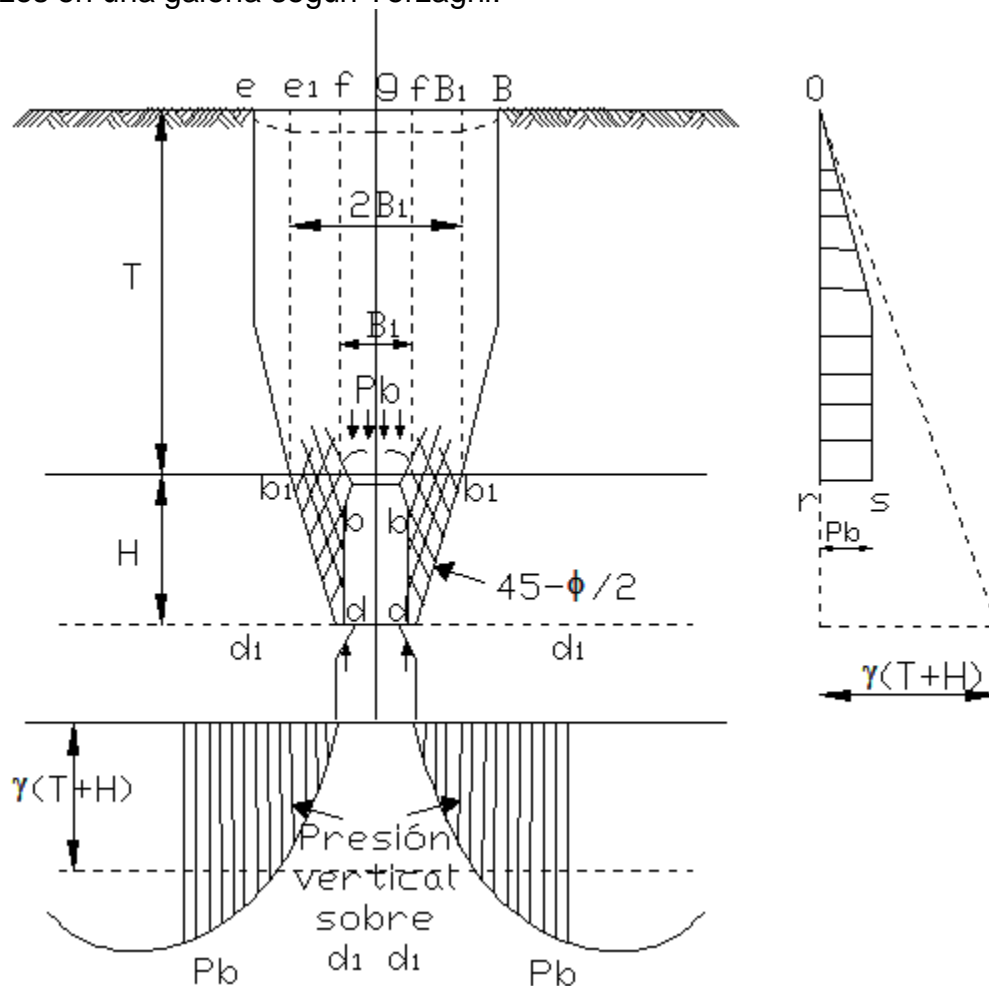


Figura 1.30. Distribución de Presiones en una galería (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

Si la galería se encuentra a una profundidad mayor se puede optar por colocar una malla de acero utilizando concreto lanzado para evitar el fenómeno de intemperismo. La práctica establece que espesores de 5 a 10 cm bastan para evitar el intemperismo en las paredes y techo de la bóveda.

Cada caso se tratará de manera diferente según condiciones y particularidades de cada proyecto, sin embargo el método de refuerzo de bóvedas mediante el uso de arcos, tiene la desventaja de los espesores y cantidad de acero de refuerzo a utilizar, puesto que entre mayor sea la cantidad de acero, más caro será el tratamiento.

#### 1.3.4. Cimentaciones profundas.

Este tipo de cimentación se utiliza cuando las descargas en el subsuelo son de magnitudes enormes por lo que utilizar algunos de los procedimientos anteriores no es adecuado; sin embargo, cuando se opta por implantar cimientos profundos es necesario conocer la geometría y estado de las cavidades, así como la estratigrafía y propiedades mecánicas del subsuelo debido a que, si no se realiza un buen estudio podrían surgir alteraciones en las cimentaciones debido a la migración de cavidades.

Por lo tanto, los procedimientos de cimentación profunda generalmente van acompañados de procesos de tratamiento del terreno tal como rellenos controlados e inyección o muros para reforzar el techo de las minas. En el primer proceso la presión efectiva, será función de la profundidad de la cimentación ( $D_f$ ), si el techo llegara a gravitar sobre el relleno y de  $D_2$  si la pila se desplanta sobre el terreno. Para el segundo proceso la presión efectiva será en función de la profundidad de desplante  $D_1$  bajo el piso.

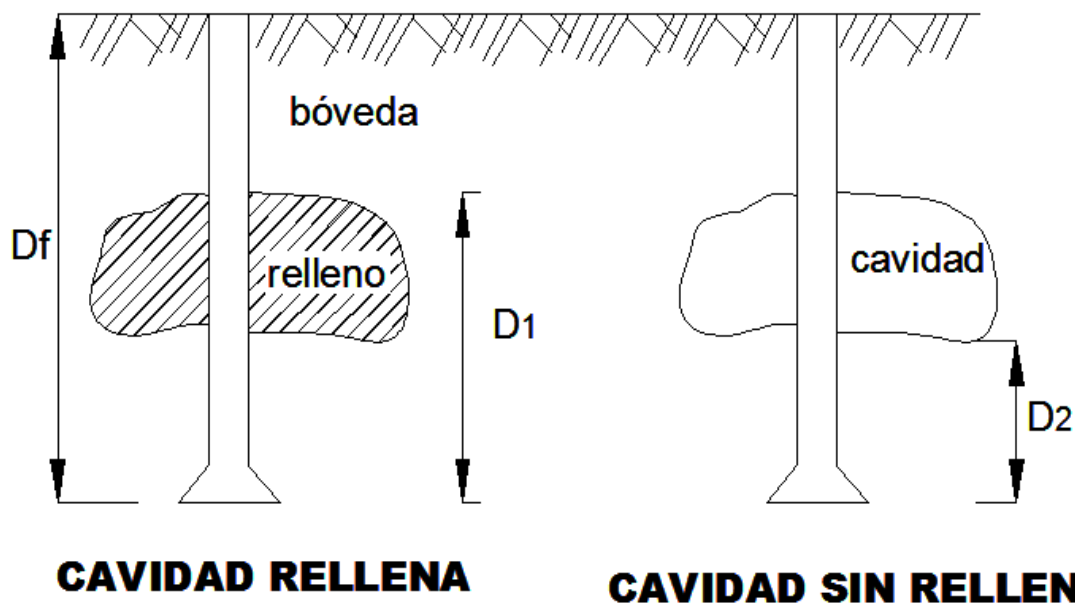


Figura 1.31. Pilas desplantadas en zonas minadas (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

En cada proyecto, se tomará la solución más conveniente; es así el ejemplo de un edificio de dos niveles, ubicado al poniente del Anillo Periférico en las inmediaciones de la segunda sección de Chapultepec, estructurado a base de marcos formado por traveses y columnas de concreto reforzado, donde se decidió construir cimentaciones superficiales y profundas tal como se muestra en la figura 1.32.

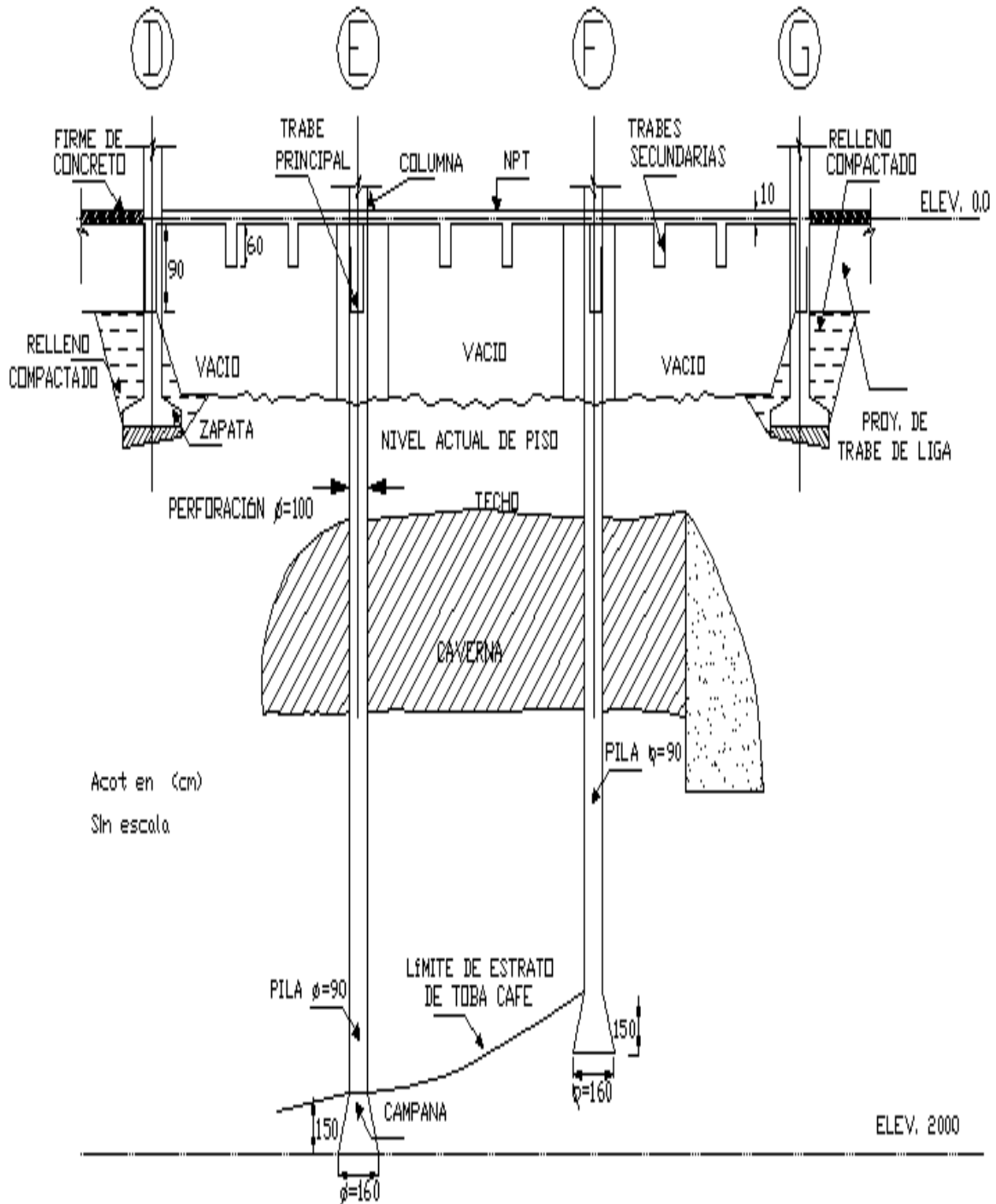


Figura 1.32. Pilas y zapatas desplantadas en zonas minadas (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1992)



1.3.5 Desventajas y aplicación de tratamientos en zonas minadas

Indudablemente cada alternativa para el tratamiento del terreno depende del tamaño del área y de sus cargas; sin embargo, la condición más viable es utilizar relleno e inyección, conforme se menciona en la tabla 1.5.

Tabla 1.5. Utilización viable de las formas de cimentación y tratamiento del subsuelo en áreas minadas (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1976)

Método	Áreas Extensas (Colonias)		Áreas Reducidas (Predios)	
	Construidas	No construidas	Construidas	No construidas
<b>Relleno e inyección</b>	Sí	Sí	Sí <sup>1</sup>	Sí <sup>1</sup>
<b>Excavación y relleno compactado</b>	No <sup>2</sup>	Sí	No	No <sup>3</sup>
<b>Refuerzo y protección contra intemperismo</b>	<b>Con bóvedas o arcos</b>	Sí <sup>1 y 4</sup>	Sí <sup>1 y 4</sup>	Sí <sup>1 y 4</sup>
	<b>Sólo con muros</b>	Sí <sup>4</sup>	Sí <sup>4</sup>	Sí <sup>4</sup>
	<b>Mortero lanzado</b>	No <sup>5</sup>	No <sup>5</sup>	No <sup>5</sup>
<b>Cimientos Profundos</b>	No <sup>1 y 6</sup>	Sí <sup>1 y 6</sup>	No <sup>1 y 6</sup>	Sí <sup>1 y 6</sup>

<sup>1</sup> Es muy costosa

<sup>2</sup> Excepto en el caso de convertir la reconstrucción total de colonias muy precarias, con fuerte deficiencia urbana y carencia de servicios

<sup>3</sup> Excepto que las minas se encuentran a poca profundidad y que el procedimiento no dañe propiedades e inmuebles vecinos

<sup>4</sup> El trabajo se ejecuta fundamentalmente desde el interior de las minas, requiere de accesos seguros para el personal y materiales; solo se recomienda en terrenos poco o nada susceptible a intemperizarse, lo que ocurre con poca frecuencia.

<sup>5</sup> Tiene fuertes limitaciones su uso sería excepcional

<sup>6</sup> Sólo se justifica en construcciones importantes u obligadas.



# CAPÍTULO

## 2.

---

# DEFINICIONES, COMPONENTES Y TIPOS DE MORTERO

## CAPÍTULO 2

### DEFINICIONES, COMPONENTES Y TIPOS DE MORTERO

El mortero fue uno de los primeros materiales utilizados en la construcción, su utilización se remonta a épocas prehistóricas cuando al hombre primitivo le surge la necesidad de tener un refugio o un lugar para protegerse de animales peligrosos, o por que no, también del frío, el calor o las precipitaciones. Las primeras pastas de mortero se realizaron con mezclas de barro, arena y materia vegetal, cuyos materiales esenciales eran el silicato arcilloso, componentes de calcio naturales (carbonatos, sulfatos) y oxihidróxidos de hierro.

Al transcurrir del tiempo, su empleo cambió a un material con fines decorativos (y no como un material de resistencia). Esta técnica, se empezó a utilizar en pueblos neolíticos del Mediterráneo Oriental y en Europa para enlucir pisos y muros, de aquí nace la idea que el mortero es el resultado del sentido estético del hombre.

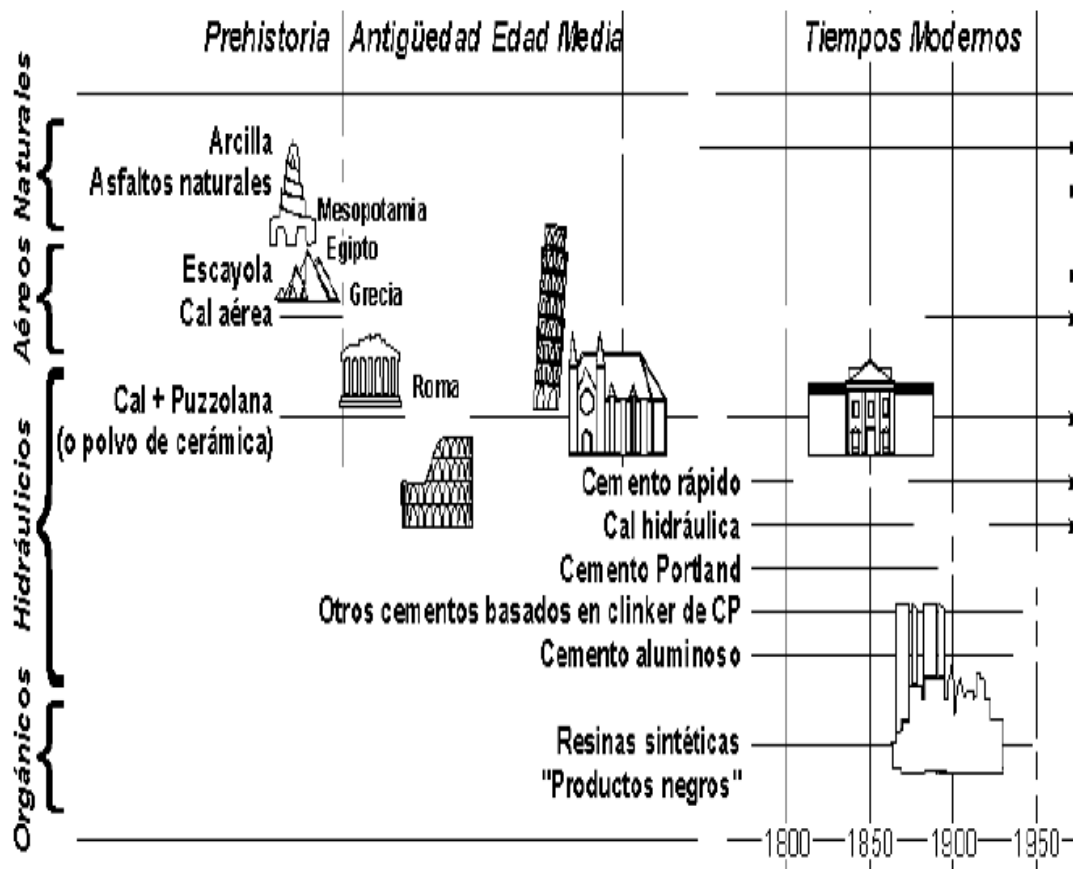


Figura 2.1. Materiales aglomerantes utilizados a lo largo de la historia (<http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA04.htm>)

Después llegaron los mesopotámicos y egipcios, culturas que fueron muy diferentes entre sí, puesto que los primeros construyeron sus templos, palacios y tumbas con elementos de barro y ladrillo, los segundos siguieron utilizando más la

piedra como principal elemento constructivo. La estabilidad estructural de los monumentos mesopotámicos se debe, en gran medida, a morteros de arcilla fluida mezclada con tierra o arena y otros materiales naturales como sustancias bituminosas de tipo asfáltico, que unían un ladrillo con otro. Los egipcios en cambio no usaban ninguna clase de mortero para unir sus piedras, en lugar de ello usaban un método que denominaban "entramado" el cual consistía en unir tales piezas con anclajes y encajes, tales estructuras (denominadas arquitrabadas) al no tener ninguna unión entre sí, se justificaban puesto que los empujes que generaban eran verticales, asegurando una buena resistencia en las estructuras.

Después del uso de los morteros como un material estético, se inició su desarrollo como un material de unión. Esta manera de utilizar el mortero vino junto con la estabilidad requerida en los edificios, es así como surgió la cal hidráulica o el mortero puzolánico que aseguró la unión y revestimiento entre los elementos que formaban las paredes, y como elemento principal para la fabricación del concreto. Este tipo de mortero era mejor que el utilizado a base de cal aérea porque al fraguar bajo el agua obtenía mejores propiedades mecánicas para su uso estructural. En ese entonces los romanos desarrollaron una gran variedad de métodos conocidos como "OPUS"

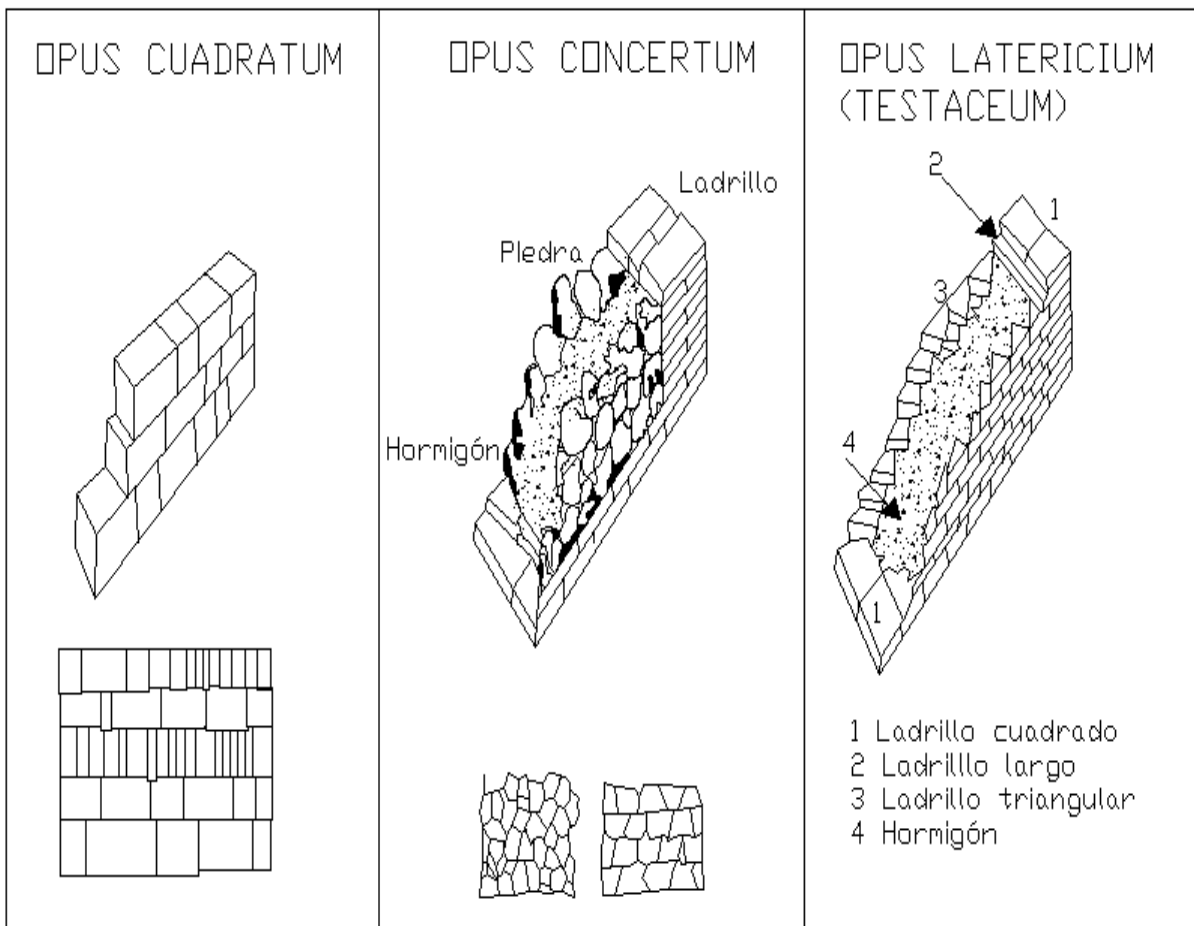


Figura 2.2. OPUS En la arquitectura Romana  
(<http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA04.htm>)

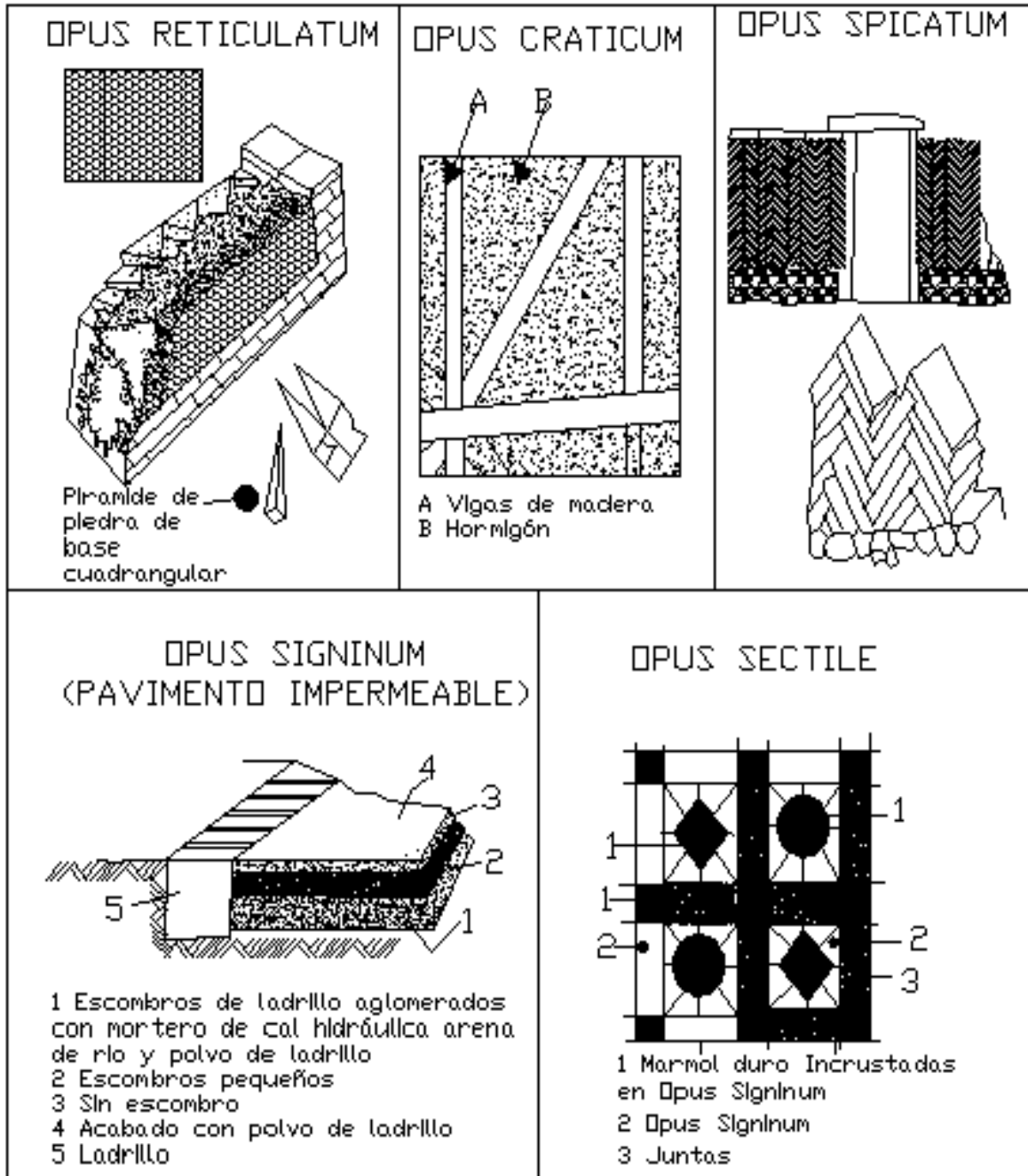


Figura 2.3. OPUS En la arquitectura Romana  
<http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA04.htm>

Sin embargo, no fue sino hasta el siglo XIX cuando James Parker y Joseph Aspdin patentan el Cemento Pórtland y lo comercializan en todo el Mundo, mostrando su gran dureza y sus altas propiedades al mezclarse con los elementos del mortero.

Por lo tanto, la historia de los morteros está íntimamente ligada al descubrimiento de los agentes aglomerantes naturales y artificiales. En la actualidad, el mortero se define como una mezcla natural o artificial, que se compone de materiales inertes





o arenas de distinta composición granulométrica, de aditivos, agua y aglomerantes, mismas que imparten dos características esenciales a la mezcla como son la plasticidad y la elasticidad. La primera permite el moldeado antes del secado (por lo que es una buena solución para el relleno de cavidades), mientras que la segunda confiere al secarse, cohesión y resistencia mecánica al conjunto. Un tercer componente de los morteros son los aditivos que varían dependiendo del uso del mortero y de los cuales se hablará posteriormente.

## 2.1 Clasificación de morteros de acuerdo a su composición

**Mortero simple:** Es un conglomerado, que requiere una cantidad de agua necesaria para formar una masa pastosa, dentro de su composición no se usa la arena.

**Mortero de arcilla:** Está formado por agua y arcilla, este tipo de mortero se usa en trabajos de poca importancia y se aplica en trabajos de mampostería y adobes

**Mortero de yeso:** Existen diferentes clases, están en función de las propiedades de los diferentes tipos de yeso. Se usa para enlucir o revocar paredes y ladrillos aplicándose en espacios interiores.

Esta clase de mortero presenta inconvenientes para utilizarlo en el relleno de cavidades. Para empezar los morteros de yeso son relativamente solubles al agua, es decir, sus componentes a base de yeso son fácilmente solubles, por lo que provoca graves daños si se utiliza en espacios exteriores. Son muy poco resistentes debido a que necesitan gran cantidad de agua para su fraguado, tal es su baja resistencia, que para mejorar sus propiedades mecánicas, en la antigüedad, se añadían pelos de distintos animales o fibras (los cuales debían de ser gruesos y colocarse entre 4 y 8 kg por metro cúbico), paja, caña y hierba molida.

**Mortero de cal aérea:** Son aquellos que tienen la característica de endurecer bajo la influencia del aire, es decir, se seca y endurece por un proceso de precipitación y decantación.

**Mortero de cal hidráulica:** Son aquellos que tienen la característica especial de endurecer o fraguar bajo el agua. Es el más utilizado en las obras de albañilería debido a su gran manejabilidad y aunque generalmente se le añade algo de cemento, son morteros de gran plasticidad, flexibles, grasos y pegajosos.

**Mortero de Cemento Pórtland:** Se utiliza en trabajos que requieren lograr una mayor resistencia. Esta clase de morteros necesitan un volumen de agua entre un 16% a 25% del volumen de los materiales y está constituido por un esqueleto de granos de arena, cuya adherencia perfecta consiste en una fina película de pasta de cemento.



La cantidad de cemento utilizada, debe ser lo necesario para lograr la adherencia entre sus componentes, puesto que si tal cantidad aumenta, esta tiende a ser muy resistente, muy costosa y con alta retracción al secado (lo que trae como resultado el agrietamiento de la pasta); en cambio si la mezcla es muy pobre en aglomerante, ésta se hace áspera e intrabajable, porque las partículas de arena rozarán entre sí.

## 2.2 Clasificación de morteros de acuerdo a su módulo de finura

De acuerdo al módulo de finura los morteros se clasifican según la tabla 2.1

Tabla 2.1. Módulo de Finura (Sánchez, 1998)

Tipo de Mortero	Módulo de finura	Usos
Morteros Finos	1.8-2.3	Aplanados
Morteros Medios	2.3-2.7	Pegado de mampostería
Morteros Gruesos	2.7-3.2	Pisos de rellenos de mampostería

## 2.3 Clasificación de morteros de acuerdo a su resistencia a la compresión

Mortero de revestimiento: Éste se utiliza para emparejar las unidades de mampostería.

Mortero utilizado para el relleno de oquedades: Tiene la finalidad de rellenar espacios en tabiques o muros con el objeto de aumentar la sección resistente.

Las resistencias para mezclas de mortero hechas con cemento Pórtland pueden variar de acuerdo a la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Resistencia a la compresión (Sánchez, 1998)

MPa	Kg/cm <sup>2</sup>	p.s.i
7	70	1,000
10.5	105	1,500
14.0	140	2,000
17.5	175	2,500
21.0	210	3,000
24.5	245	3,500
28.0	280	4,000
31.5	315	4,500
35.0	350	5,000

## 2.4 Clasificación de morteros de acuerdo a su método de fabricación

Los morteros pueden ser predosificados o dosificados según las necesidades de cualquier proyecto clasificándose según el cuadro sinóptico de la figura 2.4.

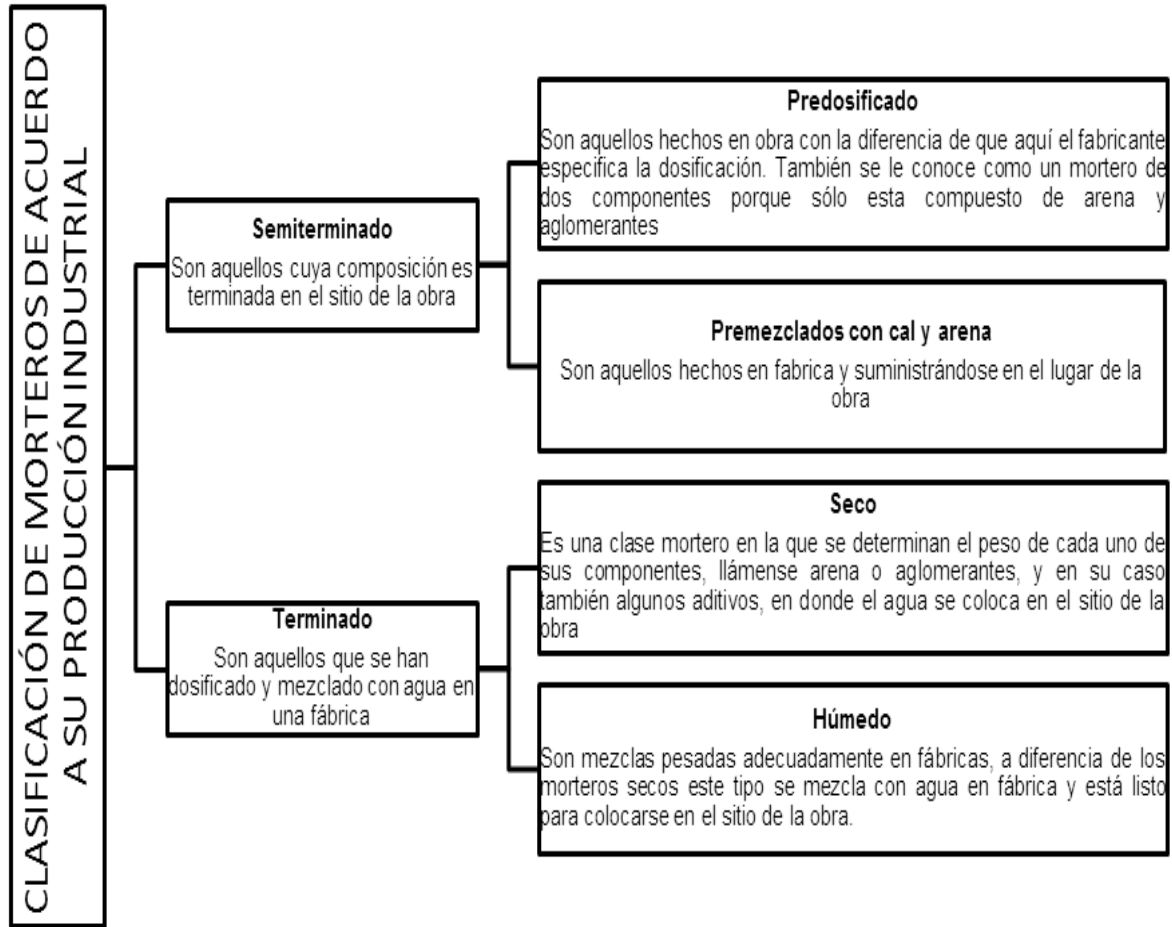


Figura 2.4. Clasificación de morteros de acuerdo a su producción industrial

## 2.5 Clasificación de morteros según el terreno a inyectar

El proceso de inyección impone un fluido con poca viscosidad y rigidez para facilitar su penetración, pero al mismo tiempo impone una mezcla, la cual deberá asegurar una resistencia mecánica o impedir el paso del agua cuando se trate de impermeabilizar. Por lo que en un sistema de inyección y dependiendo del terreno a inyectar se dispone de una gran variedad de morteros que se obtienen de productos básicos como cemento, arena, silicato o betún, utilizados aisladamente o en combinación.

El diagrama de la figura 2.5 muestra esquemáticamente la clasificación de morteros según el terreno a inyectar; cabe mencionar que la siguiente clasificación envuelve propiedades como lo son la viscosidad, resistencia y decantación cuyo proceso de elaboración se especifica dentro del capítulo 3.

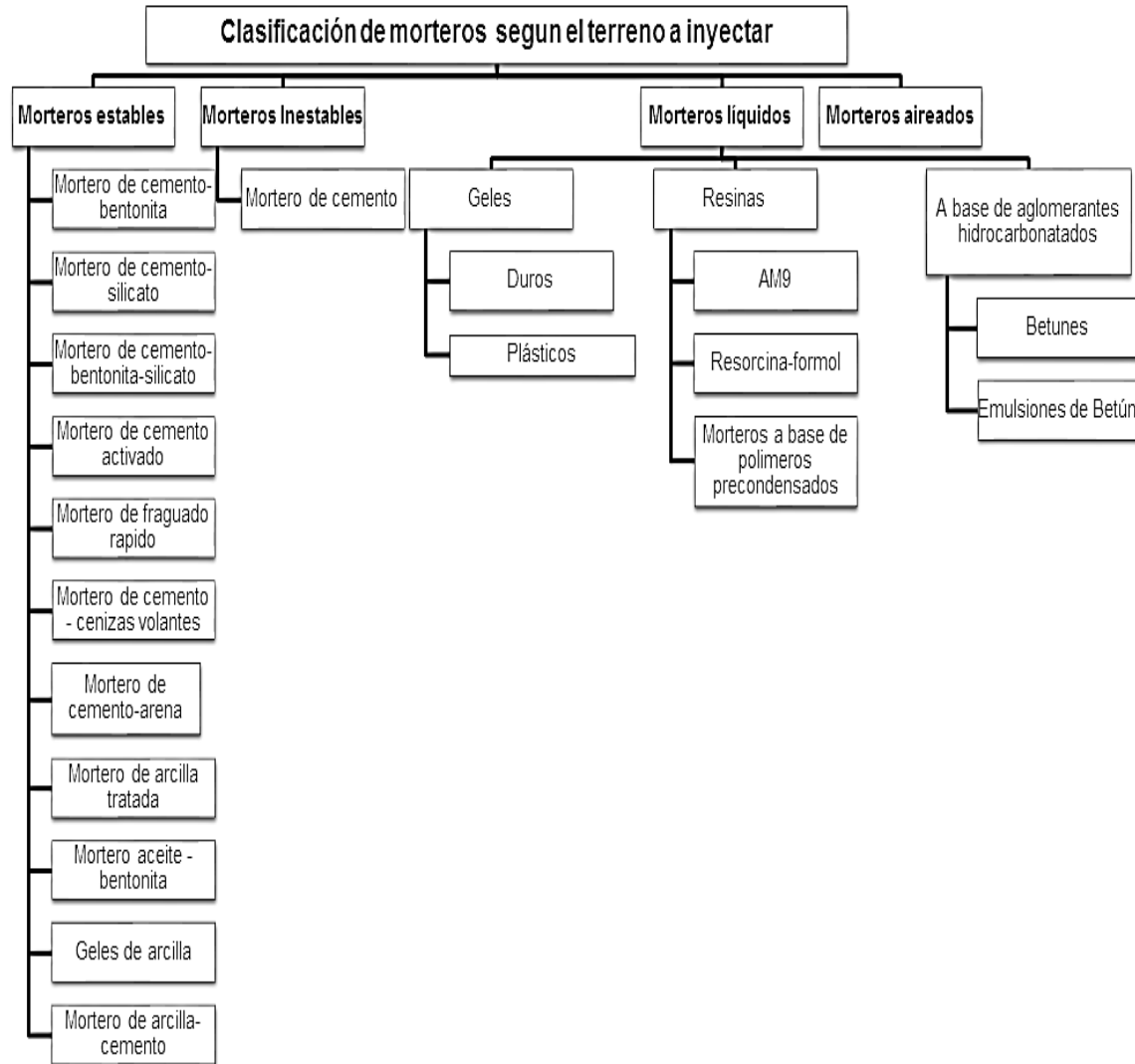


Figura 2.5. Clasificación de morteros según el terreno a inyectar

### 2.5.1 Morteros inestables

Conocidos también como suspensiones, son aquellos con una relación C/A 1:10, tienen poca resistencia, pero son utilizados con muy buenos resultados cuando se requiere obturar o taponar fisuras.

La agitación constante y las altas presiones de inyección en mezclas inestables serán necesarias para que no se presente la sedimentación en las mezclas, en caso contrario ésta obturará los tubos y retrasará el proceso de inyección.

Los morteros inestables más comunes son los de cemento y agua muy diluidos. C. Caron (1953) investigó 18 morteros de diferente tipo de cemento con una dosificación 1/10 para el anclaje de cables, estudiando con la aguja de Vicat su velocidad de fraguado y con una decantación durante 24 hrs sobre una altura total de 45 cm, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 2.3.



Tabla 2.3. Clasificación de morteros inestables (Cambefort, 1968)

Cemento		Altura decantada (%)	Fraguado en un día	Densidad	Resistencia en 15 días Kg/cm <sup>2</sup>
A		14.4	Comienzo del fraguado	1.41	4.8
B		8	Final del fraguado	2	42
C	250/315	11.1	Final del fraguado s/ 1/2 Comienzo del fraguado s/ 1/2	1.72	35
D	230/215	18.9	Comienzo del fraguado	1.36	3
E	250/315	8.9	Final del fraguado s/ 9/10	1.57	30
E	160/250	8.9	Comienzo del fraguado s/ 9/10	1.60	22
E	100/160	12	Final del fraguado s/ 1/4 Comienzo del fraguado s/ 3/4	1.50	15.6
F	250/315	17.8	Comienzo del fraguado	1.44	4.8
B1	250/315	20	Comienzo del fraguado	1.35	2.1
G	160/250	11.1	Final del fraguado s/ 1/2 Final del fraguado s/ 1/2		20
H	250/315	12.2	Final del fraguado s/ 9/10 Comienzo del fraguado s/ 9/10	1.52	24
I	250/315	15.6	Comienzo del fraguado	1.34	26
J	250/315		No fraguo		
J	160/250	14.4	Comienzo del fraguado	1.41	14.5
K		21.6	Final del fraguado s/ 9/10 Comienzo del fraguado s/ 1/10	1.57	48
L	250/315	8.9	Final del fraguado s/ 1/2 Final del fraguado s/ 1/2	1.76	75
L	315/400		No fraguo		
M		8.9	Final del fraguado	1.97	50

Los resultados obtenidos muestran que para un porcentaje de decantación dado la resistencia aumenta después de 15 días, excepto para las muestras A, D, F, B1

### 2.5.2 Morteros estables

Los morteros de arcilla fueron las primeras suspensiones estables que aparecieron en la historia de las inyecciones. A diferencia de los morteros inestables esta clase de suspensiones no presentan sedimentación durante el proceso de inyección.

#### *Morteros de cemento-bentonita*

Contienen pequeñas adiciones de bentonita (alrededor del 2 al 4 % del peso del cemento) las cuales disminuyen la viscosidad, sedimentación y el límite de resistencia al corte de los morteros a base de cemento, tal como se muestra en las gráficas de la figura 2.6.

