

# MECÁNICA DE PAVIMENTOS

## Materiales de Pavimentación

---



FACULTAD DE  
INGENIERÍA



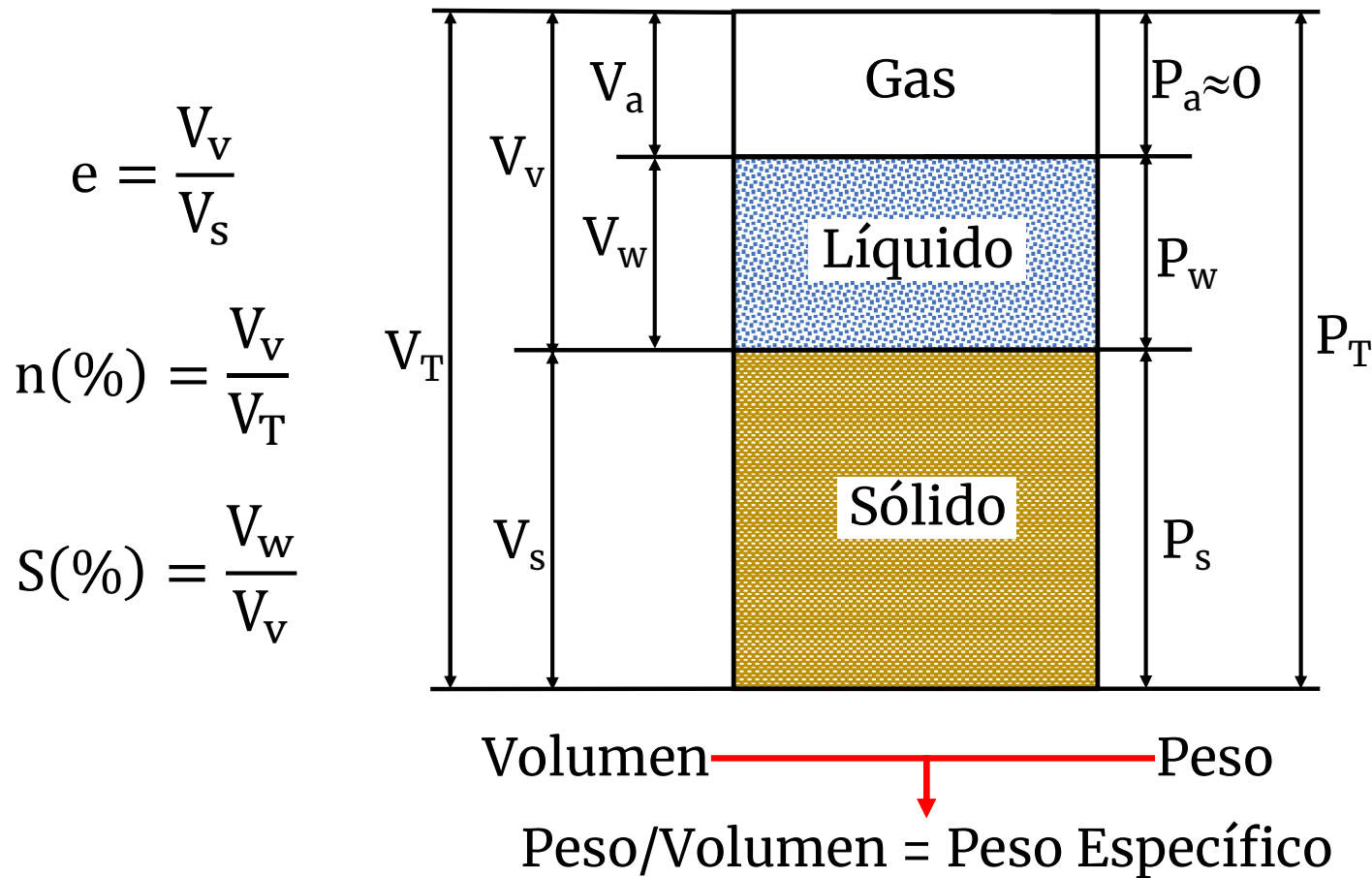
UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

Dr. Ing. Leonardo Behak  
Instituto de Estructuras y Transporte

# MATERIALES DE PAVIMENTACIÓN

Naturales	Suelos Granulares	No Cementados
Mezclas Asfálticas	Agregados Ligantes Asfálticos	Cementados
Hormigón	Agregados Cemento Portland	
Materiales Cementados	Cal Cemento Cenizas	

# SUELOS



$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_T}$$

$$S(\%) = \frac{V_w}{V_v}$$

$$w(\%) = \frac{P_w}{P_s}$$

$$\gamma = \frac{P_T}{V_T}$$

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V_T}$$

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s}$$

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

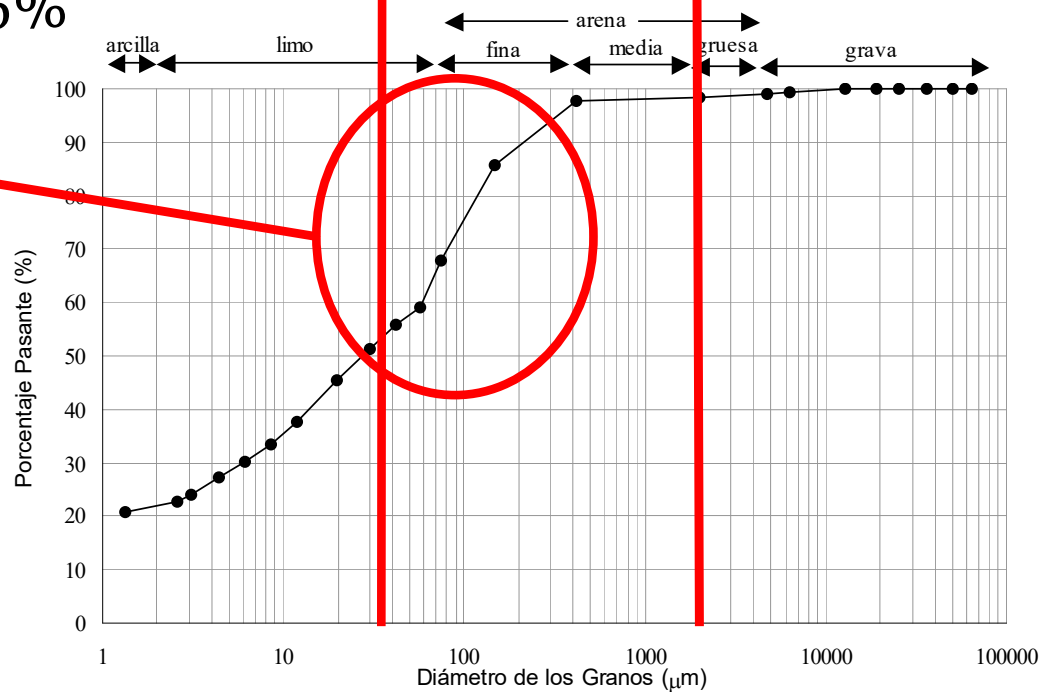
# ESPECIFICACIONES GRANULOMÉTRICAS Y PLÁSTICAS

Finos ← #200 AASHTO M147

Límite Líquido (LL)  $\leq 25\%$   
Índice Plástico  $\leq 6\%$

Tamaño Máximo  
2''-1''

Graduación



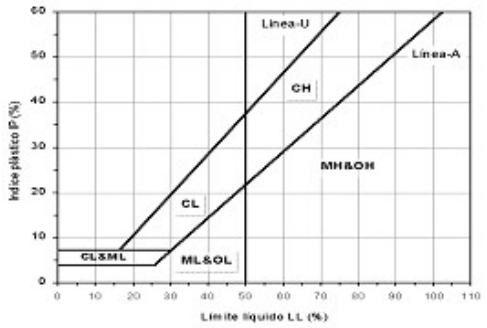
# CURVAS DE FULLER (AASHTO M147)