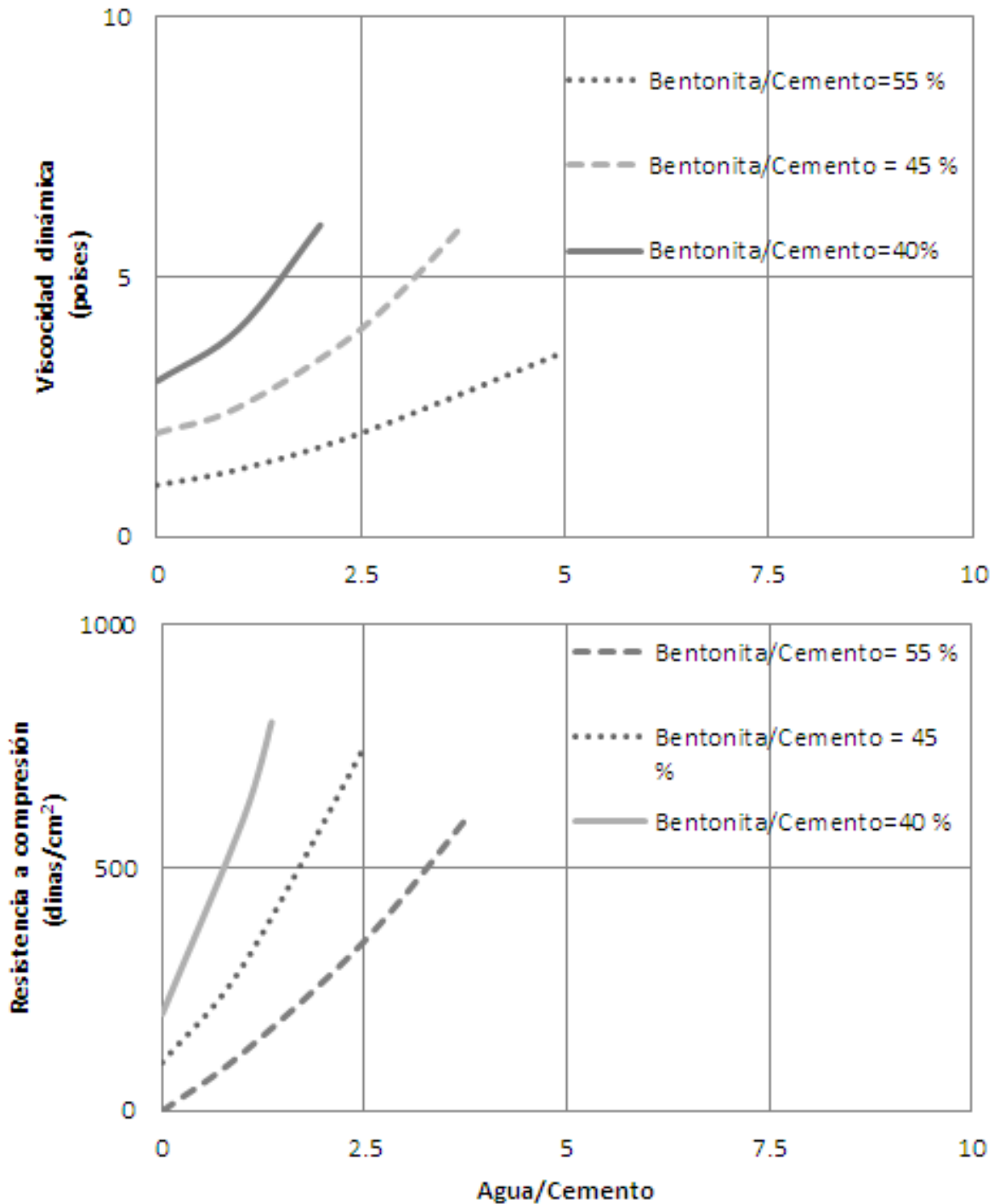


Figura 2.6. Influencia del porcentaje de bentonita en la viscosidad y el límite de resistencia al corte en morteros con una dosificación de agua constante (Cambefort, 1968)

A continuación se citan las resistencias a compresión sobre probetas cilíndricas de 14 mm de diámetro, con el 2% y el 4% de bentonita de las cuales se obtuvieron los resultados obtenidos en las tablas 2.4 y 2.5, así como en la gráfica de la figura 2.7.

Tabla 2.4. Mortero con el 2% de Bentonita (Cambefort, 1968)

C/A	Hundimiento de la probeta en cm	Decantación (%)	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	
			En 7 días	En 28 días
1	10.4	7.0	30	54
1.1	10.1	4.0	36	78
1.2	9.8	2.5	30	78
1.3	9.6	1.5	49	83
1.4	9.3	0	63	102
1.5	9.0	0	63	128
1.7	8.4	0	101	175
2	7.1	0	133	141

Tabla 2.5. Mortero con el 4% de Bentonita (Cambefort, 1968)

C/A	Hundimiento de la probeta en cm	Decantación (%)	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	
			En 7 días	En 28 días
1	9.2	0	26	53
1.1	9	0	39	78
1.2	8.6	0	39	73
1.3	8	0	68	104
1.5	7.4	0	72	143
1.7	4.3	0	124	200

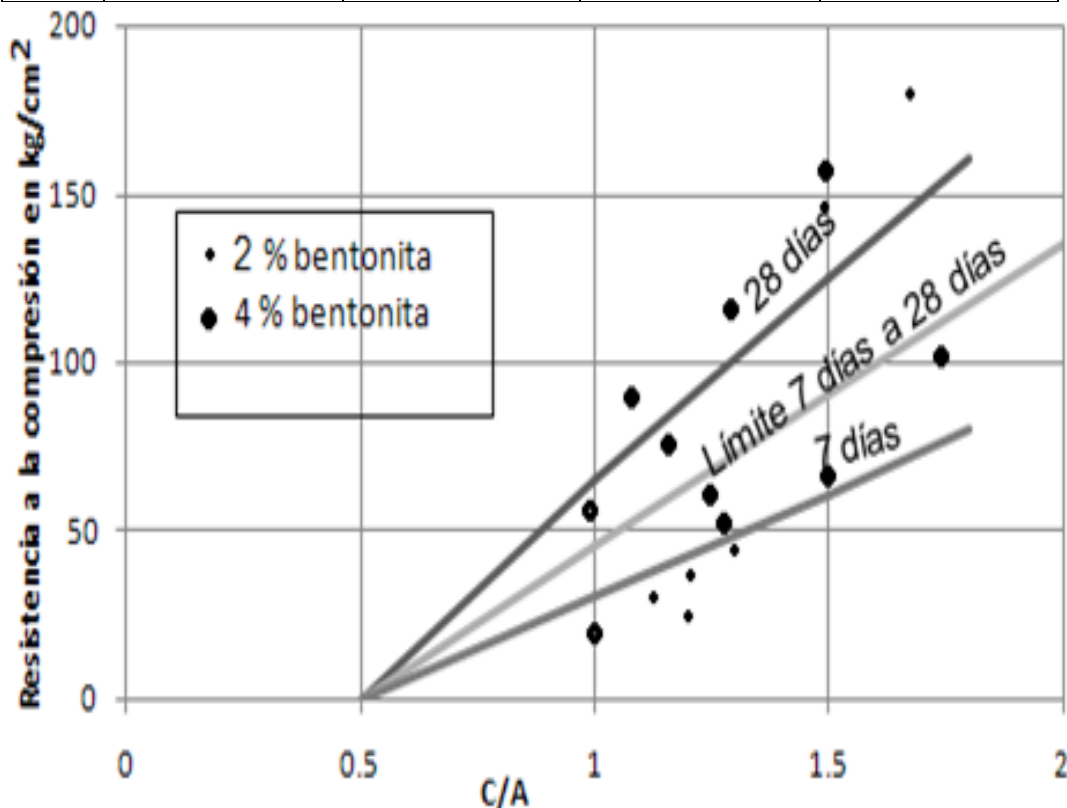


Figura 2.7. Influencia de la relación Cemento/Agua en la resistencia a compresión de un mortero de cemento con adición de bentonita (Cambefort, 1968)



*Morteros de cemento-silicato*

La adición de silicato de sodio a un mortero de cemento incrementa su rigidez la cual es mejor en cuanto mayor es la dosificación del cemento, aunado con el tiempo de reposo. Estos morteros no son homogéneos, es decir forman mezclas con grumos y son muy espesas.

Si se tiene un cemento Portland normal, las cantidades de silicato de sodio a utilizar son las siguientes

- a) 10 a 20 cm<sup>3</sup> por litro de mortero de 1/1
- b) 5 a 10 cm<sup>3</sup> por litro de mortero de 1.5/1
- c) 2 a 5 cm<sup>3</sup> por litro de mortero de 2/1

Si estas dosificaciones aumentan los morteros pierden sus resistencias y pueden dejar de ser económicos.

El mortero de cemento-silicato de sodio, acusa una sedimentación muy rápida del cemento, para evitarla basta con añadir 1 ó 2 % de bentonita la cual mantiene el cemento en suspensión.

*Morteros de cemento-bentonita-silicato*

La adición de bentonita a un mortero de cemento retarda su fraguado, sin embargo, cuando se le añade silicato a un mortero de cemento se acelera el fraguado pero produce un mortero espeso. Si se combinan estos productos con un cemento de dosificación Cemento/Agua =2/1 y se somete a compresión a través de tres ensayos utilizando probetas cubicas de 5 cm de arista se obtienen morteros con elevadas resistencias y decantaciones mínimas, tal como se ve en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Morteros con bentonita y silicato de sodio (Cambefort, 1968)

Adición por litro	Viscosidad en el cono Prepakt (s)	Decantación (%)	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )		
			2 días	7 días	28 días
Bentonita, 18 g Silicato, 5 cm <sup>3</sup>	19	1.8	41	126	320
Bentonita, 40 g Silicato, 5 cm <sup>3</sup>	18	2.0	42	161	292

*Morteros de cementos activados*

Los morteros de cemento activados son aquellos con elevadas dosis de cemento y una ligera sedimentación o nula. Presentan también la particularidad y es que no son deslavables por lo que los hacen productos muy interesantes. Cabe





mencionar que un mortero de cemento con una dosificación A/C entre 2/1 y 2.3/1, está en el límite de la inyectabilidad, por lo que utilizar grandes cantidades de cemento provocaría mezclas inyectables. Dado de esta manera la adición de elevadas cantidades de cemento no es una opción a considerar, excepto si se añade a la mezcla en dosificaciones pequeñas, dispersándolo a través de medios químicos, físicos y mecánicos.

- a) Dispersión del cemento por vía química. Permite obtener morteros de dosificación pequeña y sedimentación prácticamente nula, mediante el empleo de productos coadyuvantes que proporcionan a la mezcla plasticidad, fluidez y aumento de volumen, tales como plastificantes y expansivos.

Tabla 2.7. Productos que permiten dosificaciones pequeñas de cemento en mezclas estables (Cambefort, 1968)

Producto coadyuvante	Función
Fluidificantes	Impiden la hidratación del cemento. El comportamiento de estos productos es variable ya que tanto pueden aumentar al mismo tiempo la viscosidad y la rigidez o solamente pueden reducir esta última considerablemente, por lo que tales productos deben evitarse lo más que se pueda
Expansivos	Aumentan el volumen del mortero antes de su fraguado reduciendo la sedimentación del mismo. Estos productos generalmente están constituidos por aluminio, el cual al reaccionar con el cemento desprende burbujas de hidrógeno, muy pequeñas y numerosas

Tabla 2.8. Influencia de expansivos y fluidificantes en mezclas de cemento agua (Cambefort, 1968)

Naturaleza y dosificación Cemento/Agua de mortero	Expansión (%)	Decantación (%)	Variación del volumen (%)
Cemento B 2.3/1 + G	2.3	2.3	0
Cemento B 2.1/1 + G	2.3	3.3	1
Cemento E 2.5/1 + G	2	2	0
Cemento F 2.3/1 + G	2.5	0.5	2
Cemento G 2.2/1	0	4	4
Cemento G 2.5/1 + G	2.4	1.5	0.9
Cemento H 2.1/1	0	4	4
Cemento H 2.3/1 + G	4	3	1
Cemento H 2.5/1 + F	0	3	3
Cemento L 2.5/1 + G	3	2	1
Cemento M 2.5/1	0	2.5	2.5
Cemento M 2.5/1 + G	2.5	2.5	0

G= Expansivo F= Fluidificante

En la tabla 2.8 se puede notar que el uso de estos productos permite obtener decantaciones mínimas en comparación con morteros simples.

- b) Dispersión del cemento por vía física: Este tipo de dispersión tiene un gran interés teórico debido a que no acusa sedimentación, pero normalmente no se aplica en obras. Descubierta y patentado con el nombre de Thermocol, consiste en recalentar el mortero de cemento a una temperatura entre  $25^{\circ}$  a  $35^{\circ}$ , lo cual es suficiente para tener una relación C/A = 2/1 a 2.2/1. Entre más fuertes sean las dosificaciones del cemento más altas serán las temperaturas a alcanzar; sin embargo, cuando aumenta la temperatura, la decantación disminuye, pero la viscosidad y la rigidez aumentan.
- c) Dispersión por vía mecánica: Conocida también como Colgrout y siendo la primera utilizada, se obtiene haciendo pasar un mortero de cemento convenientemente dosificado por un mezclador que provoca una agitación muy violenta. Esta agitación desprende los granos de cemento adheridos a la superficie, por lo que la película de hidrato es eliminada precipitando el estado coloidal. Con este tipo de tratamiento la decantación es mínima y la viscosidad disminuye al hacer pasar la mezcla por el cono Prepakt de 24 s a 12 s. La viscosidad a través del cono Marsh, así como sus características se tratan más adelante en el capítulo 3.

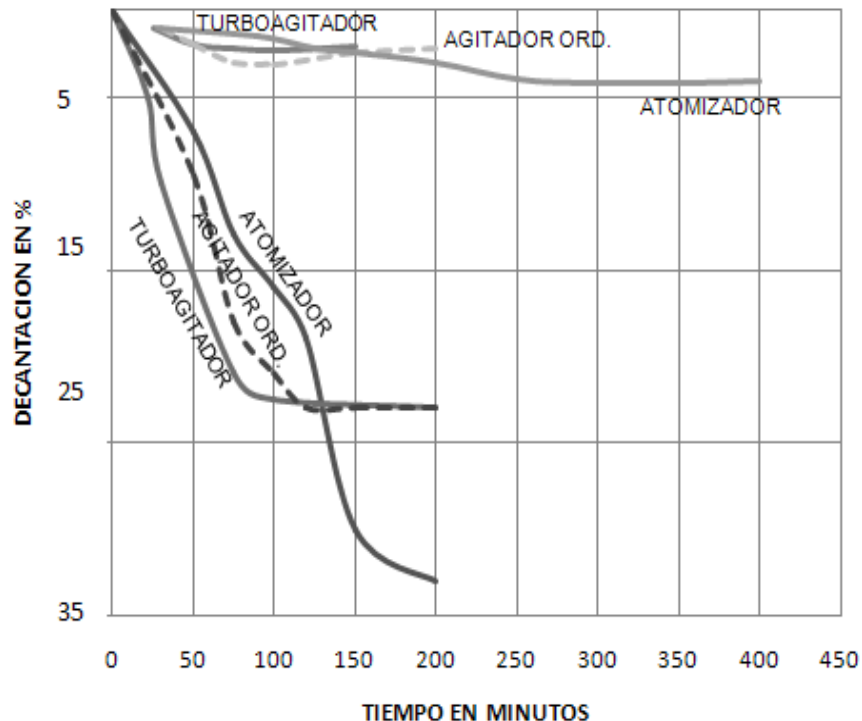


Figura 2.8. Influencia de la agitación violenta en el porcentaje de decantación (Cambefort, 1968)

La resistencia al corte aumenta con este tipo de tratamiento, ya que cuando se realizó un mortero 2/1 con un mezclador ordinario dió una resistencia de  $101 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que con un mortero realizado con un turbomezclador se obtuvo una resistencia de  $133 \text{ kg/cm}^2$  (Cambefort, 1968).



*Morteros de fraguado rápido (15 min a 30 min)*

Se emplean para reducir fugas del mortero, ofreciendo a la vez buena resistencia mecánica y un fraguado relativamente rápido, mismo que se da a través de:

1. Dosificar convenientemente un acelerador de fraguado
2. Mezclar cemento y agua
3. Utilizar aserrín de madera seco, que aumenta la viscosidad del mortero, ya que absorbe su agua, haciendo pastosa la mezcla y deteniendo su circulación. Su proporción expresada en litros puede variar del 5 al 7% del peso del cemento.

*Mortero cenizas volantes*

La obtención de morteros económicos se puede dar reemplazando una parte de cemento por hollín, el cual tiene propiedades puzolánicas. Es un producto abundante, barato y muy adaptable para la elaboración de morteros de inyección

La viscosidad se modifica un poco por la adición de hollín relativamente importante, pero si su dosificación cemento + hollín/ agua es constante no perjudica en exceso a la misma. Como ejemplo se citará un mortero 1.5/1 con las viscosidades indicadas en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Viscosidad de un mortero cemento-cenizas volantes (Cambefort, 1968)

<b>%Cemento</b>	<b>% Cenizas</b>	<b>Circulación en el viscosímetro (s)</b>
100	0	9.4
90	10	9.4
80	20	9.6
70	30	10.1
60	40	13.1

Además, otras ventajas del uso de las cenizas es que mejora la sedimentación de los morteros y aumenta la resistencia a la rotura (datos basados en medidas realizadas en probetas de 5 cm conservadas en agua) lo cual se debe a las propiedades puzolánicas de las cenizas.

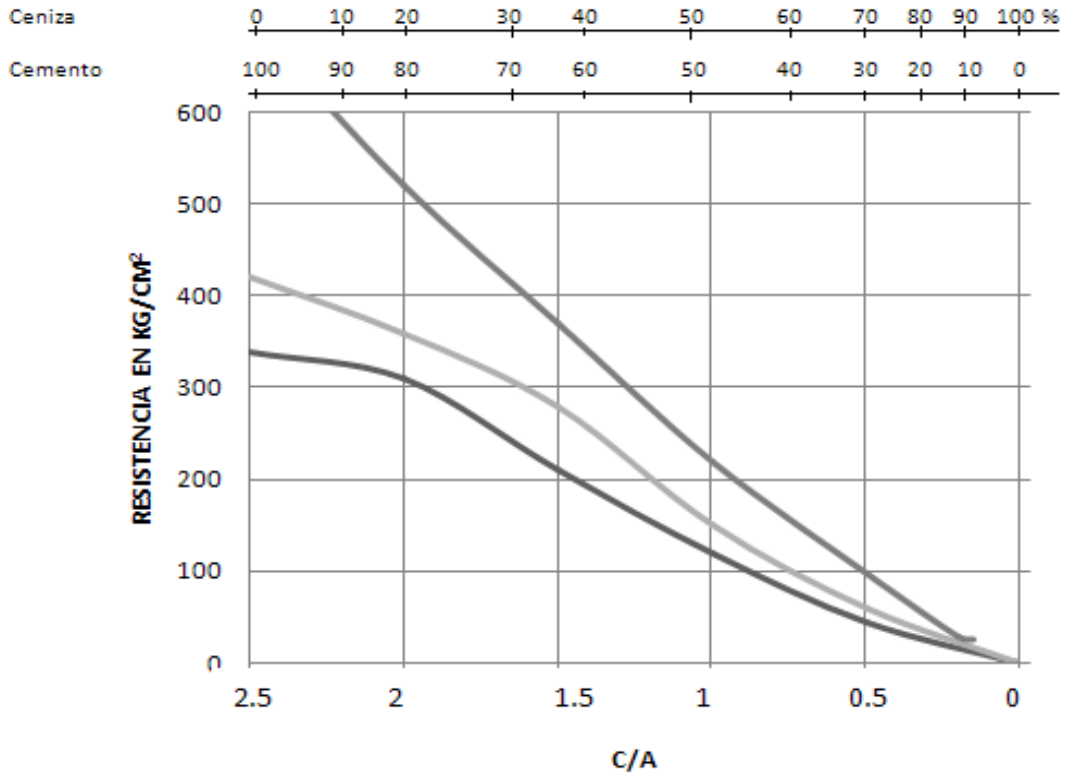


Figura 2.9. Resistencia a la compresión de un mortero Cemento/Agua variando su porcentaje de cenizas volantes (Cambefort, 1968)

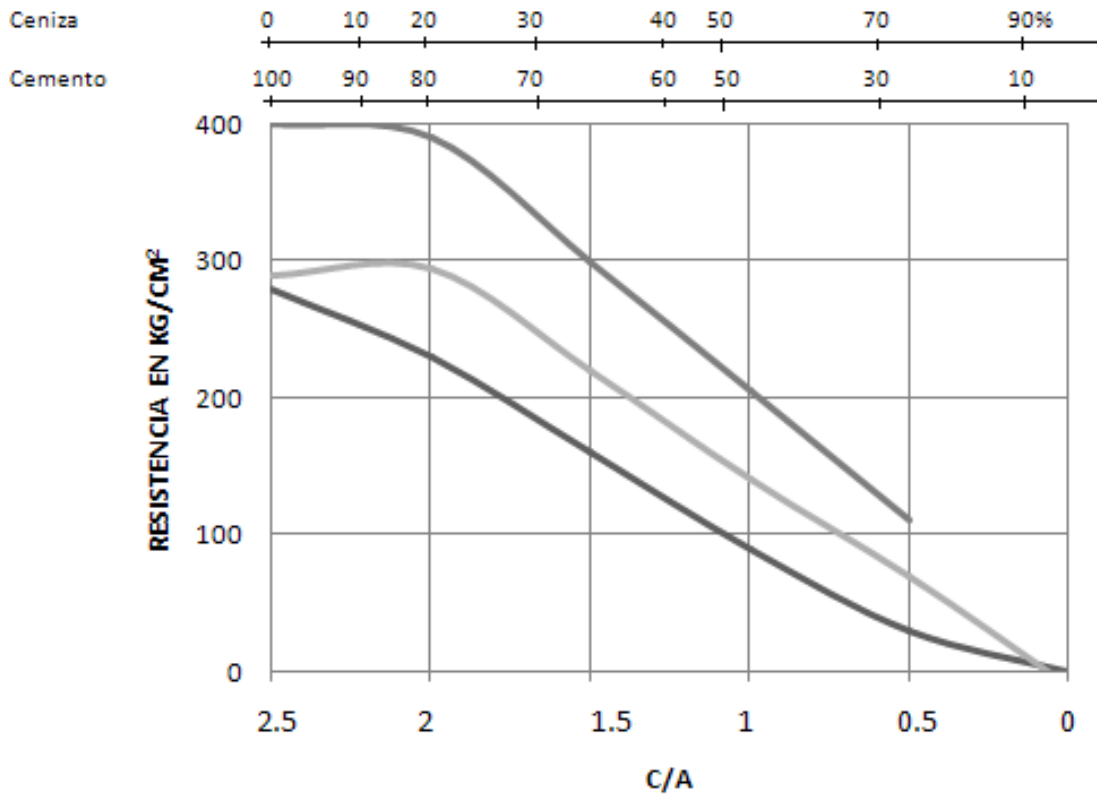


Figura 2.10. Resistencia a compresión de un mortero Cemento/Agua (Cambefort, 1968)



*Morteros de cemento arena*

La adición de arena a una mezcla de cemento da un mortero sólido, evitando la aparición de grietas; sin embargo, cuando se adiciona arena en una mezcla crece el volumen de agua lo que a su vez da una disminución de la resistencia mecánica.

Tabla 2.10. Disminución de la resistencia en morteros al aumentar el contenido de arena (Cambefort, 1968)

Composición en partes			Viscosidad en el cono Prepakt (s)	Decantación (%)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	
Cemento	Arena	Agua			2 días	7 días
3	0	1	15	0.7	355	443
3	3	1.3	14.8	0.8	330	386
3	6	1.9	15	0.8	280	310
3	9	3	13.8	3.5	142	129

*Morteros de arcilla tratada*

Son suspensiones viscosas de arcilla en agua a la cual se le adicionan productos químicos para permitir una inyección satisfactoria. Estos tipos de mortero; no tienen ninguna resistencia por lo que sólo se utilizan en impermeabilizaciones y para obturar los intersticios del suelo por su composición de granos muy pequeños

*Morteros de aceite bentonita*

Se usan para realizar taponamientos o empotramientos en las perforaciones sobre todo cuando se utilizan en compañías petrolíferas. Esta clase de mortero se utiliza únicamente cuando el suelo no está sumergido para que la bentonita no se hinche en el curso de la inyección. Absorbiendo una parte del agua del suelo se forma un gel que impermeabiliza fisuras

*Geles de arcilla*

Permiten la impermeabilización de un medio cualquiera, sus propiedades son análogas a los geles obtenidos con productos químicos y a los morteros de arcilla pura con contenidos de arcilla de 500 a 600 g por litro

*Morteros de arcilla-cemento*

Si se le agrega a las suspensiones de arcilla cemento, que no sea bentonita, pueden formarse mezclas con una resistencia mecánica capaz de bloquear el deslavado. La adición de arcilla aumenta la resistencia al corte y la viscosidad de los morteros con una dosis de agua constante, pero si ésta aumenta, la viscosidad y la resistencia al corte disminuyen.

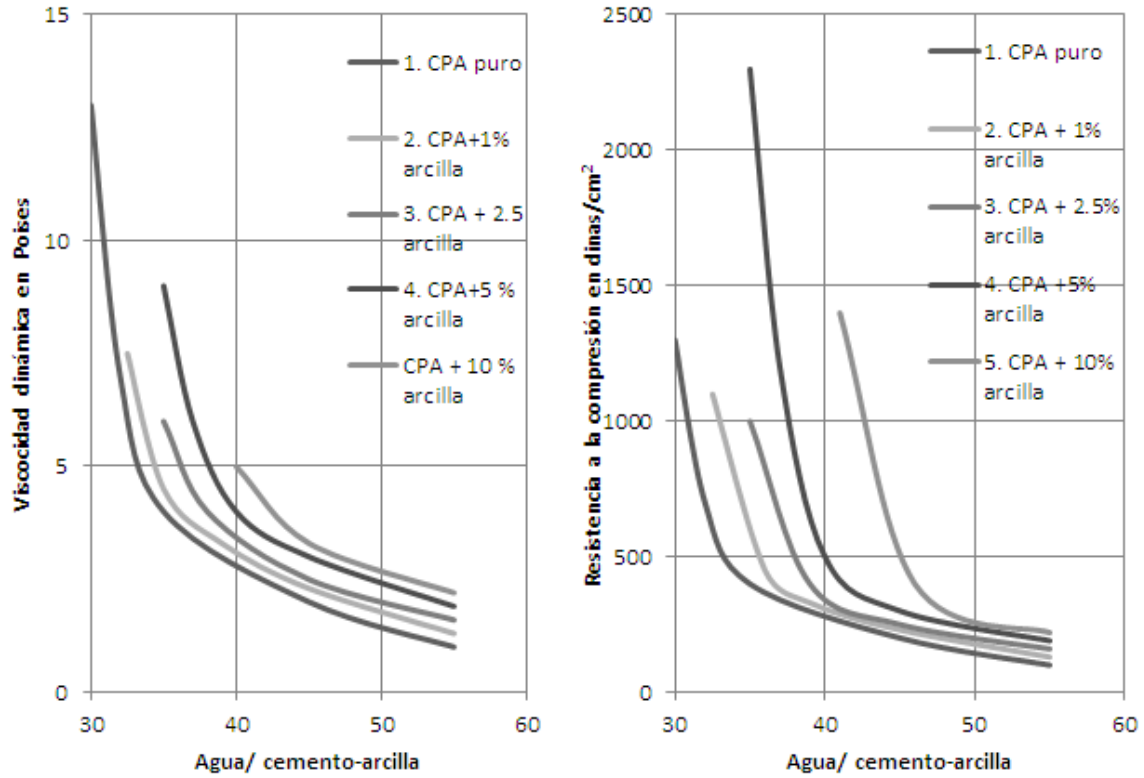


Figura 2.11. Influencia de la dosificación de agua en la viscosidad y en el límite de resistencia al corte de un mortero de dosificación cemento + arcilla constante (Cambefort, 1968)

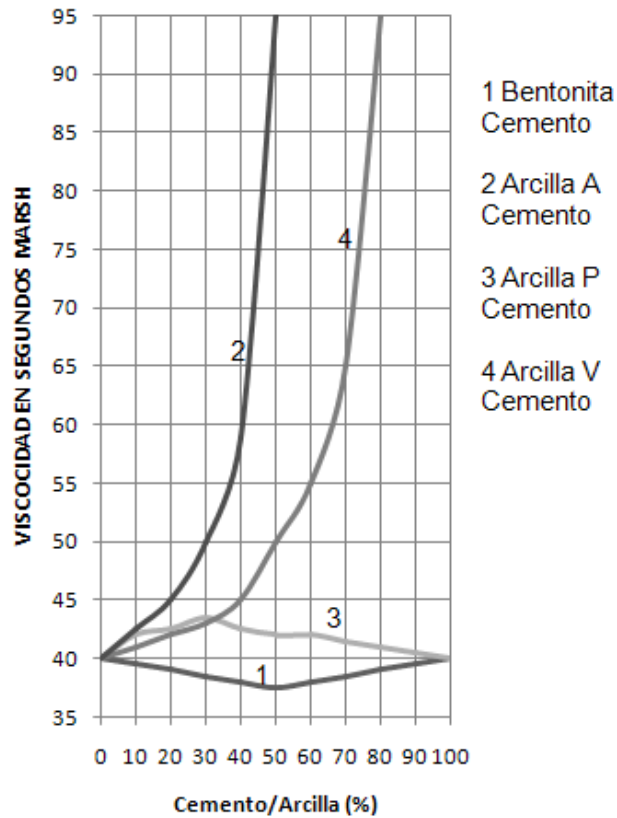


Figura 2.12. Viscosidad de diferentes morteros de arcilla (Cambefort, 1968)

Fluidez: Para obtener una fluidez adecuada en morteros arcilla cemento, este último deberá estar débilmente dosificado, excepto en el caso de los morteros cemento bentonita ya que esta última es más coloidal que las arcillas.

Si aun así un mortero no tiene gran fluidez (es muy viscoso) se le pueden añadir materias secas, obteniendo un mortero inestable de mala calidad. Es así el caso de silicato de sodio, que generalmente espesa al mortero, pero si se le añade en pequeñas proporciones, la velocidad puede mantenerse o disminuirse ligeramente.

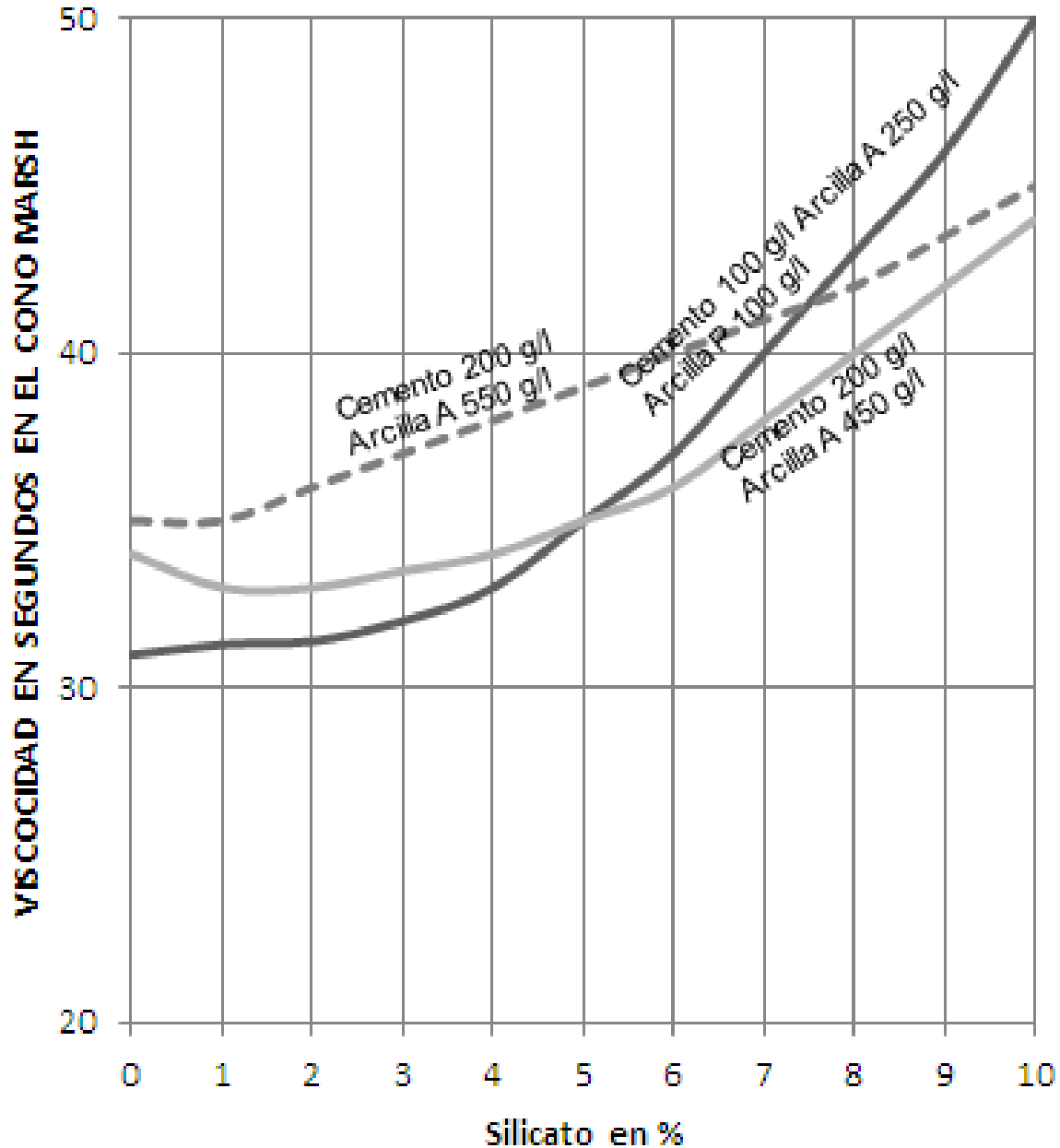


Figura 2.13. Influencia del silicato en la viscosidad de diferentes morteros de cemento arcilla (Cambefort, 1968)

### 2.5.3 Morteros líquidos a base de productos químicos

Esta clase de morteros utilizan sustancias químicas para formar morteros perfectamente líquidos que alcanzan aquellos huecos del suelo por donde el agua puede tener acceso y por consecuencia, donde no todos los morteros de inyección pueden entrar a las fisuras o cavidades del suelo. Su uso queda limitado a pequeños volúmenes de inyección debido que son de precio elevado.

En cuanto al tiempo de fraguado, sólo se puede determinar en resinas orgánicas, en morteros de silicato de sodio y lignosulfito no es posible obtener este parámetro

La viscosidad aumenta en función del tiempo en este tipo de morteros, por lo que se deberá tener cuidado en el proceso de inyección. Ésta es constante en el caso de las resinas orgánicas, en otros morteros líquidos tales como los de silicato de sodio y lignosulfito su viscosidad aumenta progresivamente y puede provocar roturas, lo cual se debe evitar en productos tan caros.

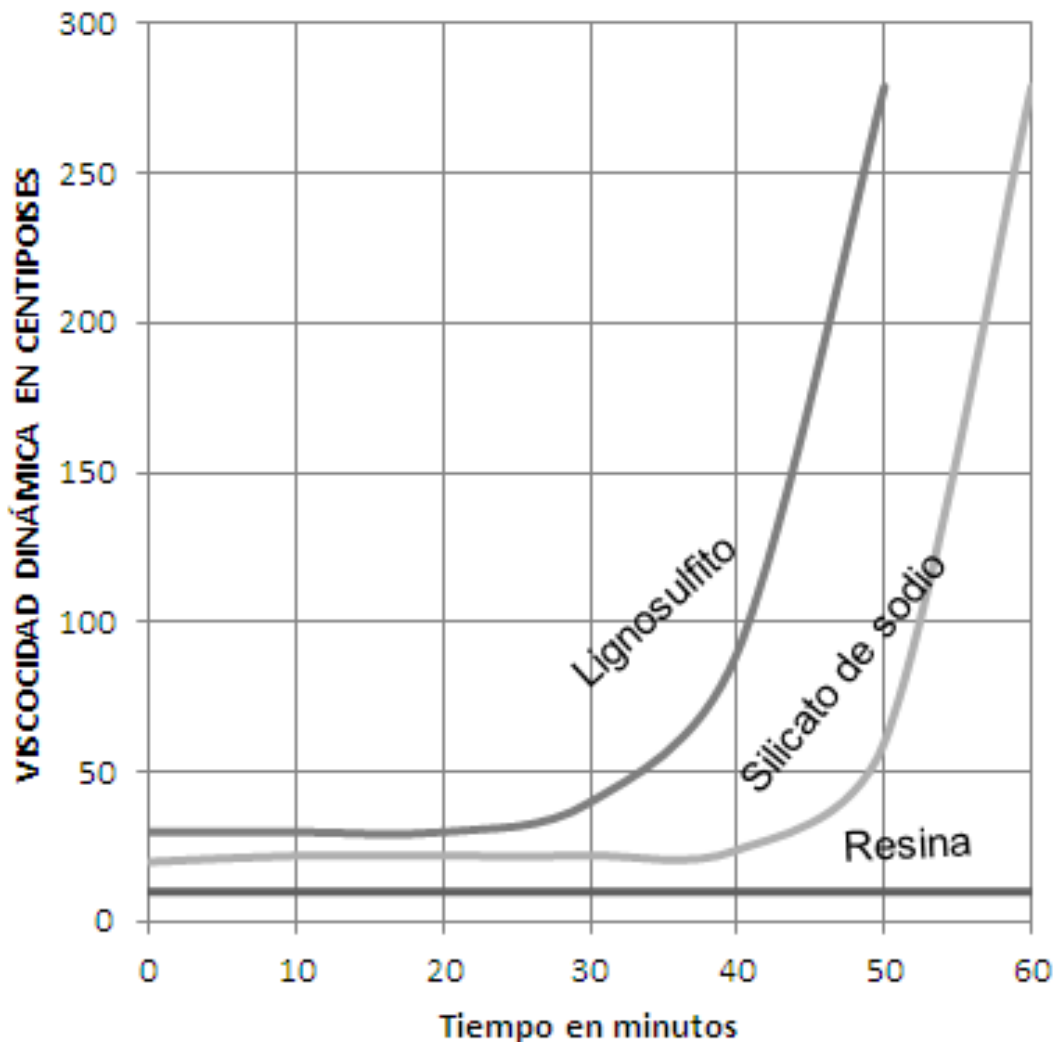


Figura 2.14. Variación de la viscosidad de tres morteros diferentes en una hora de fraguado (Cambefort, 1968)



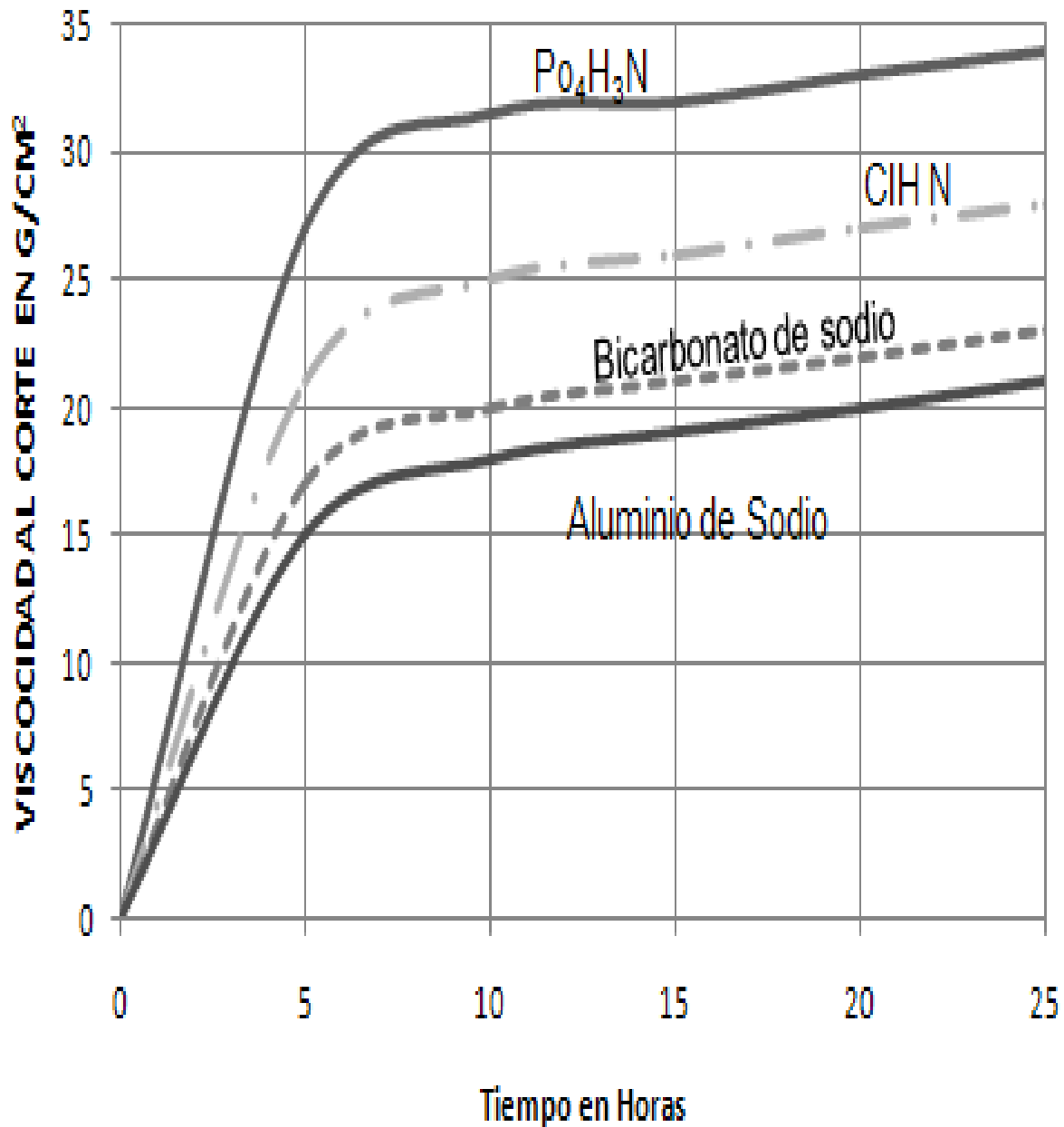


Figura 2.15. Variación de la rigidez en función del tiempo, de diferentes geles con un tiempo igual de fraguado (Cambefort, 1968)

### Geles

Contenido de agua: Siempre es muy grande, pudiendo alcanzar fácilmente el 1500 %, lo que a su vez tiene una clara influencia en la resistencia, ya que cuanto mayor es la cantidad de agua menor es su resistencia, de ahí la razón que solamente este tipo de mezclas se utilicen para impermeabilizaciones

Resistencia al corte: Los geles con un contenido de silicato constante y con un tiempo igual de fraguado tienen la misma resistencia al corte y aquellos de fraguado lento sólo son resistentes al deslave.

El esquema de la figura 2.16 muestra la clasificación de geles según sus materiales constituyentes.

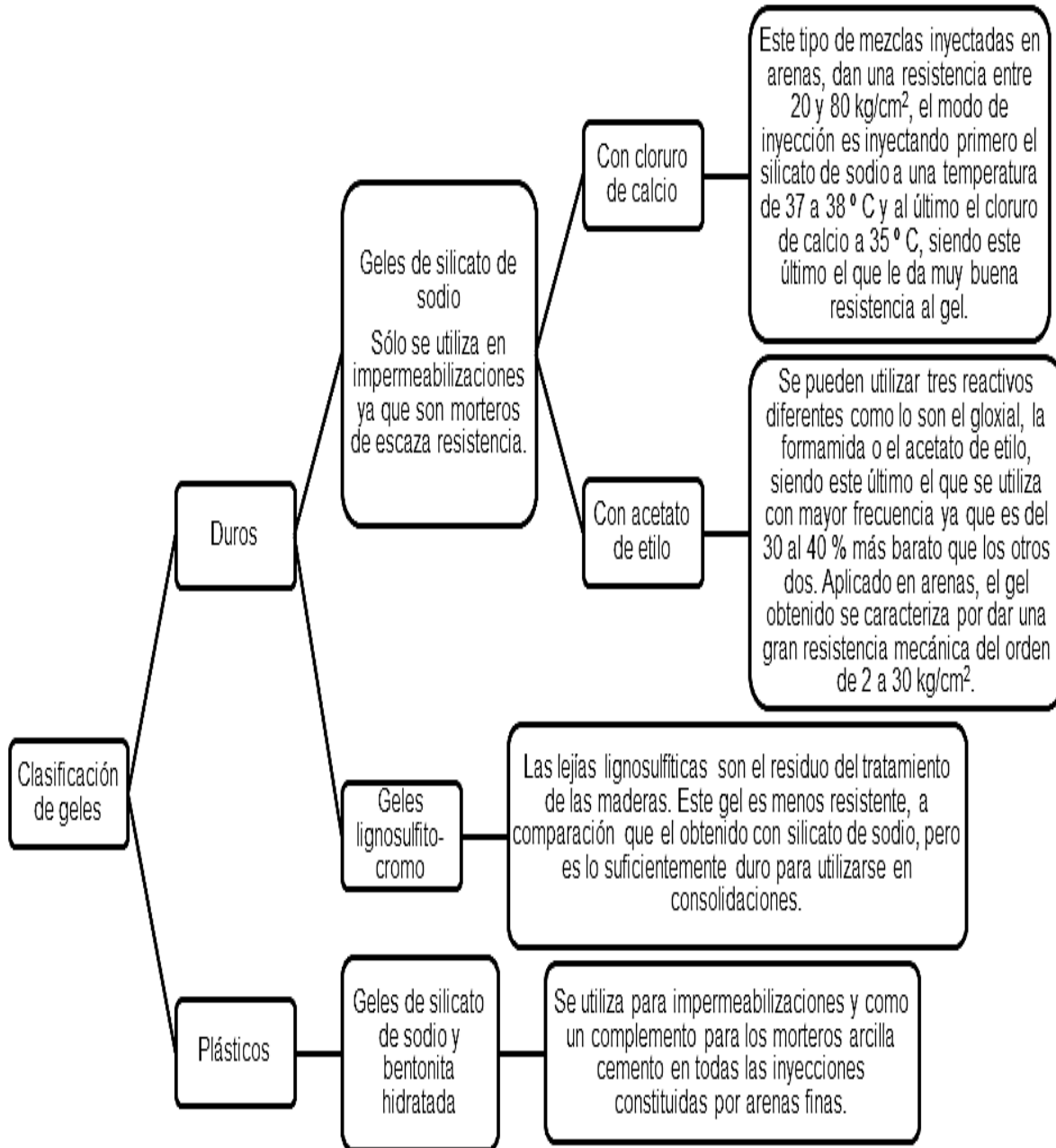


Figura 2.16. Clasificación de geles (Cambefort, 1968)

### Resinas orgánicas

Se presentan en forma líquida y después de un cierto tiempo se polimerizan y forman un sólido más o menos resistente. Las resinas orgánicas se dividen en monómeras acuosas y en polímeros precondensados; los primeros se transforman en una pasta homogénea medianamente resistente y se subdividen en AM 9 y

fenoplastos, los segundos proporcionan una masa extremadamente dura más resistente que el hormigón. La figura 2.17 muestra los diferentes tipos de resinas orgánicas.

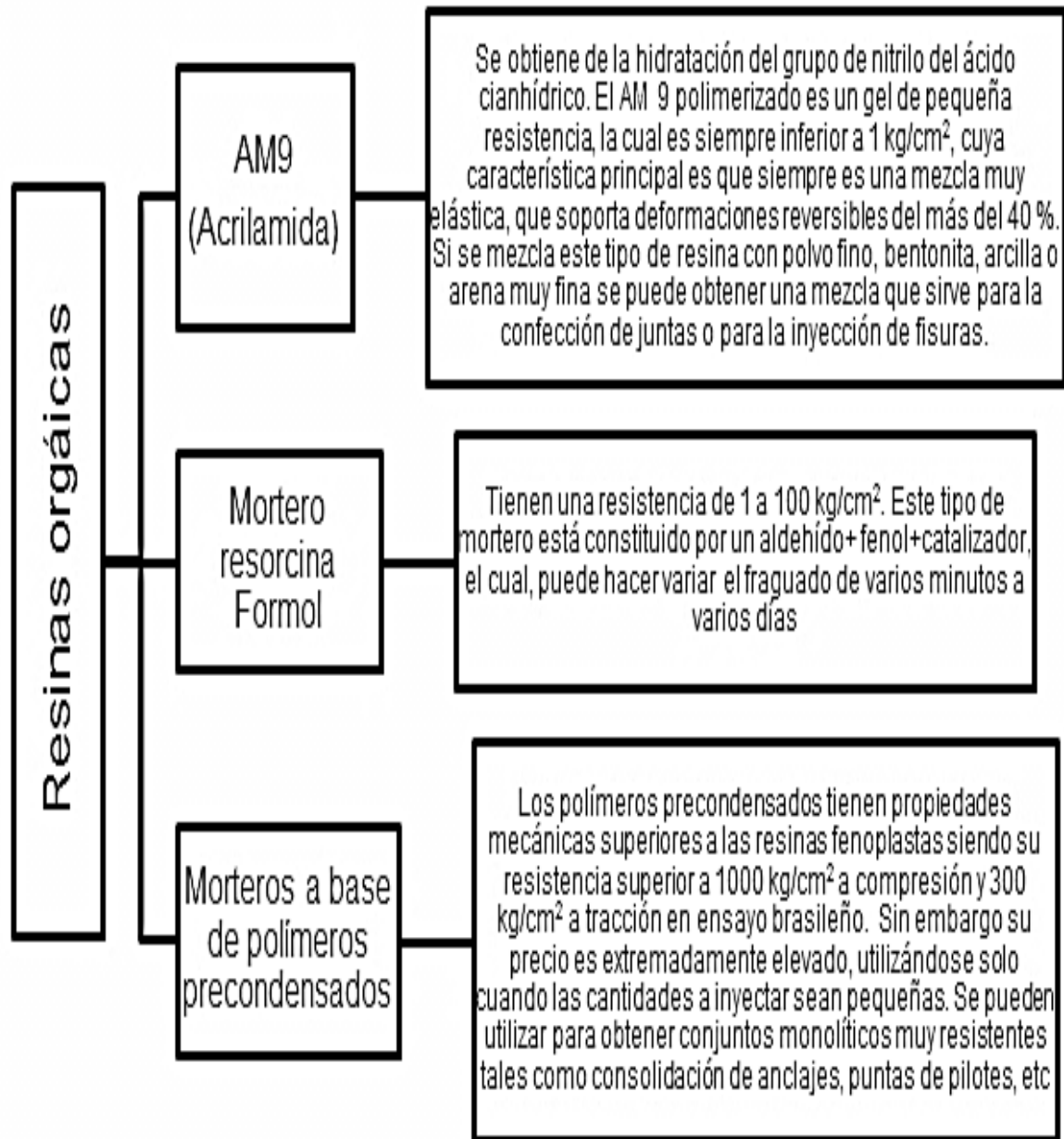


Figura 2.17. Variación de la rigidez en función del tiempo, de diferentes geles con un tiempo igual de fraguado (Cambefort, 1968)

#### *Morteros a base de aglomerantes hidrocarbonatados*

Se utilizan esencialmente para impermeabilizar provisionalmente debido a que es una mezcla viscosa y flexible siendo los más utilizados los betunes y las emulsiones de betún, los cuales se inyectan en arenas, son morteros blandos después de ser inyectados, es decir, son materiales carentes de rigidez y cohesión



después de su inyección. Lamentablemente estas mezclas ni añadiéndole cemento dan una resistencia aceptable, siendo ésta de alrededor de  $1 \text{ kg/cm}^2$  a  $7 \text{ kg/cm}^2$ . Cabe mencionar que el betún caliente proporciona protección al principio, es decir, sólo es una solución provisional debido a que al cabo de unos doce años la carga hidrostática hace circular al betún líquido viscoso desprovisto de rigidez.

#### 2.5.4 Morteros aireados

Los morteros aireados son una patente de Solétanche, sirven para rellenar completamente todos los huecos del subsuelo, en forma de espuma que al hacerse rígida, con el tiempo proporciona una impermeabilización tan buena como cualquier otro mortero. Para dar a las burbujas del mortero aireado las propiedades requeridas por la inyección, es necesario emplear productos químicos de precio elevado. La característica principal de este tipo de morteros es su penetrabilidad, la cual puede llegar a aquellos huecos que con morteros ordinarios son ininyectables.

Según ensayos de laboratorio, todos los morteros pueden airearse, excepto las resinas orgánicas, cuyo tiempo de fraguado se retrasa con la presencia de aire. Sin embargo, los únicos que pueden ser considerados de interés son los morteros cemento-arcilla; de los cuales se describirán sus características por ser los más comúnmente empleados. El sistema de preparación adoptado se basa en el tamaño de las burbujas, estas pueden ser pequeñas o microscópicas.

Las características físicas de este tipo de morteros son:

- Densidad. Tienen densidades inferiores a 1 tales como:

$$\begin{aligned} \text{Densidad}_{\text{bentonita pura}} &= 0.15 \\ \text{Densidad}_{\text{cemento bentonita (microburbujas)}} &= 0.455 \\ \text{Densidad}_{\text{cemento bentonita (burbujas grandes)}} &= 0.59 \end{aligned}$$

- Rigidez. La aireación proporciona rigidez a un mortero de cemento arcilla obteniendo los siguientes resultados después de la aireación:

$$\begin{aligned} R_{\text{inicial}} &= 0.040 \text{ g/cm}^2 \\ R_{\text{final (después de la aireación)}} &= 0.095 \text{ g/cm}^2 \end{aligned}$$

- Decantación. Son más estables que los ordinarios, ya que su densidad se aproxima a la del agua (la cual es  $1.0 \text{ g/cm}^3$ )
- Penetrabilidad: Ésta es la característica principal de los morteros aireados, por ejemplo un mortero ordinario con una relación C/A entre 1 y 1.5 se inyecta fácilmente, pero si se aumenta la dosificación, el mortero no penetra; no es el caso de los aireados, los cuales aunque sean muy espesos se inyectan fácilmente.

- Resistencia a la rotura: La resistencia a la rotura de los morteros aireados constituidos por cemento inicialmente es pequeña, la cual se incrementa con el tiempo, tal y como se ve en la gráfica de la figura 2.18.

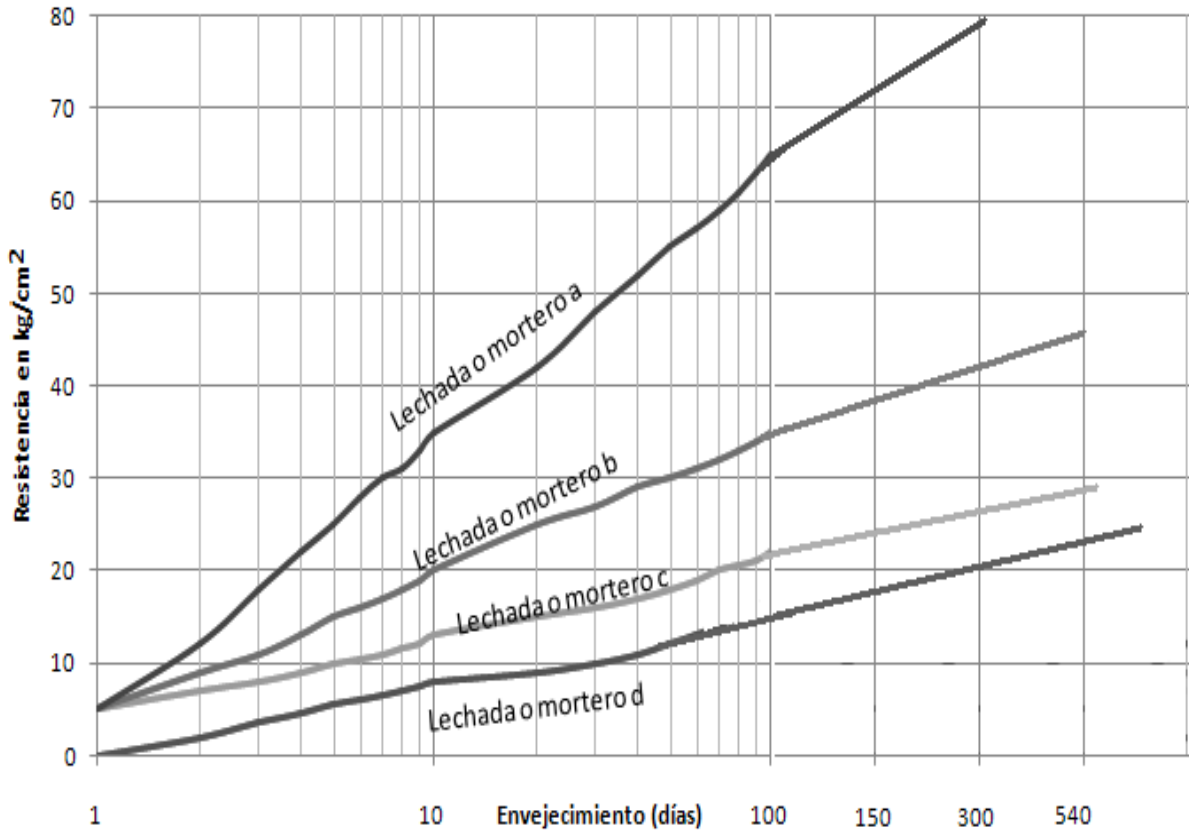


Figura 2.18. Resistencia a la compresión simple de morteros aireados (Cambefort, 1968)

A causa de su baja resistencia estos morteros solo pueden utilizarse en impermeabilizaciones.

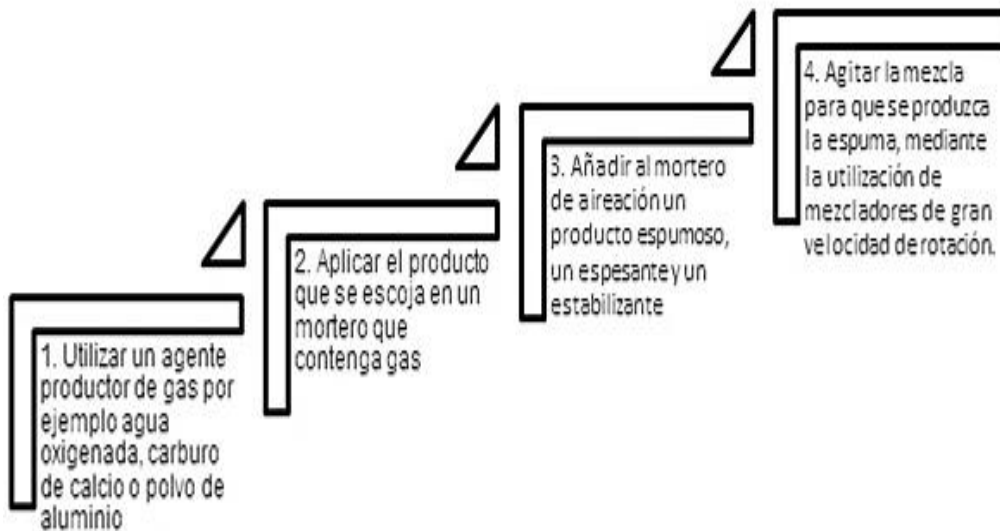


Figura 2.19. Preparación de morteros aireados



2.5.5 Elección de morteros según el terreno a inyectar

La elección de morteros depende de varios factores tales como del tipo de suelo a inyectar, si se desea consolidar o impermeabilizar, los resultados que se deseen obtener, la penetrabilidad, del volumen y precio de los productos, por lo que con una mala elección de morteros la inyección está abocada al fracaso.

No es posible determinar un precio exacto de una inyección; debido a que las velocidades de inyección no son iguales para las diferentes clases de mortero, pero lo que sí se puede dar es un precio relativo.

Para comenzar se le ha dado al mortero clásico de arcilla-cemento un precio igual a uno, dando un precio relativo a los diferentes tipos de morteros tal como se ve en la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Precio relativo de materias primas para 1 m<sup>3</sup> de los principales morteros (Cambefort, 1968)

<b>Mortero de inyección</b>		<b>Precio relativo</b>
Suspensión de cemento agua <sup>1</sup>		4.2
Arcilla-cemento (mortero clásico: 300 kg de arcilla- 200 kg de cemento)		1
Geles duros	Gel Joosten	10.7
	Geles duros Solétanche <sup>2</sup>	6.3 a 11.4
	Geles de lignocromo <sup>2</sup>	6.5 a 8
Geles plásticos	Geles plásticos silicato-aluminio <sup>2</sup>	2 a 4
	Bentonita hidratada	1.8
Arcilla hidratada		1.1
Aceite-bentonita <sup>2</sup>		20 a 35
Resinas orgánicas	AM 9 <sup>2</sup>	50 a 130
	Resorcina-formol <sup>2</sup>	10 a 40
	Polímeros precondensados <sup>2</sup>	150 a 500
Aglomerantes hidrocarbonatados	Emulsión de betún + silicato	6
	Emulsión de betún + resorcina	25
<sup>1</sup> Se entiende que se trata de 1 m <sup>3</sup> depositado en las fisuras. El peso específico de este depósito se ha supuesto a 1.5. El elevado precio de estos morteros así como el largo tiempo de duración en la inyección con ellos, esta compensado por la pequeña cantidad de fisuras que tiene una roca fisurada, en comparación con el volumen de huecos de un macizo aluvionar en el que no es interesante su empleo		
<sup>2</sup> Los precios aumentan con la resistencia del mortero después del fraguado		

Generalmente las rocas están atravesadas por fisuras muy finas del orden de la décima de milímetro, el material a inyectar generalmente es una relación C/A = 1/4. Pero si las fisuras son anchas y existe evidencia de presencia de cavernas se puede mezclar el mortero con agregados, utilizándose morteros que sedimenten muy poco. Después de la obturación de cavernas es necesario inyectar una suspensión de cemento muy diluido con el objeto de rellenar las fisuras muy finas.



Tabla 2.12. Características y posibilidades aproximadas de los principales morteros de inyección. (Cambefort, 1968)

Tipo de mortero		Resistencia a rotura <sup>(1)</sup>	Precio relativo por m <sup>3</sup> <sup>(2)</sup>	Campo de utilización <sup>(3)</sup>	Forma de efectuar la inyección			
SUSPENSIONES	Morteros inestables	Suspensiones de cemento en el agua (+arena) C/A 1/10 a 1/1 o 1.5/1	Comparables al hormigón	4.2	Fisuras de macizos rocosos o fábricas	Cantidades no limitadas		
	Morteros estables (decantación de unas centésimas)	Cementos y morteros activados	Prépkat	Comparables al hormigón	Rellenos de grandes huecos	Cantidades limitadas		
			Thermocol					
		Cemento arcilla (+arena)	1 a 50 kg/cm <sup>2</sup>	1	Fisuras anchas + arenas y gravas K>5X10 <sup>-4</sup> m/s			
Arcilla tratada	<1 g/cm <sup>2</sup>	1.1						
SOLUCIONES	Morteros Líquidos a base de productos químicos	Geles duros	Silicato de sodio	+CaCl <sub>2</sub>	10-20 kg/cm <sup>2</sup>	10.7	K>10 <sup>-4</sup> m/s	Inyección en dos tiempos
				+Acetato de etilo	40 kg/cm <sup>2</sup>	11		
			Lignosulfito +bicromato	300 kg/cm <sup>2</sup>	6.5 a 8	K>5x10 <sup>-5</sup> m/s	Mortero único	
		Geles plásticos	Silicato de sodio + reactivo		50 g/cm <sup>2</sup>	2 a 4	K>10 <sup>-5</sup> m/s	
			Bentonita hidratada		10-20 g/cm <sup>2</sup>	1.8	K>10 <sup>-4</sup> m/s	
		Resinas orgánicas	AM9	<1 kg/cm <sup>2</sup>	50 a 130	Para inyecciones corrientes K>10-6 m/s	Cantidades limitadas	
			Resorcina formol	10 g/cm <sup>2</sup> a 100 kg/cm <sup>2</sup>	10 a 40			
Polimeros precondensados	Comp.= 1000 kg/cm <sup>2</sup>			Pegado de fisuras de hormigón				
Aglomerantes hidrocarbonatados	Emulsiones de betún	+Silicato	100 g/cm <sup>2</sup>	6	K>10 <sup>-5</sup> m/s			
		+Resorcina	10 kg/cm <sup>2</sup>	12				
	Betún caliente	Líquidos muy viscosos			Circulaciones de agua importantes			

<sup>1</sup> Salvo indicaciones contrarias, estas resistencias son las del mortero puro después del fraguado o endurecimiento (para valores muy pequeños, esta resistencia se toma igual al doble de la rigidez)

<sup>2</sup> Se trata del precio de compra de los productos necesarios para el relleno de 1 m<sup>3</sup> de huecos. Ni el transporte ni el tiempo de inyección, que pueden variar de un mortero a otro, han sido tenidos en cuenta. Cuando hay dos valores, el más elevado corresponde a las resistencias máximas. La base 1 es relativa a 300 kg de arcilla y 200 kg de cemento por 1 m<sup>3</sup>. Para la suspensión de cemento se admite que el depósito tiene una densidad seca de 1.5

<sup>3</sup> Las permeabilidades K indicadas son las de los suelos sueltos susceptibles de ser impregnadas por el mortero. Cuando la rigidez de éste es débil no es necesario inyectar en suelos muy permeables (La impregnación no es el único método de inyección satisfactorio)

## 2.6 Características de los componentes del mortero

### 2.6.1 Aglomerantes

Un aglomerante es una sustancia capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y a través de transformaciones químicas da cohesión al conjunto. Los



aglomerantes pueden ser minerales y también pueden ser productos inorgánicos o prefabricados. En los morteros se distinguen los siguientes tipos de aglomerantes:

1) Cal

La cal es una sustancia sólida blanca cuando es pura que se obtiene de la calcinación de la piedra caliza, está compuesta por el óxido de calcio, aunque comercialmente se le puede encontrar con impurezas como óxidos de aluminio, magnesio, hierro y silicio. Se clasifica en:

Cal aérea: También se le conocen como cal aérea hidratada que endurece únicamente con el aire. Esta cal primero se amasa con agua, fraguando por la cristalización del hidróxido de calcio. Después es expuesta a la acción del aire, donde, los cristales endurecen por la acción del dióxido de carbono atmosférico (CO<sub>2</sub>). Su proceso de elaboración es lento y su resistencia es baja.

La cal aérea es conocida como portlandita (hidróxido de calcio (Ca (OH) <sub>2</sub>), o como cal hidratada o apagada, siendo las más comunes la blanca y la dolomita o gris, que posteriormente se convierte en calcita (CaCO<sub>3</sub>) por un proceso de carbonatación. La cal aérea se produce tal y como se muestra en la figura 2.20.

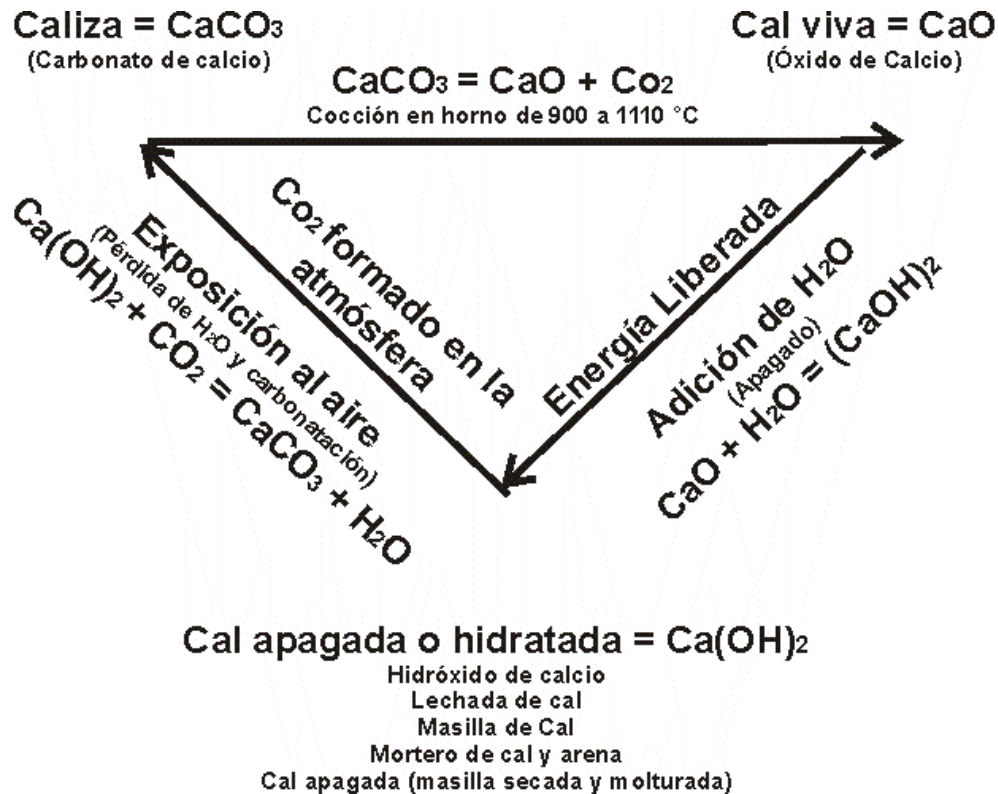


Figura 2.20. Ciclo de la cal aérea: cocción, apagado y endurecimiento de cal. (<http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA04.htm>)

La cal viva (óxido de calcio) es sumamente inflamante al tacto y por lo tanto debe apagarse mezclándola con agua. Este tipo de cal, es sumamente eficiente para los





morteros de unión. Ahora bien, si a ésta se le coloca agua en exceso, se obtiene una masa grasienta llamada lechada de cal, la cual se utiliza en enlucidos de pisos.

Una vez fraguado el mortero se produce dentro de su composición, un lento proceso de carbonatación que en algunos casos, dura años en poderse completar. Estudios llevados a cabo en Roma sobre cubos de mortero de cal, muestran que en una película externa de unos mm de grosor se carbonata después de 2 meses. De hecho, se encuentran morteros de cal romanos que presentan cal no carbonatada en el interior. Y es tal la importancia, que si este proceso no se completa, el mortero puede presentar escasa resistencia mecánica y una muy alta vulnerabilidad a la escorrentía de agua de lluvia. Para evitar estos problemas se debe de regar los morteros con  $\text{CO}_2$  disuelto en agua y recurrir a ensayos muy simples y rápidos como son los análisis DRX y los análisis químicos de pH. El primero consiste en un análisis cualitativo y cuantitativo de la fase sólida cristalina del mortero, mientras que el segundo contiene una disolución acuosa de fenolftaleína, que permanece incolora para  $\text{pH} < 8.3$  cuando entra en contacto con el carbonato cálcico y se torna roja para  $\text{pH} > 10$  cuando entra en contacto con el hidróxido cálcico.

**Cal hidráulica:** Es una pasta que se amasa con agua y endurece por las reacciones de hidrólisis (la cual consiste en una reacción química en la que la molécula del agua HOH reacciona con una sustancia A B, en la que A B representa átomos o grupos de átomos; en tal reacción la molécula del agua se descompone en  $\text{H}^+$   $\text{OH}^-$  y la molécula AB en  $\text{A}^+\text{B}^-$  formando un producto final AOH y HB) e hidratación de sus constituyentes.

Las proporciones cal-arena más utilizadas en morteros son 1:2 para revoques y 1:3 ó 1:4 para mampostería simple. Sin embargo, tales proporciones deben ser las apropiadas, puesto que si éstas aumentan, el mortero pierde ductilidad y trabajabilidad, en cambio si éstas descienden pueden ocurrir contracciones y agrietamientos.

## 2) *Cemento*

El cemento es una sustancia muy fina que forma una pasta al entrar en contacto con el agua y fragua al contacto con el aire. En los morteros se pueden usar distintos tipos de cementos tales como los cementos comunes (CEM), blancos (BL), resistentes a los sulfatos (SR) y/o agua (MR).

Con respecto a su control de calidad existe la prueba Blaine, que determina su finura a través de la superficie que ocupa cada grano de polvo, la cual deberá ser de 4200 a 5100  $\text{cm}^2/\text{g}$ , como mínimo. Esta prueba se basa en la permeabilidad del cemento y consiste en hacer pasar una cantidad determinada de aire a través de una capa de cemento de porosidad definida.



Por sus características, el cemento más utilizado para la realización de morteros, es el Portland. Este consiste en mezclas de silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) en diversas proporciones, junto con pequeñas cantidades de compuestos de hierro y magnesio. La función del primer componente es dar un endurecimiento inicial al cemento y forma dióxido de silicio hidratado e hidróxido de calcio; sustancias claves para unir arenas o gravas. Los demás componentes actúan casi de la misma manera pero a diferencia del silicato tricálcico, uno no contribuye al endurecimiento de la mezcla y el otro la endurece a través de los años. El cemento Portland se fabrica a partir de piedra caliza, junto con arcillas, pizarras o escorias de altos hornos que contienen un 60% de cal de óxido de aluminio, un 19% de óxido de silicio, 8% de óxido de aluminio, 5% de hierro, 5% de óxido de magnesio y 3% de trióxido de azufre.

### 2.6.2 Arena

Las arenas son materiales inertes donde su uso puede ser natural (producto de la descomposición de la roca) o industrial producto de la trituración de la roca. Contienen partículas inorgánicas de tamaño variable, que no deben actuar químicamente frente a los componentes del cemento, por lo tanto estas partículas deben de estar libres de sulfuros oxidables, silicatos inestables o cualquier otro componente de hierro. Vitrubio indica que la arena más idónea es la que *"al frotarla fuertemente con las manos, produce un crujido; este efecto no se consigue con la arena mezclada con tierra, pues no tiene aspereza"*.

Las arenas dan solidez y evitan la aparición de grietas en la pasta, debido a que la arena actúa como un rígido armazón. Para lograr un mortero de buena calidad éste debe de contener por lo menos un 99.7% de sílice; logrando una mejor retención de agua, por esta razón se dice que la arena es la esencia del mortero.

- Densidad aparente: Para obtenerla se tiene que emplear un método de medida, cuyo procedimiento empieza con el secado y conservación de la muestra a  $110^\circ\text{C}$  en una estufa. Posteriormente se vierte la arena en capas horizontales sucesivas en un recipiente cuyo enrasado debe ser efectuado mediante una regleta. Ésta viene dada por la expresión (1).

$$d = \frac{\text{Masa del árido Seco}}{\text{Volumen del recipiente lleno}} \quad (1)$$

Aunque Destable (Venaut y Papadakis, 1975) aplica la fórmula (2) para un molde cúbico.

$$d = d_0 \left( 1 - 6K \frac{D}{a} \right) \quad (2)$$

En donde  $d$ , representa la densidad aparente media;  $d_0$ , es la masa del mismo árido pero en un medio indefinido;  $D$ , el tamaño máximo del árido;  $a$ , la arista del molde y  $K$ , el coeficiente determinado experimentalmente e igual a 0.08

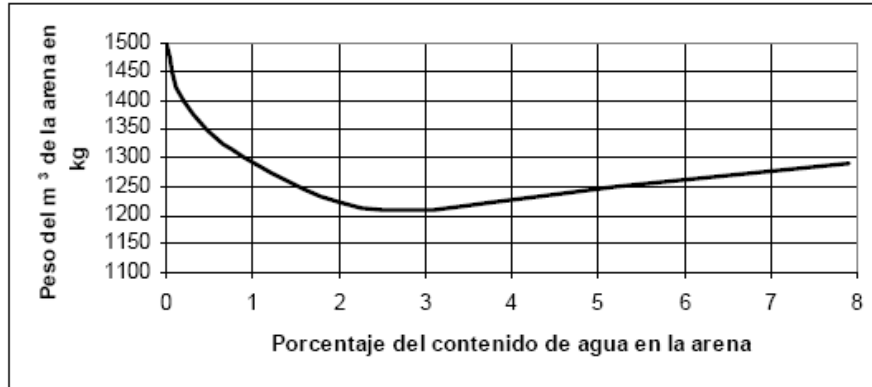


Figura 2.21. Variación de peso de un mismo volumen de arena en función del contenido de agua (Venaut y Papadakis, 1975)

- **Densidad Verdadera:** Es la relación de la masa del árido seco no poroso entre el volumen absoluto del mismo. Para determinarla se utiliza el Método del Frasco, comenzando primero por pesar la masa de la muestra seca  $P_1$  posteriormente se llena de agua un recipiente de cristal, se tapa con una placa de vidrio y se pesa ( $P_0$ ). Teniendo la arena seca en el fondo del recipiente, se vierte lentamente un chorro de agua, con el objeto de eliminar las burbujas de aire. Por último se cierra lentamente el recipiente secándose y obteniendo su peso ( $P_2$ ).

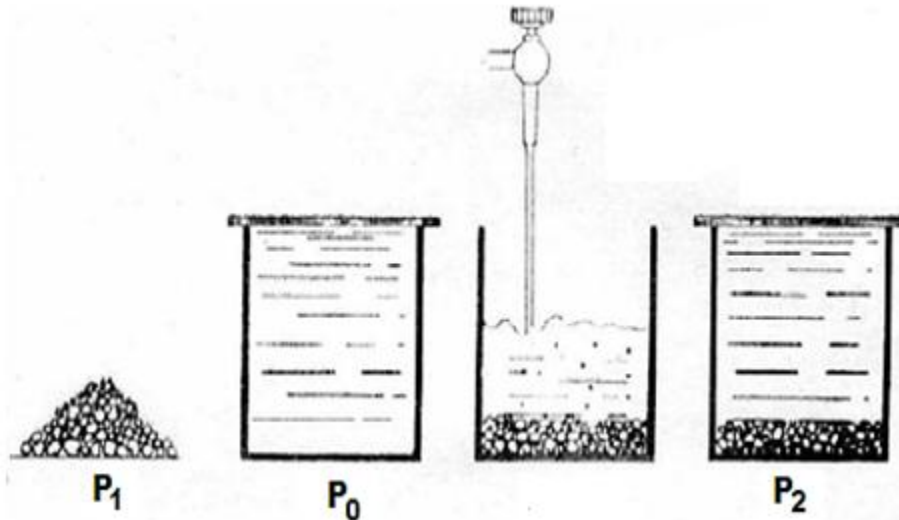


Figura 2.22. Método del Frasco para determinar la Densidad Verdadera (Venaut y Papadakis, 1975)

Siendo la densidad verdadera igual a:

$$\rho = \frac{\text{Peso de la muestra seca}}{\text{Peso del volumen del agua desplazada}} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{P_1}{(P_0 + P_1) - P_2} \quad (4)$$



La densidad media de la arena está comprendida entre 2.6 y 2.65 g/cm<sup>3</sup> como se muestra en la tabla 2.13.

Tabla 2.13. Densidad Media (Venaut y Papadakis, 1975)

Tipo de arena elemental (mm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
0.2/0.4	2.579
0.4/0.8	2.603
0.8/1.6	2.605
1.6/3.15	2.609
3.15/6.3	2.613
6.3/12.5	2.596
Media	2.601
La densidad de la arena puede ser diferente a este valor	

- Superficie Específica: Es la determinación de las diferentes formas en que una partícula ocupa una área específica. Se calcula mediante la expresión (5)

$$S\rho = \frac{6}{\rho D} \quad (5)$$

En donde  $S\rho$ , es la superficie específica;  $D$  es el diámetro uniforme de cada uno de los granos y  $\rho$ , es la densidad verdadera.

La cantidad de agua para humedecer un conjunto de partículas de arena está en función de su superficie específica. En la realidad no existen granos uniformes y la cantidad de agua necesaria para humedecer la mezcla se puede obtener empíricamente mediante la expresión (6) de Bolomey (Venaut y Papadakis, 1975).

$$Q \text{ litros /m}^3 \text{ de árido} = \frac{130}{\sqrt[3]{(D_{\text{mín}})(D_{\text{máx}})}} \quad (6)$$

Donde,  $D_{\text{máx}}$ , es el diámetro uniforme máximo expresado en mm;  $D_{\text{mín}}$ , es el diámetro uniforme mínimo, el cual debe ser superior a 0.2 mm

- Porosidad: Para determinar esta característica se debe tomar una muestra representativa, con un peso superior a 1 kg, después se debe secar a una temperatura de 100 °C, hasta un peso constante ( $P$ ). Posteriormente se coloca la muestra en agua en ebullición durante dos horas, se escurren los granos, se saca la muestra, se deja escurrir y se seca mediante un paño; siendo  $P'$  el peso de la muestra humedecida.

$$P(\%) = 100 \frac{P' - P}{P} \rho \quad (7)$$

- Forma y Adherencia de los granos. La forma de los granos resulta ser muy importante, puesto que influye mucho en las cualidades de los morteros,

tales como en su resistencia mecánica y la cantidad de agua que necesita. La mejor arena es aquella cuya forma de las partículas se aproxime lo más posible a una esfera. En el caso de la arena rodada mientras más pequeños sean los granos tiende a ser más esférica. En cuanto a la adherencia, ésta depende de la forma, la porosidad, la naturaleza de la roca y sobre todo del estado de su superficie.

- Impurezas. La arena, no debe de contener materias perjudiciales que puedan disminuir las propiedades esenciales de los morteros.

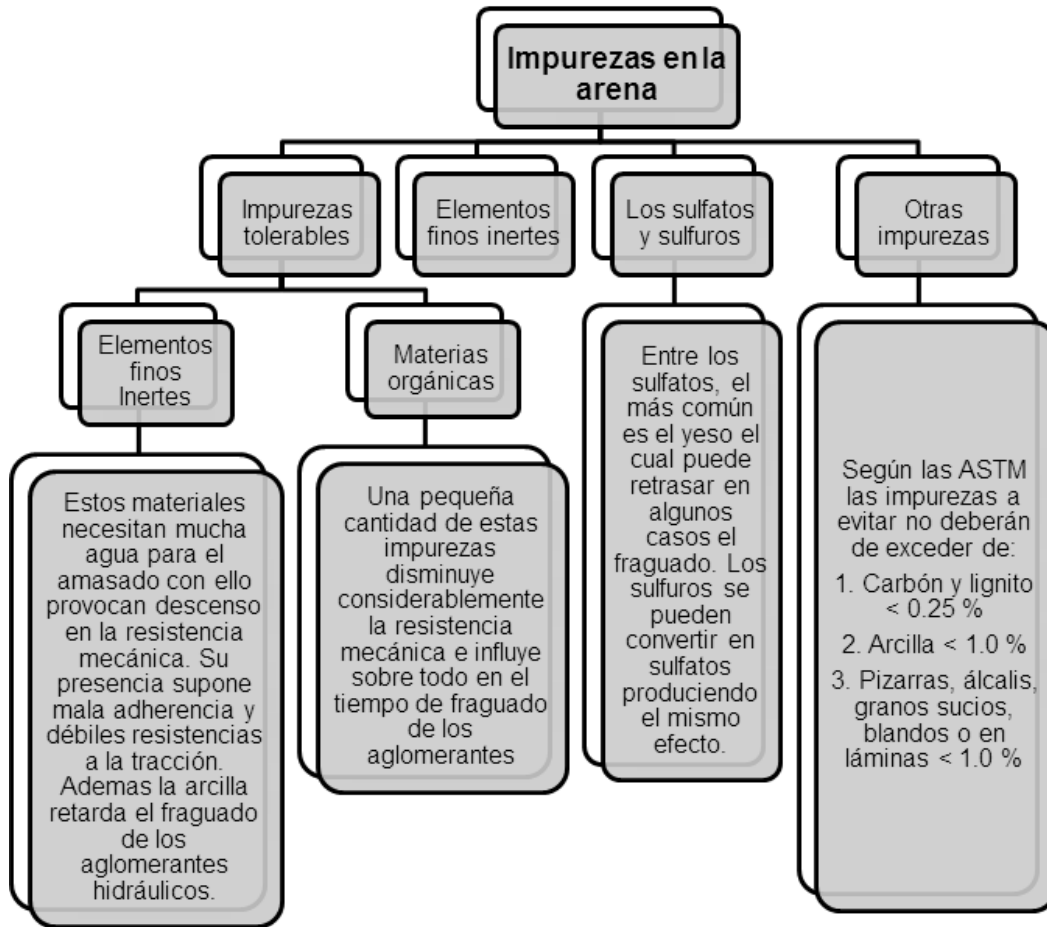


Figura 2.23. Clasificación de Impurezas en las arenas.

Según su obtención la arena se pueden clasificar de la siguiente manera:

**Arena Natural.** Se obtiene de yacimientos minerales según el tamaño de sus partículas y la forma de sus aristas, se puede denominar como arena granular y arena de trituración. La primera consiste en aquella que no tiene aristas en sus granos y su superficie es rugosa, mientras que la segunda es aquella que tiene superficies rugosas y aristas. Estos últimos proceden de rocas resistentes a bajas temperaturas y se obtienen principalmente de rocas como el granito, gabros, traquitas, pórfidos, gneis, cuarcitas, basaltos y calizas. La maquinaria empleada



son las trituradoras rotatorias o de mandíbula. Para mezclarlos necesitan mayor cantidad de agua, puesto que contienen muchos finos.

Arena Artificial. Es aquella constituida por subproductos o residuos de procesos industriales tales como:

- Escorias de alto horno
- Cenizas
- Restos de tejas y ladrillos
- Arcillas y esquistos expandidos
- Virutas y fibras

Arena Reciclada. Es aquella que se obtiene del material inorgánico que se ha utilizado previamente en la construcción.

La arena se clasifica según el porcentaje en peso o volumen de material que pasa a través del tamiz así como por el porcentaje que pasa por el diámetro de los agujeros de un colador. Su clasificación se menciona en la tabla 2.14.

Tabla 2.14. Clasificación de morteros (Venaut y Papadakis, 1975)

Denominación		Módulos de los tamices o coladores	Tamices abertura de las mallas en mm	Coladores Diámetros de los agujeros en mm
Polvos o Filler		Corresponden a los tamices de abertura de malla inferior a 0.080		
ARENAS	Finas	20	0.08	(0.1)
		23	0.16	(0.2)
		26	0.315	(0.4)
	Medianas	29	0.63	0.8
		32	1.25	1.6
		35	2.5	3.15
Gruesas	38	5	6.3	
	39		8	
GRAVILLAS	Pequeñas	40		10
		41		12.5
	Medianas	42		16
		43		20
	Gruesas	44		25
		45		31.5
Piedras partidas (materiales de machaqueo) y guijarros (cantos rodados)	Pequeñas	46		40
		47		50
	Medianas	48		63
		49		80
	Gruesas	50		100
Morrillo (materiales de trituración) y guijarros (cantos rodados)		Correspondientes a los coladores de agujeros con diámetro superior a 100		

### 2.6.3 Agua

Debe ser potable y la suficiente para hidratar el cemento, tal como una relación A/C de 0.3:1 en peso como mínimo; este componente tiene una función importante en la viscosidad puesto que entre mayor cantidad de agua tenga el mortero será más fluido, teniendo menor resistencia, y si éste se encuentra seco será más difícil de colocar y tendrá menor compacidad. El agua utilizada, no debe contener ningún agente que altere las propiedades del mortero, tales como sulfatos, cloruros, contenido orgánico, etc. De lo contrario si el contenido de sales solubles es elevado pueden aparecer algunas reacciones en la pasta tal como las eflorescencias (conversión en polvo de las sustancias al perder el agua la cristalización). Por lo tanto es indispensable tener un control de calidad en las propiedades de este parámetro.

### 2.6.4 Aditivos químicos

Su presentación es líquida y son productos químicos sintéticos libres de cloruro que generalmente producen mezclas de inyección fluidas de alta trabajabilidad que se caracterizan por estabilizar, fluidificar y/o incrementar la velocidad de fraguado, en algunos casos pueden utilizarse para mejorar la resistencia de las mismas. El porcentaje de aditivo empleado en una mezcla estable es variable desde 0.25 a 1%.

- a) Dispersantes químicos: Reducen la tendencia de las partículas del cemento a aglomerarse lo que hace que la mezcla tenga mayor fluidez para penetrar en las fracturas del macizo rocoso. Entre algunos ejemplos de estos aditivos se encuentra la marca Sikalntplast el cual es un súper-plastificante que agregado al 1% del peso del cemento en una relación A/C de 0.67:1 proporciona a la mezcla una buena fluidez sin emplear bentonita.