Tamiz	Abertura (mm)	Pasa (%)					
		A	B	C	D	E	F
2"	50000	100	100	---	---	---	---
1"	25000	---	75-95	100	100	100	100
3/8"	9500	30-65	40-75	50-85	60-100	---	---
#4	4750	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
#10	2000	15-40	20-45	25-60	40-70	40-100	55-100
#40	425	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
#200	74	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20	8-25

# SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

## ASTM D2487

		SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla N° 200				SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla N° 200				División Mayor	Simbolo	Nombre Típicos	Criterio de clasificación en laboratorio				
		LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido mayor de 50%				LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido menor de 50%				ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla N°4 Para clasificación usual puede usarse 14 en como equivalente a abertura malla N°4		GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla N°4					
		OH		CH	MH	OL	CL	ML	SC	SM	SP	SW	GC	GM	GP	GW	
Suelos altamente orgánicos	Pt	Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad		Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas	Limos inorgánicos, limos micáceos o diamicáceos	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arenosas o limosas	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeros plásticos	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla	Arenas limosas, mezclas de arena y limo	Arenas mal graduadas, arena con gravas, poco o nada de finos	Arenas bien graduadas, arena con gravas, poco o nada de finos	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	
		Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad		Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas	Limos inorgánicos, limos micáceos o diamicáceos	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arenosas o limosas	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeros plásticos	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla	Arenas limosas, mezclas de arena y limo	Arenas mal graduadas, arena con gravas, poco o nada de finos	Arenas bien graduadas, arena con gravas, poco o nada de finos	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	
		De 5% a 12% de finos (fracción que pasa por la malla N°200), los suelos gruesos se clasifican como: menos de 5% son GW, GP, SW, SP; más de 12% son GM, GC, SM, SC; de 5% a 12% son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles y se puede ser GM-GP o SM-SP		Límites de uniformidad $C_u$ mayor de 4 Coeficiente de curvatura $C_c$ entre 1 y 3		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW		Límites abajo de la "Línea A" y con $I_P$ menor que 4		Límites arriba de la "Línea A" y con $I_P$ mayor que 7		Límites abajo de la "Línea A" y con $I_P$ menor que 4		Límites arriba de la "Línea A" y con $I_P$ mayor que 7		Amba de "Línea A" y con $I_P$ entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.	



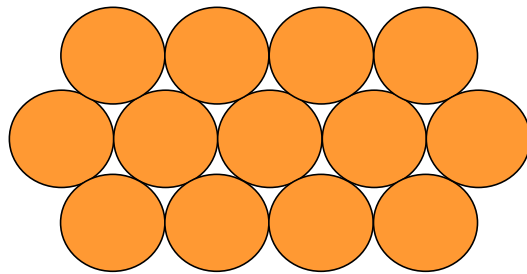
# SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO

## ASTM D3282

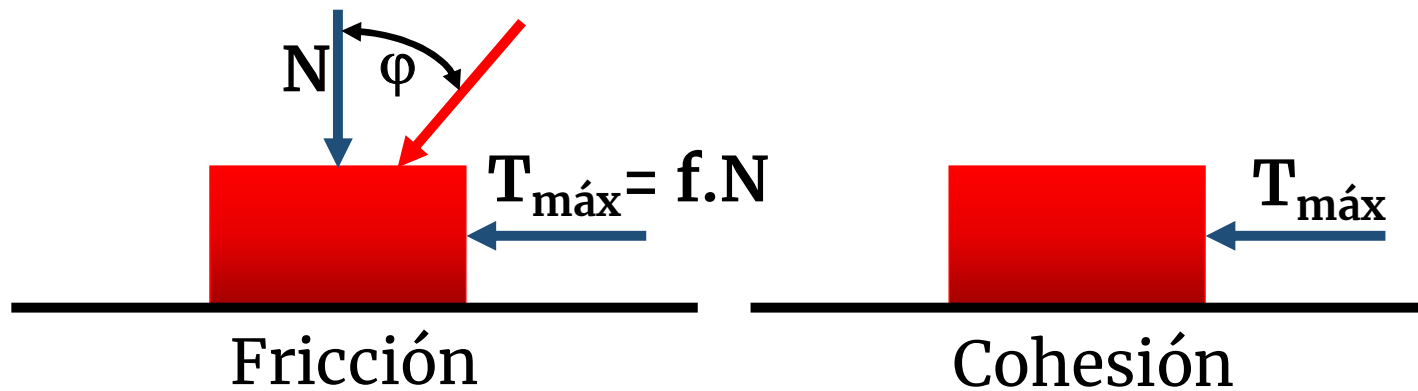
Clasificación General	Materiales Granulares (35% o menos pasa el tamiz N°200)							Materiales limo-arcillosos (más de 35% pasa el tamiz N°200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de Grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
<b>Análisis de tamizado (% pasa)</b>											
2.00 mm (# N°10)	50 máx	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.425 mm (# N°40)	30 máx	50 máx	51 min	----	----	----	----	----	----	----	----
0.075 mm (# N°200)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 min	36 min	36 min	36 min
<b>Características de fracción pasa # N°40</b>											
Límite Líquido (LL)	----	----	40 máx	41 min	40 máx	41 min	40 máx	41 min	40 máx	41 min	41 min
Índice Plástico (IP)	6 máx	NP	10 máx	10 máx	11 min	11 min	10 máx	10 máx	11 min	11 min	11 min
Materiales constituyentes significativos	Fragmentos de piedra, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general como subrasante	Excelente a buena							Regular a pobre			

El IP del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL menos 30. El IP del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30 (ver **Gráfico** siguiente).  
La casilla A-3 antes de la A-2 es debido al proceso de eliminación de izquierda a derecha. No indica superioridad de A-3 sobre A-2.

# RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS



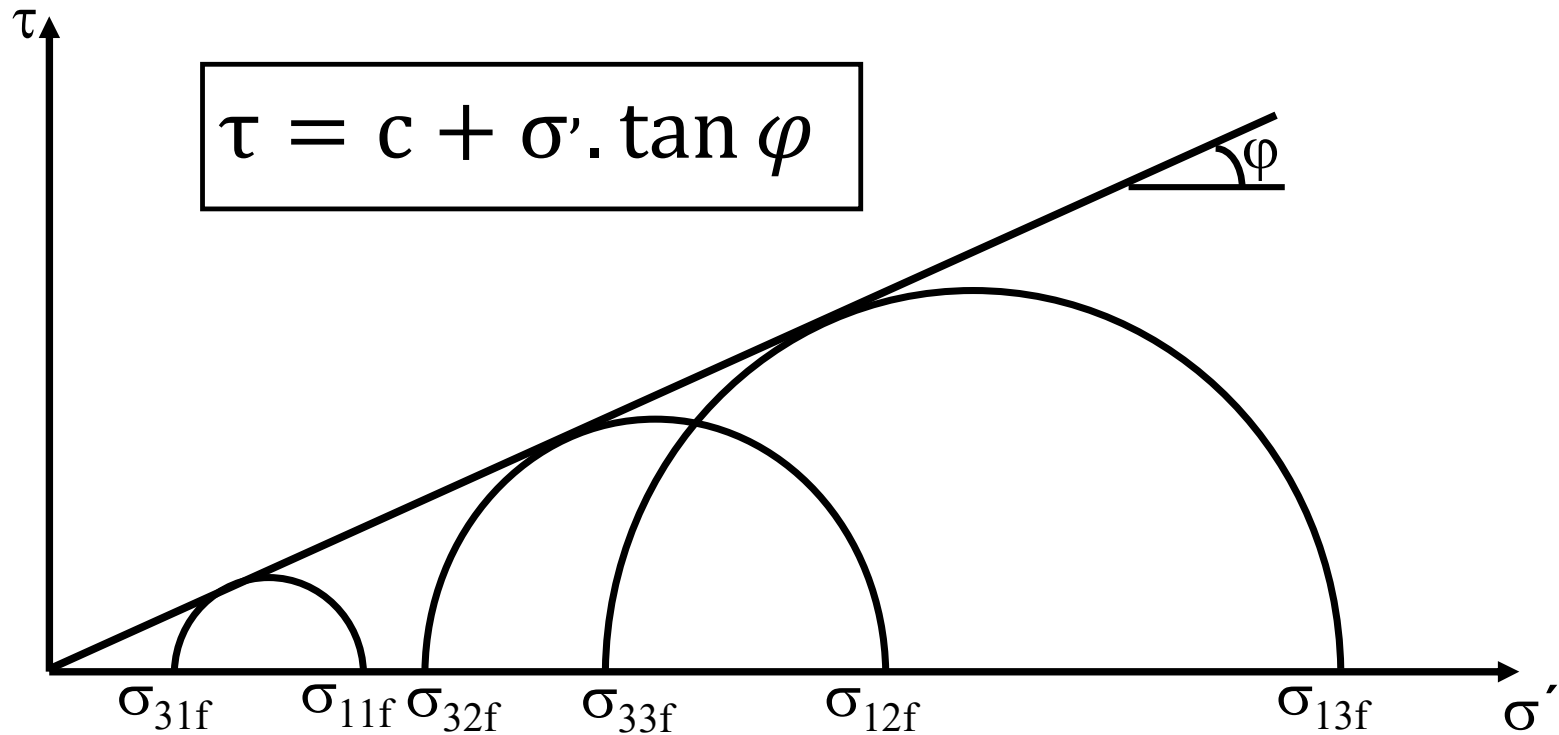
Medio Granular sin Cementación  
entre Partículas



$$\tau = c + \sigma' \cdot \tan \phi$$



# ENVOLVENTE DE FALLA DE MOHR-COULOMB



# ENSAYOS DE RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS

Corte Directo  
(ASTM D3080)

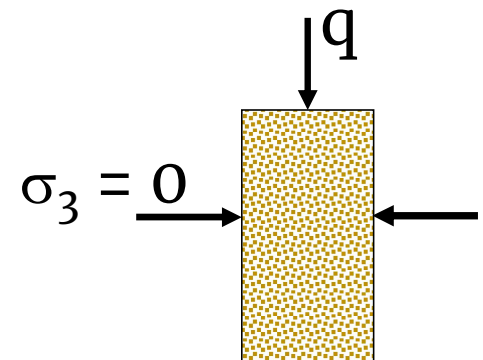
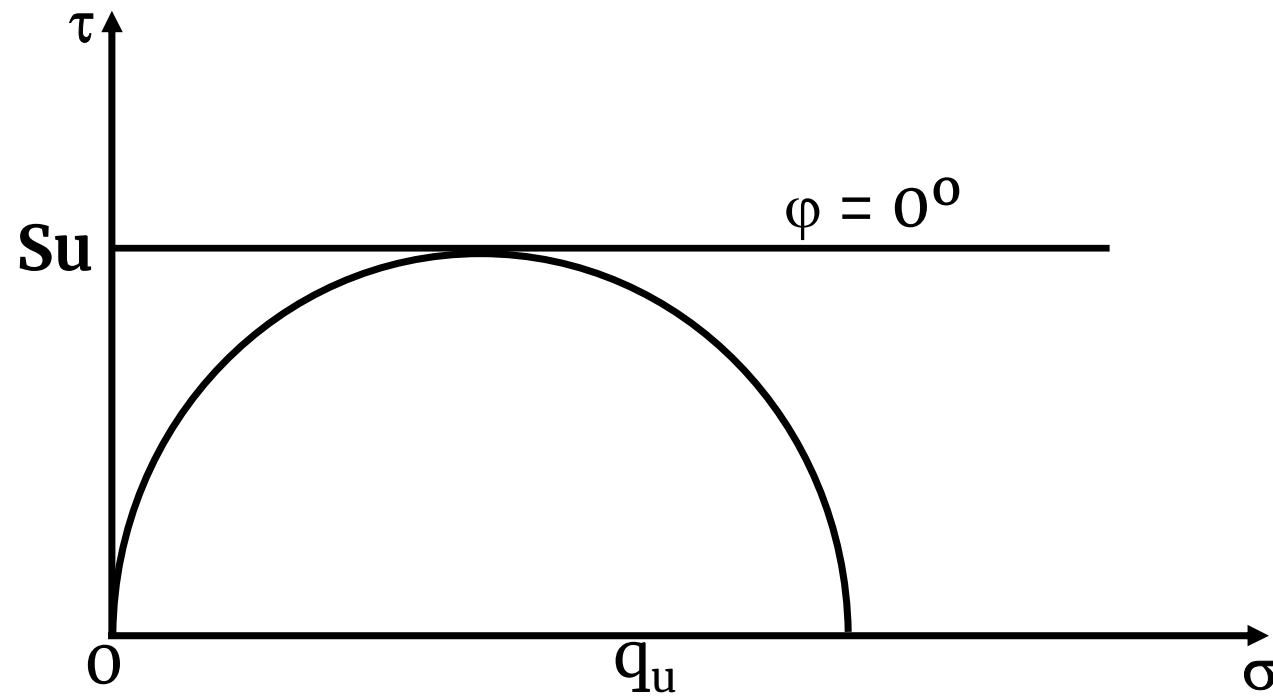


Compresión Triaxial  
(ASTM D2850 (UU); ASTM D4767 (CU);  
ASTM D7181 (CD))



# RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA (RCI)

ASTM D2166



# ÍNDICE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)

Porter (1929)

$$\text{CBR}(\%) = \frac{q_{0,1''\text{muestra}}}{q_{0,1''\text{patrón}}} \cdot 100$$

Material Patrón

Piedra triturada de California de la que se conoce tensión necesaria para producir penetración preestablecida

$$\text{CBR}(\%) = \frac{q_{0,1''\text{muestra}}}{70,3 \text{ kg/cm}^2} \cdot 100 = \frac{q_{0,1''\text{muestra}}}{0,703}$$

# ENSAYO CBR (ASTM D1883; AASHTO T193)

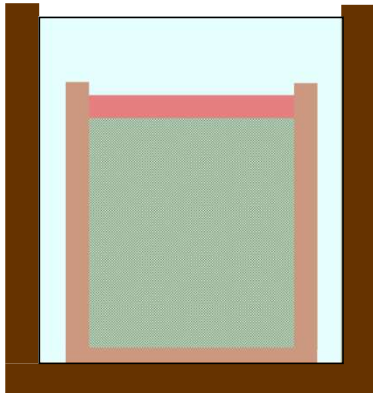
Compactación de 3 Probetas con:

- Diferentes Energías
- Igual Humedad (Humedad Óptima de Ensayo Proctor)



# ENSAYO CBR

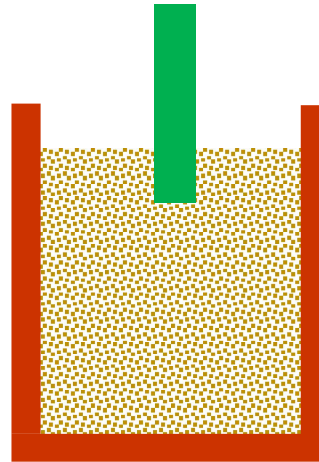
Saturación de Probeta



Medida de Expansión  
(4 días)

Carga por Punzonado

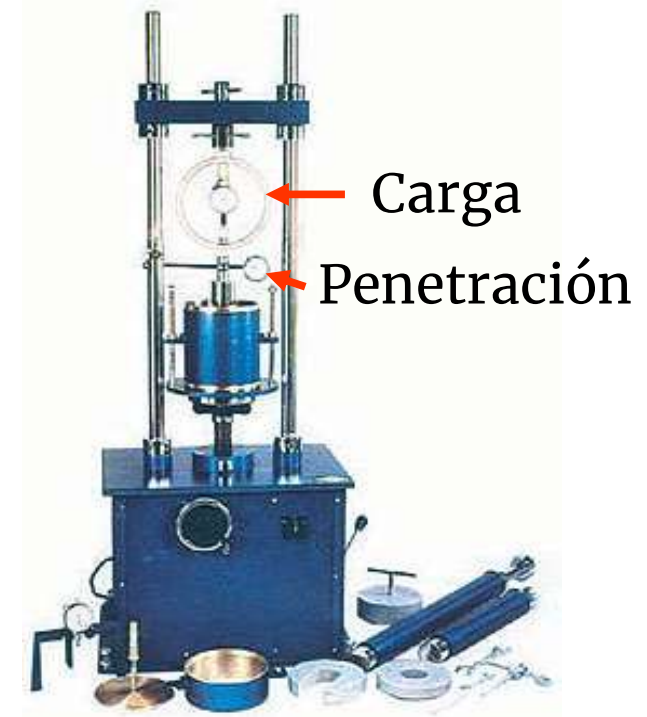
Vástago de  
3 in<sup>2</sup> (19,4 cm<sup>2</sup>)