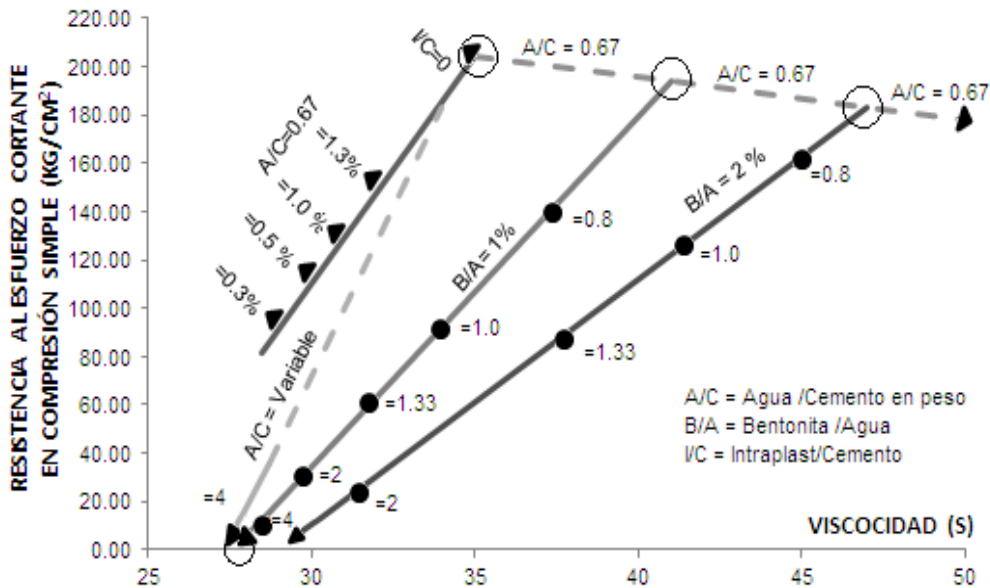


Figura 2.24. Influencia de aditivos y la relación agua cemento (A/C) sobre la resistencia al esfuerzo cortante y fluidez en la mezcla de inyección (Bonola y Paredez, 2007)



b) Aditivos acelerantes en la mezcla: Los principales acelerantes en una mezcla utilizada para inyectar son el cloruro de calcio y el silicato de sodio cuyos porcentajes en mezcla pueden variar entre 0.5 y 6 % dependiendo de los objetivos buscados. De igual manera se puede utilizar aserrín o cenizas de cascara de arroz cuyo efecto da un acelerado de fraguado de las mezclas

2.6.5 Bentonita

La bentonita es una clase de arcilla empleada en las mezclas, debido a que posee propiedades que benefician a su estabilidad. Durante la inyección evita la sedimentación de las partículas del cemento y mantiene una buena fluidez de la misma.

Tabla 2.15. Influencia del porcentaje de bentonita (Bonola y Paredes, 2007)

Relación en la Mezcla agua cemento (A/C), en peso	Porcentaje en sedimentación (%)		
	0 % Bentonita	2 % Bentonita	4 % Bentonita
3:1	62	40	22
2:1	52	20	6
1:1	16	3	1
0.66:1	5	0	0

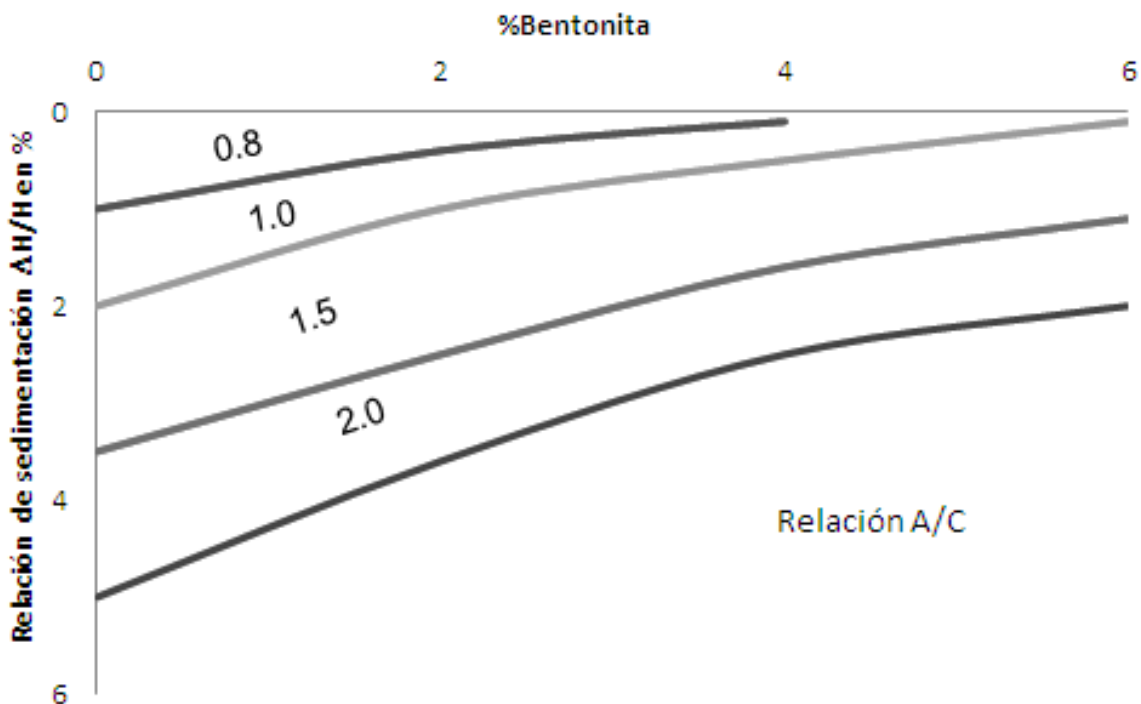


Figura 2.25. Influencia del contenido de bentonita en la sedimentación de una lechada agua/cemento (, 2007)



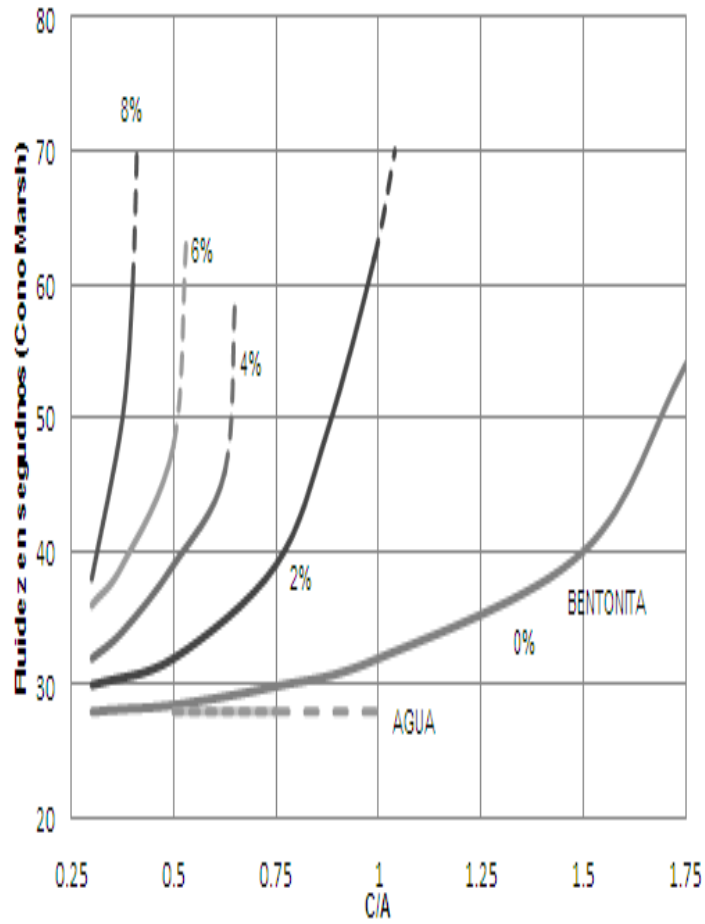


Figura 2.26. Influencia del contenido de bentonita en la fluidez de la lechada en el cono Marsh de una lechada cemento/agua (Bonola y Paredes, 2007)



# CAPÍTULO

## 3.

---

# RESISTENCIA MECÁNICA Y ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE MORTEROS



## CAPÍTULO 3

### RESISTENCIA MECÁNICA Y ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE MORTEROS

En el presente capítulo se mencionan las propiedades que tienen los morteros a través de pruebas de laboratorio, tomando como referencia las normas mexicanas (NMX), cuantificando sus propiedades y especificaciones.

Para comenzar se cita que el mortero es también conocido como *cemento de albañilería* en el resto del mundo, sin embargo en México se tuvo que cambiar su nombre debido a la confusión que anteriormente existía entre el cemento de albañilería (mortero) y el cemento Portland. Para las NMX el cemento de albañilería (mortero) es el material formado por un aglomerante como piedra caliza, arcilla, puzolana, escoria granulada de alto horno, ceniza volante o yeso; el cual al agregarle agua y arena adquiere la propiedad de fraguar y formar una masa endurecida que da resistencia mecánica con el paso del tiempo hasta un punto máximo.

#### 3.1. Especificaciones para caracterizar la calidad del cemento de albañilería (mortero)

Las NMX caracterizan la calidad de un mortero según las especificaciones mostradas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Especificaciones físicas (ONNCCE, 2004)

Subtema	Determinación	NMX	Unidad	Condición	Especificación
3.2	Consistencia Normal	C 057	mm	Máximo	10
3.3	Tiempo de fraguado inicial	C 059	Min	Mínimo	90
	Tiempo de fraguado final	C 059	Min	Máximo	1080
3.4	Sanidad (expansión en autoclave)	C 062	%	Máximo	1.0
3.5	Fluidez	C 061	%	Mínimo	110
3.6	Contenido de aire	C 021	%	Máximo	22
3.7	Retención de agua	C 021	%	Mínimo	60
3.10	Resistencia a la compresión a 7 días	C 062	kg/cm <sup>2</sup>	Mínimo	44.85
	Resistencia a la compresión a 28 días	C 062	kg/cm <sup>2</sup>	Mínimo	79.81

Cabe mencionar que en cuanto a las condiciones de temperatura y humedad del ambiente éste deberá oscilar entre 20 °C y 27 °C, mientras que la temperatura del agua de mezclado y del gabinete de curado deberá de conservarse a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . En lo que se refiere a cuestiones de humedad ésta no deberá ser mayor al 50% en laboratorio.

### 3.2. Determinación de la consistencia normal de cementos hidráulicos

Este método consiste en determinar la consistencia normal para los cementantes utilizados para elaborar el mortero; la cual, es determinante para establecer hasta qué punto el cemento es capaz de fraguar, permitiendo programar lapsos de tiempo en el cual se deben efectuar las diferentes etapas de inyección en campo.

Los aparatos utilizados son probetas, cuchara de albañil, balanza, mezclador mecánico, pesas (cuyas especificaciones deberán consultarse según la NMX C-085-ONNCCE y NMX C-057-ONNCCE-2004 respectivamente) y un aparato Vicat que deberá estar integrado por los siguientes elementos:

- A. Soporte
- B. Barra móvil
- C. Extremo de la barra móvil B
- D. Aguja removible
- E. Tornillo para manipular la barra B
- F. Indicador
- G. Anillo tronconico no absorbente e inoxidable
- H. Placa no absorbente e inoxidable
- I. Escala graduada en milímetros

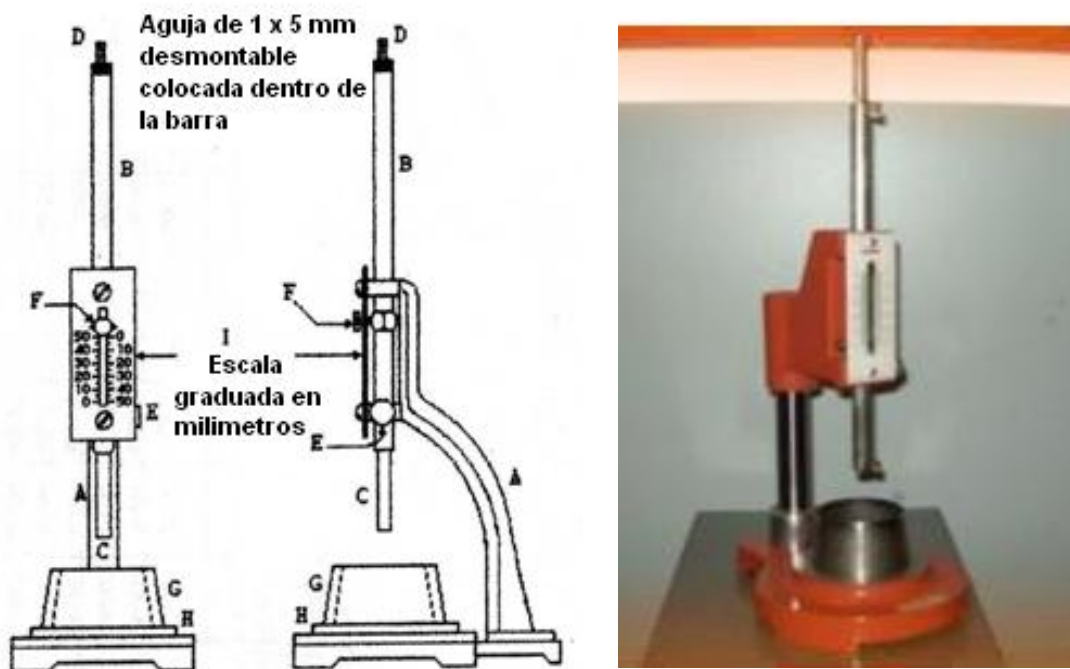


Figura 3.1. Elementos del aparato Vicat (ONNCCE, 2004)

- *Procedimiento.*

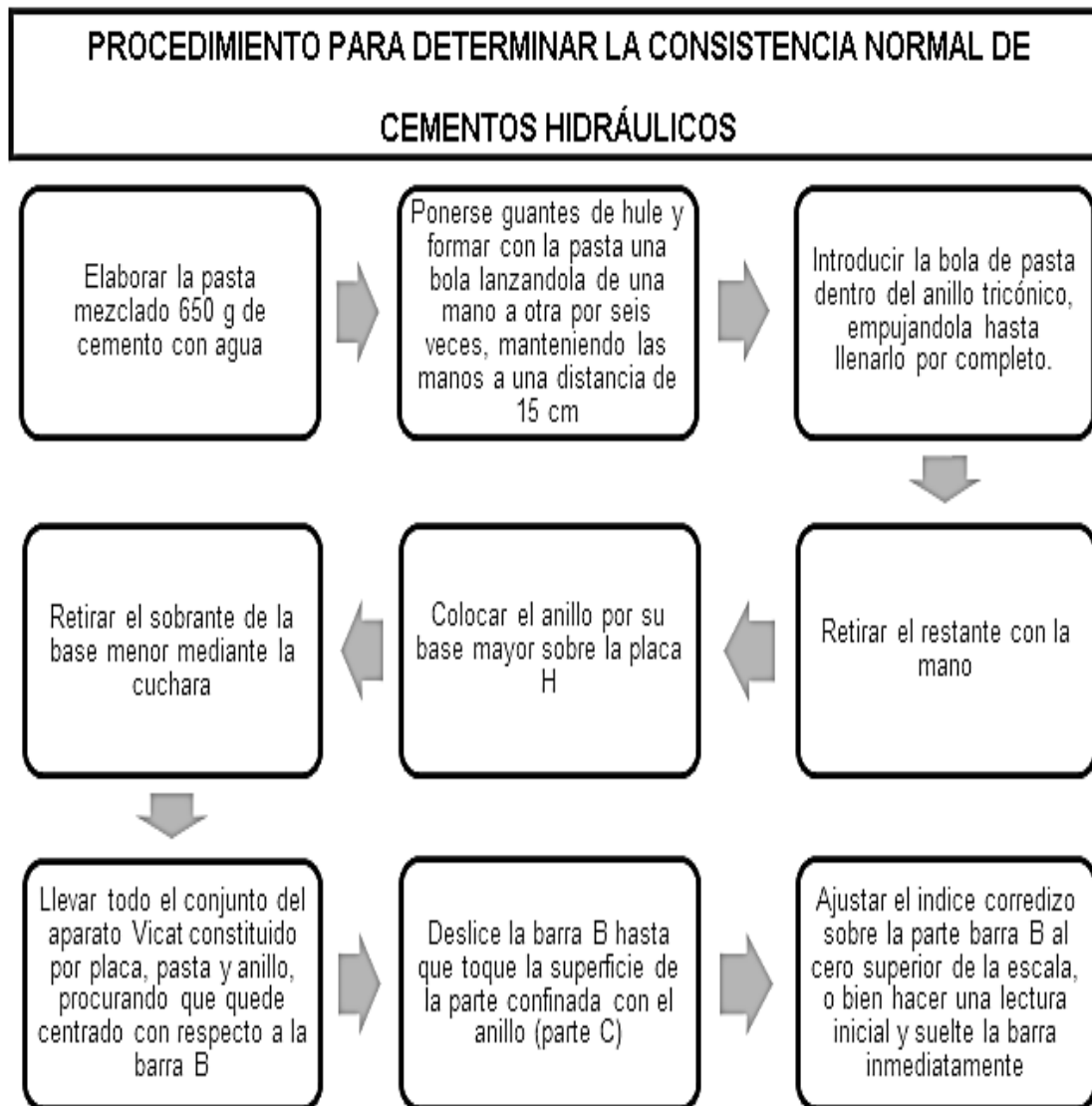


Figura 3.2. Procedimiento para determinar la consistencia normal

- *Expresión para la determinación del contenido de agua para obtener una consistencia normal.* La consistencia normal se obtiene cuando la barra B con extremo C baja  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  a partir de la superficie original en un intervalo de 30 s contados desde el instante en que se soltó la barra. La cantidad de agua (CN) que se requiere para obtener la consistencia normal se expresa en porcentaje de la masa del cemento seco, calculándose hasta décimos de porciento mediante (1).

$$CN = \left( \frac{\text{Mililitros de agua}}{650 \text{ g de cemento}} \right) (100) \quad (1)$$

### 3.3. Determinación del tiempo de fraguado inicial y final de cementos hidráulicos

Esta norma determina el tiempo de fraguado de los cementantes hidráulicos, midiendo su resistencia a la penetración de la aguja del aparato Vicat. Al igual que la norma anterior el ensayo deberá estar libre de toda vibración, manteniendo la aguja limpia y recta.

El tiempo de fraguado es afectado por el porcentaje y temperatura del agua, grado de amasado y por la temperatura y humedad del ambiente.

- *Procedimiento.*

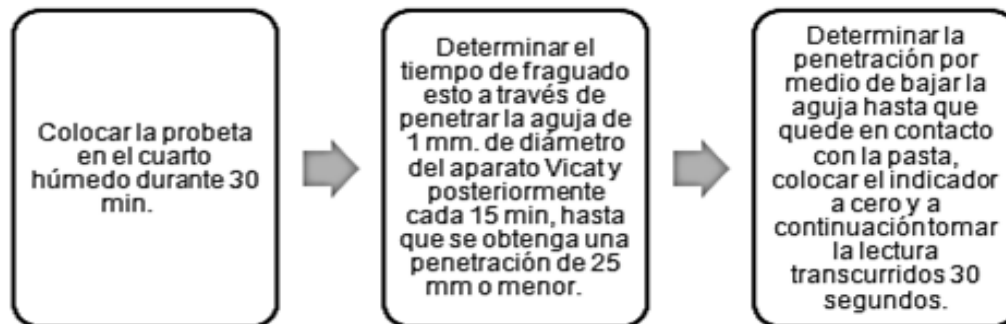


Figura 3.3. Procedimiento para determinar el tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos

Donde el fraguado inicial será el tiempo correspondiente a la penetración de la aguja 25 mm, mientras que el fraguado final, será aquel en el que la aguja no penetra visiblemente en la pasta.

### 3.4. Determinación de la sanidad de cementantes hidráulicos

Este método determina la expansión del cemento utilizado para la elaboración del mortero, a través de la inmersión de presión y calor establecidos por medio de un autoclave

El equipo necesario para la ejecución del ensayo es:

1. Balanza
2. Pesas
3. Probetas
4. Aparato de Vicat
5. Cuchara de albañil
6. Mezclador mecánico
7. Moldes. Deberán ser hechos de un metal duro que no sea fácilmente atacado por la pasta de cemento y tener una sección cuadrada de 2.50 cm
8. Autoclave. Es un recipiente de vapor que opera a alta presión provisto de un regulador automático, de una válvula de seguridad que a una presión máxima de 2.4. MPa  $\pm$  5% se accione y libere la alta presión y de un termopozo

9. Micrómetro. Sirve para medir los cambios que la probeta sufra en su longitud.

• *Procedimiento.*

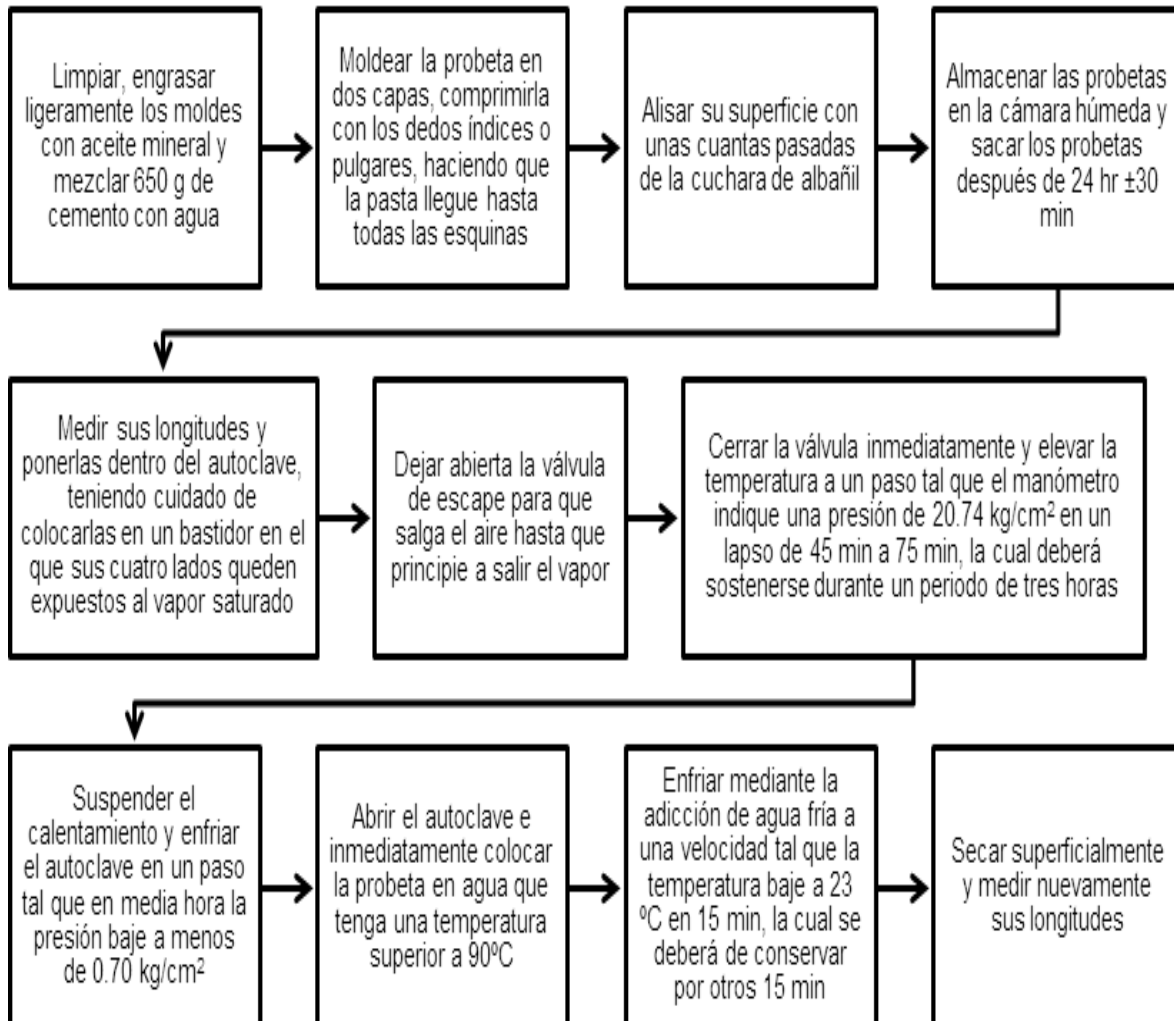


Figura 3.4. Procedimiento para determinar el tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos

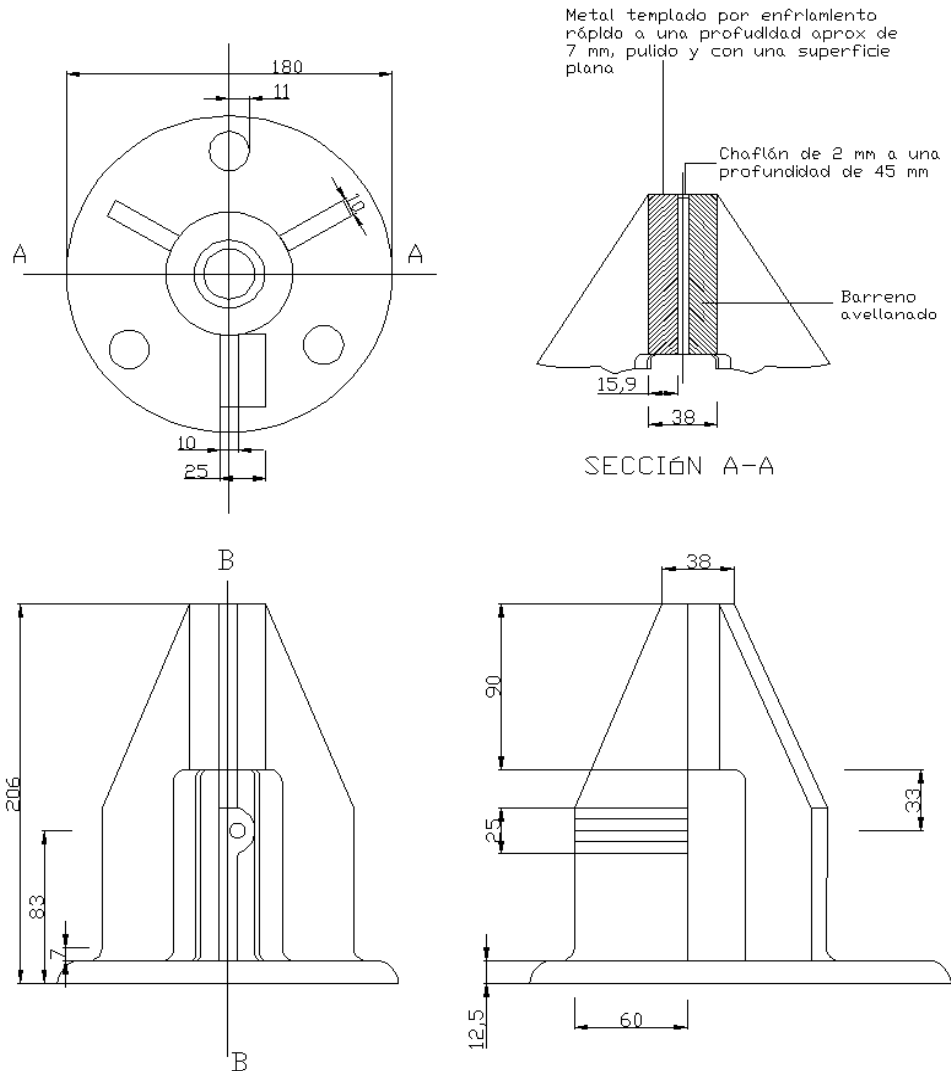
La diferencia entre la longitud de la probeta antes y después de pasar por el autoclave se calculará aproximadamente hasta el 0.01% de la longitud efectiva y se designará como la expansión del cemento en el autoclave.

### 3.5. Determinación de la fluidez de morteros hechos con cementantes hidráulicos

Para determinar la fluidez de morteros es necesario construir una mesa de fluidez que cumpla los siguientes requisitos y especificaciones:

1. Mesa. Constituida por un plano metálico de  $254 \text{ mm} \pm 2.5 \text{ mm}$ , que servirá para expandir el cono de mortero mediante un número de caídas dadas

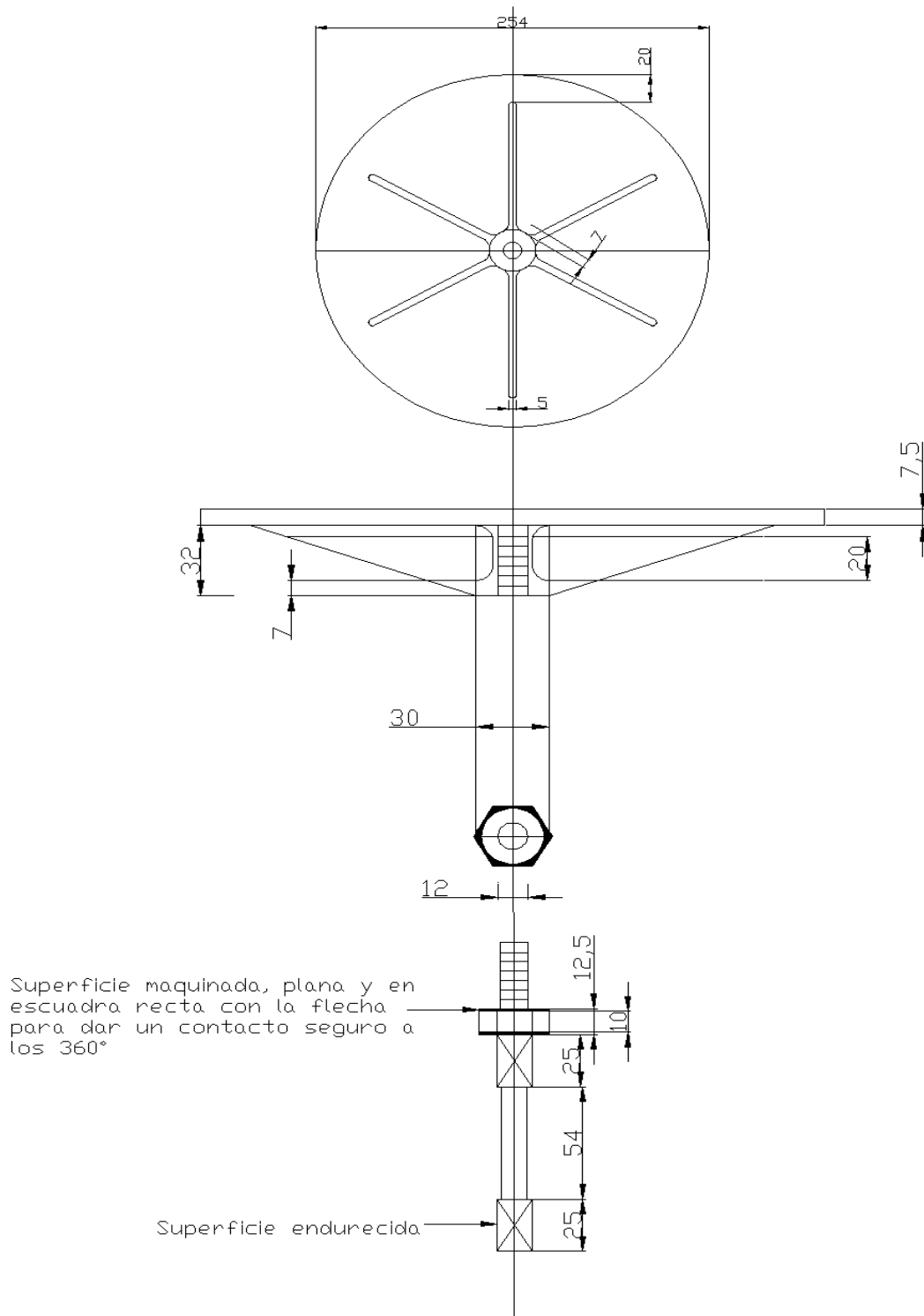
- sobre el marco, teniendo un marco elaborado de hierro vaciado de grano fino y de alta pureza. La mesa deberá ser accionada por un motor conectado a la flecha de la leva, cuya velocidad deberá ser de aproximadamente 100 rpm.
2. Marco. Soporte metálico de forma piramidal con un barreno en el centro que servirá para sostener y guiar la caída de la flecha de la mesa
  3. Pedestal monolítico de concreto de forma de pirámide cuadrangular, sobre el cual se fija la mesa de fluidez
  4. Molde Troncónico. Elaborado de bronce o latón vaciado, teniendo una altura de  $50 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ , un diámetro interno de  $70 \pm 5 \text{ mm}$  para moldes nuevos y  $70 \pm 1.3 \text{ mm}$  para moldes en uso. El molde inferior interno deberá ser de  $100 \pm 5 \text{ mm}$  para moldes nuevos y  $100 \pm 1.3 \text{ mm}$  para moldes en uso
  5. Vernier. Deberá ser utilizado para medir el diámetro del mortero cuando éste ha sido extendido por el movimiento de la mesa de fluidez



ACOTACIÓN EN MM  
Figura 3.5. Marco (ONNCCE, 2002)



Mesa con dureza Rockwell B 25 como mínimo

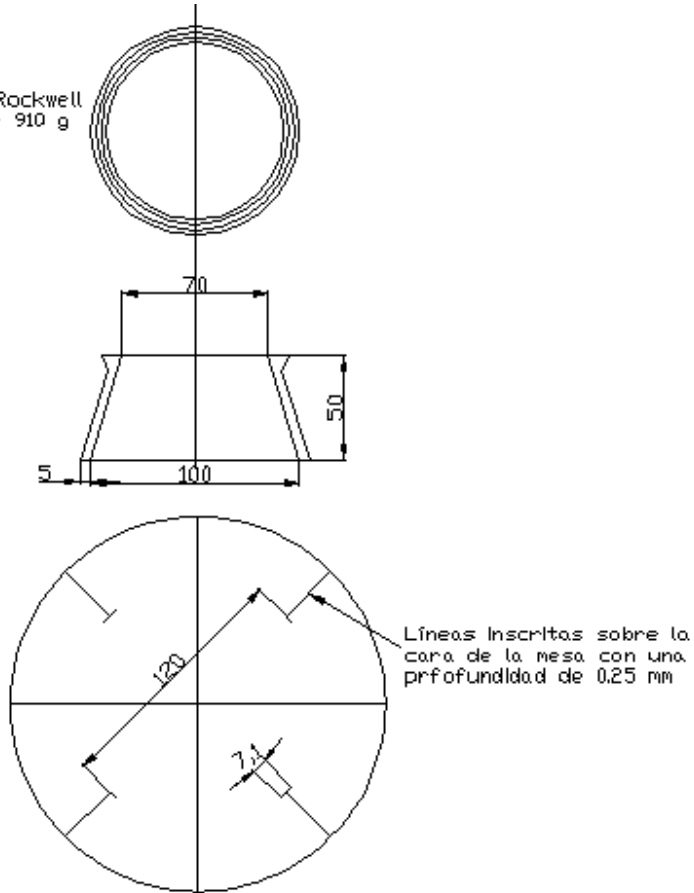


Flecha de acero para maquinaria de contenido medio de carbón

ACOTACIÓN EN MM

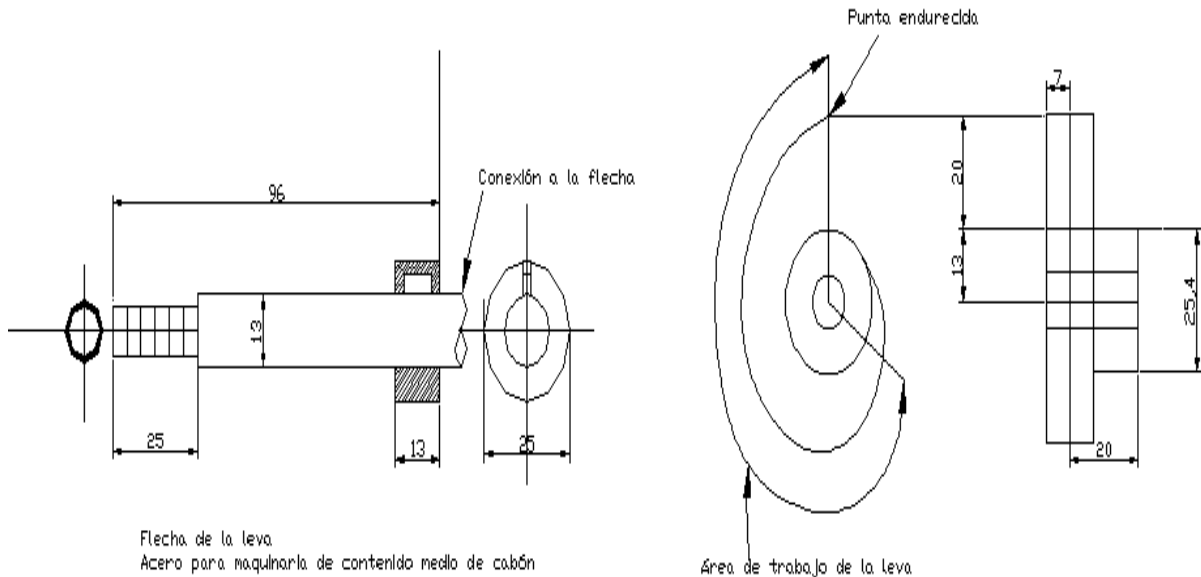
Figura 3.6. Mesa y flecha (ONNCCE, 2002)

Molde de bronce con dureza Rockwell B 25 como mínimo con peso de 910 g



ACOTACIÓN EN MM

Figura 3.7. Cono tronconico y superficie de la mesa (ONNCCE-2002)



ACOTACIÓN EN MM

Figura 3.8. Leva y flecha de la leva (ONNCCE, 2002)

- *Procedimiento*

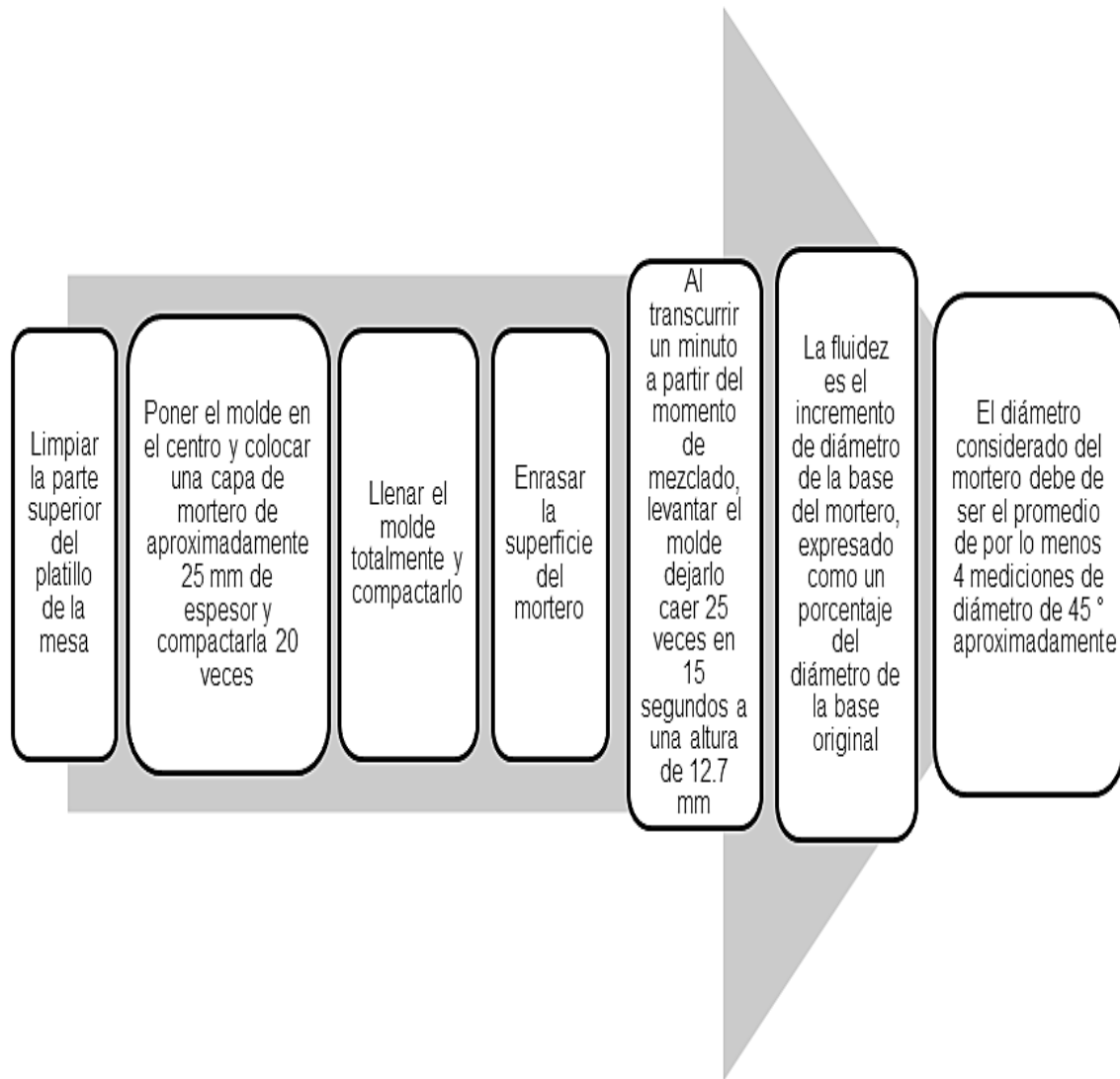


Figura 3.9. Procedimiento para determinar la fluidez

### 3.6. Determinación del contenido de aire de morteros

Esta prueba determina la capacidad del mortero para generar en su interior burbujas de aire durante su operación de mezclado. Asimismo, ayuda a obtener una idea de la resistencia del mortero, puesto que entre mayor sea el número de vacíos, menor será su resistencia, lo que a su vez está muy ligado a la compacidad, ya que si existe un mayor espacio en el acomodo de las partículas, menor será la resistencia de la pasta, por lo que la realización de esta prueba deberá arrojar el menor número de vacíos posible, es decir, contener el menor porcentaje de aire contenido en el mortero.



- *Procedimiento.*

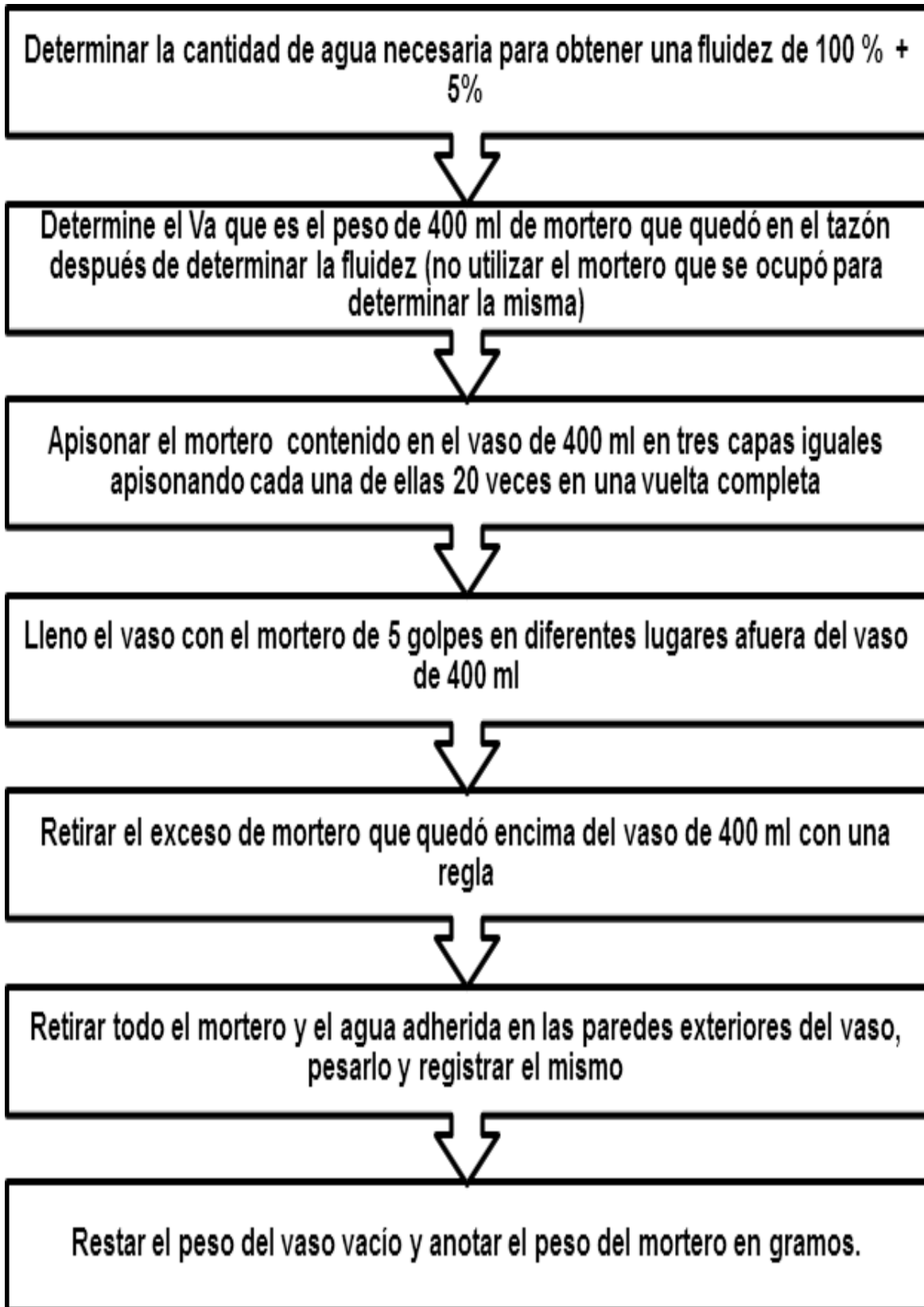


Figura 3.10. Procedimiento para determinar el contenido de aire en los morteros



- *Expresiones para determinar el contenido de aire.* Para el cálculo del contenido de aire en un mortero se deberán usar las fórmulas (6) y (7).

$$M_t = \frac{M_1 + M_2 + Va}{\frac{M_1}{\rho_1} + \frac{M_2}{\rho_2} + Va} \quad (6)$$

$$C = 100 - \frac{M_m}{4M_t} \quad (7)$$

Donde  $M_t$ , es la densidad del mortero calculada en base libre de aire en  $\text{g/cm}^3$ ;  $M_1$ , es la masa del mortero siendo igual a 500 g;  $M_2$ , es la masa de la arena siendo igual a 1620 g;  $Va$ , es la cantidad de agua de mezclado en g;  $\rho_1$ , es el peso específico de los morteros;  $\rho_2$ , es la masa específica de la arena siendo igual a  $2.65 \text{ g/cm}^3$ ;  $C$  es el contenido de aire en el mortero en % y  $M_m$  es la masa de los  $400 \text{ cm}^3$  de mortero en g.