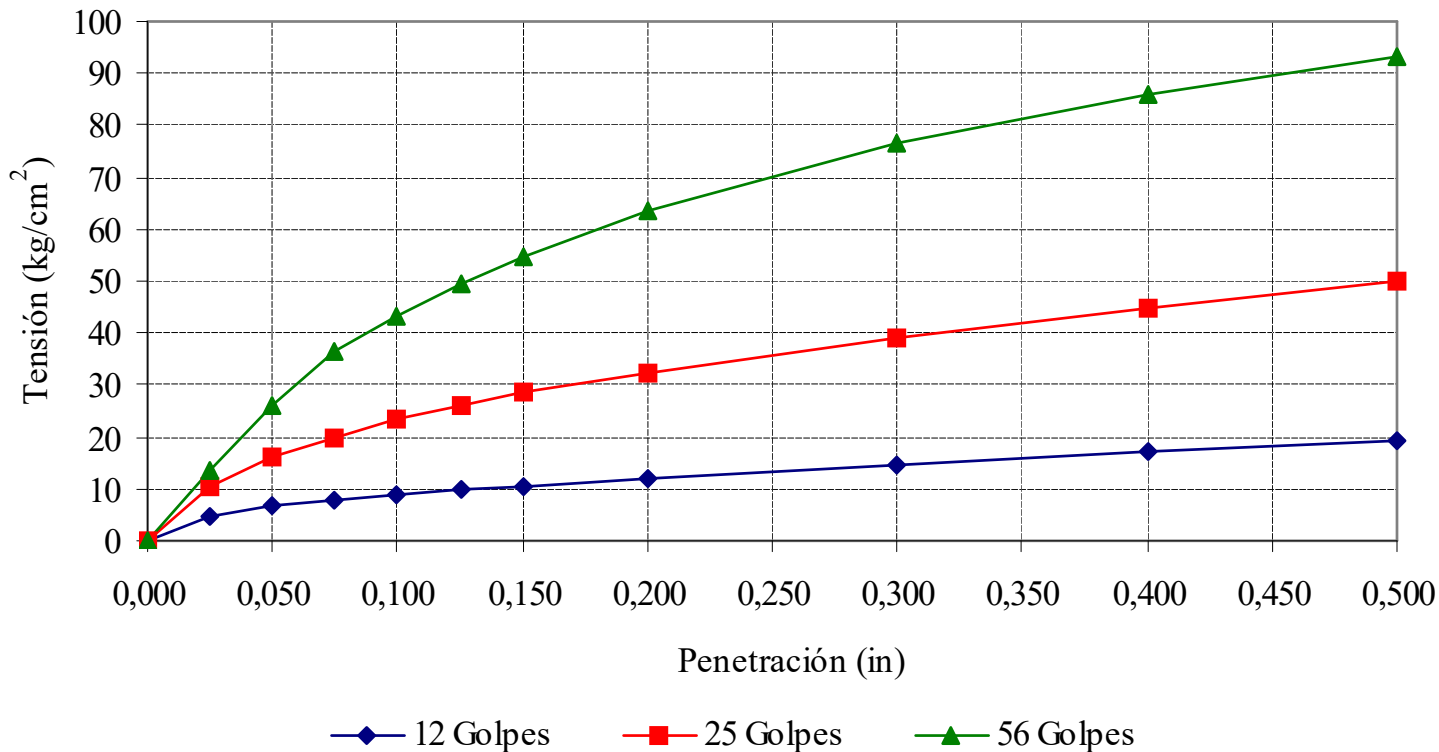
Expansión Máxima Admisible

Subrasante: 2-3%

Subbase y Base: 0,5%



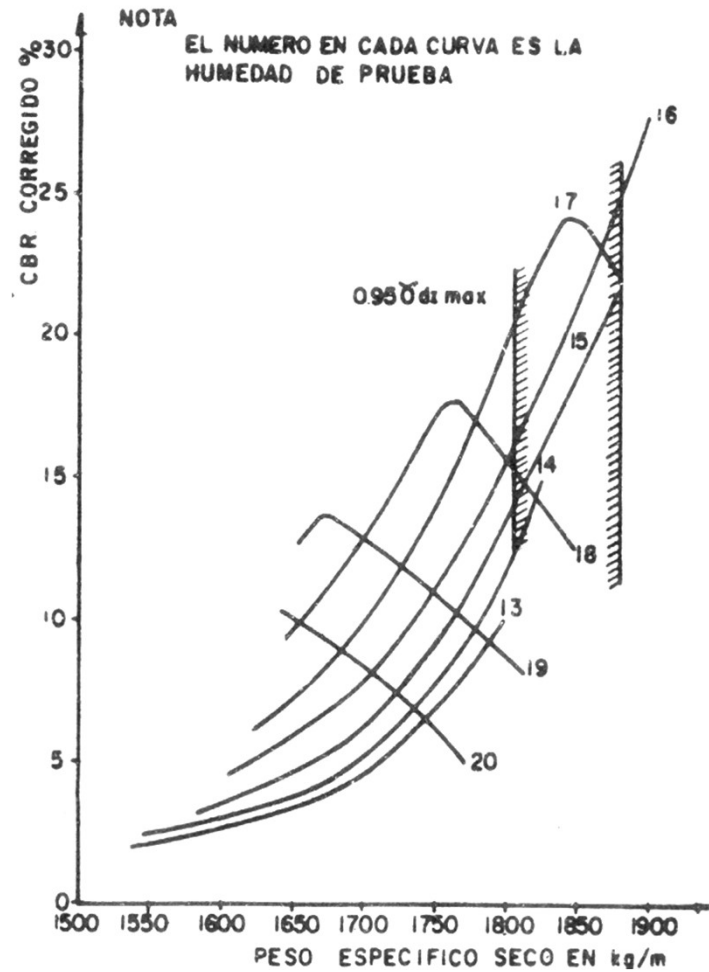
# RELACIÓN TENSIÓN-PENETRACIÓN



Valor Mayor

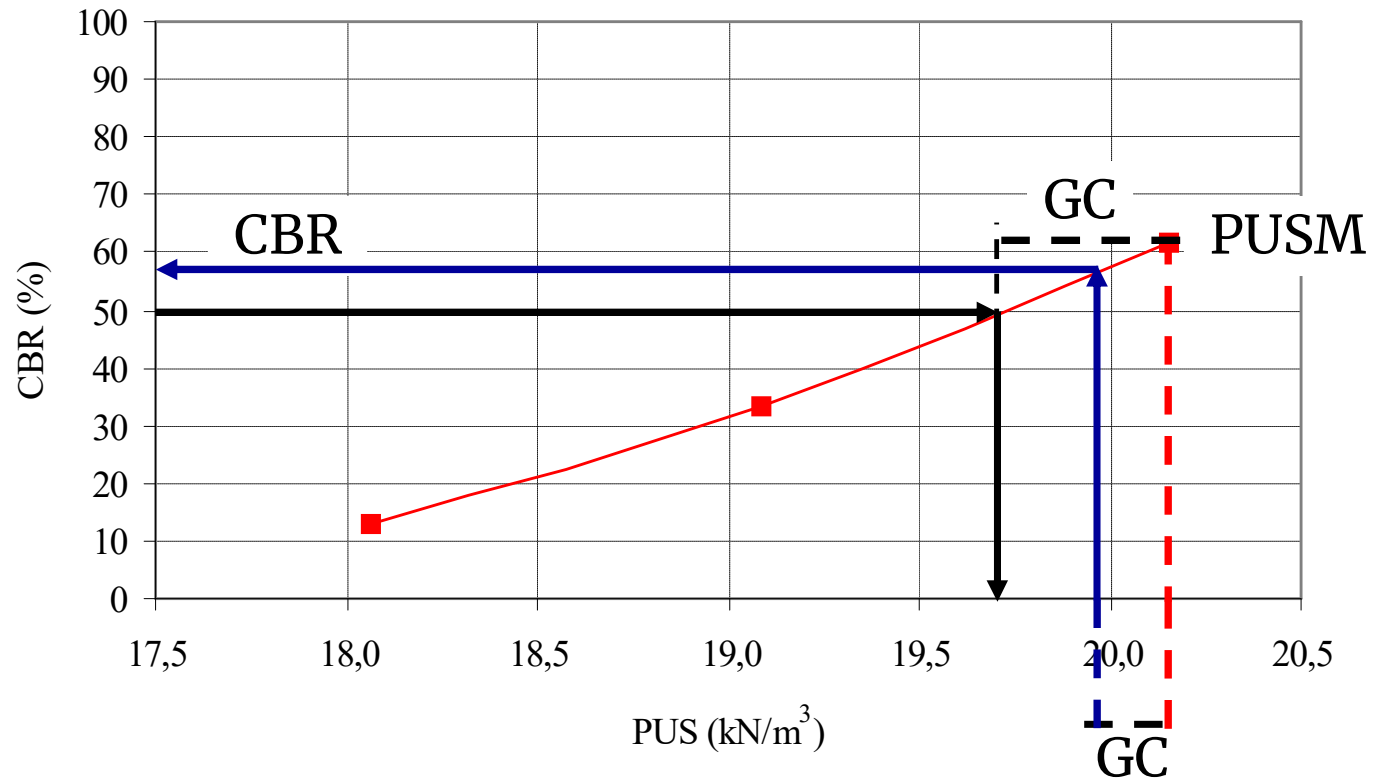
$$\text{CBR}(\%) = \frac{q_{0,1''\text{muestra}}}{0,703}$$
$$\text{CBR}(\%) = \frac{q_{0,2''\text{muestra}}}{1,055}$$

# RELACIÓN CBR-PESO UNITARIO SECO (PUS)





# RELACIÓN CBR-PUS



# CRÍTICA DEL ENSAYO CBR

Se comparan materiales ensayados en condiciones diferentes

Material	Condición de Ensayo	
	Saturación	Drenado
Gruesos (Arenas y Gravas)	Saturado	Drenado
Finos (Arcillas y Limos)	No Saturado	No Drenado

# CRÍTICA DEL ENSAYO CBR

Condiciones de laboratorio y campo diferentes

Condición	Laboratorio	Campo	Resultado
Compactación	Impacto	Amasado	Estructura diferente (Finos)
Carga	Estática	Tránsito	Respuesta mecánica diferente

# CRÍTICA DEL ENSAYO CBR

No es medida directa de capacidad soporte de materiales (Porter, 1950)

Es un ensayo de corte, siendo indicador de resistencia al corte de suelos (Turnbull, 1950)

Debe considerarse como *ensayo indicativo de resistencia al corte...* principios de diseño de pavimentos están basados en prevención de *falla al corte de subrasantes* de pavimentos (Simposio de la ASCE, 1950)

Parámetro de caracterización sencillo y rápido pero que conduce a pavimentos sobredimensionados

No permite evaluación de desempeño

## CBR IN SITU (ASTM D4429)



Condición de Humedad de Campo (No Saturado)

$$CBR_{\text{in situ}} > CBR_{\text{laboratorio}}$$

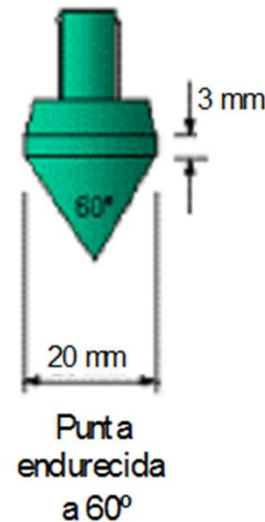
# PENETRÓMETRO DE CONO DINÁMICO (DCP)

Resistencia a la penetración de cono por impacto de masa

Índice de Penetración

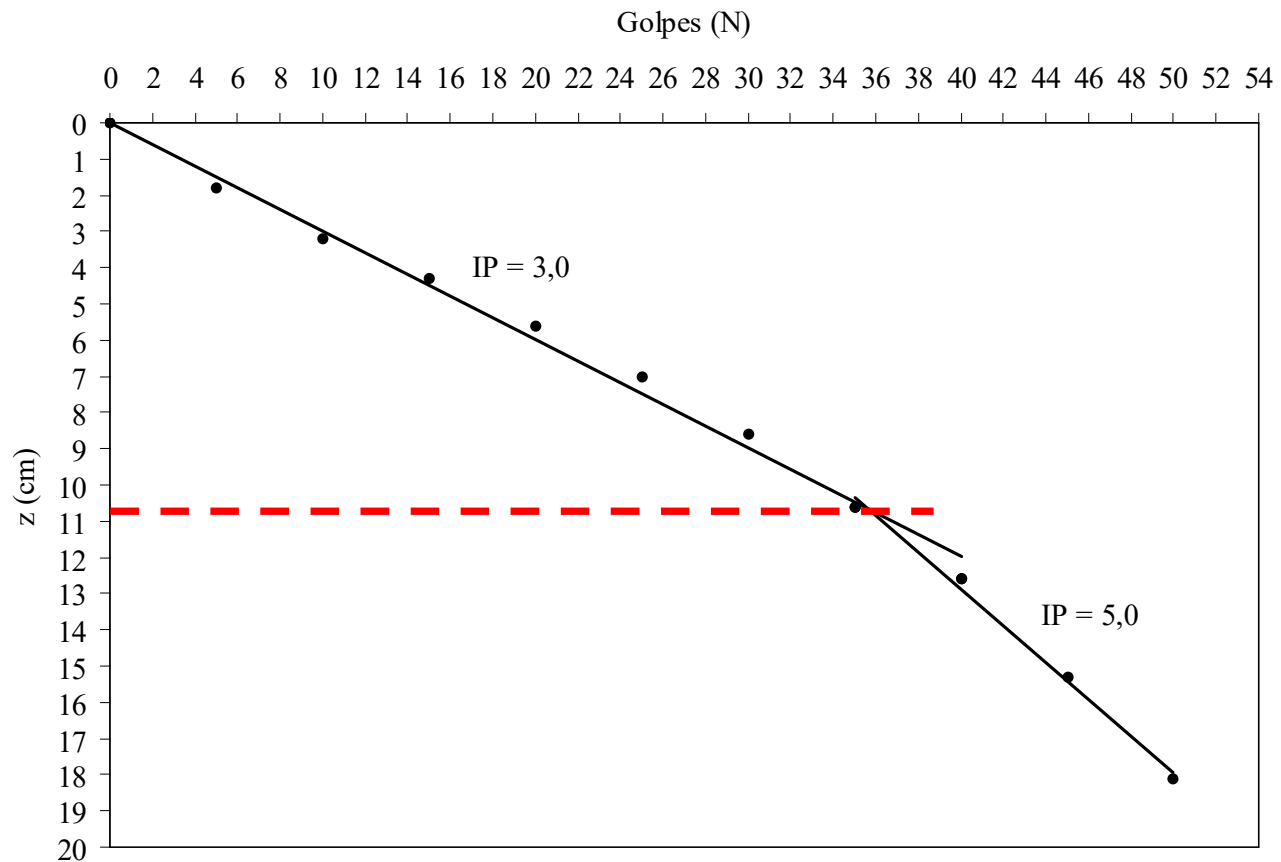
$$IP = \frac{\Delta}{N}$$

$\Delta$ : Penetración del Cono  
N: Número de Golpes



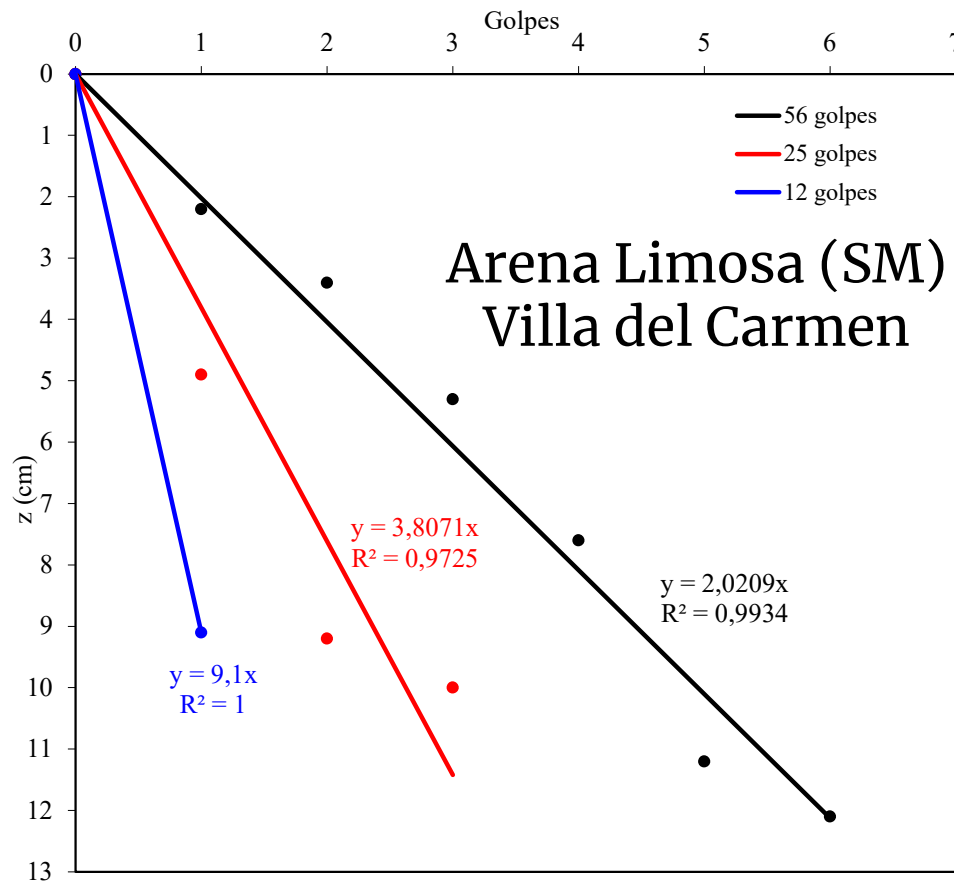
# DCP

## Función del Tipo de Suelo



# DCP

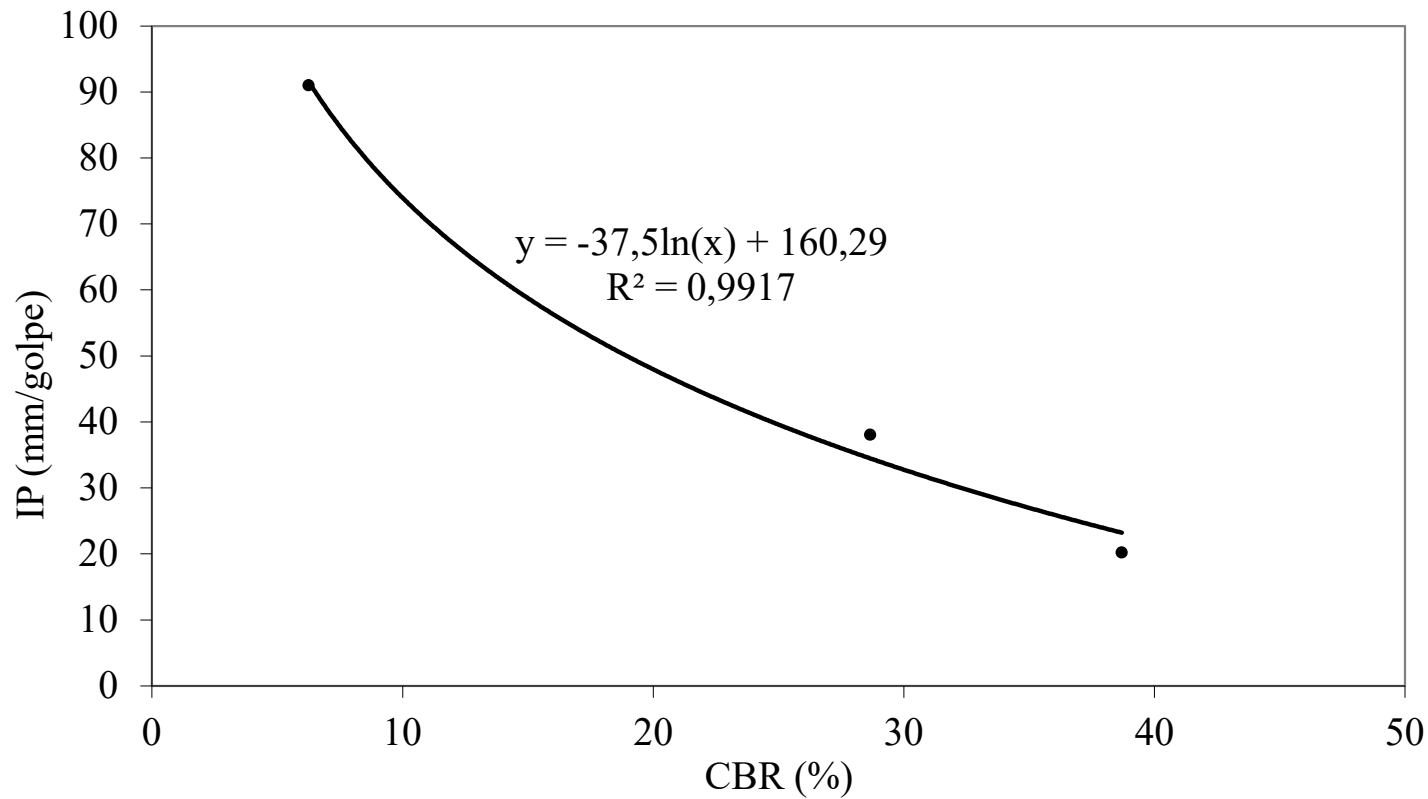
## Función del PUS y Humedad





# RELACIÓN DCP-CBR

## Arena Limosa (SM) – Villa del Carmen



# AGREGADOS

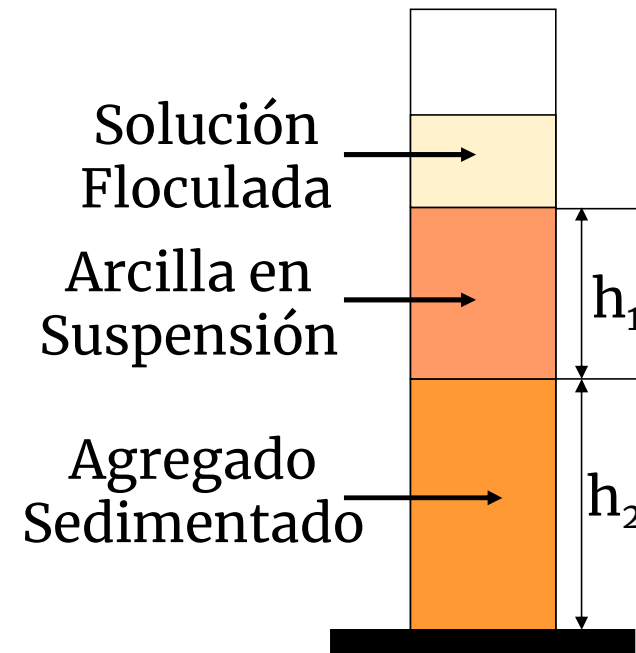
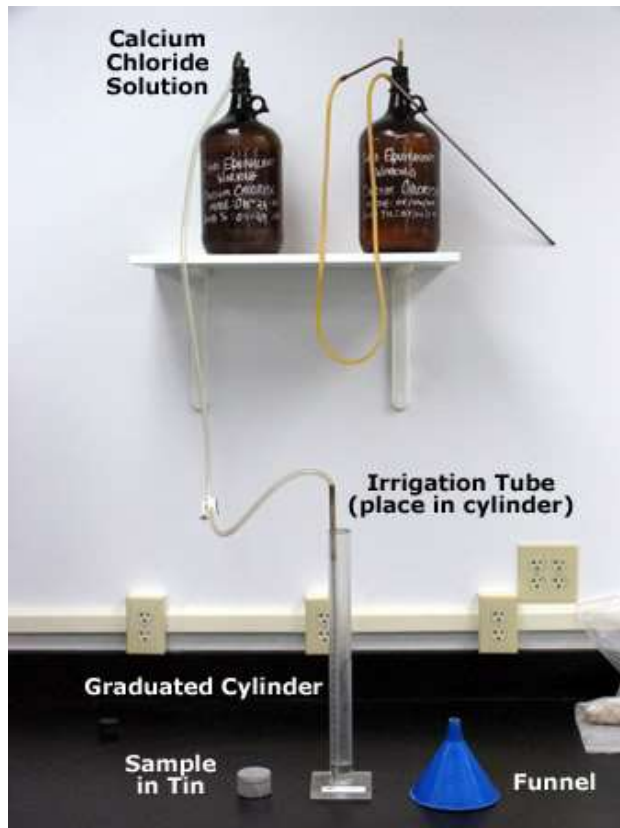
Mezcla de grava, arena, piedra partida, escoria u otros materiales minerales usada en combinación con un ligante para formar hormigones o morteros (ASTM D8)

## Clasificación

Naturaleza	Tamaño	Graduación
Natural	Grueso >#10	Densa
Procesado	#200 < Medio < #10	Abierta
Artificial (Residuos)	Filler (65%<#200)	Uniforme
Reciclado	Polvo <#200	Discontinua

# EQUIVALENTE DE ARENA (ASTM D2419)

Medida de proporción relativa de polvo o arcilla en agregados medios



$$EA(\%) = \frac{h_2}{h_1} \quad EA > 45\%$$

# DESGASTE DE LOS ÁNGELES (ASTM C131)

Resistencia a la abrasión de agregados gruesos menores de 1 1/2''



$$LA(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i}$$