### 3.7. Determinación de la retención de agua en morteros

Ensayos que tienen como objetivo determinar la capacidad del mortero para retener el agua cuando esta trata de separarse a través de una fuerza de succión. La realización de ésta prueba toma un papel importante en la inyección, puesto que al aplicarse la presión el agua o cualquier otro componente puede tender a separarse y conocer este dato puede significar conocer hasta qué punto se puede aplicar una fuerza y que ésta no llegue a ser tal que separe los componentes de una mezcla

Esta prueba utiliza un equipo para la retención del agua el cual a su vez deberá contener las siguientes especificaciones:

- A. Un aspirador de agua u otra fuente de vacío
- B. Una columna reguladora de mercurio que controla la fuente de vacío
- C. Una llave de tres vías conectada a C, con un diámetro de  $4\text{mm} \pm 0.5 \text{ mm}$
- D. Un embudo con una superficie plana y esmerilada
- E. Un disco perforado que descansa en D, hecho de metal no atacable por el mortero, y con una superficie plana y esmerilada
- F. Tubería de vidrio para las conexiones con un diámetro interior mínimo de 4 mm
- G. Un sello a prueba de aire en la parte superior del embudo, obtenido por medio de una junta de hule sintético o por medio de una ligera cubierta de grasa
- H. Matraz de un litro
- I. Una regla de no más de 200 mm y de no menos de 2 mm ni más de 3 mm de espesor
- J. Papel filtro

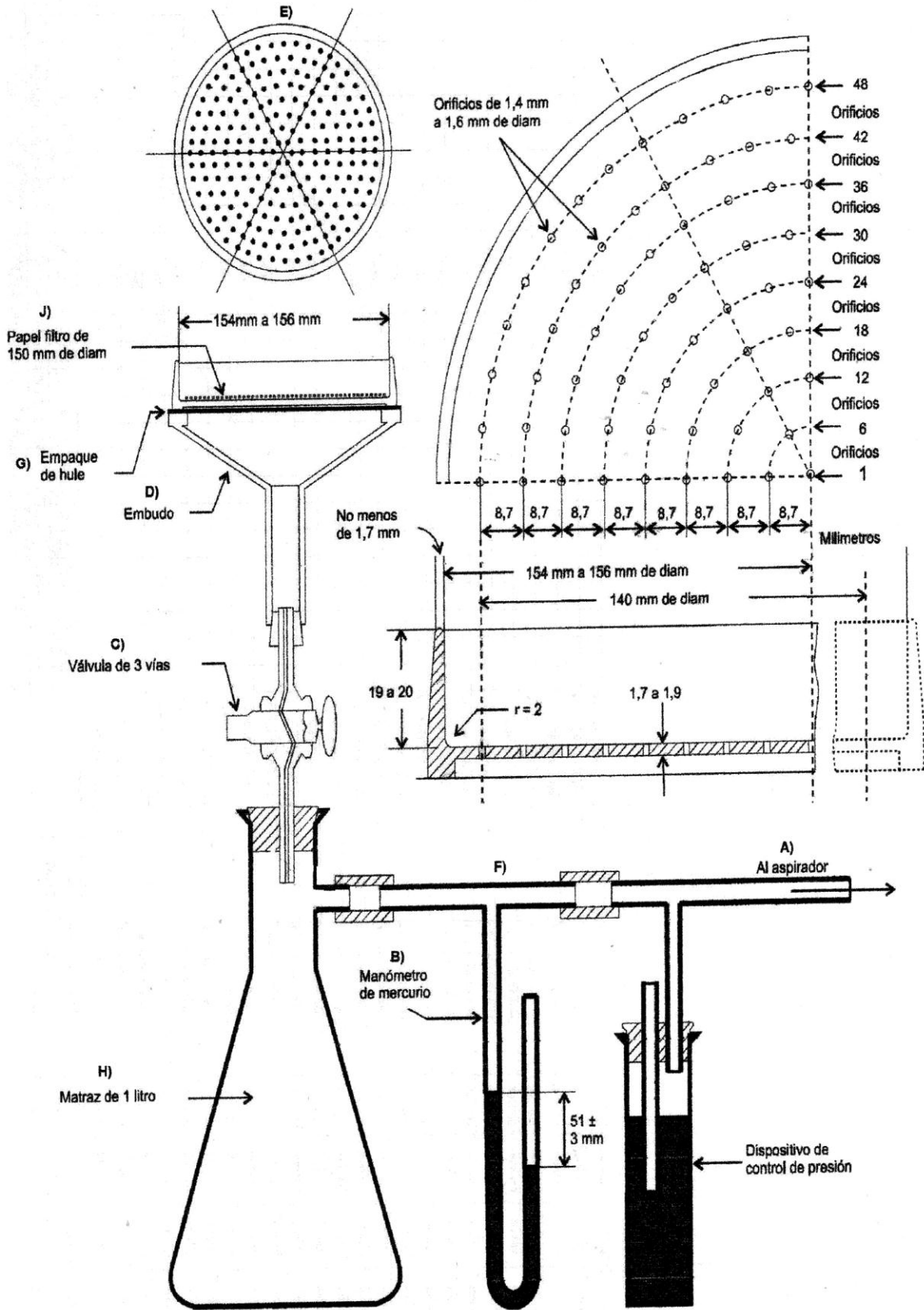


Figura 3.11. Equipo para determinar la retención de agua en los morteros (ONNCCCE, 2004)

• *Procedimiento*

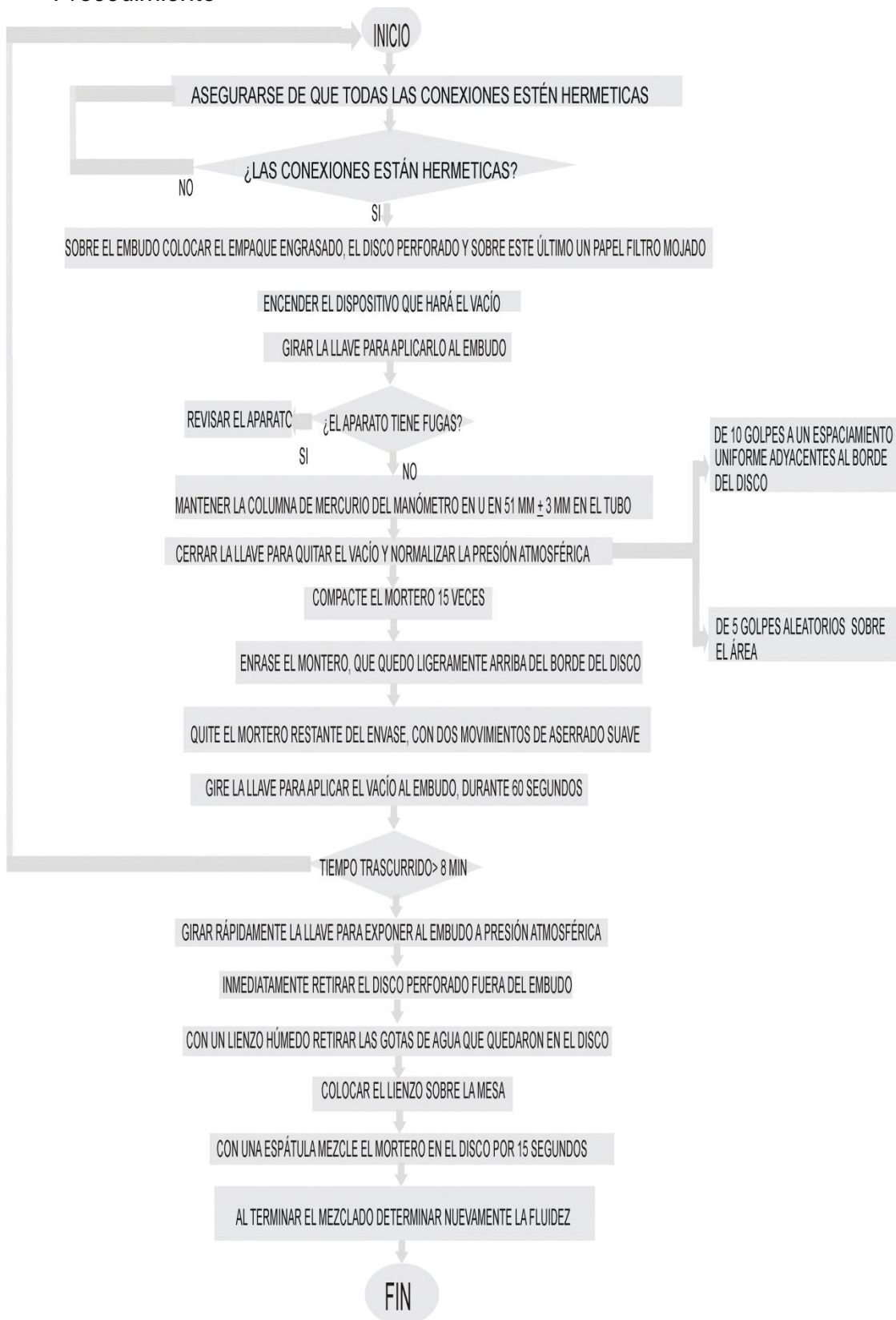


Figura 3.12. Procedimiento para determinar la retención de agua en los morteros

- *Expresión para determinar la retención de agua en morteros.* La retención de agua del mortero se calculará mediante la expresión (8).

$$R_A = \frac{A}{B} (100) \quad (8)$$

Donde  $R_A$ , es la retención de agua en porcentaje; A, es la fluidez después de la succión y B, es la fluidez inmediatamente después del mezclado.

### 3.8. Determinación del peso específico de cementantes hidráulicos

Para determinar el peso específico de los cementantes hidráulicos (relación entre su masa y su volumen), se deberá utilizar un Matraz Lechatelier; el cual deberá ser de vidrio químicamente resistente y con las especificaciones que se muestran a continuación.

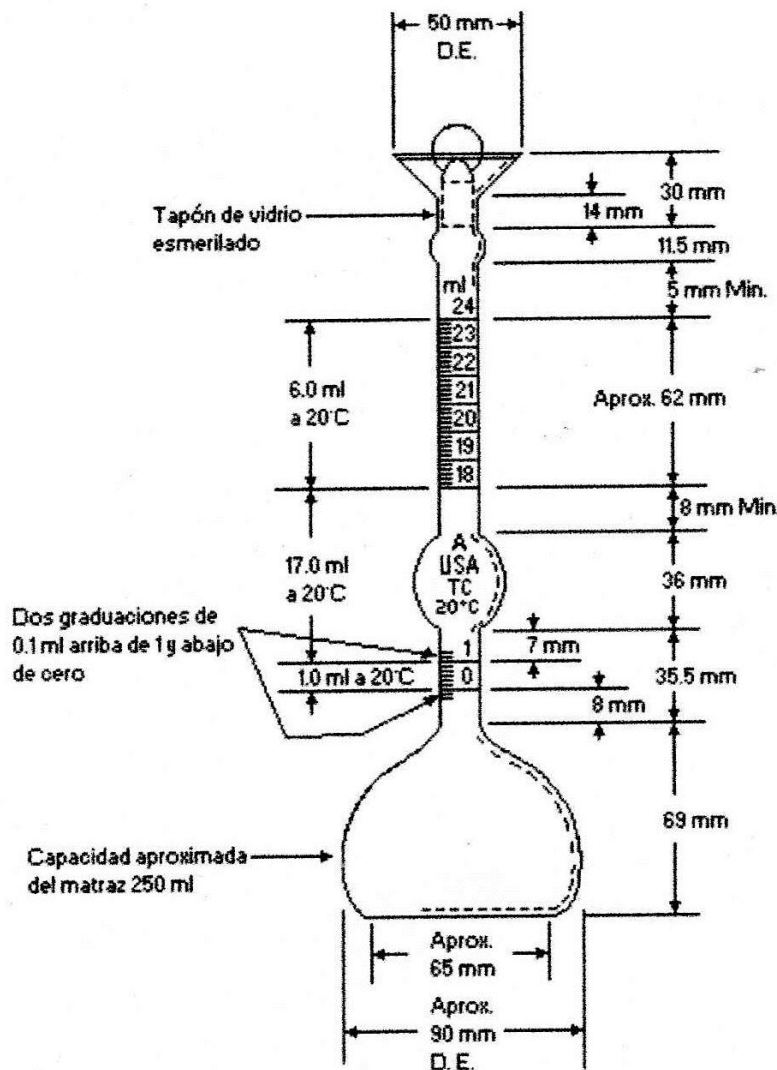


Figura 3.13. Matraz de Lechatelier (ONNCCE, 1997)



- *Procedimiento.*

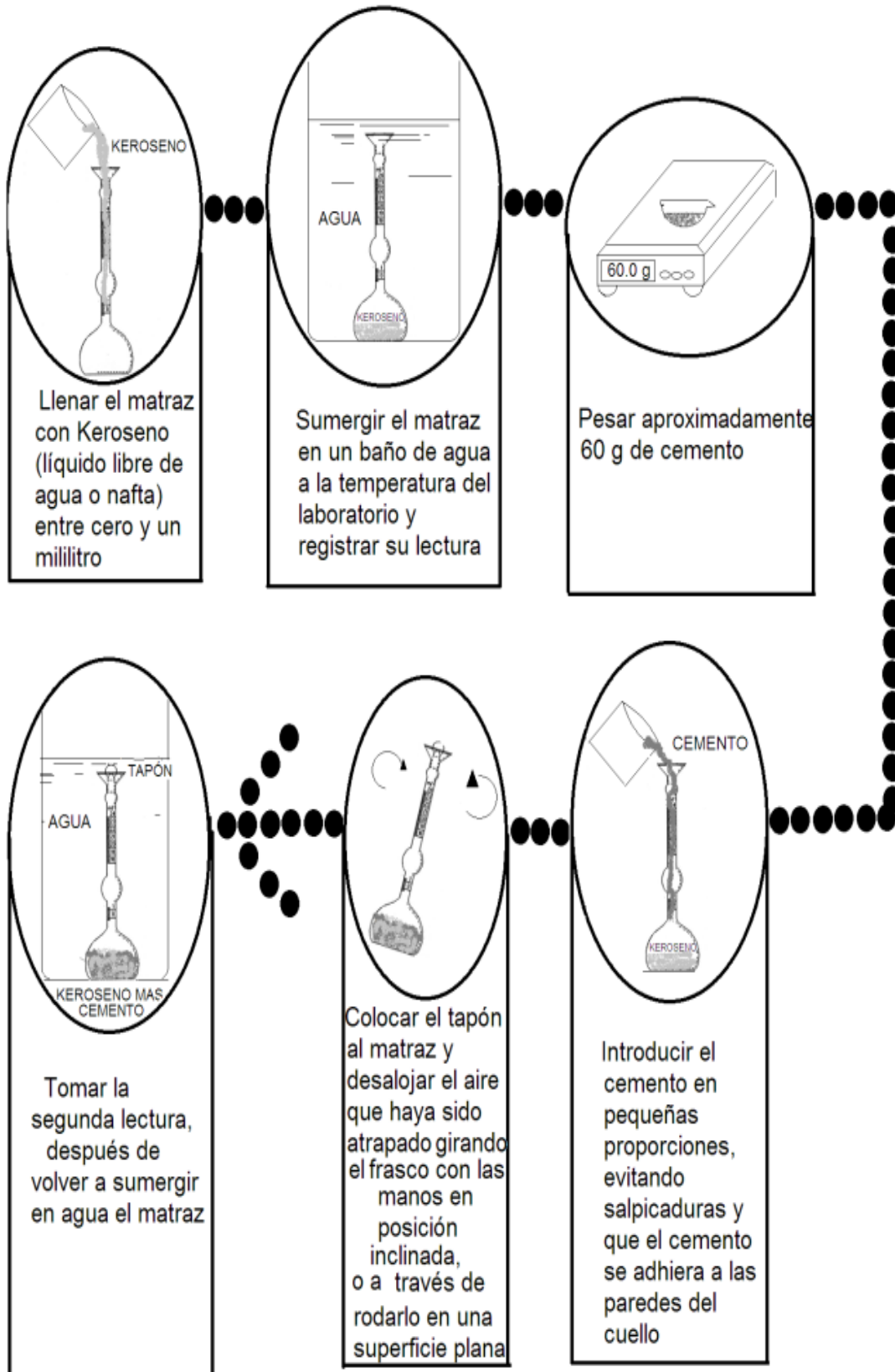


Figura 3.14. Procedimiento para determinar el peso específico de cementos hidráulicos

- *Expresión para determinar el peso específico.* La diferencia entre la lectura inicial y la lectura final representa el volumen de líquido desplazado por lo que el peso específico se calculará mediante las expresiones (2) y (3)

$$\text{Volumen de líquido desplazado} = \text{Lectura Final} - \text{Lectura Inicial} \quad (2)$$

$$\text{Peso Específico} = \frac{\text{Masa del cementante en gramos}}{\text{Volumen de líquido desplazado}} \quad (3)$$

### 3.9. Determinación de la granulometría de la arena sílice

Para la determinación de la granulometría de la arena sílice usada para la elaboración de morteros se deberán utilizar un cepillo, una máquina de cribado, una estufa eléctrica, cribas de 203 mm de diámetro de números 16 (1.18 mm), 20 (0.85 mm) 30 (0.60 mm), 40 (0.425), 50(0.30 mm) y 100 (0.15 mm), una balanza y un cuarteador.

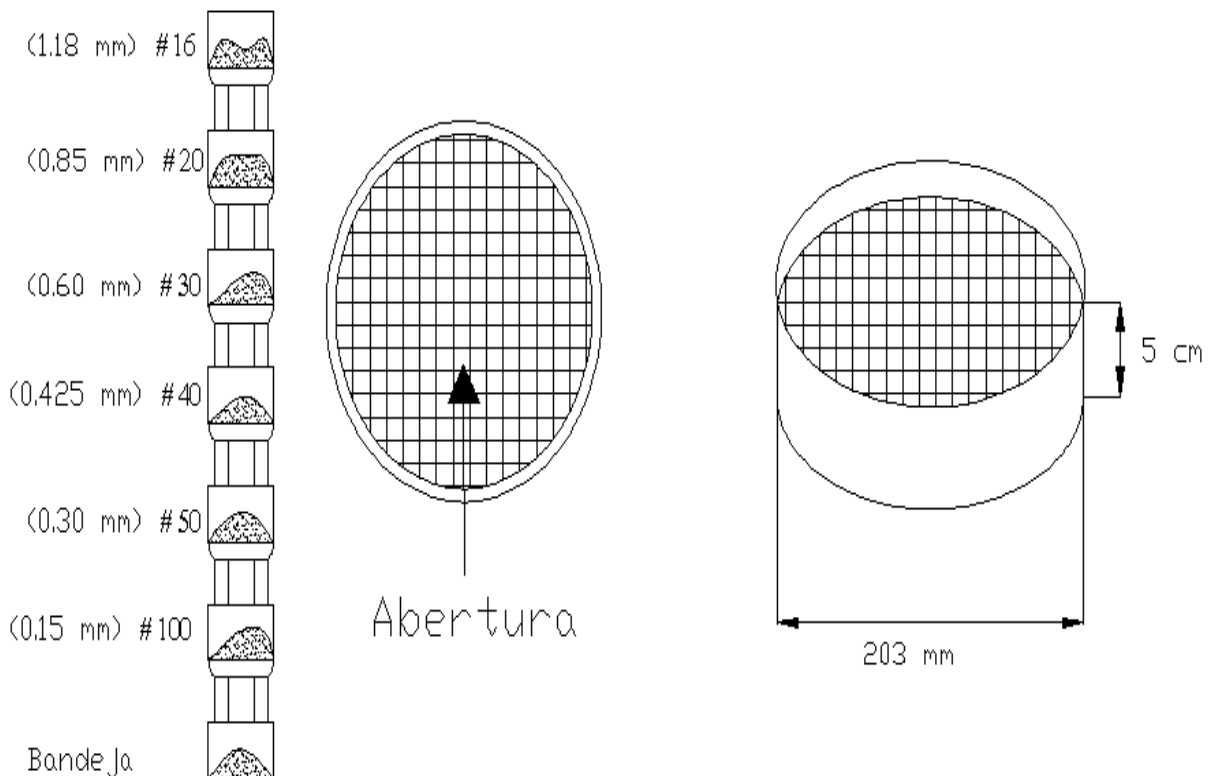


Figura 3.15. Mallas utilizadas para determinar la granulometría de la arena sílice

- *Procedimiento.* Para determinar la granulometría de la arena sílice se deberá de cribar mediante métodos manuales o mecánicos según el siguiente procedimiento:
  1. Primero se deberá realizar un muestreo, seleccionando un saco por cada 15 sacos, o dependiendo de la cantidad de sacos recibidos en un lote, determinándose según la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Muestreo de la arena según el número de sacos (ONNCCE, 2002)

	Sacos en el lote	Cantidad de sacos por analizarse	No. de los sacos por seleccionar
Primer Muestreo	Menos de 5	1	Aleatorio
	5 - 19	1	El 5
	20 - 24	2	El 5 y 20
	35 - 49	3	El 5, 20 y 35
	50 - 64	4	El 5, 20, 35 y 50
Segundo Muestreo	Menos de 5	Ninguno	Rechace el lote
	5 - 19	1	El 5
	20 - 24	2	El 5 y 20
	35 - 49	3	El 5, 20 y 35
	50 - 64	4	El 5, 20, 35 y 50

- Tomar 850 g de arena de un saco.
- Nivelar la arena a lo largo y ancho del recipiente.
- Cuando todo el material original ha sido dividido la porción de cada uno de los recipientes receptores se coloca en el vertedor y se repite la acción de división, repitiéndola hasta obtener una cantidad aproximada de 100 g.
- Tomar la porción de 100 g, secar en la estufa puesto que esta será utilizada en la porción de tamizado.

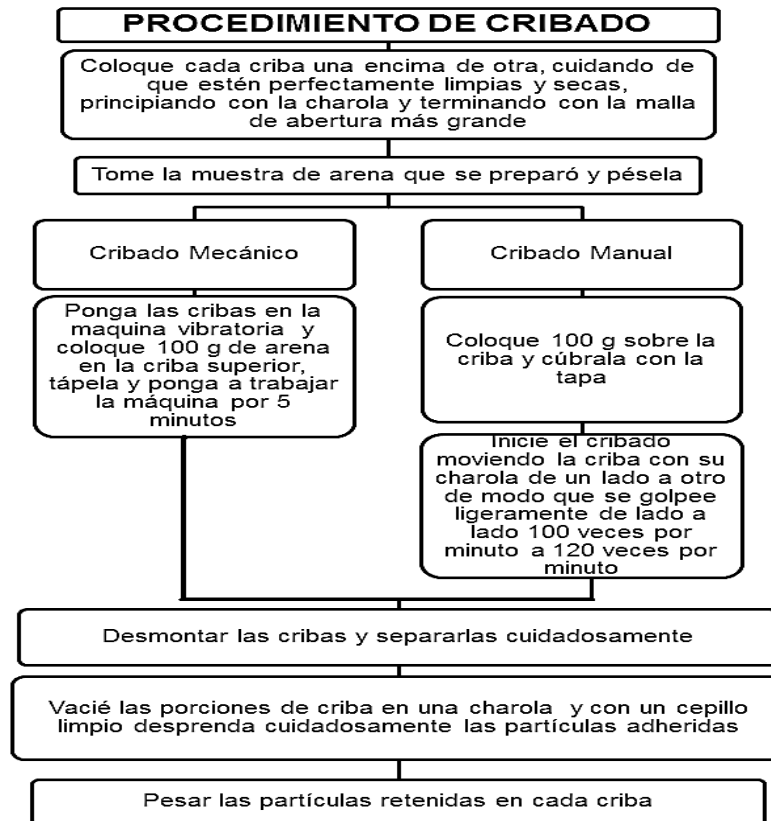


Figura 3.16. Procedimiento de cribado



- *Expresiones para determinar la granulometría de la arena.* La granulometría se calcula en porciento a través de las expresiones (4) y (5).

$$F_1 = 100 \left( 1 - \frac{a_1}{b} \right) \quad (4)$$

$$F_2 = 100 \left( 1 - \frac{a_1+a_2}{b} \right) \quad (5)$$

Donde  $F_1$ , es el porcentaje acumulado que pasa por la criba No 1;  $a_1$ , es el peso retenido en la criba No 1;  $b$ , es el peso total de la muestra;  $F_2$ , el porcentaje acumulado que pasa por la criba No 2 y  $a_2$ , el peso retenido en la criba No 2.

### 3.10. Determinación de la resistencia a compresión de morteros hechos con cementos hidráulicos

Se debe contar con 3 especímenes cúbicos de 50 mm de lado. De igual modo, para el ensaye en cámaras triaxiales se podrán utilizar moldes cilíndricos, de 3.6 cm diámetro, donde su altura no debe ser menor de 2.1 veces el diámetro inicial, siendo generalmente adecuada una altura de 9 cm (Secretaria de Recursos Hidráulicos, 1970).

En este ensaye se deberán utilizar los siguientes materiales, equipo y aparatos.

1. Arena. Ésta deberá ser de cuarzo, de grano redondeado y despolido clasificada según la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Clasificación de la arena (ONNCCE, 2001)

No. Malla	% Retenido
100	98 ± 2
50	75 ± 5
40	30 ± 5
30	2 ± 2
16	Ninguno

2. Balanza
3. Cuchara de albañil
4. Máquina de prueba. Puede ser de tipo hidráulico, mecánico o una combinación de ambas y de capacidad apropiada. La base superior de carga debe ser hecha de un bloque de material endurecido con asiento esférico y firmemente sujeto al centro de la cabeza superior de la máquina
5. Mesa de fluidez según la norma NMX C 144
6. Mezcladora

7. Moldes. Deberán tener cavidades cúbicas de 50 mm de lado, hechos de un material no atacable por los morteros, con dureza no menor de B 55 de la escala Rockwell y constituidos con paredes rígidas; mientras que para moldes cilíndricos deberán cumplir una relación de esbeltez de 2.0.
8. Pesas
9. Pisón
10. Probetas
11. Mallas del número 100, 50, 40, 30, 20 y 16.

• *Procedimiento.*

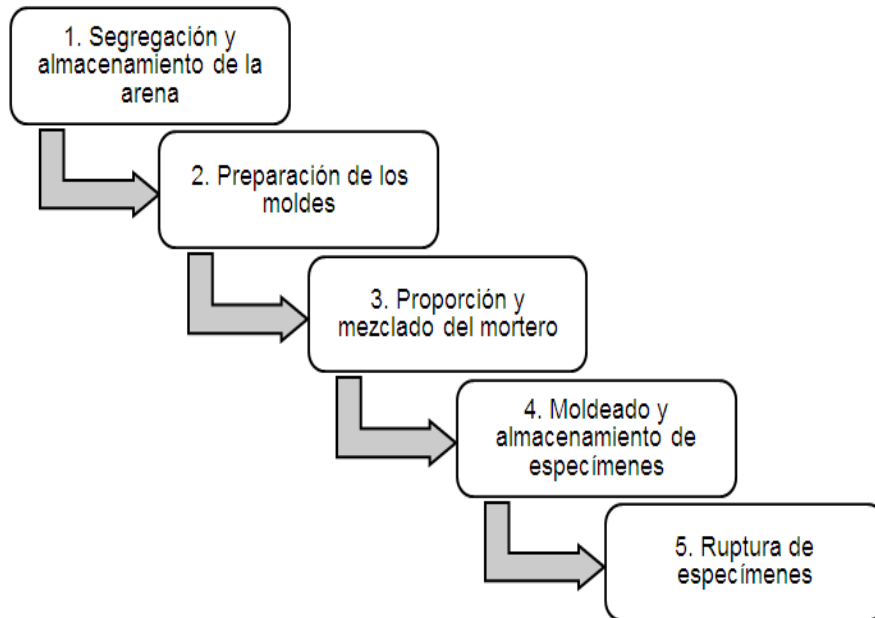


Figura 3.17. Procedimiento para determinar la resistencia a compresión

### 1. Segregación y almacenamiento de la arena

- Vaciar la arena de los sacos y mezclarla con un cucharón o una pala, todo esto con la intención de evitar la segregación; si se desea se puede volver a llenar los sacos después de realizar el mezclado
- Obtener por cuarteo una porción de 700 g de arena
- De esta porción separar por cuarteo cinco muestras de aproximadamente 100 g con el fin de comprobar la granulometría de la arena
- Cribar la arena, golpeando la criba 150 veces por minuto

### 2. Preparación de los moldes

- Cubrir los moldes con una capa delgada de aceite mineral o de grasa delgada
- Colocar los moldes sobre una superficie plana y de material no absorbente, a la cual se le ha aplicado una delgada capa de aceite mineral.



- Aplicar una mezcla de tres partes de parafina y cinco de brea en peso en línea de contacto entre el molde y la placa, la cual deberá ser calentada a una temperatura entre 110°C y 120° C, con el propósito de asegurar una junta hermética.

### 3. Proporción y mezclado del mortero

Para las normas mexicanas, el siguiente proporcionamiento se utiliza sólo cuando se realicen las pruebas de resistencia a la compresión, contenido de aire y retención de agua en los morteros. La proporción deberá ser una relación cemento/arena 1:3 tal como se muestra a continuación:

500g de cemento

Agua suficiente para obtener una fluidez de 110 %  $\pm$  5 %

1620 g de arena sílice

810 g de arena graduada de acuerdo a NMX C 061

810 g de arena sílice con granulometría indicada en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Granulometría de la arena sílice (ONNCCE-2004)

Malla (abertura en mm)	Residuo acumulado (%)
No. 16 (1.18 mm)	0.0
No. 20 (0.850)	15 máx.
No. 30 (0.600 mm)	95 – 100 máx.

- La proporción de materiales secos para elaborar un mortero agua cemento arena deberán ser los especificados en la tabla 3.5.

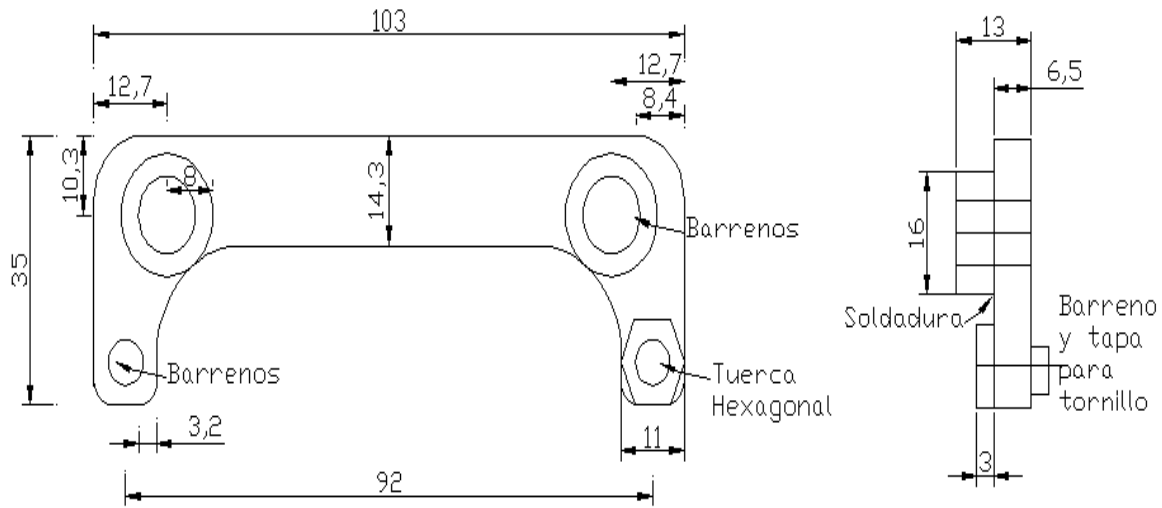
Tabla 3.5. Proporción de mortero agua cemento arena (ONNCCE, 2001)

Materiales secos	Peso en gramos
Número de especímenes	6
Cemento	500
Arena	1375
Agua	242

- Mezclar el mortero mecánicamente. Este método establece el mezclado de lechadas y morteros de cementantes hidráulicos, las primeras son mezclas de cemento y agua, mientras que las segundas son mezclas de cemento, arena y agua.

Para realizar esta prueba se deberá utilizar una máquina mezcladora que deberá ser impulsada eléctricamente del tipo epicíclico, que importa un movimiento orbital y de rotación a una paleta colocada en posición vertical dentro de la olla. Además tendrá que contar como mínimo con dos velocidades, una baja que haga girar a la paleta a 140 rpm  $\pm$  5 rpm, con un desplazamiento orbital de 62 vueltas por minuto, y otra alta la cual girará la

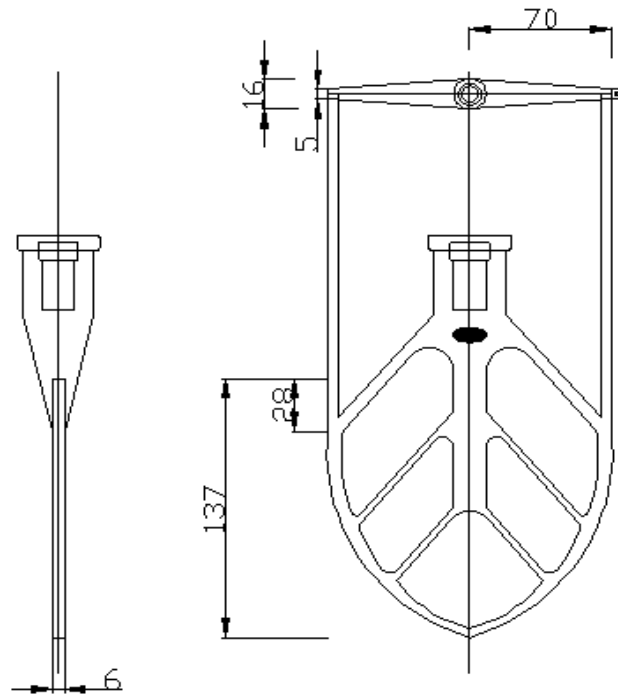
paleta a  $285 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$ , con un desplazamiento orbital de 125 vueltas por minuto.



Acotación en mm

Figura 3.18. Dispositivo de ajuste para la olla (ONNCCE, 2002)

La paleta deberá ser de acero inoxidable y fácilmente desmontable, teniendo una holgura entre la paleta y la superficie interior de la olla de 4 mm y que ésta no sea mayor de 0.8 mm



ACOTACIÓN EN MM

Figura 3.19. Especificaciones de la paleta (ONNCE, 2002)

La olla de mezclado, al igual que la paleta, será desmontable de la mezcladora, deberá tener una tapa y una capacidad de 4.73 L., fabricada de acero inoxidable y de acuerdo a las dimensiones establecidas en la figura 3.20.

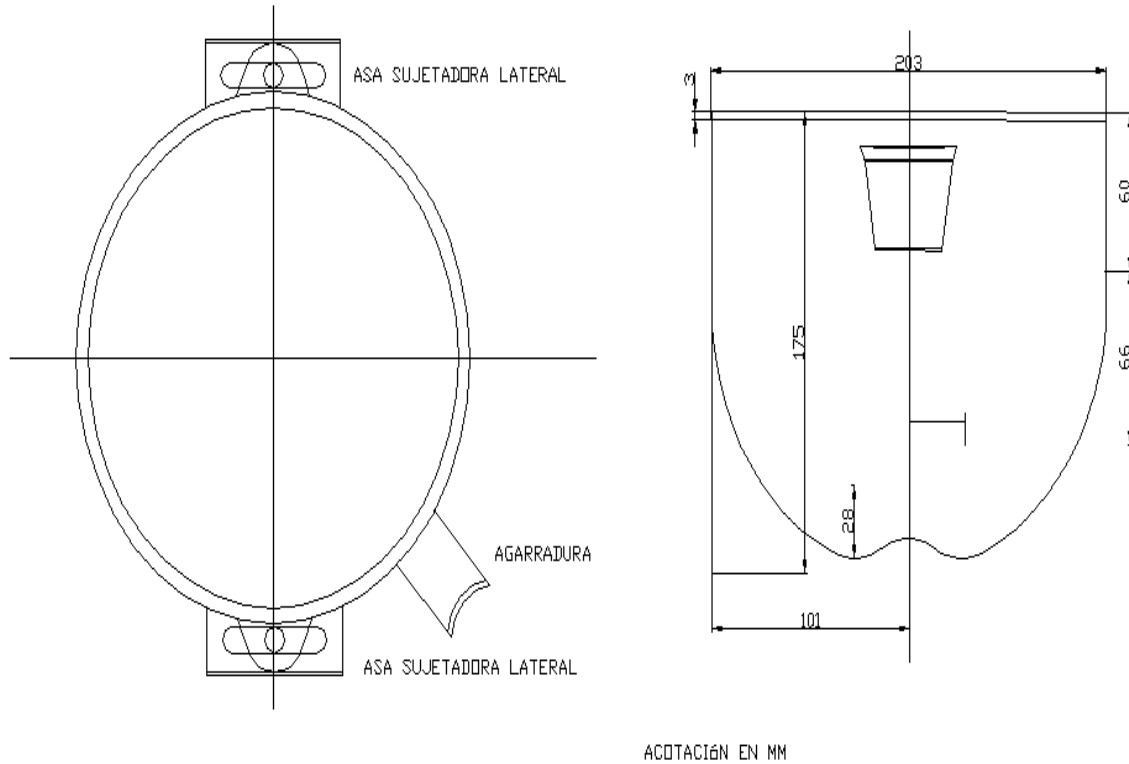


Figura 3.20. Olla de Mezclado (ONNCCE, 2002)



Figura 3.21. Mezclador de morteros  
([http://heelt.com.ar/catalogos/Catalogo\\_HEELT.pdf](http://heelt.com.ar/catalogos/Catalogo_HEELT.pdf))



- *Procedimiento.*

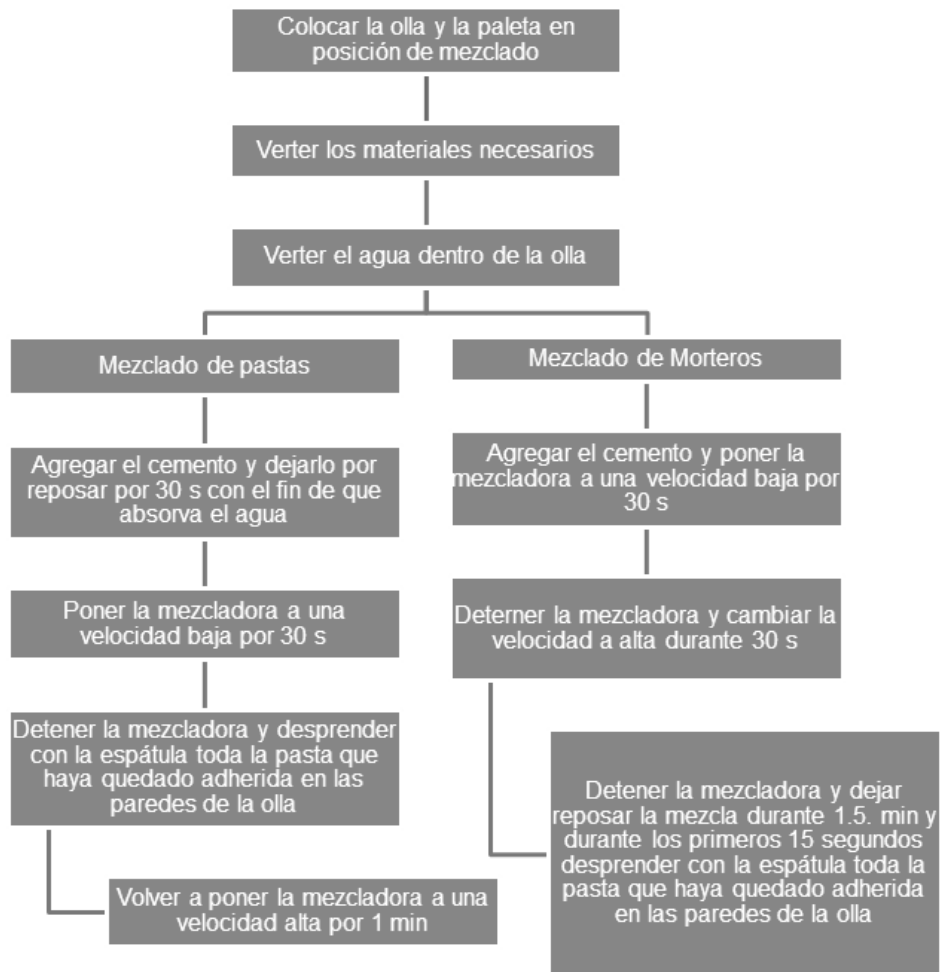


Figura 3.22. Procedimiento para mezclar pastas y morteros

#### 4. Moldeado y almacenamiento de especímenes

- Inmediatamente regresar al recipiente el mortero que se ocupó para determinar su fluidez
- Se continúa el mezclado por 15 s a una velocidad media (285 rpm)
- Preparar los especímenes dentro de un tiempo no mayor de 2 min 30 s a partir de haber iniciado el mezclado inicial del mortero
- Colocar una capa de mortero de 25 mm de espesor en los moldes
- Compactar el mortero con el pisón 32 veces en 10 s, en 4 vueltas.
- Enrasar el mortero sobresaliente con la cuchara de albañil
- Colocar los especímenes (con su molde y sobre su placa) en la cámara de gabinetes húmedos, dejando sus superficies expuestas al ambiente pero protegidas al goteo directo
- Los especímenes deberán permanecer dentro de los moldes de 20 h a 24 h
- Sumergir los especímenes en agua saturada de cal, en los tanques de almacenamiento, los cuales a su vez deberán ser hechos de material no corrosivo

## 5. Ruptura de especímenes

- Probar de inmediato los especímenes, con las tolerancias de tiempo según se especifica en la tabla 3.6.
- Tapar los especímenes con un trapo húmedo hasta el momento de la prueba
- Secar y quitar los granos sueltos de arena de los especímenes
- Comprobar que las caras sean planas mediante el uso de una regla
- Centrar el espécimen y aplicar la carga a una velocidad conveniente hasta alcanzar el 50 % de la carga máxima esperada.

Tabla 3.6. Tolerancia de tiempo (ONNCCE-2001)

Edad Prueba	Tolerancia
24 h	$\pm 30$ min
3 días	$\pm 1$ h
7 días	$\pm 3$ h
28 días	$\pm 12$ h

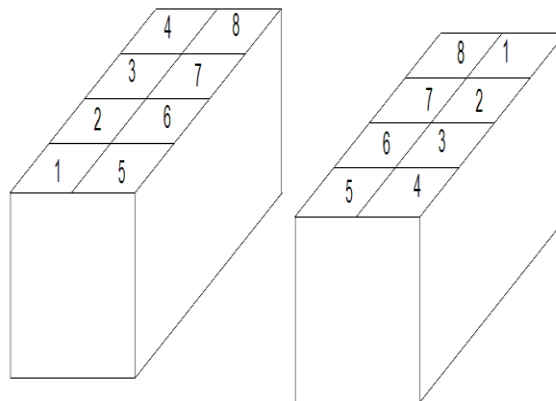


Figura 3.23. Apisonamiento en el molde (ONNCCE, 2001)

- *Expresión para determinar la resistencia a compresión.* El área de la sección transversal, al calcularse la resistencia a compresión del espécimen, será  $25 \text{ cm}^2$  pero cuando el área del espécimen varíe más de  $0.3 \text{ cm}^2$  se deberá usar la real. La carga máxima se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{P_{max}}{S} \quad (9)$$

Donde  $P_{max}$ , es la carga máxima; R, la resistencia a compresión y S es el área de la sección transversal del espécimen.

Con respecto a la resistencia de los morteros, se debe tener en cuenta que mezclas realizadas mediante cemento y cal alcanzan su resistencia a los 6 meses mientras que los de cemento y bentonita alcanzan su resistencia a los 28 días.

3.10.1. Ejemplos de resistencias obtenidas en dos tipos diferentes de morteros

A título de ejemplo, se muestra una prueba de resistencia determinada sobre especímenes colados en moldes de 5.6 cm de diámetro y 11 cm de altura, ensayado a 7, 14 y 28 días de edad y dosificados según las proporciones marcadas en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Dosificaciones de dos tipos de mortero

Tipo de mortero	
Mortero: Cemento/agua= 0.5; Cemento/Arena pómez= 0.85	Mortero: Cemento/agua= 0.6; Cemento/Arena= 0.75
Cemento = 500 kg Agua = 1000 ml Cal = 350 kg Arena pómez = 588 kg	Cemento = 600 kg Agua = 1000 ml Bentonita = 60 kg Arena andesítica = 800 kg
Límites de dosificación recomendados 0.4 < Cemento/Arena < 2.0 0.2 < Cemento/Agua < 0.8	

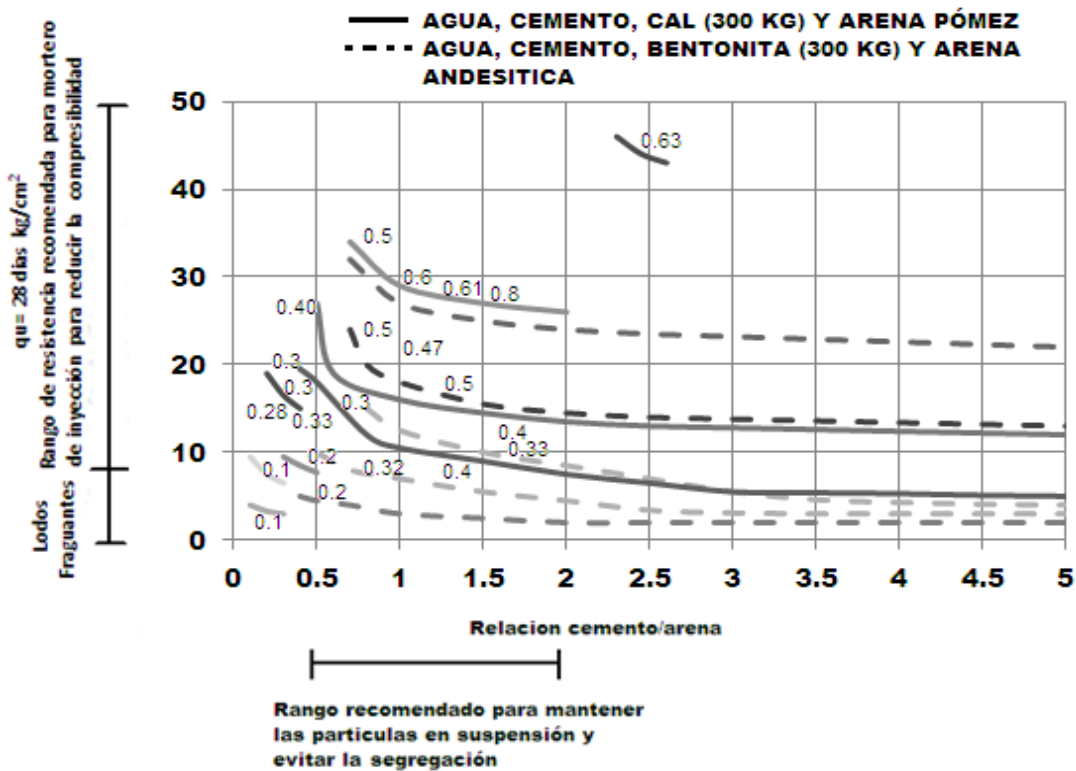


Figura 3.24. Resistencia en función de la relación cemento/arena y cemento agua en morteros de inyección (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002)

3.11. Especificaciones que deben de cumplir los gabinetes, cuartos húmedos y tanques de almacenamiento para el curado de especímenes de mortero

Los cuartos y gabinetes húmedos son aquellos que controlan la temperatura y humedad relativa, requisitos indispensables para almacenar los especímenes,



mientras que el tanque de almacenamiento es aquel que contiene agua a temperatura controlada en la cual se sumergen y se curan los especímenes.

Las especificaciones que deberán cumplir los gabinetes, cuartos húmedos, y tanques de almacenamiento son:

1. Cuarto o Gabinete Húmedo:
  - a) Su atmósfera deberá tener una temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , y su humedad relativa, deberá ser por lo menos de 95 %
  - b) Deberá estar equipado con graficadores continuos de temperatura
  - c) Sus paredes deberán construirse de materiales duraderos y sus puertas deberán estar herméticas
  - d) Su humedad relativa podrá mantenerse a través de rociadores de tipo aire o agua
  
2. Tanque de almacenamiento de agua
  - a) Deberán construirse con materiales que no sean susceptibles a la corrosión dentro de un cuarto o bajo el techo
  - b) Deberá estar equipado con un termómetro con su bulbo sumergido, manteniendo la temperatura del agua a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
  - c) El agua del tanque deberá estar saturada de cal para prevenir la lixiviación de hidróxido de calcio de los especímenes. Para lograr que el agua esté saturada de cal es necesario añadir 3 g por cada litro de agua como mínimo.
  - d) Los tanques deberán lavarse y cambiárseles el agua con cal en periodos no mayores a 24 meses.



Figura 3.25. Curado de Especímenes en cal

### 3.12. Especificaciones que deben de cumplir las mezclas en el momento de la inyección

#### 3.12.1 Viscosidad

La viscosidad se define como el tiempo que tarda una mezcla en fluir. Para determinar la viscosidad existen tres tipos de viscosímetros.

- a) Viscosímetro de cilindros coaxiales: Esta clase de viscosímetros permite determinar la tixotropía (estado en el que las mezclas se vuelven viscosas al dejarlas en reposo), mediante el trazo por puntos dando una desviación del cilindro interior en función del número de vueltas del cilindro exterior.

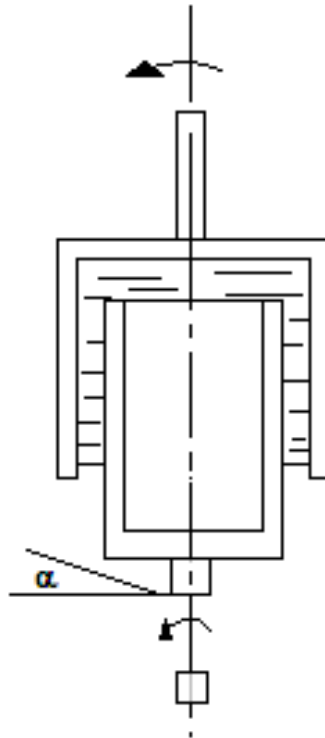


Figura 3.26. Esquema del principio de viscosímetro de cilindros coaxiales (Cambefort, 1968)

- b) Viscosímetro Stormer: Utilizado para determinar características de lodos de perforación. Se basa en determinar el peso necesario para arrastrar un agitador a una velocidad de 600 revoluciones por minuto.
- c) Viscosímetros de circulación: Son simples conos calibrados en los que la media, únicamente se obtiene determinando el tiempo de circulación de un volumen de mortero dado. Existen tres tipos de conos que se utilizan dependiendo cual sea la consistencia del mortero; estos tipos de cono se diferencian dependiendo del tamaño de su apéndice y son el cono Marsh (apéndice 5 mm), el cono Mecasol (apéndice de 8 mm) y el cono Prepakt (apéndice de 14 mm).

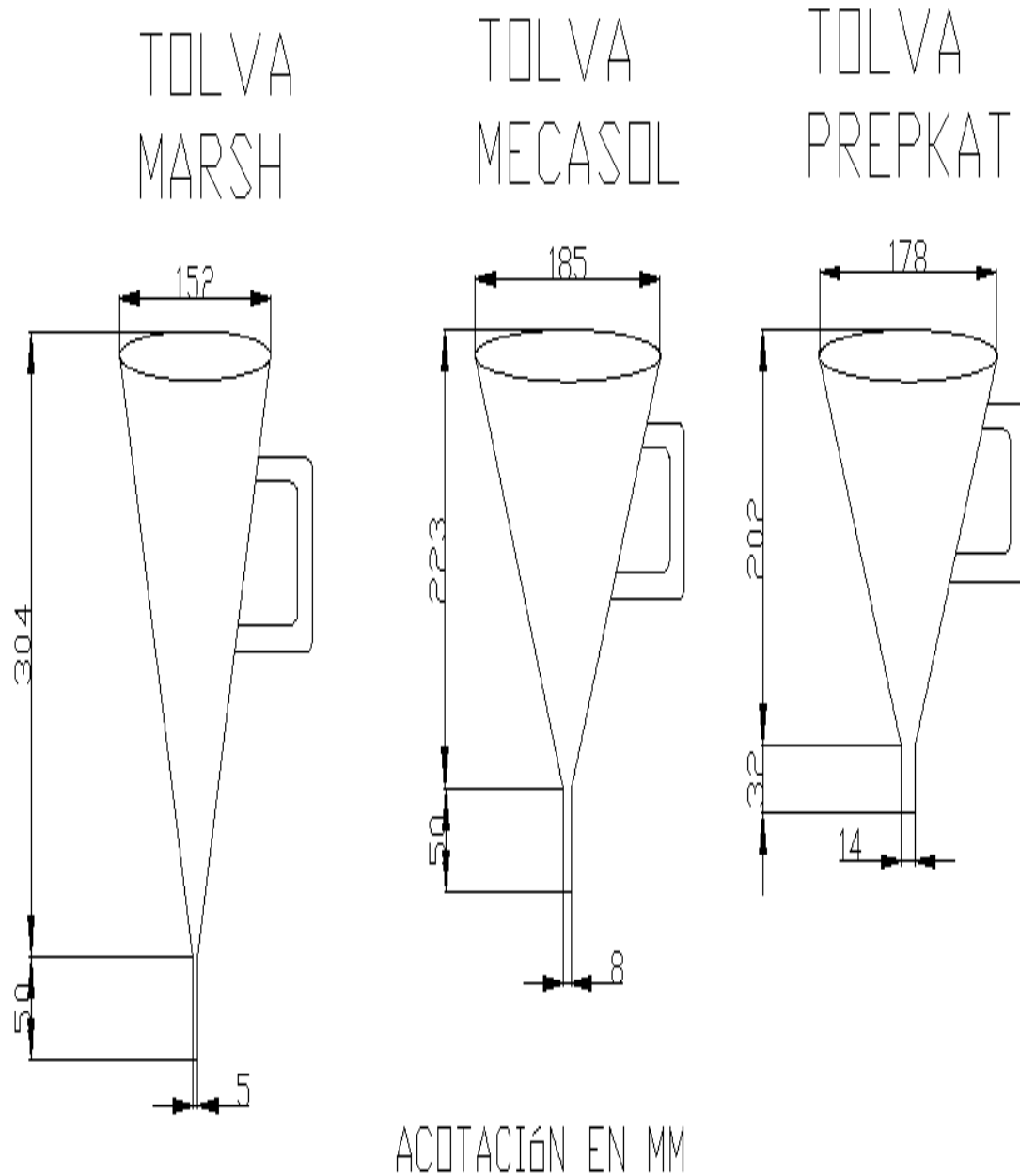


Figura 3.27. Diferentes tipos de conos (Cambefort, 1968)

Patentado por Hallan N. Marsh en 1931, en los Ángeles California EUA (Marsh Funnel). El uso del viscosímetro de Marsh es una prueba que controla la fluidez de los morteros. Para que estos sean bombeables los valores óptimos oscilan entre 45 a 100 s. Cuando una mezcla es espesa es difícil de bombear y además reduce la penetrabilidad de la misma en el terreno.

En laboratorio, la prueba consiste en definir el tiempo en segundos que tarda en salir 946 ml de mezcla en un embudo de dimensiones estándar cuando en él se colocan 1500 ml. Una mezcla es fluida cuando su tiempo varía entre 20 y 35 s.

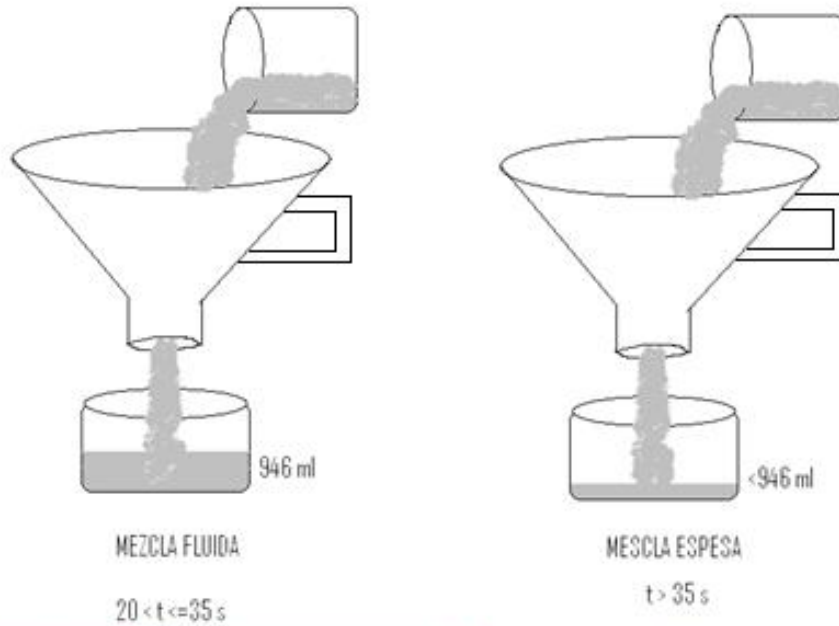


Figura 3.28. Viscosidad al cono Marsh

### 3.12.2 Sangrado, decantación o sedimentación

Este parámetro muestra si una mezcla es estable o no y se define como la ascensión de agua que se produce en la superficie de una suspensión, después de la sedimentación de sus partículas. En las mezclas de inyección entre más fuerte es la dosificación de cemento más resistencia tendrá un mortero, siendo menor su decantación; pero habrá que tener cuidado en no obtener mezclas con decantaciones nulas puesto que estas mezclas generalmente provocan morteros inyectables

En laboratorio la estabilidad de una mezcla se calcula colocando 300 ml de lechada en una probeta de 500 ml de capacidad, y midiendo durante dos horas la cantidad de agua libre en la parte superior de la misma, si ésta es menor o igual al 5% la mezcla se considera estable.

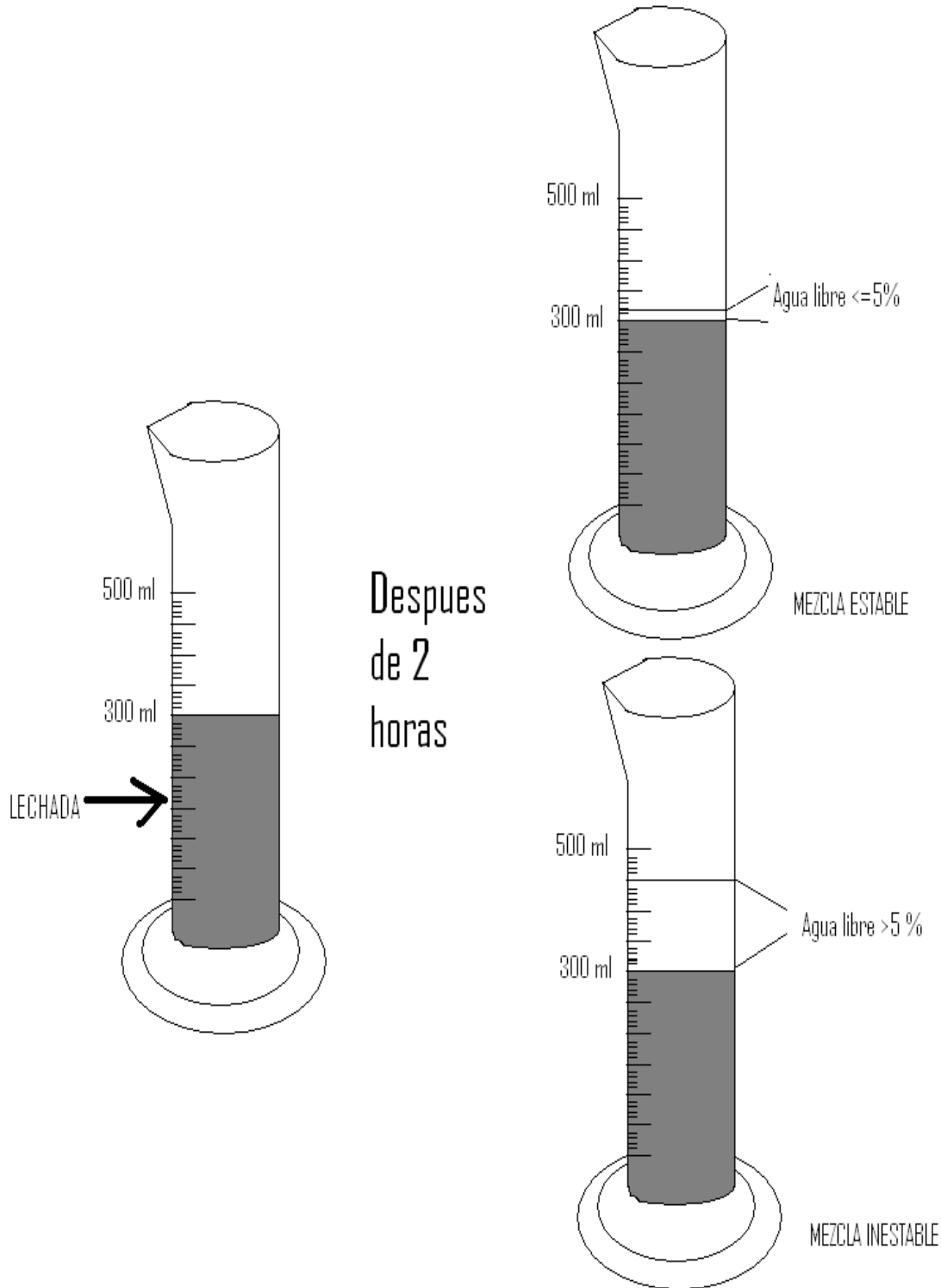


Figura 3.29. Procedimiento para determinar la estabilidad de una mezcla a base de cemento



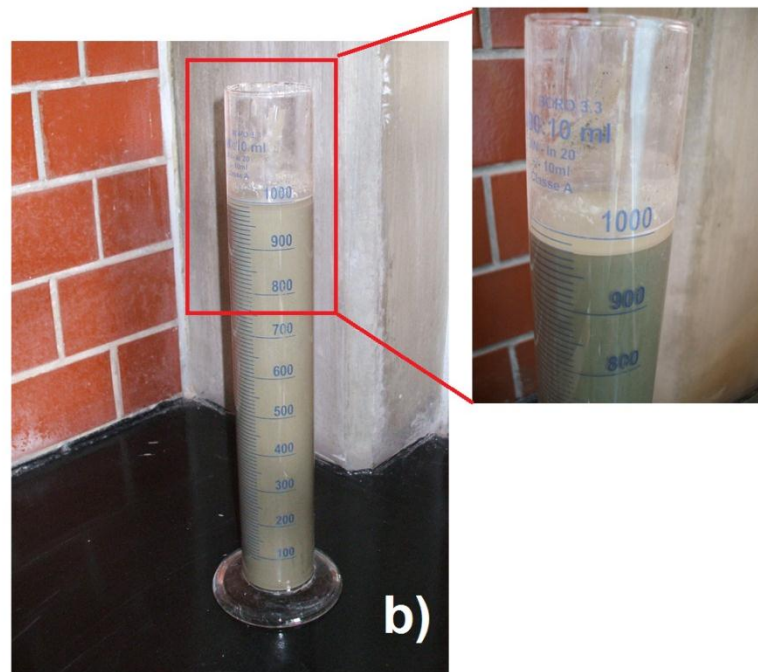


Figura 3.30. Ejemplos de una mezcla inestable a) y una mezcla estable b)

Antes de la aparición de los aditivos químicos se utilizaban proporciones de agua cemento de 2:1 a 3:1 para alcanzar mezclas estables utilizando bentonita, caracterizando este tipo de mezclas por su bajo contenido de cemento y baja resistencia final.

A continuación se muestran tres gráficas donde se ve que mezclas con cal tienen mayores porcentajes de contracción, mientras que mezclas sin cal tienen menores porcentajes de contracción, esto en función del porcentaje de sangrado.

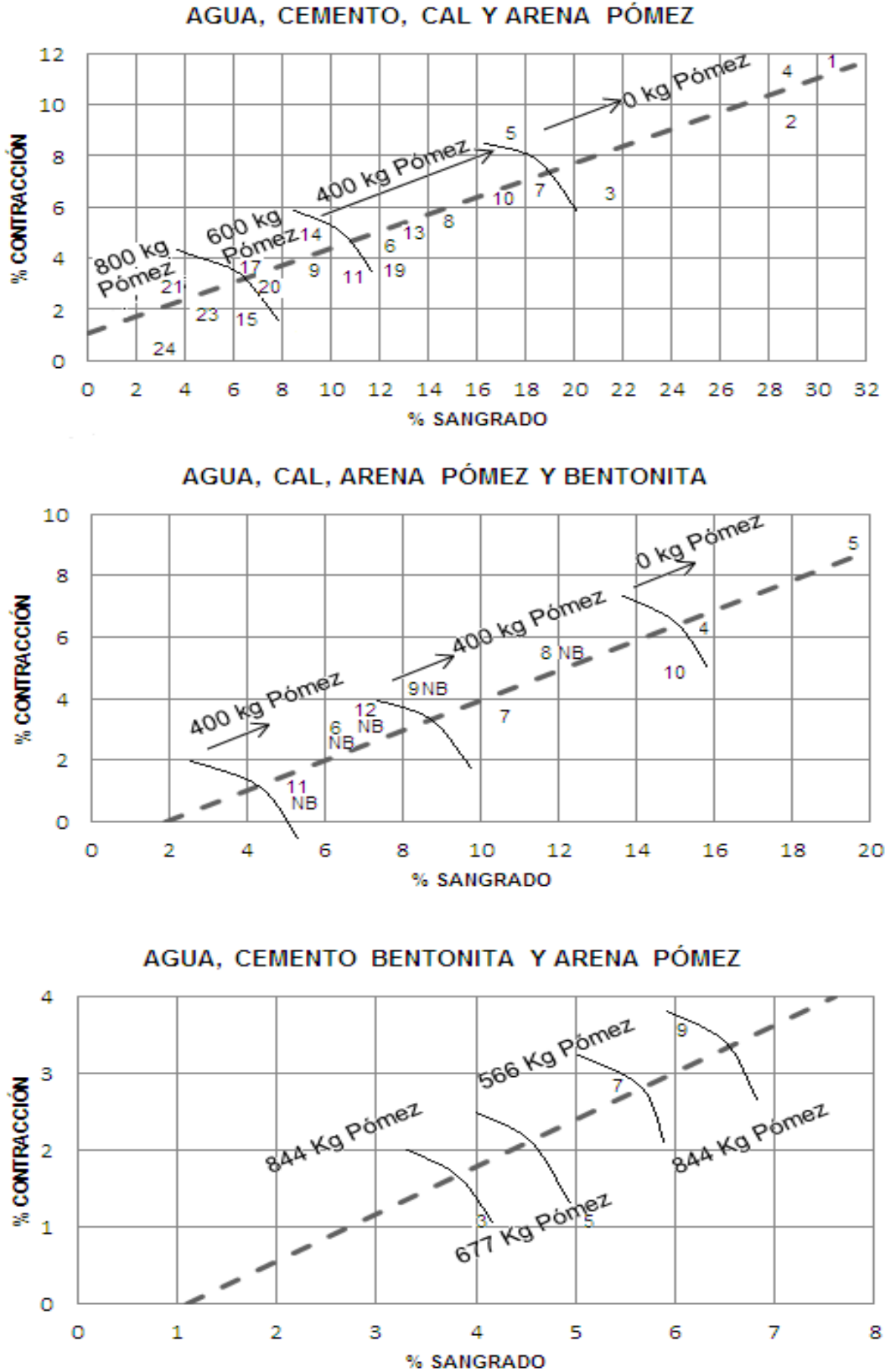
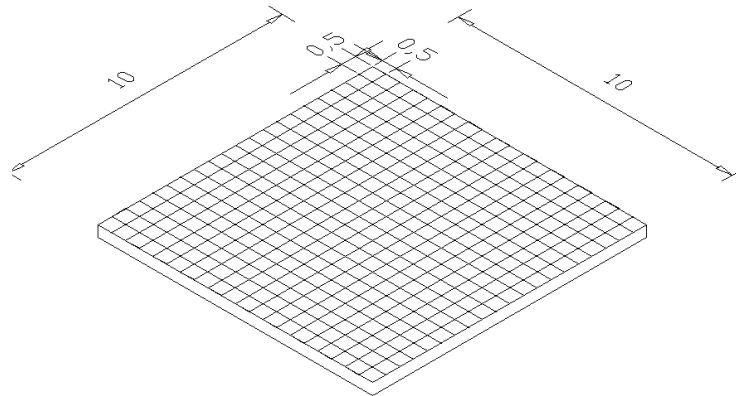


Figura 3.31. Correlación entre el Sangrado y contracción de morteros (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002)

### 3.12.3 Adhesión en placa

Esta prueba determina la adhesión de una mezcla, su procedimiento consiste en pesar la placa seca, introducirla totalmente en la mezcla, escurrirla y pesarla nuevamente.

La placa es de acero inoxidable y está rayada en ambas caras con las características que se muestran en la figura 3.32.



Acotación en cm

Figura 3.32. Características de la placa para determinar la adhesión en placa

Obteniendo la adhesión en  $\text{g/cm}^2$  mediante:

$$a = \frac{\text{Peso}_{\text{placa con mezcla}} - \text{Peso}_{\text{placa seca}}}{\text{Área de la placa}} \quad (10)$$

Para obtener una mezcla estable la adhesión (a) deberá ser mayor o igual a  $0.03 \text{ g/cm}^2$ .

Para obtener este parámetro se utilizó una placa de acero de  $10 \times 7.7 \times 0.7$  centímetros seleccionándose una mezcla de agua cemento y agua cemento bentonita en diferentes dosificaciones, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 3.8.

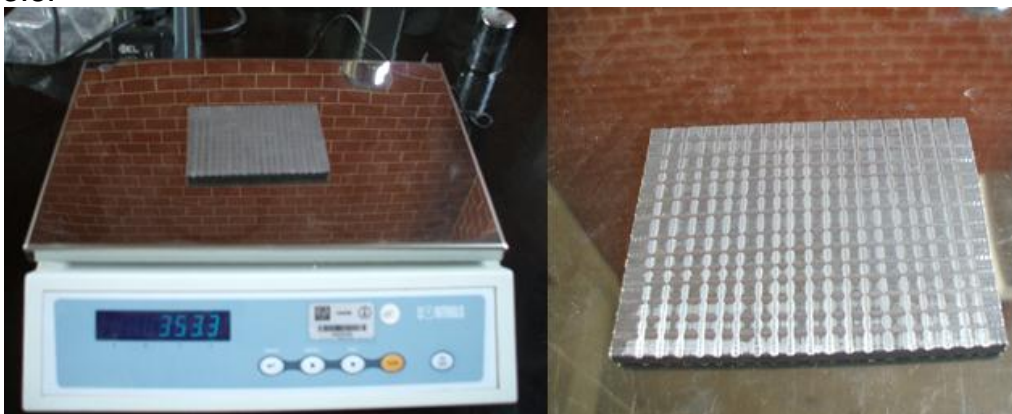


Figura 3.33. Peso de la placa seca

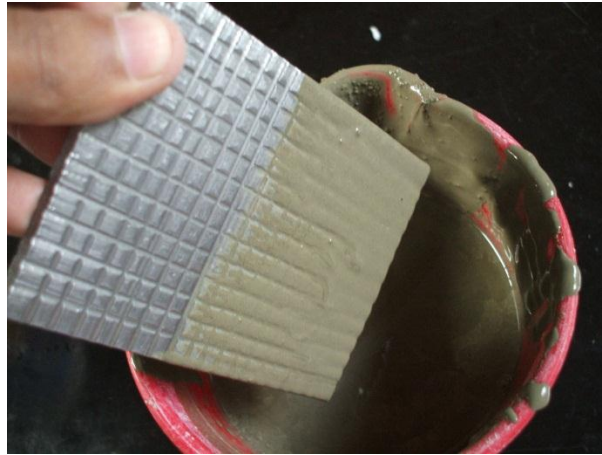


Figura 3.34. Introducción de la placa a la mezcla

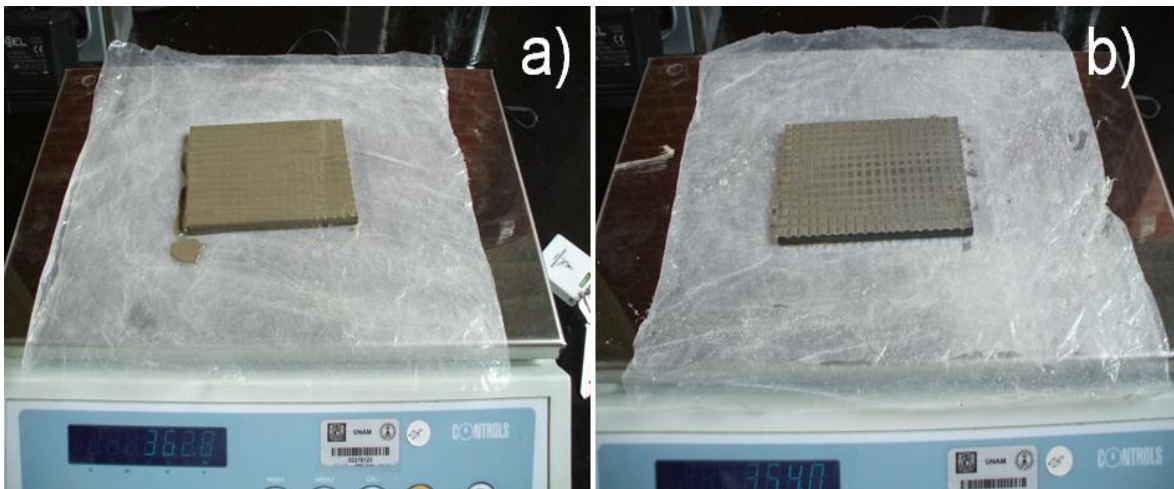


Figura 3.35. Ejemplos de una mezcla adherente (a) y de una mezcla no adherente (b)

Tabla 3.8 Adhesión en morteros

Dosificación A/C	Dosificación en peso (g)	Peso de la placa seca (g)	Peso de la placa con mezcla (g)	a (g/cm <sup>2</sup> )
0.66/1	Agua= 500 Cemento 757.5	353.3	357.6	0.055
3/1	Agua= 500 Cemento = 166.6		354.4	0.018
0.66/1 + 4% Bentonita	Agua= 500 Cemento = 757.5 Bentonita = 30.3		362.8	0.13
3/1 + 4% Bentonita	Agua= 500 Cemento 166.6 Bentonita = 20		354.7	0.018

En la tabla 3.8 se ve que a medida que se aumenta la dosificación en cemento la placa retiene mayor cantidad de mortero, volviéndose más espesa escurriendo muy poco y aumentando de esta manera su adhesión, lo cual no ocurre en mezclas con menor cantidad de cemento, ya que en estas la mezcla escurre más y su adhesión disminuye.



# CAPÍTULO

## 4.

---

# INYECCIÓN DE MORTEROS EN CAVIDADES, INTERACCIÓN SUELO- MORTERO



## CAPÍTULO 4

### INYECCIÓN DE MORTEROS EN CAVIDADES, INTERACCIÓN SUELO-MORTERO

La inyección de suelos comenzó en Francia a principios del siglo XIX, exactamente en 1802, cuando Bérigny inyectó morteros de cemento y puzolana con éxito. Después A. Mayer inyectó morteros de arcilla utilizados hasta entonces y posteriormente esta técnica se implementó con mezclas de arcilla-cemento.

Años más tarde se inyectaron otros productos, tales como resinas orgánicas (su fluidez se asemeja a la del agua durante la inyección) cuyas propiedades transforman al suelo en un hormigón de resistencia aceptable.

#### 4.1 Concepto de inyección

La inyección es el proceso mediante el cual se introduce en el subsuelo un fluido o producto que se solidifica y es capaz de reemplazar el aire o el agua de las fisuras, grietas u oquedades; lo cual a su vez reduce el flujo de agua y consolida el terreno; es decir, incrementa su resistencia y eleva en forma significativa su módulo de deformabilidad.

En cualquier inyección las variables a tomar en cuenta son el volumen del mortero, su viscosidad y la presión aplicada según la profundidad a rellenar.

#### 4.2 Medios inyectables

En los medios inyectables se pueden encontrar fisuras y huecos de suelos sueltos. Los primeros son de abertura sensiblemente constante mientras que los segundos tienen aberturas muy desiguales.

De acuerdo a Cambefort (1968), los medios inyectables se clasifican en:

- a) Suelos homogéneos: En este tipo de medio pueden encontrarse dos tipos de huecos o poros, ya sean de gravas mal cementadas o juntas de mortero. Estos suelos tienen un espesor delgado, por lo que no es posible someter la mezcla inyectada a elevadas presiones.
- b) Rocas Cársticas: Son en general rocas calizas en las que aguas subterráneas han creado cavernas de gran longitud y altura enlazadas por pozos o túneles. En ocasiones existe la posibilidad de ingresar a las mismas, pero cuando esto no es posible la inyección es el único medio para rellenarlas.
- c) Rocas Fisuradas: Este medio se caracteriza por la abundancia de fisuras en las rocas. El método de inyección a emplear se determina por la abertura de las fisuras y la calidad de la roca. La porosidad de estos suelos es de un 3 % aproximadamente.

- d) Suelos friccionantes: Se caracterizan por tener una porosidad de alrededor de 20 a 35 % y son aquellos medios constituidos por arenas y gravas, por derrumbes de ladera y cantos mal cementados.

### 4.3 Productos empleados en la inyección

Es importante recordar que las mezclas se deberán elegir en función del terreno a inyectar, de los objetivos que se pretenden alcanzar y de la economía de los trabajos. En resumen la clasificación de morteros empleados en la inyección de macizos rocosos se divide según el diagrama de la figura 4.1.

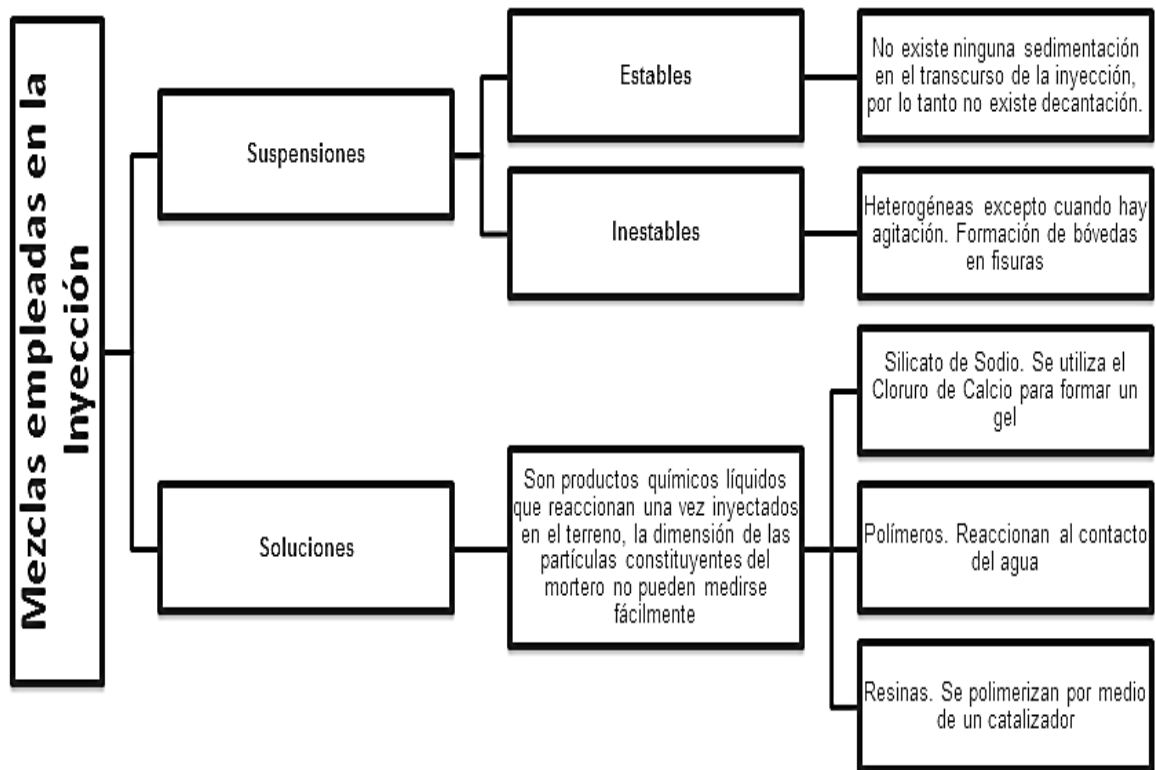


Figura 4.1. Tipo de mezclas empleadas en la inyección de un terreno

Medidas necesarias en tomar en cuenta es que si se desean reutilizar los mismos componentes de una mezcla, sus propiedades reológicas, como la cohesión y la fluidez, no llegan a ser las mismas por lo que es necesario desechar la mezcla.

Además es necesario inyectar agua en la superficie de cavidades, puesto que si se inyecta la mezcla en la superficie seca, éstas pueden perder parte del agua de su composición; incrementándose rápidamente su cohesión y reduciéndose su penetrabilidad.

Para alcanzar los resultados deseados el orden de preparación de la mezcla en campo es muy importante, colocando agua, después cemento y finalmente aditivos. El tiempo de mezclado es del orden de 1 a 3 minutos, posteriormente se



traslada la mezcla a los agitadores de bajas revoluciones mientras que se inyecta en el terreno.

#### **4.4 Presión de inyección**

La determinación de la presión de inyección en macizos rocosos es un factor de relevancia que se debe tomar muy en cuenta, puesto que presiones incorrectas pueden ser causa de sobrecostos, mayores tiempos de ejecución, incluso puede afectar las propiedades del terreno inyectado.

Se debe tener cuidado en no aplicar presiones excesivas; algunos autores justifican el uso de las mismas como por ejemplo Arguilere (1927), especifica que las altas presiones sólo son justificadas cuando se necesita expulsar el agua sobrante, ensanchando fisuras estrechas y facilitando de esta manera la circulación de la lechada a través de ella. Lugeon (1933), establece que la utilización de elevadas presiones sólo se justifica cuando los estratos no son horizontales, ya que si lo son se podrían levantar los estratos rocosos.

Por el contrario si se tiene construcciones vecinas al medio a inyectar, se debe tener cuidado en no utilizar presiones excesivas que provoquen en el terreno agrietamientos. Si las cavidades a inyectar se encuentran a más de 12 m de profundidad puede utilizarse la presión que se desee sin que se presente este problema.

Cuando sólo se requiera rellenar cavidades en el terreno, no es necesario aplicar altas presiones en rocas blandas. Por el contrario, cuando se desee que la mezcla penetre en el terreno y mejore su rigidez, será necesario emplear presiones de inyección poco superiores a la crítica del terreno.

##### **4.4.1 Método de inyección GIN**

En 1987 surgió un nuevo método para inyectar lechadas en macizos rocosos. Este método que por sus siglas en ingles significa Grout Intesity Number, se controla mediante una computadora en campo, permitiendo reducir y evitar el problema de hidrofracturamiento (si se establecen adecuadamente los parámetros de control, mismos que se definen mediante pruebas de inyectabilidad y con la información geológica del sitio). Mediante esto se aseguran los límites de presión y volumen adecuados de las curvas GIN, elaboradas a tiempo real, registrando todo el proceso de inyectado y controlándolo mediante la manipulación de la presión.

Antes de comenzar la inyección es conveniente utilizar una mezcla estable (decantación mínima), con baja cohesión, alta densidad, baja viscosidad, tiempos de fraguado aceptables en función de la inyección a realizar, resistencia elevada a la desintegración o al desgaste, resistencia mecánica, además de asegurarse que el terreno tenga suficiente humedad para evitar que este absorba la humedad de la mezcla de lo contrario se provocarían deficiencias en el tratamiento del terreno.