$m_i$ : Peso inicial (5000 g)

$m_f$ : Peso final retenido en #12 (1,7 mm)

$$LA < 40\%$$

# CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Forma y Textura de Partículas (ASTM D3398)

Gravedad Específica (ASTM C127 y C128): Volumétrica y Aparente

Absorción (ASTM C128 y C127): Medida de porosidad

Adhesividad (ASTM D1075)

Sanidad (ASTM C88: Sulfato de Sodio; AASHTO T103:  
Congelamiento y Deshielo)

# MEZCLAS ASFÁLTICAS



Material conformado por agregados ligados por cemento asfáltico




Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC)	Agregados y Asfalto Calentados (140-170°C)
Mezcla Asfáltica en Frío (MAF)	Agregados y Emulsiones Asfálticas a $T_{\text{ambiente}}$
Mezcla Asfáltica Tibia (WMA)	Agregados y Asfalto Calentados (105-135°C)

# MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE (MAC)

Clasificadas en función de graduación de áridos



Densa	Continua y bien graduada (Concreto Asfáltico, CA)	
Abierta	Uniforme sin finos (Mezcla Asfáltica Drenante, MAD)	
Discontinua	Tamaños gruesos y mástic asfáltico (Stone Matrix Asphalt, SMA)	

# MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE (MAC)

Mezcla	Asfalto (%)	Vacíos (%)	
Concreto	3-8	4,5-6	
Drenante	4-6	18-25	
SMA	6-7,5	4-6	



# MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO (MAF)

Mezcla	Asfalto (%)	Vacíos (%)	
Densa	4-6	9-15	
Abierta	4-6	22-34	

# MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA(WMA)

## Técnicas de Producción

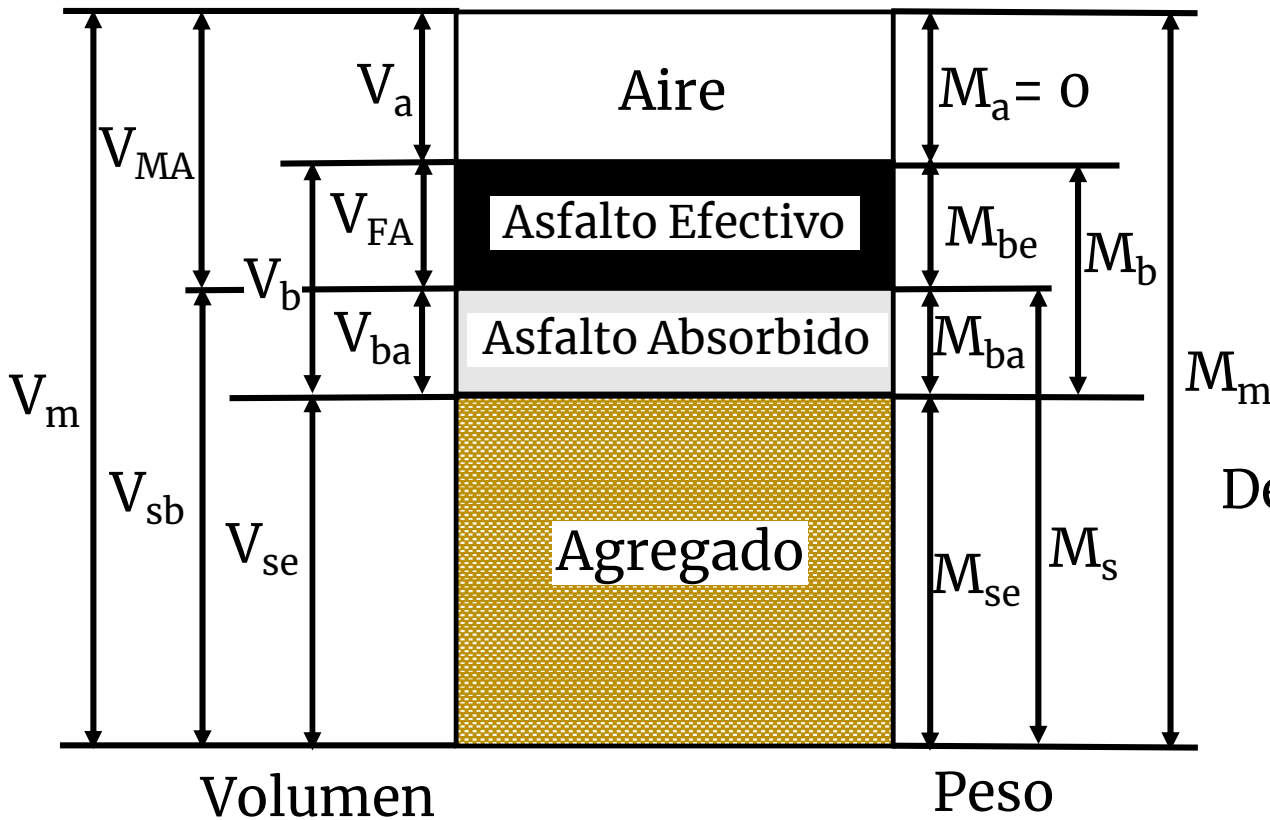
Adición de Agua (Asfalto Espumado):  
Vapor de agua reduce viscosidad de asfalto

Polímeros orgánicos:  
Reduce Viscosidad

Tensoactivos:  
Reducen tensión interfacial asfalto-agregado

Arena Húmeda:  
Agua se evapora haciendo espuma

# RELACIONES FÍSICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS



Densidad Aparente (Bulk)  
(AASHTO T166)

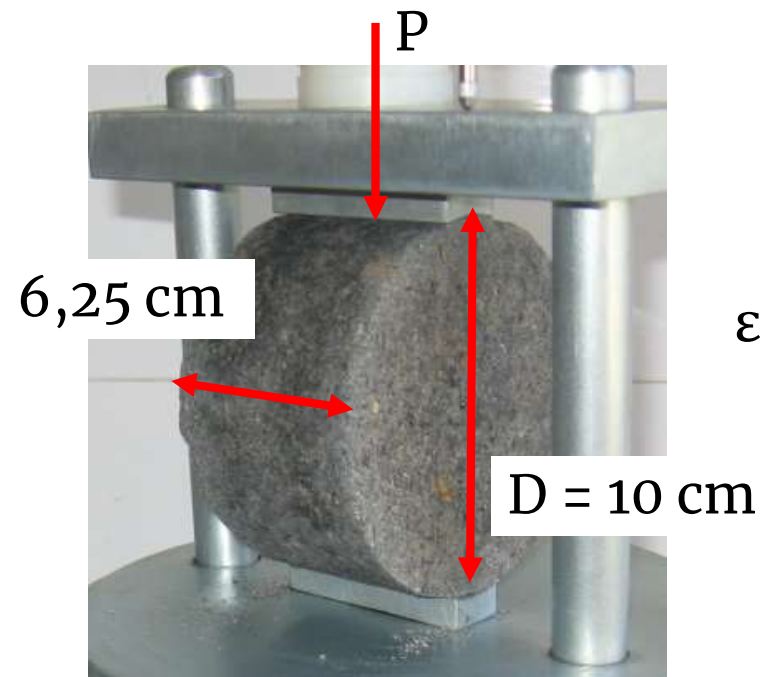
$$G_{mb} = \frac{M_m}{V_m}$$

Densidad Máxima Medida (Rice)  
(AASHTO T209)

$$G_{mm} = \frac{M_{se} + M_{be}}{V_{se} + V_a + V_b}$$

# RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

## Resistencia a la Tracción Indirecta (ASTM D6931)



$$RT = \frac{2P}{\pi D}$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \mu \sigma_y)$$

Curado a  $T_{\text{controlada}}$  ( $25^{\circ}\text{C}$ ) por  $t_{\text{determinado}}$  (4 h)

# ENSAYO MARSHALL (AASHTO T245)

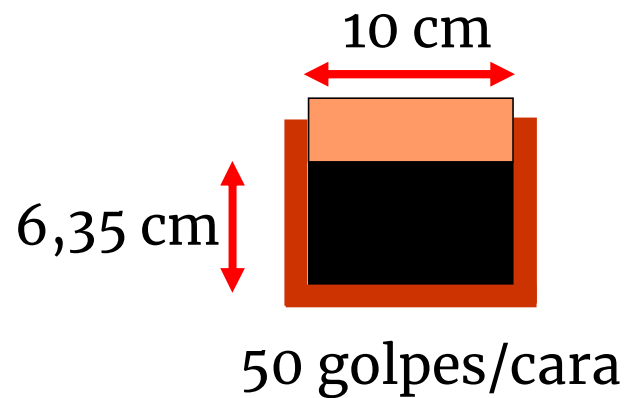
## Compactación

$T_{\text{cemento asfáltico}}$  de mezclado  $\rightarrow$  Viscosidad ( $\mu$ ) = 170 cSt (centiStokes)

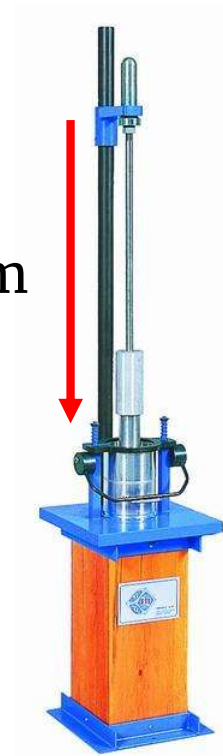
$T_{\text{ca}}$  de compactación  $\rightarrow \mu = 280$  cSt

5 contenidos de asfalto

Peso Específico  
Volumen de Aire

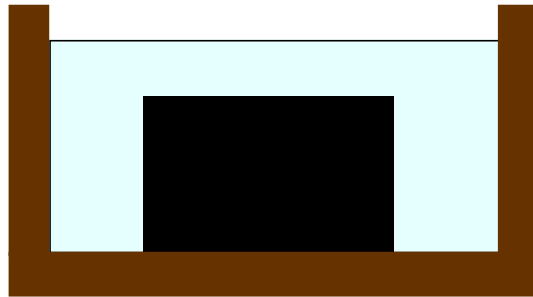


45,7 cm



# ENSAYO MARSHALL

## Estabilidad y Fluencia



60°C – 30-40 m

Estabilidad (kg): Máxima carga (ruptura)

Fluencia (mm): Deformación vertical a la ruptura



# ESPECIFICACIONES DE SELECCIÓN (MTOB)

Mezcla	Capa	V <sub>aire</sub> (%)	Estabilidad <sub>min</sub> (kg)	Fluencia (mm)	Est/Flu (kg/mm)
I	Base	3-8	---	---	---
II	Base	3-8	---	---	---
III	Base	3-8	500	Tránsito: Liviano 2-5 Mediano 2-4,5 Pesado 2-4	Tránsito: Liviano 100 Mediano 150 Pesado 200
IV	Base	3-8	500		
IV	Rodadura	3-5	550		
V	Base	3-8	500		
V	Rodadura	3-5	550		
VI	Rodadura	3-5	550		
VII	Rodadura	4-6	500		
VIII	Rodadura	4-6	450		