La curva límite de inyección se define por tres parámetros:

1. La intensidad o número  $GIN = PV$  [*bars l/m*], siendo P la presión en bars, KPa o  $kg/cm^2$ ; y V el volumen de absorción de lechada por metro de barreno inyectado en [*l/m*] o en kg de cemento por metro [*Kg cemento/m*].  $GIN = PV = \text{constante} = \text{“energía específica”}$ , es decir, energía de inyección por metro de barreno
2. La presión máxima (en la boca del barreno)
3. La toma máxima de lechada o volumen de absorción en el barreno

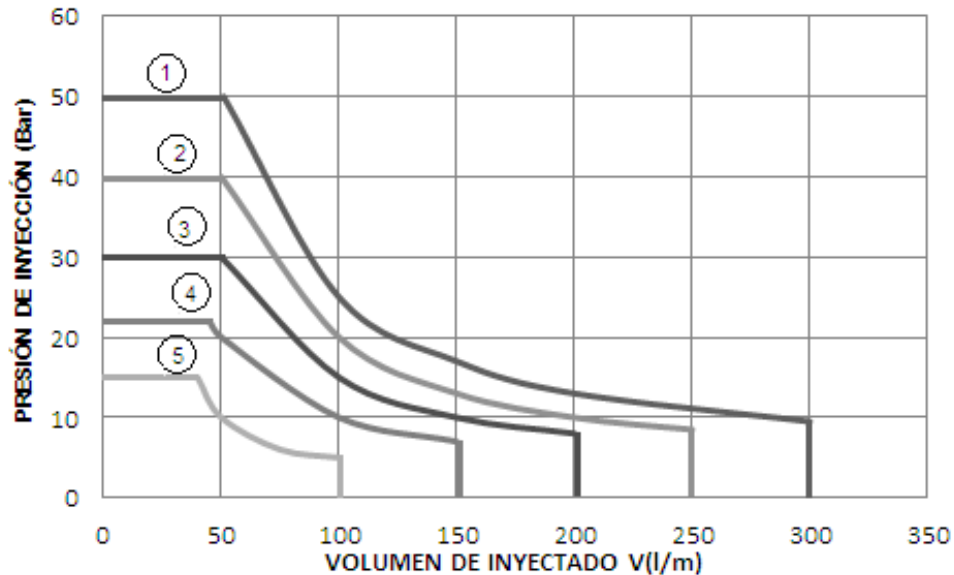
Con el número GIN también se puede definir el volumen crítico a inyectar siendo igual a:

$$V_{cr} = 0.5 \text{ GIN}/P_{m\acute{a}x}$$

$$V_{cr} = V_{m\acute{a}x}/20$$

$$V_{cr} = V_{m\acute{a}x} / 10$$

A continuación se muestra un conjunto estándar de curvas límite GIN que se pueden considerar como punto de partida para el diseño particular de un proyecto



	Intensidad GIN (bar - Vm)	Pmax (bar)	Vmax (l/m)
①	Muy Alto > 2500	50	300
②	Alto 200	40	250
③	Moderado 1500	30	200
④	Bajo 100	22.5	150
⑤	Muy bajo < 500	15	100

Figura 4.2. Gráficas de un conjunto de curvas límite GIN (Bonola y Paredez, 2007)

La inyección se suspende cuando la trayectoria de la curva de inyectado alcanza la curva GIN o cuando se alcanza la presión máxima preestablecida, en ambos casos el consumo de mezcla debe ser bajo (menos de 5 l/min) o nulo. También se

suspende la inyección cuando se alcanza un volumen máximo de inyección que es el indicador de una fractura abierta.

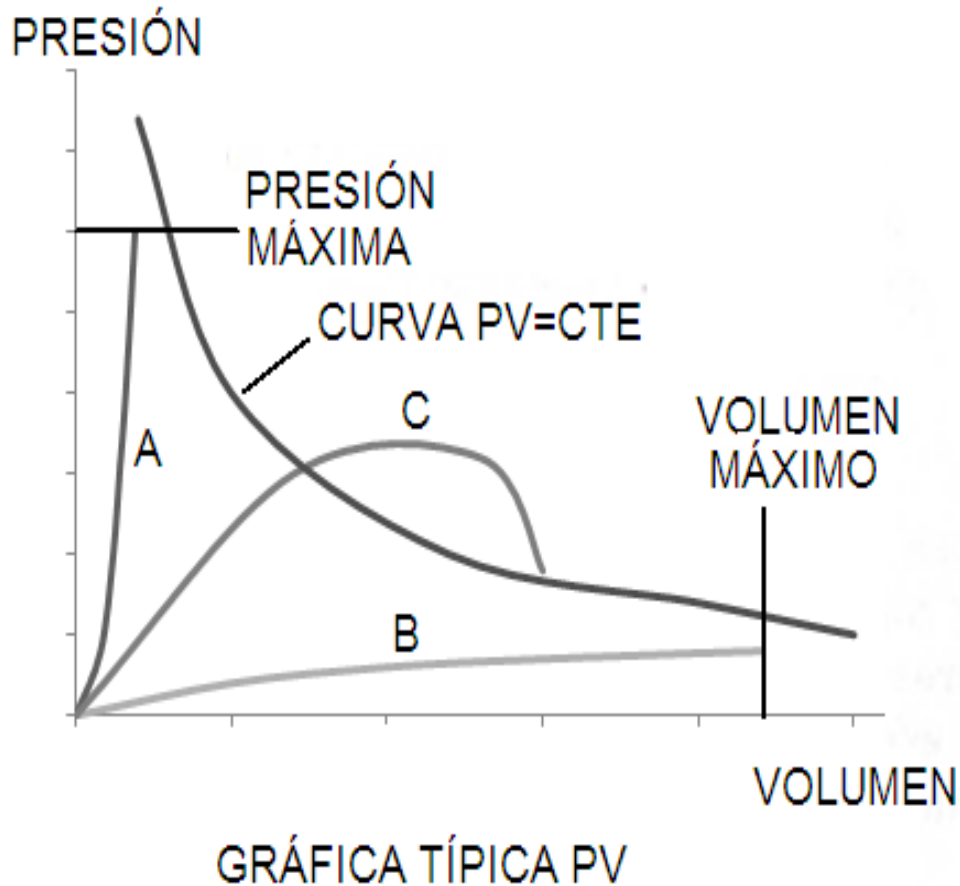


Figura 4.3. Gráficas de control empleadas en el procedimiento de Presión-Volumen constante donde A, B, C son ejemplos de curvas de inyección (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002)

#### 4.5 Equipo utilizado para fabricar mezclas de inyección

La inyección de cavidades consiste en preparar los morteros con un mezclador, mantenerlo en suspensión mientras que se inyecta por medio de un mezclador de bajas revoluciones, someterlos a presión mediante el empleo de una bomba, introducirlos en el medio a tratar y obturar la perforación al finalizar

El equipo a utilizar para mezclas elaboradas a base de cemento es:

- 1) *Turbo mezclador*: Equipo de altas revoluciones con 1250 rpm como mínimo.
- 2) *Mezclador de bajas revoluciones*: Equipo de 60 a 80 rpm, empleado para mantener la agitación de la mezcla durante la inyección
- 3) *Bombas de tornillos sin fin o de doble pistón*: Equipo con capacidad de inyección de 0 a 60 l/min y presión ajustable de 0 a 30 o 40 kg/cm<sup>2</sup>.
- 4) *Obturadores mecánicos, neumáticos o hidráulicos*: Su función consiste en obturar la perforación

- 5) *Manómetros registradores de paso integral*: Equipo capaz de medir un tercio más de cada una de las presiones de inyección especificadas.

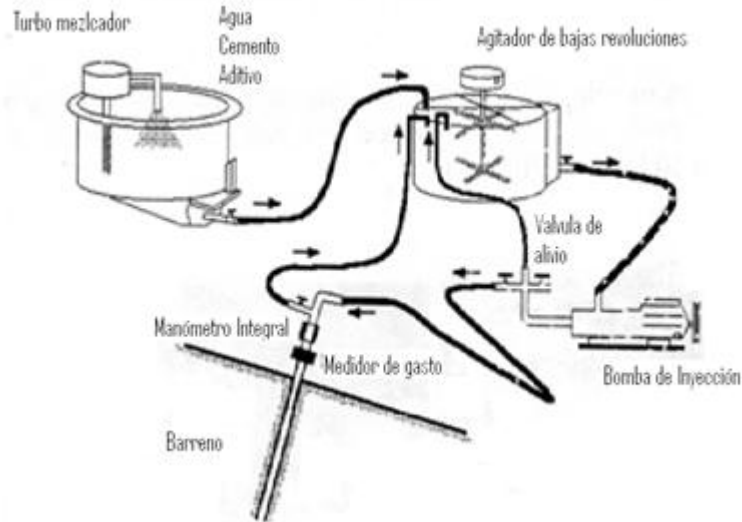


Figura 4.4. Arreglo del equipo de inyección (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002)

#### 4.5.1 Mezcladores

En la antigüedad, se inyectaban cemento puro empleando solamente una pala y una cubeta limitándose a cavidades muy pequeñas y además superficiales. Obviamente el relleno de grandes extensiones era imposible, fue entonces cuando apareció el primer mezclador que consistía en un recipiente cuya parte inferior tenía una hélice accionada por un agitador o manivela.

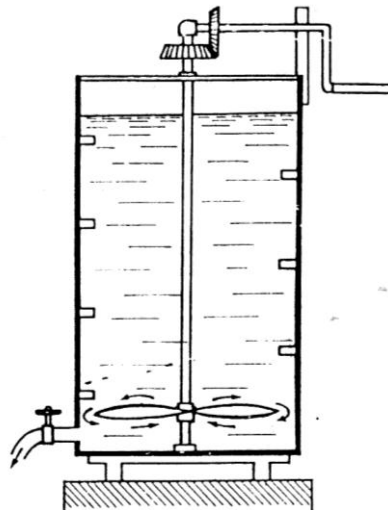


Figura 4.5. Mezclador de una cubeta (Cambefort, 1968)

En el año 1945, se realizaron las primeras inyecciones de cemento arcilla, empleándose un mejor sistema el cual consistía de un mezclador de dos cubetas de 100 litros de capacidad, colocadas una encima, con agitadores accionados por un motor. La cubeta superior mezclaba el mortero y al estar listo, era aspirado por una bomba a la cubeta inferior, cuya función era impedir la sedimentación.

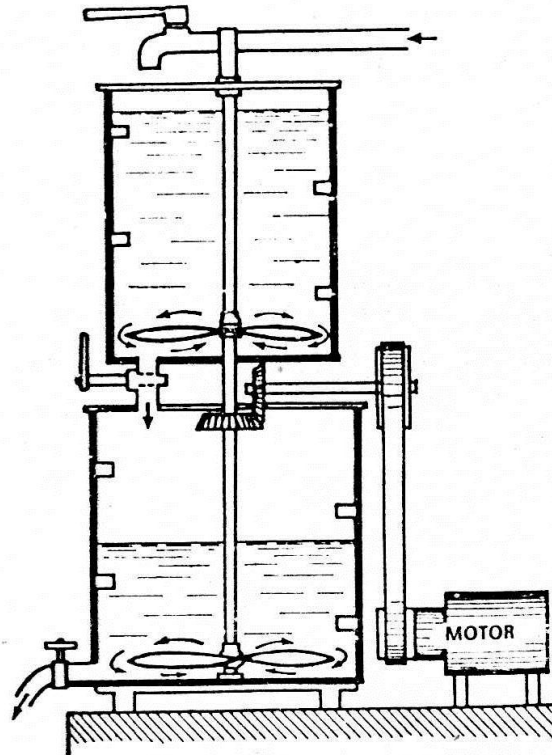


Figura 4.6. Mezclador de dos cubetas (Cambefort, 1968)

Años más tarde aparecieron turbomezcladores, que incrementaron notablemente la velocidad de agitación, pasando de cien de revoluciones por minuto a 1500 o hasta 3000, esto mediante el empleo de una turbina de bomba o un sistema de cilindros. El primero de los aparatos en adoptar este sistema fue el Colereete, el cual prepara un cemento coloidal en la primera cubeta, después cambia a la segunda añadiéndole una arena fina. Debajo de cada cubeta se halla una turbina que provoca la circulación de los morteros en un circuito cerrado de un recipiente a otro.

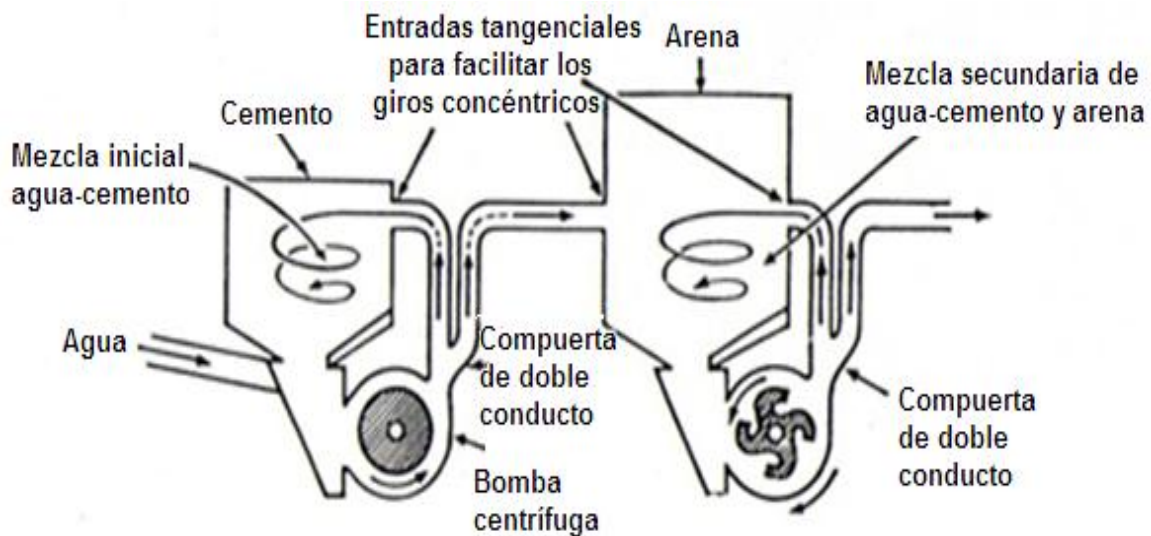


Figura 4.7. Principio del Mezclador Colereete (Cambefort, 1968)

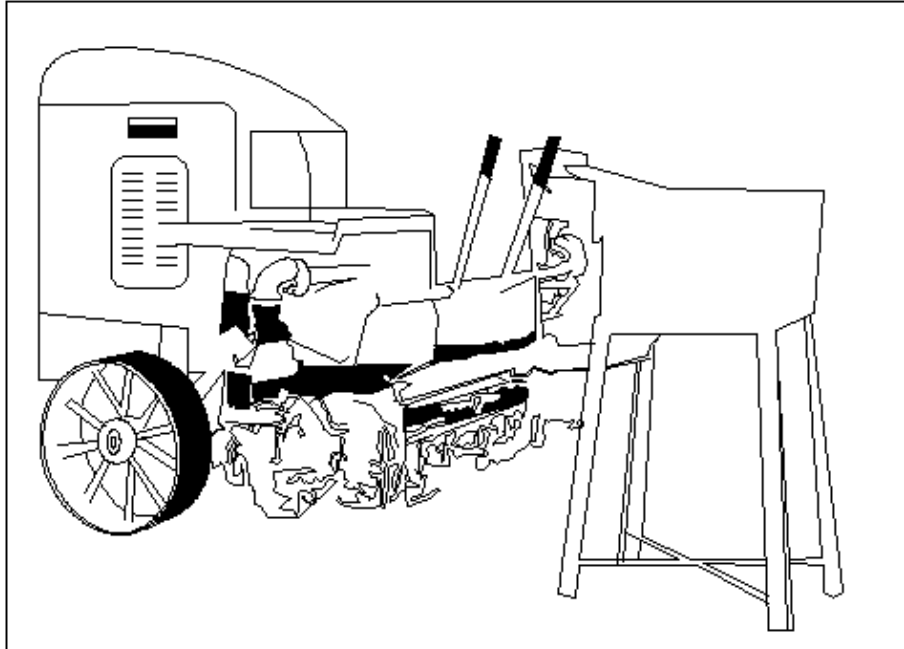


Figura 4.8. Mezclador Colereete (Cambefort, 1968)

Posteriormente apareció el mezclador de alta turbulencia de cubeta única y cuya agitación es provocada por el movimiento a gran velocidad de dos grandes cilindros verticales y paralelos girando en sentido inverso

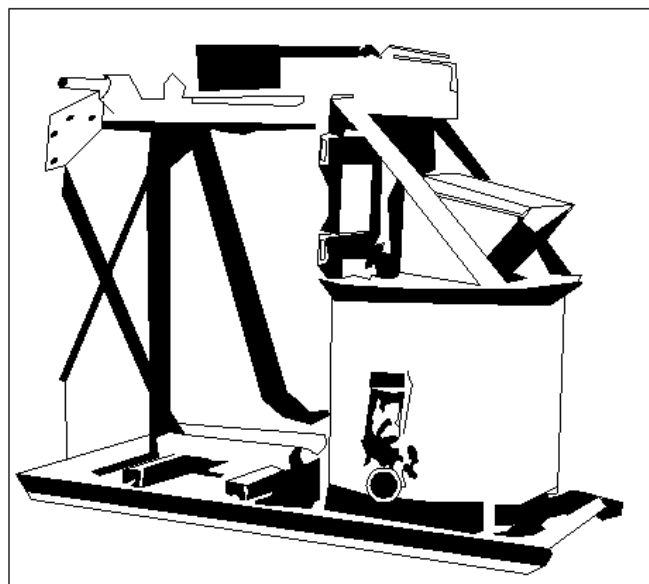
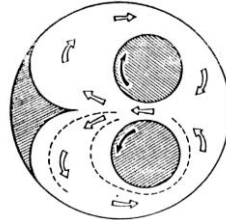


Figura 4.9. Mezclador de alta turbulencia y su principio de amasado (Cambefort, 1968)

#### 4.5.2 Bombas, prensas e inyectores

Las bombas que se emplean dependen mucho del tipo de suelo y del volumen de mortero a rellenar; por ejemplo, cuando se requiere inyectar un mortero aireado se puede utilizar bombas de tornillo de Arquímedes, cuya potencia es baja y son accionadas por un motor. Además existen otras bombas de membrana o de émbolo cuyas presiones son del orden de 10 a 20 kg/cm<sup>2</sup>.

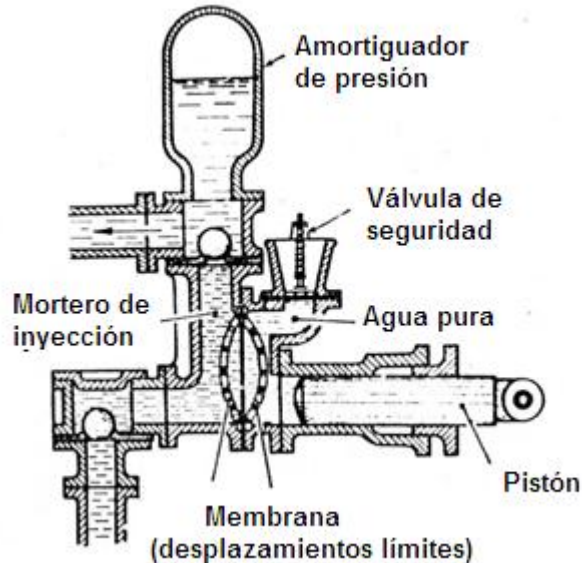


Figura 4.10. Bomba de membrana (Cambefort, 1968)

Más sin embargo si se desea inyectar un volumen de mortero elevado, como es el caso del relleno de cavidades, se pueden utilizar aparatos mucho más potentes llamados indistintamente bombas, inyectores o prensas los cuales suelen tener dos émbolos en oposición. Generalmente tienen un caudal máximo del orden de 1 l/s y permiten alcanzar una presión de 100 kg/cm<sup>2</sup>.

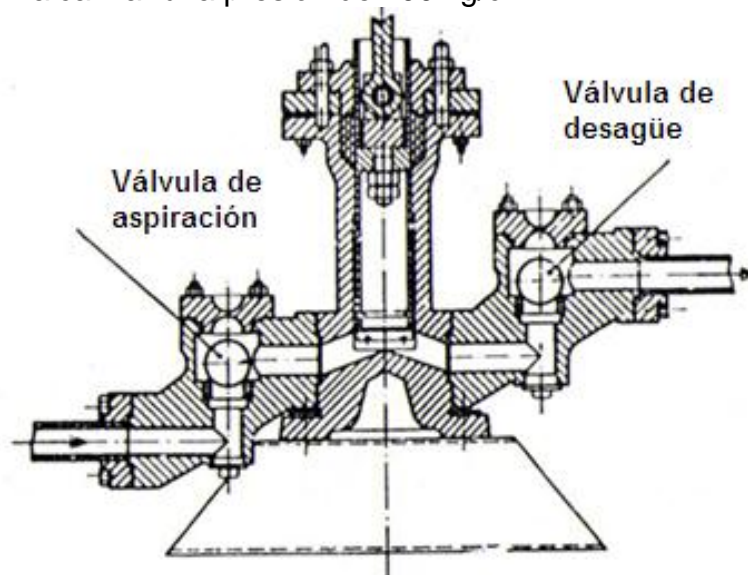


Figura 4.11. Bomba de émbolo (Cambefort, 1968)

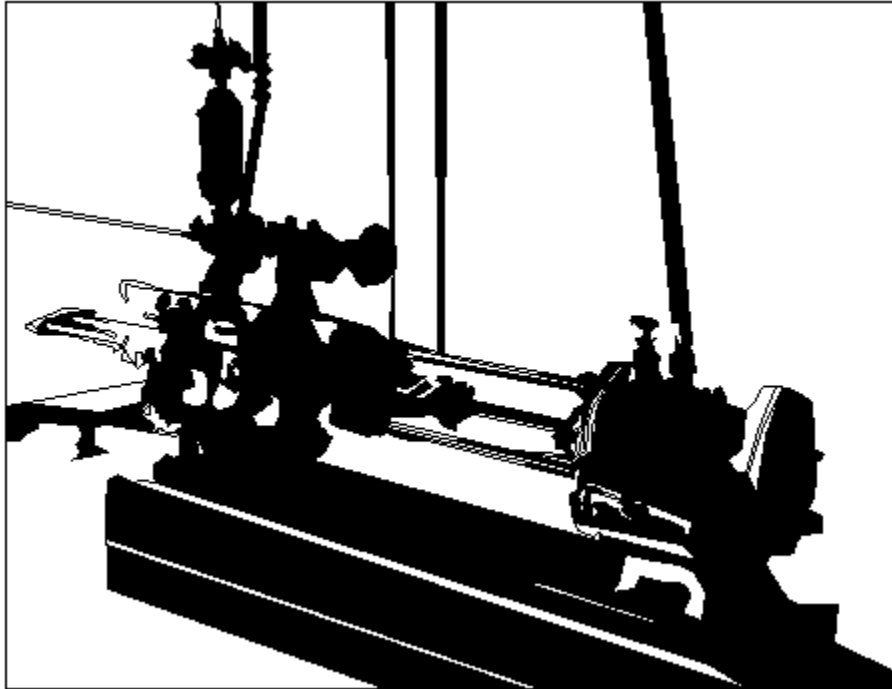


Figura 4.12. Inyector de dos émbolos en oposición (Cambefort, 1968)

Existe otro aparato llamado Johnny que puede ser utilizado como mezclador o bomba. Su funcionamiento consiste en suministrar aire comprimido por la parte inferior, asegurando la agitación del mortero que después de ser sometido a presión (cerrada su tapa), se lanza lejos. El aparato es de construcción muy sencilla pero no su manejo, el cual exige mucha destreza para no inyectar aire en lugar de mortero.

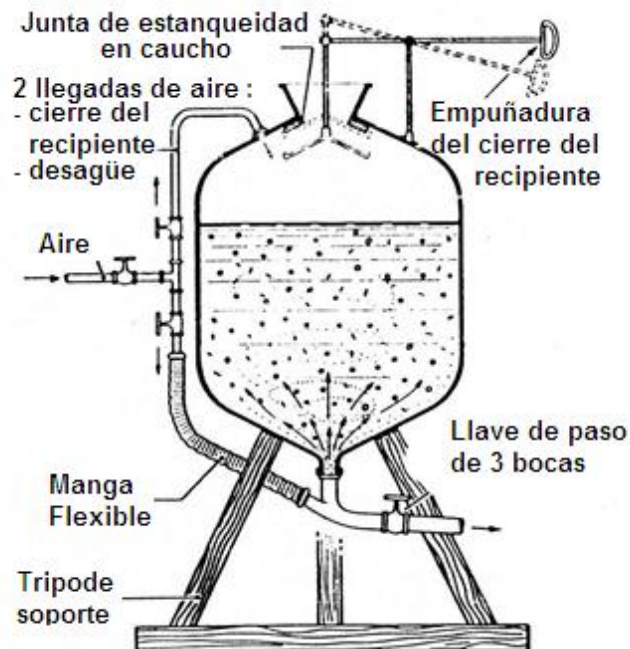


Figura 4.13. Aparato tipo Johnny (Cambefort, 1968)

Cabe mencionar, que este tipo de dispositivo no debe utilizarse en las inyecciones propiamente dichas, ya que es un simple transportador de morteros muy espesos y con granos tan grandes que las bombas no puedan admitirlos. Estos morteros están destinados a rellenar grandes cavidades a poca profundidad y sólo son inyectados a baja presión

#### 4. 6. Tipos de inyección

Los tipos de inyección dependen de las características del suelo y de los objetivos que se busquen, como son: impermeabilización, estabilización o mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo.

Los tipos de inyección se clasifican de acuerdo a la figura 4.14.



Figura 4.14. Clasificación de los métodos de inyección

##### 4.6.1 Inyecciones de impermeabilización

Cuando existe flujo de agua es necesario impermeabilizar el terreno y recurrir al uso del asfalto caliente (introducido en el terreno en forma caliente) o bien de productos químicos del tipo polímeros que reaccionan y se expanden al contacto con el agua, logrando con esto un taponamiento local de la cavidad que permite la inyección de mezclas sin que sean arrastradas por el flujo del agua.

Al impermeabilizar el terreno es necesario recurrir a tres tratamientos del terreno tales como son las pruebas de inyección, pantallas de impermeabilización y tapetes de consolidación.



Tabla 4.1. Tratamientos del terreno para impermeabilizar el suelo

Se realiza in-situ utilizada para determinar la permeabilidad natural y las características de inyectabilidad de un macizo rocoso. También permite determinar la geometría más apropiada de la pantalla de impermeabilización y/o del tapete de consolidación, tales como su geometría, distribución, inclinación, separación y longitud de las perforaciones, así como definir el procedimiento y presiones de inyección más convenientes.

Las pruebas de inyección consisten en

1. Caracterizar la permeabilidad del terreno a través de pruebas tipo Lugeon; la cual tiene por objeto proporcionar una idea aproximada de la permeabilidad de un macizo rocoso a través del grado de fisuración de la roca. Su procedimiento consiste en inyectar agua a presiones crecientes y decrecientes y medir el caudal que escurre por las fisuras del macizo rocoso. Para mayor información se recomienda consultar el libro *“Manual Geotécnico para el Diseño de Pequeñas Presas, (Bonola y Paredez., 2007).*

Pruebas de inyección

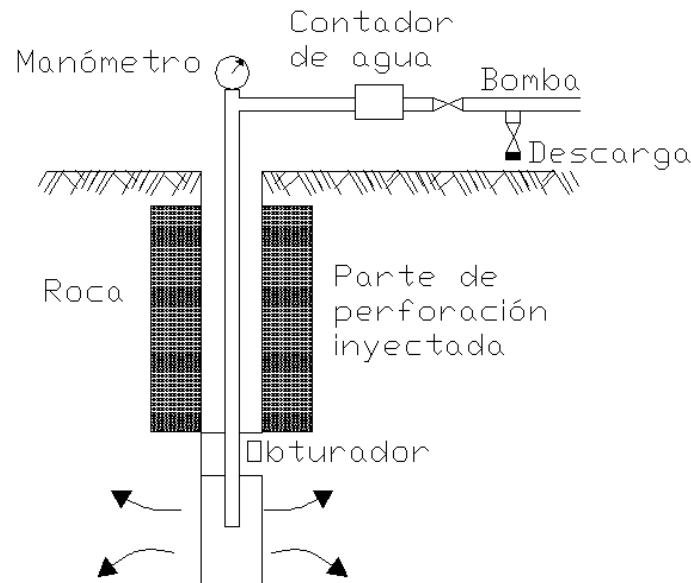


Figura 4.15. Montaje para determinar la permeabilidad de un macizo rocoso a través de pruebas Lugeon

2. Inyectar en el terreno una mezcla estable utilizando un cierto arreglo geométrico en las perforaciones, realizando modificaciones conforme se obtienen los primeros resultados.
3. Registrar las presiones y consumos obtenidos en cada tramo inyectado.
4. Analizar la información obtenida para ajustar los parámetros geométricos del tratamiento, el proporcionamiento de la mezcla de inyección y definir el procedimiento de inyección así como el control más acorde con el terreno.

Tabla 4.1. Tratamientos del terreno para impermeabilizar el suelo

Su objetivo es reducir la permeabilidad y las múltiples filtraciones a través del macizo rocoso. Las pantallas de impermeabilización se forman por medio de la perforación e inyección paralela de una serie de barrenos. Las características de una pantalla se muestran en la figura 4.16.

Pantalla de impermeabilización



Figura 4.16. Características de una pantalla de impermeabilización

La inyección de barrenos se realiza por 3 etapas que en forma esquemática se expresan en la figura 4.17.

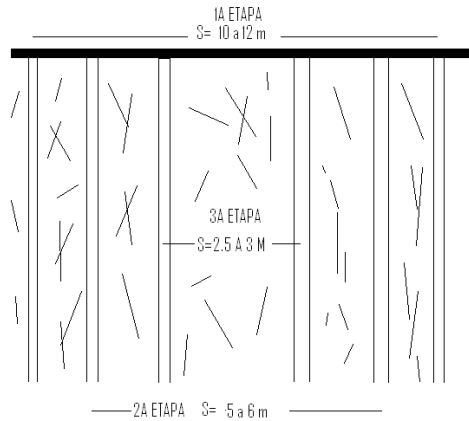


Figura 4.17. Etapas de Inyección

Tabla 4.1. Tratamientos del terreno para impermeabilizar el suelo

Tiene por objetivo mejorar las propiedades mecánicas de la roca bajo la cimentación de la estructura civil, dando como resultado menores deformaciones (producidos por los esfuerzos transmitidos) y mejor permeabilidad del terreno al sellar las fracturas.

Tapetes de consolidación

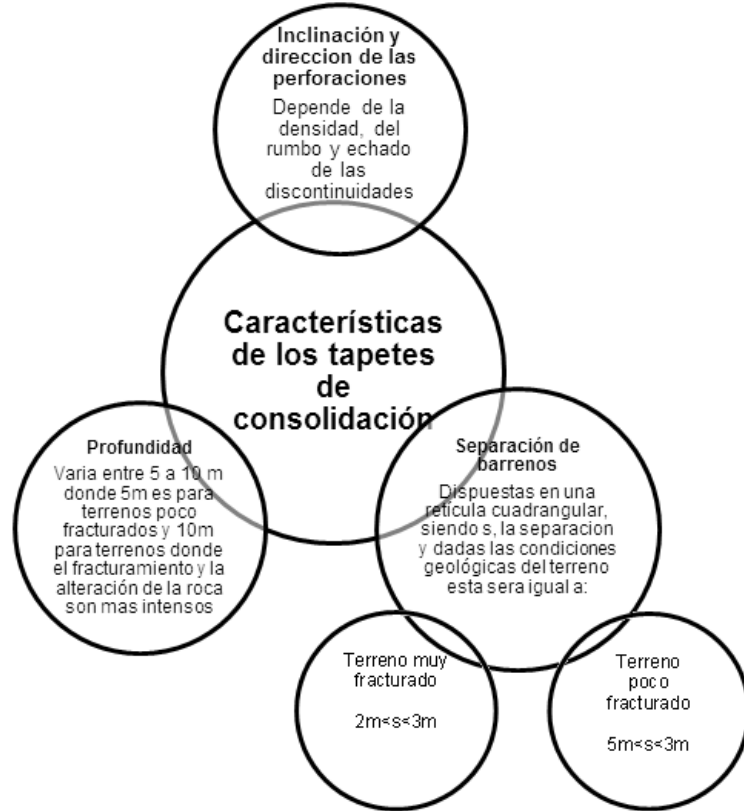


Figura 4.18. Características de los tapetes de consolidación

Al igual que las pantallas de impermeabilización los tapetes de consolidación se inyectan en tres etapas mostradas en la figura 4.19.

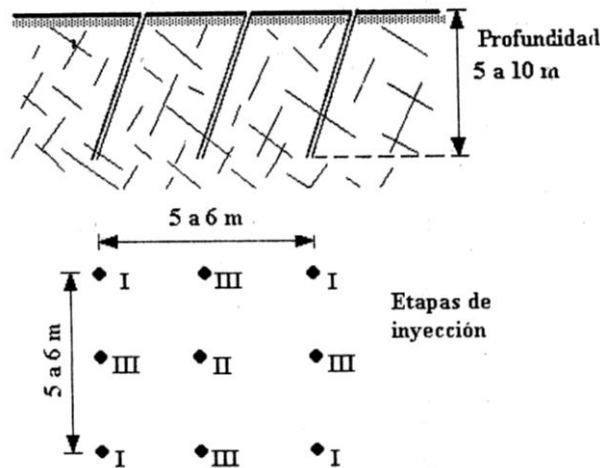


Figura 4.19. Etapas de inyección de un tapete de consolidación (Cambefort, 1968)

#### 4.6.2 Inyecciones de relleno

Este tipo de inyecciones emplea una mezcla gruesa, tipo mortero de cemento fabricada con agregados de arena y gravilla; las cuales son bastante buenas cuando no existe flujo de agua que genere deslaves, erosión o arrastre de las mismas.

Cuando no existe el flujo del agua, el relleno de cavidades se puede realizar mediante el procedimiento descrito en la figura 4.20.

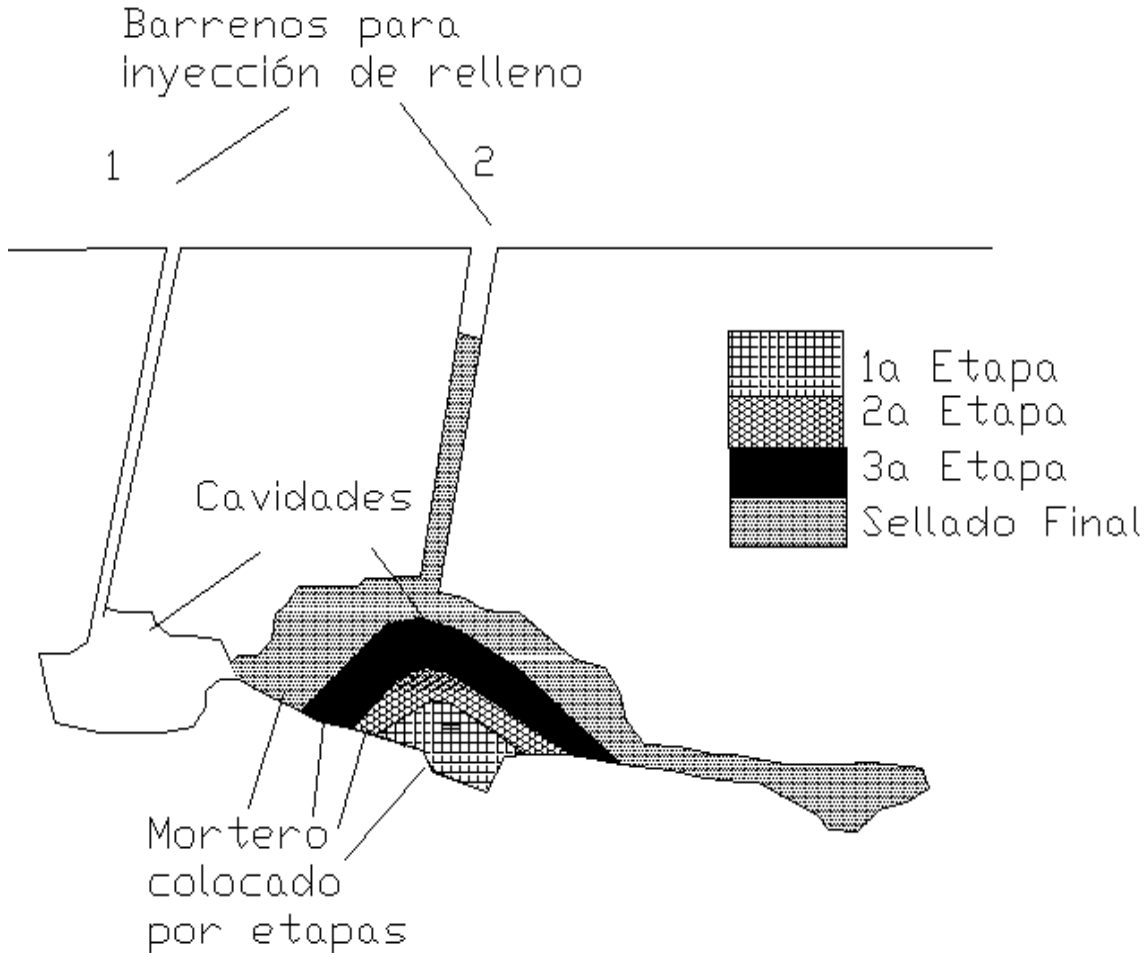


Figura 4.20. Etapas de inyección de oquedades grandes (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002)

#### 4.6.3 Inyecciones de contacto

Es un tipo particular de inyecciones de relleno, se utiliza para rellenar las fisuras que han quedado entre el concreto de cualquier estructura y la roca, reduciendo con esto el flujo de agua y asegurando la transmisión de esfuerzos entre la estructura y la roca. En esta clase de inyecciones se ocupan mezclas inestables de morteros o mezcla de morteros aireados que permiten una mejor penetración y relleno de fisuras

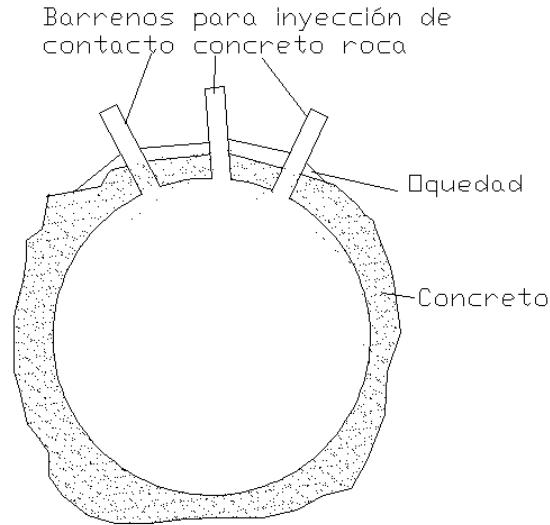


Figura 4.21. Inyección de contacto concreto-roca en la bóveda de un túnel (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002)

#### 4.7 Técnicas de inyección

Existen cuatro técnicas de inyección para mejorar las propiedades mecánicas así como su impermeabilización las cuales son:

1. Inyección por impregnación y fractura (Soil Fracture Grouting)  $P = \text{alta}$
2. Inyección por Compactación (Compactation Grouting)  $P = \text{alta}$
3. Inyección por fracturación hidráulica  $P = \text{baja}$
4. Inyección por reemplazo (Jet Grouting)  $P = \text{baja}$

##### 4.7.1 Inyección por impregnación y fractura (Soil Fracture Grouting)

Técnica denominada así debido a que la inyección impregna los materiales muy permeables al inicio de la inyección y provoca la fractura o rotura en aquellas fisuras o cavidades de mayor longitud debido a la presión que el mortero puede alcanzar.

Esta práctica requiere utilizar mezclas estables y con viscosidades adecuadas, si no es así, se producirán impregnaciones mínimas, roturas máximas, se tendrán altos volúmenes de desperdicio de material, deshidratación y densificación de partículas que provocarán formaciones de venas que impedirán el paso de material y una fuerte carga para poder desplazarlo.

##### 4.7.2 Inyección por compactación (Compactation Grouting)

Es una inyección por desplazamiento del suelo, es decir, expande una cavidad y densifica el suelo circundante. Se aplica a la restauración de la capacidad de carga en suelos sueltos o compresibles y es utilizada para prevenir asentamientos en suelos blandos densificando los suelos antes de una construcción.

### 4.7.3 Inyección por fracturación hidráulica

Inicialmente se utilizó en ingeniería petrolera, actualmente esta técnica de inyección se emplea en suelos arcillosos blandos y en rocas fisuradas, reduciendo deformaciones en el suelo ante cargas aplicadas.

La fracturación hidráulica se define como aquella discontinuidad inducida artificialmente donde había o no fisura y consisten en inyectar lechadas a presión que amplían la fisura y que al endurecer la cementan o impermeabilizan. Para ver mayor información se recomienda consultar el *Manual de Construcción Geotécnica (SMMS, 2002)*

### 4.7.4 Inyección por reemplazo (Jet Grouting)

Aplicable a terrenos de gran variedad tales como gravas o arcillas, mejora las características mecánicas e hidráulicas del terreno. Consiste en inyectar un material consolidante a muy alta velocidad a través de boquillas de pequeño diámetro, creando en el terreno un verdadero elemento estructural y destruyendo su estructura primitiva. Su ejecución se realiza de la siguiente manera:

1. Perforación del terreno por rotación
2. Después de llegar al fin de la perforación se inyecta el mortero a alta presión (presiones mayores a  $150 \text{ kg/cm}^2$ ), a través de toberas
3. Se elevan las toberas y se provoca la inyección

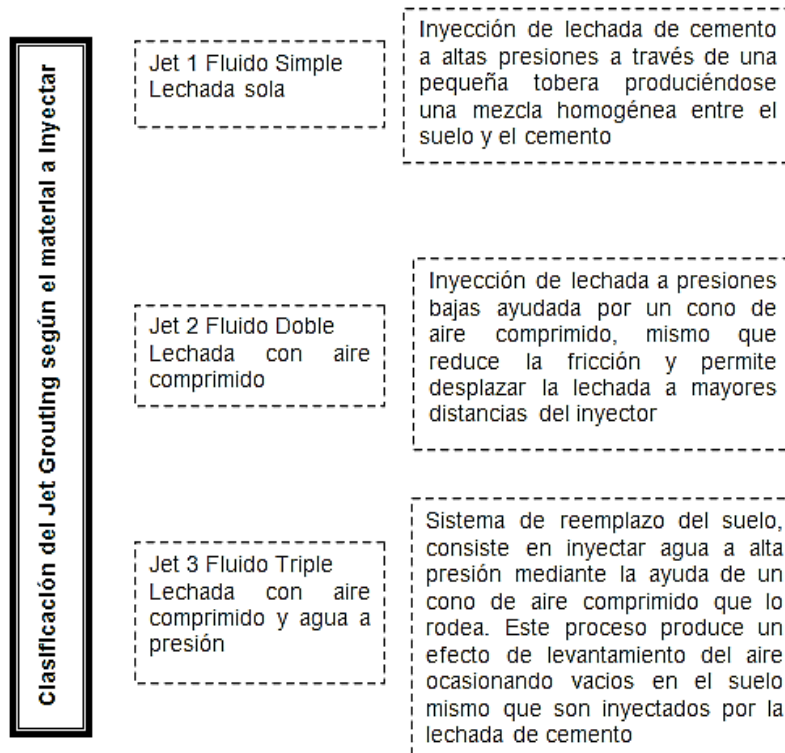


Figura 4.22. Clasificación del Jet Grouting (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2002)



## ANEXO

### EMPLEO DE CENIZAS DE CÁSCARA DE ARROZ COMO ADICIONES EN MORTEROS

En este anexo se presenta un estudio que se realizó a la cáscara de arroz, estudiando su posibilidad para utilizarla como silicato de sodio, material aislante e inclusive como combustible, debido a un valor energético superior a la mitad de los carbonos bituminosos normales.

La ceniza de cáscara de arroz (R.H.A., por sus siglas en inglés rice husk ash), es un desecho agrícola y suele ocuparse sobre todo en países en vías de desarrollo, los cuales tienden a tener escasez de cemento.

Cabe hacer notar que la cáscara de arroz es un producto sumamente atractivo por su amplia producción a nivel mundial ya que como estima Mentha (1974) su producción mundial es de  $500 \times 10^6 \text{ m}^3$ , que equivale a  $80 \times 10^6 \text{ t}$ , lo que a su vez podría representar unos  $12 \div 16 \times 10^6 \text{ t}$  de cenizas.

La obtención de la ceniza se realiza a través de hornos con capacidad de hasta 370 litros, es decir, de aproximadamente 45 kg de cáscara, los cuales pueden alcanzar temperaturas comprendidas entre  $-60^\circ\text{C}$  y  $1200^\circ\text{C}$ . De los hornos se obtienen de 35 kg de cáscara quemada unos 6.25 kg de ceniza.

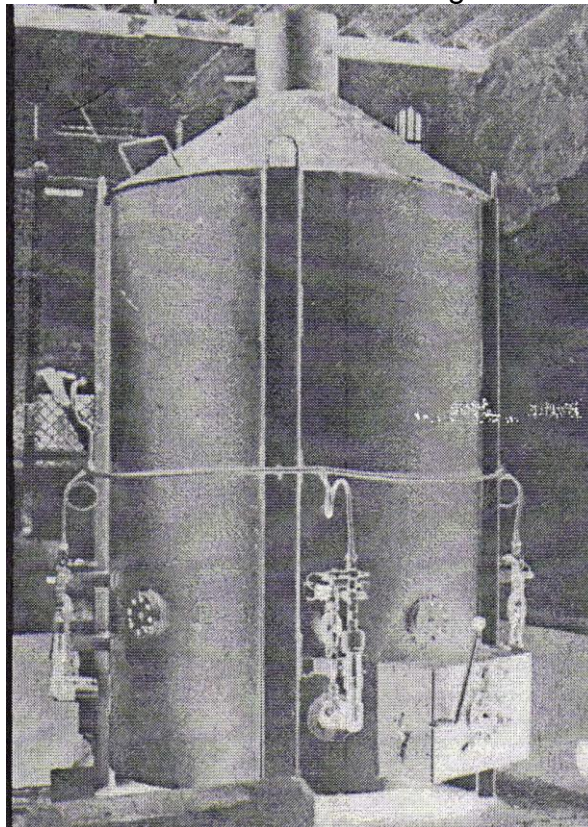


Figura 1. Horno (Salas, Castillo, Sánchez y Vera, 1966)

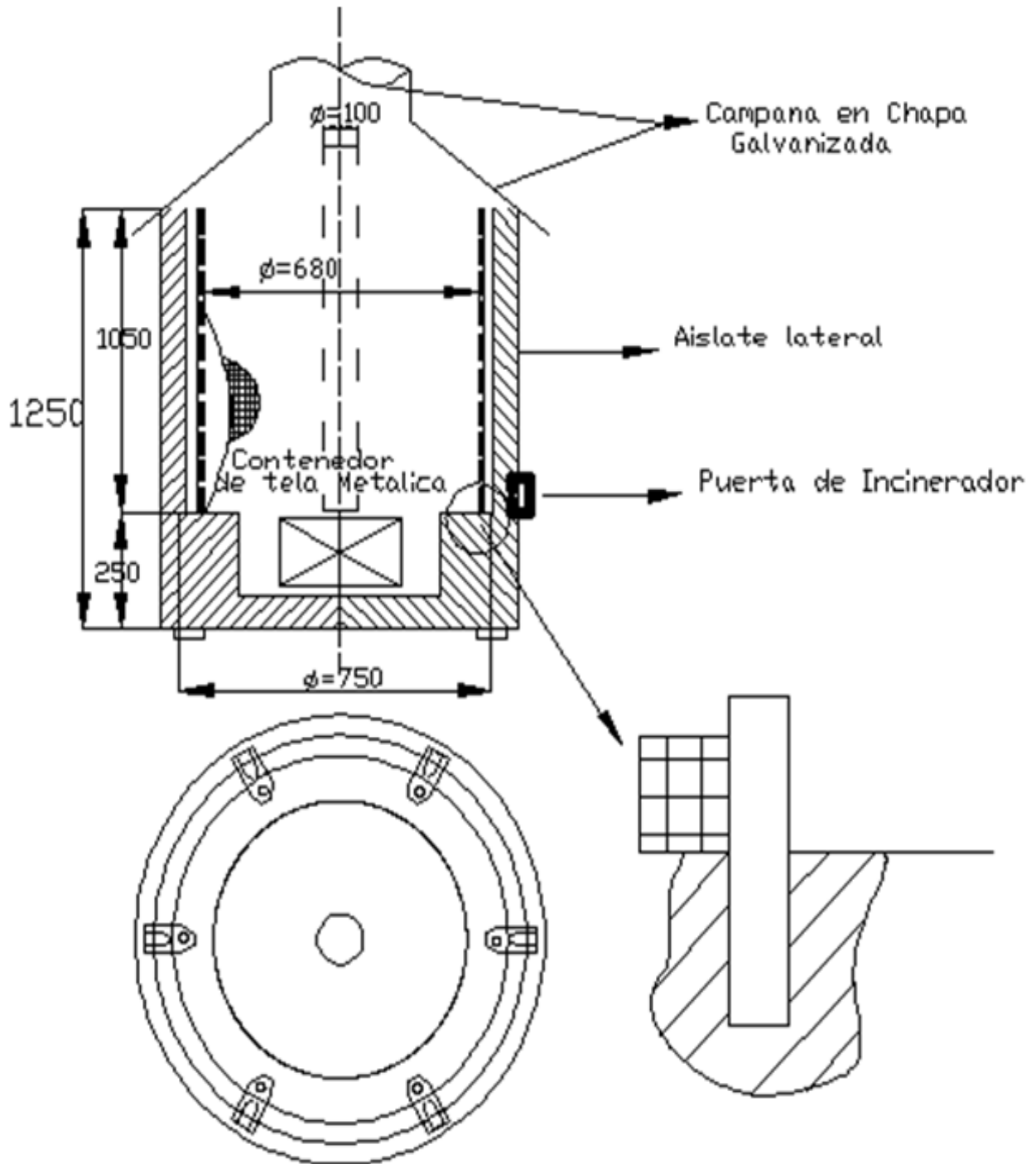


Figura 2. Horno (Salas, Castillo, Sánchez y Vera, 1966)

Con estas especificaciones del horno se procede a la combustión de la cáscara la cual sigue una curva, en la que se puede notar que la temperatura máxima se encuentra de  $1000 \pm 25$  °C y que el tiempo de combustión puede estimarse en unos 90 min siendo su enfriamiento del orden de 6 h. Asimismo se notan los resultados de tres muestras de cáscara de arroz obtenidas en el horno en días diferentes.



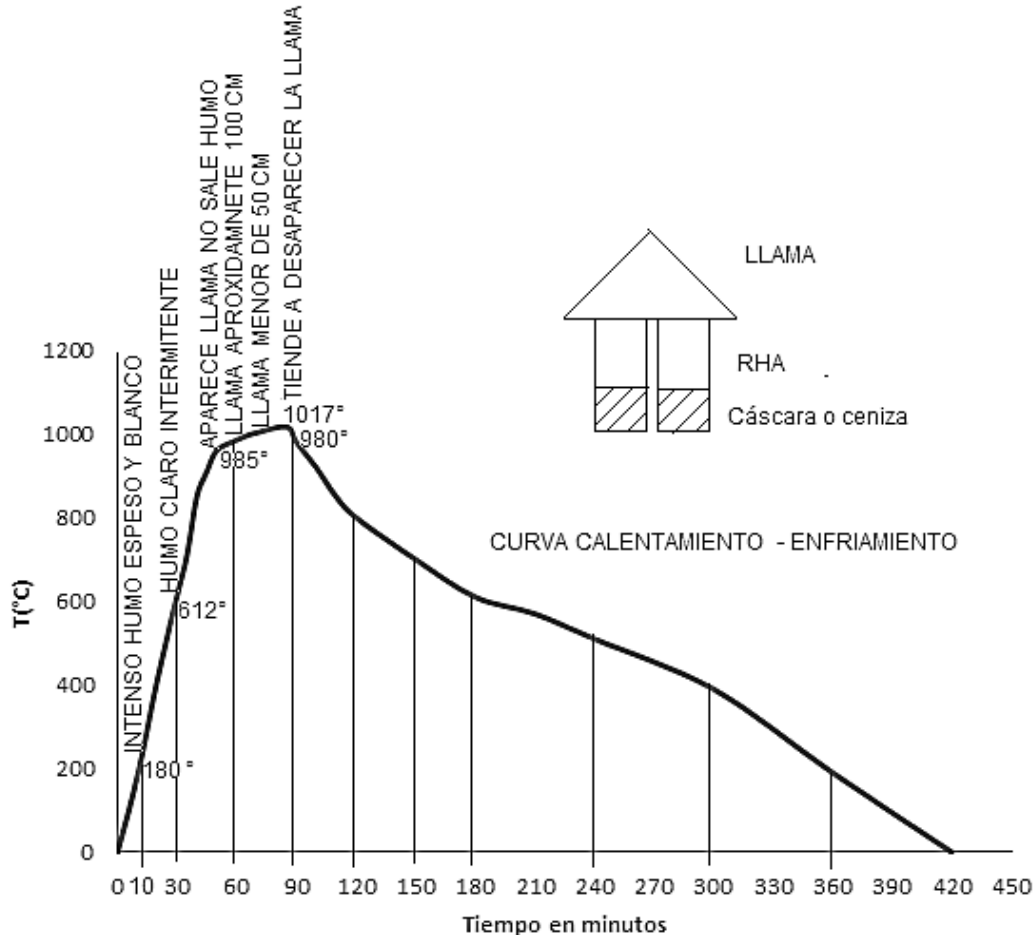


Figura 3. Curva de Calentamiento (Salas, Castillo, Sánchez y Vera, 1966)

Tabla 1. Resultados obtenidos sobre tres muestras de ceniza de cáscara de arroz después de desecar a los 105 °C y después de calcinar a 1000°C (Salas, Castillo, Sánchez y Vera, 1966)

Muestras	Perdidas por calcinación	Residuo insoluble	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Total
Muestra A Desecada a 105 °C	2.90	0.17	88.61	0.92	0.35	2.09	0.86		95.90
Muestra A Calcinada a 1000 °C		0.17	91.26	0.94	0.37	2.15	0.88		95.77
Muestra B Desecada a 105 °C	4.90	0.44	86.45	0.73	1.89	2.06	1.01		97.48
Muestra B Calcinada a 1000 °C		0.46	90.90	0.77	1.99	2.17	1.06		97.34
Muestra C Desecada a 105 °C	3.72	0.21	84.14	1.62	0.93	3.60	0.90	0.24	98.42

Cabe mencionar que la cáscara de arroz calentada a temperaturas de combustión mayores a 700 °C, da cenizas que pueden ser reactivas con la cal. Pero si el tiempo de molienda oscila de 3 a 5 horas se obtienen cenizas más blandas. Además si la temperatura de combustión de la cáscara es menor a los 850 °C, durante 2 horas se presentan partículas de sílice con una base cristalina de cuarzo.

Otra ventaja de la cáscara, es su poder calorífico cuyo valor complementario es de suma relevancia para hacer uso de la misma. Su poder oscila entre 3300 y 3600 Kcal/kg, es decir, valores próximos a la mitad de un carbón bituminoso.

### Dosificación

El mortero se deberá elaborar adicionando 500 g de aglomerante cal o cemento (1/4 cal o 3/4 de ceniza) 1500 g de arena normalizada y 250 cm<sup>3</sup> de agua.

### Procedimiento

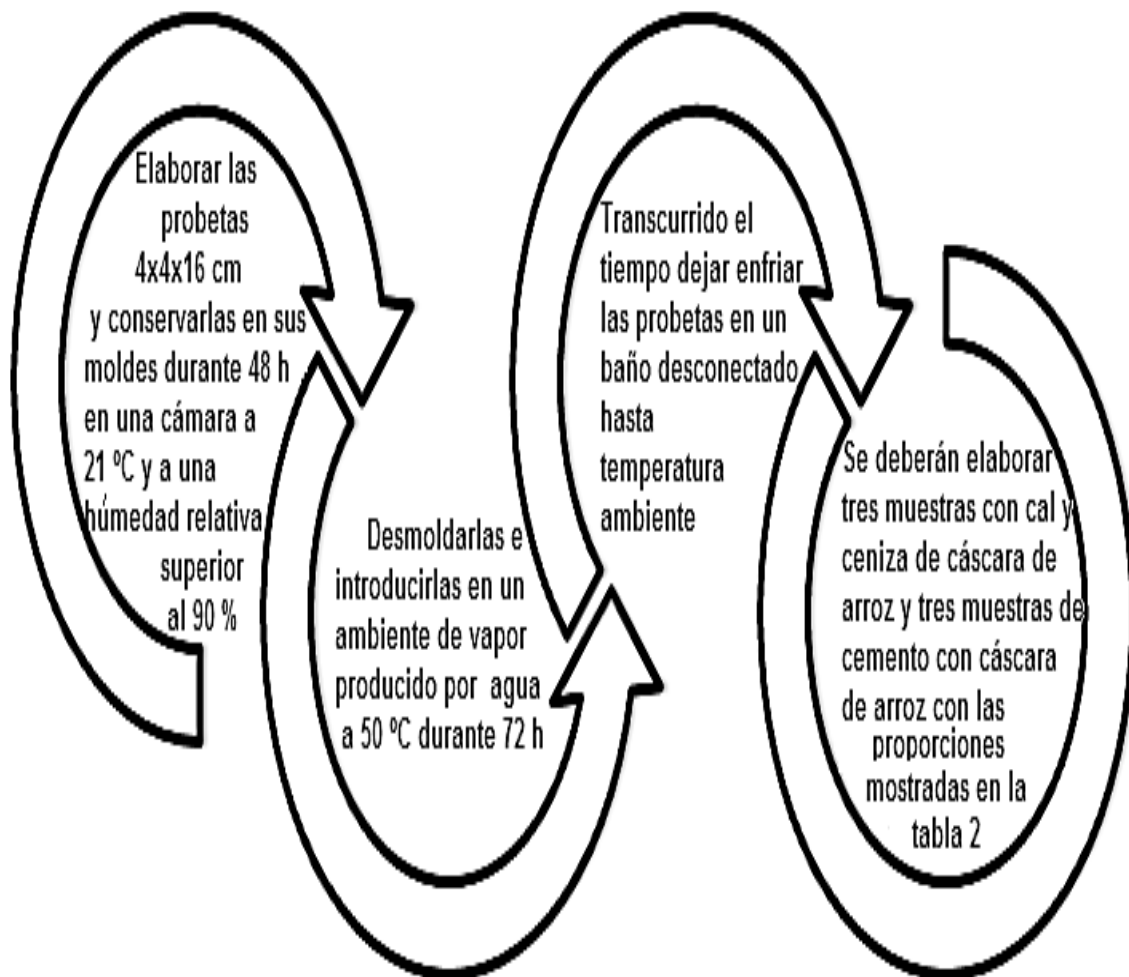


Figura 4. Procedimiento para elaborar probetas de RHA que se ensayaran para determinar su resistencia



Tabla 2. Dosificación de morteros hechos a base de cenizas de cascara de arroz (Salas, Castillo, Sánchez y Vera, 1966)

CLAVE	COMPOSICIÓN EN PESO
CLN	50% de cal +50 % de ceniza de cáscara de arroz sin moler
CAN	50% de cemento + ceniza de cáscara de arroz sin moler
CLM1	67% de cal +33 % de ceniza de cáscara de arroz
CLM2	50% de cal +50 % de ceniza de cáscara de arroz
CLM3	33% de cal +67 % de ceniza de cáscara de arroz
CAM1	67% de cemento +33 % de ceniza de cáscara de arroz
CAM2	50% de cemento +50 % de ceniza de cáscara de arroz
CAM3	33% de cemento +67 % de ceniza de cáscara de arroz

### Caracterización de la ceniza de cáscara de arroz

El estudio de la cáscara de arroz producida en el horno piloto se realizó mediante: análisis químicos, determinación del peso específico, densidad aparente molturabilidad (tiempo requerido para alcanzar una finura determinada), determinación de la superficie específica Blaine, análisis cualitativo por difracción de rayos X y espectroscopia de absorción infrarroja

*Análisis químico:* Se analizaron tres muestras revelando una composición química de la ceniza de 79.86 % de sílice reactiva, lo que a su vez la hace muy apropiada para su utilización como adición.

Tabla 3. Resultados de los análisis químicos (Salas, Castillo, Sánchez y Vera, 1966)

Determinaciones	Muestras							
	CLM1	CLM2	CLM3	CLN	CAM 0	CAM1	CAM2	CAM3
PPC <sup>1</sup>	17.84	14.29	10.79	16.61	3.30	3.89	3.56	3.31
R.I. <sup>2</sup>	17.11	20.96	29.16	1735	1.79	10.16	10.16	36.85
SiO <sub>2</sub>	13.25	23.83	30.02	16.99	17.90	30.86	30.86	34.51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.95	0.72	1.34	0.76	5.41	4.32	4.32	2.66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.95	0.35	0.41	0.23	3.36	2.19	2.19	1.17
CaO	0.25	36.90	25.75	45.59	61.80	43.73	43.73	18.92
MgO	48.46	0.47	0.56	0.20	1.42	1.15	1.15	0.70
SO <sub>3</sub>	0.56	0.60	0.49	0.66	3.35	2.45	2.45	1.12
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.72	0.05	0.05	0.03	-	0.15	0.15	0.10
K <sub>2</sub> O	0.05	0.78	0.92	0.67	-	1.28	1.28	1.14
Totales	0.76	98.95	99.49	99.09	98.33	100.18	100.18	99.82

<sup>1</sup> Pérdida por calcinación <sup>2</sup> Residuo Insoluble

*Determinación del peso específico y densidad aparente:* La ceniza obtenida arrojó un peso específico igual a 2.05 g/cm<sup>3</sup> y una densidad aparente igual a 0.7 g/cm<sup>3</sup>, lo que lo hace importante ya que las puzolanas fijan un peso específico entre 2.10 y 2.40 g/cm<sup>3</sup>.

*Molturabilidad (tiempo requerido para alcanzar una finura determinada) y determinación de la superficie específica Blaine:* La molturabilidad de la ceniza fue alta debido a la elevada temperatura de combustión del horno, y la superficie específica Blaine fue igual a  $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$ , en 35 min de molienda, mismo valor fijado para establecer una relación adecuada en las mezclas cenizas-cal y cemento-ceniza.

*Análisis cualitativo por difracción de rayos X y espectroscopia de absorción infrarroja:* Comprobó que la ceniza de cáscara de arroz está formada en su mayor parte por compuestos de naturaleza amorfa o imperfecta. Este estudio se realizó utilizando muestras compactadas cuyos difractogramas comprueban la existencia de pocos picos, indicando la existencia de compuestos cristalinos, tales como la tridimita y la aparición de la cristobalita o cuarzo, donde:

Tridimita >  $T_{\text{combustión}}$  > cristobalita

$T_{\text{combustión}}$  < Sílice amorfa (cenizas fundamentalmente de color negro)

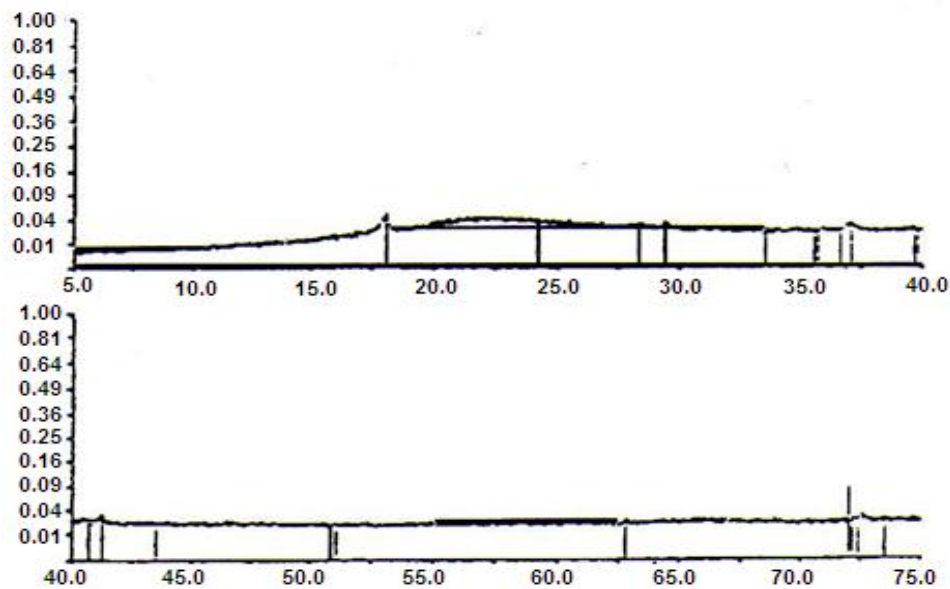


Figura 5. Difractograma (Salas, Castillo, Sánchez y Vera, 1966)

### Valoración de su aptitud como adición activa del cemento

La valoración de la reacción material/cal apagada se realizó mediante la prueba mecánico-resistente a flexotracción y compresión de morteros. Las propiedades de los materiales a utilizar son:

- Ceniza de cáscara de arroz: Molida hasta alcanzar una finura de  $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$  Blaine.
- Cal apagada: Siendo de hidróxido de calcio con una riqueza de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  superior al 90 % y un contenido en CO, inferior al 7%
- Arena normalizada
- Agua de amasado: Con una relación agua/aglomerante de 0.5

### Resultados

Las probetas se rompieron a flexión y a compresión dando los resultados que se muestran en las figuras 6 y 7.

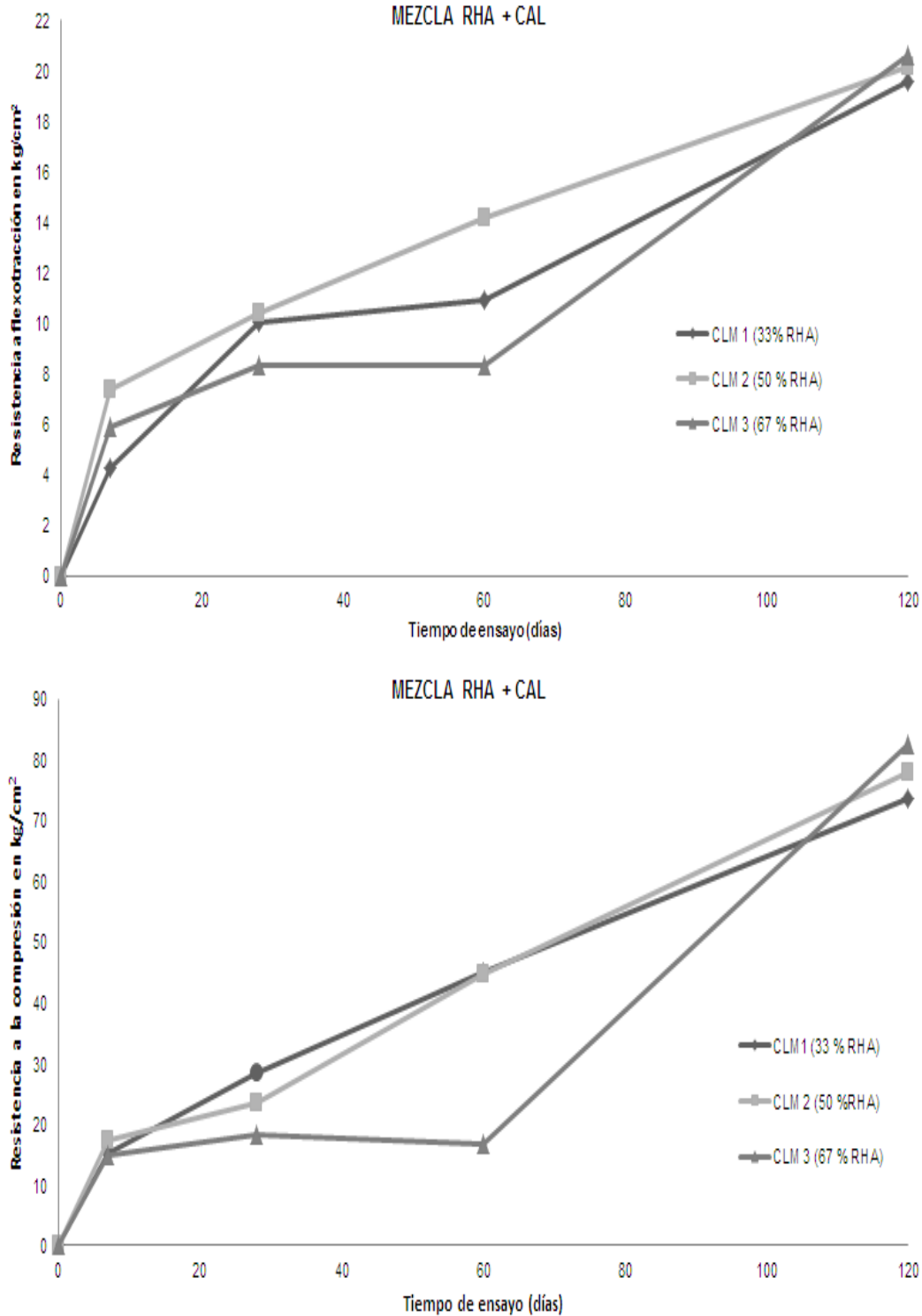


Figura 6. Resistencia a la flexotracción y a la compresión de morteros de cáscara de arroz más cal (Salas, Castillo, Sánchez y Vera, 1966)

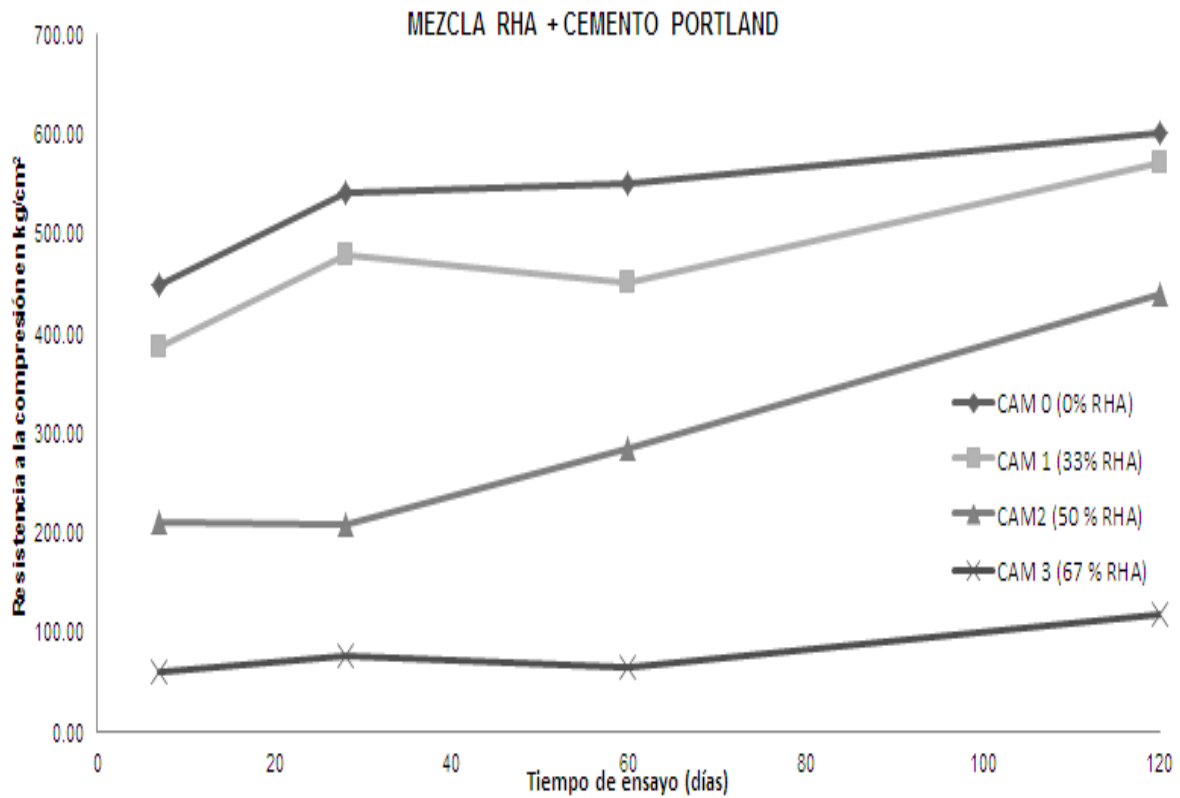
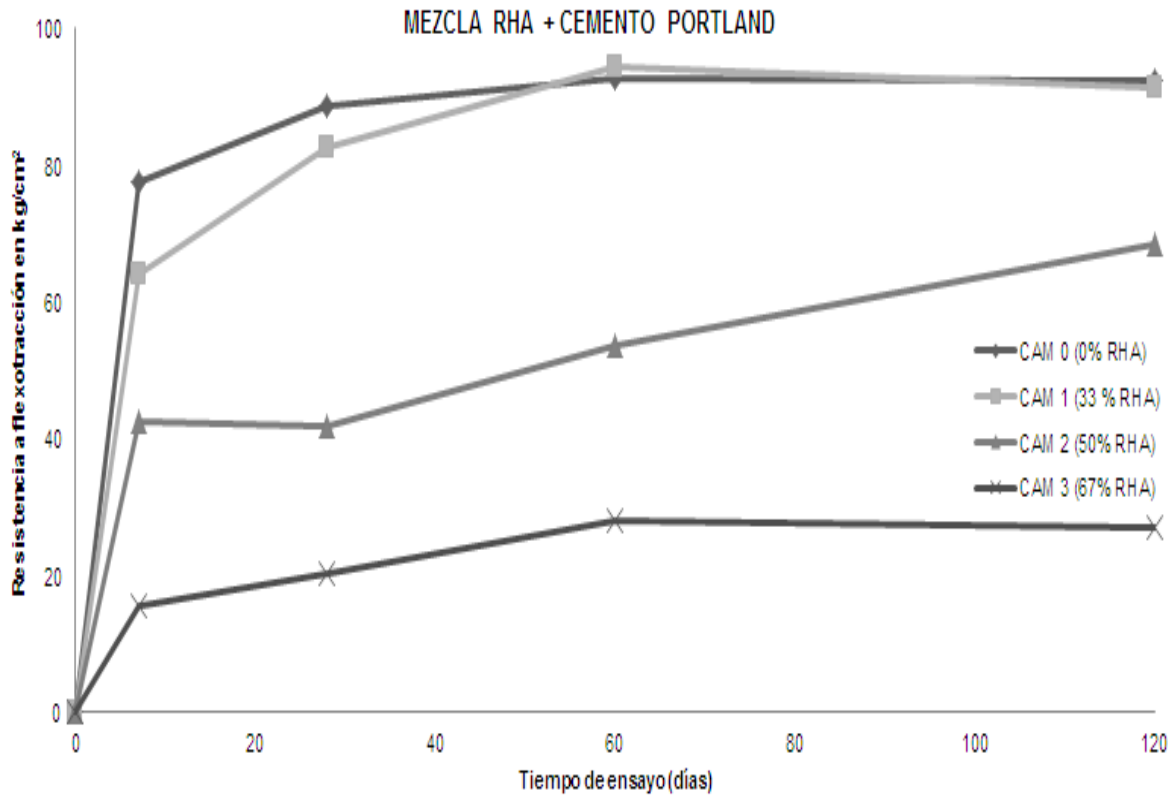


Figura 7. Resistencia a la flexotracción de morteros de cáscara de arroz más cemento (Salas, Castillo, Sánchez y Vera, 1966)



Tabla 4. Resistencia a flexotracción y a compresión de seis muestras dosificadas con diferentes porcentajes de RHA (Salas, Castillo, Sánchez y Vera, 1966)

Muestras	Resistencia a la flexotracción (kg/cm <sup>2</sup> )				Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )			
	7 días	28 días	60 días	120 días	7 días	28 días	60 días	120 días
CLN								
CLM1	4.28	9.99	10.91	19.57	15.09	28.54	45.06	73.70
CLM2	7.34	10.40	14.17	20.18	17.23	23.45	44.55	77.88
CLM3	5.91	8.36	8.36	20.59	14.88	18.35	16.62	82.36
CAM0	77.47	88.69	92.76	92.46	448.52	541.28	550.46	601.43
CAM1	64.22	82.57	94.29	91.44	385.83	479.10	450.05	570.64
CAM2	42.61	41.79	53.72	68.50	209.17	208.97	283.69	439.45
CAM3	15.60	20.39	28.24	27.22	60.14	76.45	65.65	118.04

### Valoración de la utilización de la cáscara de arroz como adición activa en los morteros

Sin lugar a duda las resistencias obtenidas en las muestras a base de cemento y ceniza de cáscara de arroz son superiores a las obtenidas mediante las mezclas de cal y ceniza de cáscara de arroz, donde se observa que en muestras realizadas con mayor cantidad de RHA y cemento se obtiene mayor resistencia que las de ceniza de cascara de arroz y cal.

Las mezclas CAM 1 y CAM 2 ofrecen una muy buena resistencia a compresión y a flexotracción y un bajo costo para utilizarse en viviendas, destacando que a mayor edad de las probetas mayor resistencia.

Finalmente, la ceniza de cascara de arroz presenta en su composición química materiales que pueden ser útiles en la elaboración de morteros (como por ejemplo el silicato de sodio en la inyección de geles) por lo que presenta la ventaja de poderlo utilizar como adición en la elaboración de mezclas de inyección



# CAPÍTULO

## 5.

---

# CONCLUSIONES





## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES

De acuerdo al trabajo de investigación, se obtienen las siguientes conclusiones. Primeramente, descubrir la existencia de cavidades evita tiempos muertos conduciendo a gastos innecesarios, por lo tanto, investigar las características del terreno en que se realizará los proyectos evita sobrecostos y da como resultado acciones preventivas y no correctivas. En cuanto a la cimentación en terreno minado, se podrá elegir entre relleno, excavación y relleno, o reforzamiento de cavidades, para posteriormente implantar zapatas; o se podrá optar por cimentación profunda (pilas o pilotes). Entre las cuatro alternativas las dos primeras son las más viables y económicas excepto cuando hay predios con espacio reducido, en los cuales una elección de morteros económicos será la única solución para bajar el costo del proyecto constructivo.

Existen muchos métodos para investigar la existencia de cavidades, sin duda el panorama más fácil es cuando se les puede encontrar a través de un reconocimiento superficial y aplicar un método directo, viendo físicamente las características geométricas y geológicas de las minas para posteriormente realizar su levantamiento topográfico; lamentablemente esta circunstancia no siempre es constante, por lo que la existencia de cavidades sólo se puede determinar a través de métodos indirectos, haciendo énfasis que cualquiera de los 8 métodos que se escoja, deberá ser combinado con al menos otros dos para asegurar su existencia.

En cuanto a la estabilidad de cavidades, sin duda el problema más crítico es la erosión y el intemperismo de sus materiales constituyentes, lo cual provoca derrumbes de techos de minas, lo que a su vez causa deformaciones en las cimentaciones y da como resultado agrietamientos en las estructuras o en el suelo cuando no hay construcciones.

De igual manera los ensayos de laboratorio dan una simulación de las características de los diferentes tipos de mortero en campo, así como su comportamiento y las condiciones a los que pueda estar sometido. Por ejemplo la prueba para determinar la fluidez, especifica la cantidad de agua necesaria para evitar problemas de viscosidad e hidratación del aglomerante, el aparato Vicat mide el tiempo de fraguado de una mezcla, la prueba de resistencia a compresión especifica su comportamiento mecánico en obra, el contenido de aire y sanidad detallan porcentajes mínimos que deben contener las mezclas para no causar problemas al mortero, mientras que la decantación y la adhesión de placa establecen hasta qué punto una mezcla es estable.

Determinar las características que le brindan sus componentes (aditivos o aglomerantes) permite analizar las propiedades que le brindan al conglomerado final; por ejemplo, la bentonita y el agua dan fluidez a la mezcla, el cemento, la



cenizas volantes y la RHA dan resistencia al mortero, la arena da solidez a la mezcla evitando la aparición de grietas, la cal provoca que la mezcla tarde más tiempo en fraguar, mientras que el silicato de sodio, el aserrín y las cenizas de cascara de arroz espesan la mezcla, es decir, aceleran el proceso de fraguado.

Caracterizar un mortero también implica determinar sus propiedades físicas, reológicas y mecánicas, es decir, involucra conocer su resistencia, sedimentación y viscosidad. El porcentaje de decantación o sedimentación, es mínimo en morteros estables, alto en morteros inestables, siendo nulo en morteros a base de productos químicos y en morteros aireados. Si el objetivo de la inyección es obturar fisuras, mediante la utilización de mezclas inestables, será necesario evitar el sangrado mediante su agitación constante en mezcladores a bajas revoluciones.

La viscosidad es baja en morteros inestables con baja dosificación en cemento, en morteros estables agua, cemento, bentonita y en soluciones a base de productos químicos, siendo mayor en morteros inestables con altas dosificaciones de cemento. En cuanto a la resistencia, ésta es alta en morteros estables e inestables y en geles duros de silicato y cloruro de calcio, baja cuando se utilice morteros aireados; sin embargo, los dos primeros su precio depende de su dosificación en cemento, siendo aun así más económicos que las soluciones a base de productos químicos.

Los morteros se clasifican en inestables, líquidos, aireados y estables. Los morteros inestables y aireados, son muy penetrables, sirven para obturar fisuras siendo muy apropiados para utilizarse después del relleno de cavidades; más sin embargo, los morteros aireados tienen escasa resistencia por lo que su uso se limita más a impermeabilizaciones. En cuanto a los morteros líquidos, éstos se pueden utilizar en zonas minadas, pero desafortunadamente presentan la desventaja de tener escasa resistencia y ser muy caros por lo que su utilización no es conveniente. Por lo tanto, el uso de morteros estables es la mejor opción para utilizarse en zonas minadas ya que confieren a la mezcla estabilidad, buena resistencia, baja viscosidad y sobre todo son más económicos a comparación de los otros dos grupos de morteros.

Dependiendo del terreno y de los objetivos de la mezcla, sea esto impermeabilizar o consolidar, se deberá escoger la mejor según los parámetros o condiciones reales. Los morteros más apropiados para impermeabilizar son los geles, mientras que para consolidar y obtener morteros con muy buenas propiedades mecánicas están los de cemento-bentonita-arena-agua, cemento-agua-hollín o cemento-agua-RHA.

Cuando se traten de minas superficiales y de fácil acceso, el mortero más ideal a inyectar es el aglomerante-arena-agua más cenizas de cascara de arroz, los cuales muestran una buena resistencia alrededor de  $82.36 \text{ kg/cm}^2$  si se utiliza la



cal como aglomerante y de  $570.64 \text{ kg/cm}^2$  si se utiliza cemento, presentando la característica de fraguar rápido, por su amplio contenido de silicato de sodio.

En cuanto al precio de una mezcla inyectar, éste no siempre depende del precio de sus componentes, sino también de factores externos que incrementan el costo tales como:

- a) Información errónea del subsuelo.
- b) Falta de exploración del terreno.
- c) Tiempos muertos en el equipo de inyección y capital humano
- d) Mala caracterización en laboratorio de propiedades reológicas y mecánicas de morteros.
- e) Desperdicios de material.

Por otra parte, un buen método que se puede utilizar para realizar la inyección de cavidades es el GIN, el cual permite obtener curvas de presión contra volumen, determinando de esta manera la presión máxima que se puede inyectar sin provocar en el terreno agrietamientos. Enfatizar también que una mezcla es de fácil inyectado, cuando ésta es estable, su viscosidad es mínima, tiene tiempos de fraguado aceptables y su resistencia mecánica es elevada o acorde al tipo de terreno a inyectar.

Por lo tanto, relevante es la presión de inyección, misma que se deberá de tener cuidado cuando en la zona a rellenar existan construcciones arriba de la misma, pero cuando las minas se encuentren a más de 12 m de profundidad se puede utilizar la presión que se desee, obturando con presiones bajas de alrededor de 10 a  $20 \text{ kg/cm}^2$ .

Es importante considerar las propiedades del terreno y su posible interacción suelo-mortero ya que el mortero a utilizar deberá devolverle al subsuelo su continuidad e igualar o asemejar las propiedades del terreno.



## REFERENCIAS

Bonola I., Paredez A., (2007), *Manual Geotécnico para el Diseño de Pequeñas Presas*, Ed. IMTA, México

Cambefort Henry (1968), *Inyección de Suelos*, Ediciones Omega S.A., España.

Chávez A. (2008), *Atlas Multidisciplinario y de riesgo Geotécnico de la zona Conurbada al Norponiente del Valle de México*, México

Gonzales de Vallejo L.I., (2002), *Ingeniería Geológica*, Ed. Prentice Hall, España

Instituto Mexicano del Concreto y el Cemento (IMCYC) (1999), *Manual de autoconstrucción Manos a la obra*, Ed. IMCYC, México.

Juárez B. y Rico R. (2007), *Mecánica de Suelos*, Editorial Limusa, México

Mark, A., (2008) *Propiedades reológicas de la arena*, Construcción y Tecnología Vol 253 pp. 10

Mentha P.K. (1974), *A new process of rice husk utilization*, Valencia, España.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, *Norma Mexicana NMX-C-021-ONNCE-2004 Industria de la Construcción, Cemento para Albañilería (Mortero)- Especificaciones y Métodos de Prueba*, México

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, *Norma Mexicana NMXC-057-1997-ONNCE Industria de la Construcción, Cementantes Hidráulicos- Determinación de la consistencia Normal*, México

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, *Norma Mexicana NMXC-059-ONNCE-2006 Industria de la Construcción, Cementos Hidráulicos- Determinación del tiempo de Fraguado de Cementantes Hidráulicos (Método Vicat)*, México

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, *Norma Mexicana NMXC-061-ONNCE-2006, Industria de la Construcción, Cemento- Determinación de la Resistencia a Compresión de Cementantes Hidráulicos*, México

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, *Norma Mexicana NMXC-062-1997-ONNCE Industria de la Construcción, Método para determinar la sanidad de cementantes hidráulicos*, México



Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, *Norma Mexicana NMXC-085-ONNCCE-2002 Industria de la Construcción, Cementos Hidráulicos, Método Estándar para el mezclado de pastas y morteros de cementos Hidráulicos*, México.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, *Norma Mexicana NMXC-144-ONNCCE-2002 Industria de la Construcción, Cementos Hidráulicos, Requisitos para el aparato usado en la determinación de la fluidez de morteros con cementantes hidráulicos*, México.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, *Norma Mexicana NMXC-148-ONNCCE-2002 Industria de la Construcción, Cementos Hidráulicos, Gabinetes y Cuartos Húmedos y tanques de almacenamiento para el curado de especímenes de mortero y concreto de cementantes hidráulicos*, México.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, *Norma Mexicana NMX-C-152-1997-ONNCCE Industria de la Construcción, Cementantes Hidráulicos, Método de Prueba para la determinación del peso específico de cementantes hidráulicos*, México.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, *Norma Mexicana NMX-C-329-ONNCCE-2002 Industria de la Construcción, Cementos Hidráulicos, Determinación de la granulometría de la arena sílice utilizada en la preparación de los morteros de cementantes hidráulicos*, México.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, *Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2002 Industria de la Construcción, Cementos Hidráulicos, Especificaciones y métodos de prueba*.

Rixom, M.R., (1977), *Concrete and Mixtures Use and Applications*”, Ed. TheConstructionsPress, Estados Unidos.

Rosenblueth, E., (1975) *Respuesta de edificios altos a temblores con cinco componentes*, Oaxaca, México.

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, (1976), *Simposio sobre Cimentaciones en zonas minadas de la Ciudad de México*, México

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, (1992), *Experiencias Geotécnicas en la zona poniente de la Ciudad de México*, Ed. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, (2002), *Manual de Construcción Geotécnica*, Tomo II, Ed. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.



Salas J., Castillo P., Sánchez I., Veras J., (1966) *Empleo de cenizas de cascara de arroz como adiciones en morteros*, Materiales de Construcción Vol. 36 no 203, Madrid, España.

Sánchez G. (1998), *Concretos y morteros: manejo y colocación en obra* Ed. Asociación Colombiana de Productores de Concreto, Instituto del Concreto en Editor, Bogotá Colombia

Secretaria de Recursos Hidráulicos (1970), *Manual de Mecánica de Suelos*, México.

Venaut, M., Papadakis M., (1975), *Control y Ensayo de Morteros y hormigones*, URMO, S.A de Ediciones, España.

Venaut, M., (1972), *Aditivo y Tratamientos de morteros y Hormigones*, Editores Técnicos Asociados, S.A., España.

[http://heelt.com.ar/catalogos/Catalogo\\_HEELT.pdf](http://heelt.com.ar/catalogos/Catalogo_HEELT.pdf)

[http://www.construmatica.com/construpedia/Introducci%C3%B3n\\_a\\_los\\_Morteros](http://www.construmatica.com/construpedia/Introducci%C3%B3n_a_los_Morteros)

<http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA04.htm>