

5. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS / AGREGADOS

5.1 INTRODUÇÃO

5.1.1 ESTABILIZAÇÃO

- Utilização de qualquer processo de natureza física, físico-química, química ou mecânica (natural ou artificial).
- Alterar propriedades e melhorar as características quanto à aplicação em Engenharia (densidade, resistência, sensibilidade às variações climáticas, etc.).
- Permanência das propriedades ao longo do tempo (durabilidade)

5.1.2 TIPOS DE ESTABILIZAÇÃO

- Mecânica - Compactação + Drenagem
- Granulométrica – Combinação adequada de materiais
- Com aditivos (estabilizantes) – cimento, cal, cinzas volantes, asfalto, óleos, resíduos.

5.1.3 ESCOLHA DO PROCESSO

(1) Estudo do Solo / Agregado

- Constituição Física – (granulometria, % passa na # n° 200, plasticidade).
- Natureza química (adição com aditivos)

(2) Análise Econômica

- Preferencialmente materiais locais
- Estabilização pelo menor custo global

5.2 ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA

- **COMPACTAÇÃO** – por si só é um processo de estabilização, mas integra os outros processos de estabilização.
- **DRENAGEM** – aproximação das partículas
- **OPERAÇÃO DE COMPACTAÇÃO** – aumentar a compacidade inicial (na construção)
 - máxima estabilidade
 - atenuar recalques devido ao tráfego
 - aumentar a resistência ao cisalhamento
 - redução da deformabilidade (elástica ou plástica)

- **COMPACTAÇÃO DE CAMPO** – energias de compactação distintas do laboratório devido as diferenças no confinamento do solo e da distribuição em camadas dependem:

- do teor de umidade
- do número de passadas do equipamento
- da espessura da camada compactada
- do tipo e características do equipamento de compactação (pressão, impacto e vibração)
- da deformabilidade da camada subjacente
- Número limite de passadas para atingir a densidade de projeto por depender de diversos fatores deve ser analisado em segmentos-teste

- CATEGORIAS DE EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO

- Rolos estáticos
 - Rodas de aço lisas
 - Pneumáticos
 - Pé-de-carneiro
- Rolos vibratórios
 - Tambor liso
 - Tambor corrugado

- CONTROLE DE COMPACTAÇÃO NO CAMPO

- Umidade (h) – $h = h_{OT} \pm x \%$ (p. ex. $x = 3 \%$)
 - Frigideira
 - Speedy – DNER ME 052/94
- Grau de compactação (GC) - $GC \geq y \%$ (p.ex $y = 100\%$)
$$G_c = \frac{\gamma_s(\text{campo})}{\gamma_{s.\max}(\text{laboratorio})} \times 100$$
 - Processo do Frasco de Areia – DNER ME 092/94

5.3 ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Consiste no emprego de um material ou mistura de dois ou mais materiais que se enquadrem dentro de uma determinada especificação.

Fatores que afetam:

5.3.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS AGREGADOS

Suficiente resistência mecânica para reter aproximadamente a mesma distribuição granulométrica durante a compactação e a subsequente utilização pelo tráfego.

5.3.2 COMPOSIÇÃO MINERAL DOS MATERIAIS

Resistente à ação do clima.

5.3.3 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Granulometrias contínuas, quando há presença de todas as frações, de maneira proporcional, sem degraus. Seguem a forma da curva de Talbot, correspondendo a uma distribuição particular que leve os grãos menores a caberem nos vazios dos maiores. São materiais que quando bem compactados, atingem altas densidades e, portanto maior resistência (preferível agregados de graduação densa, não há nem excesso, nem falta de finos).

5.3.4 PROPRIEDADES DE ARGAMASSA DE SOLO

Determinadas pelos ensaios de Limite de Liquidez (<25) e Limite de Plasticidade (<6). Depende da quantidade e tipo de argila. Material que passa na peneira # 40 e retidas na # 200.

5.3.5 COMPACTAÇÃO

Fatores que influem:

- Teor de umidade do solo
- Número de passadas
- Espessura da camada compactada
- Características de equipamento (precisão, área de contato, etc.).

5.3.6 PROJETO DE MISTURA DE AGRAGADOS

Dados 3 agregados:

Dados	Agregados	Cada #	Proporção em Peso	Mistura (M)
1	(X) Graúdo	x	p_1	$m_1 = p_1x$
2	(Y) Médio	y	p_2	$m_2 = p_2y$
3	(Z) Fino	z	p_3	$m_3 = p_3z$

Objetivo: Determinar Mistura $M = m_1 + m_2 + m_3 = p_1x + p_2y + p_3z$

$$\begin{array}{l}
 x \left\{ \begin{array}{l} \% \text{ passa} \\ \% \text{ retido entre a peneira } \# 2 - 5 \text{ a} \end{array} \right. \\
 y \left\{ \begin{array}{l} \% \text{ retido entre a peneira } \# 2 - 5 \text{ a} \\ \% \text{ passa acumulada} \end{array} \right. \\
 z \left\{ \begin{array}{l} \% \text{ passa acumulada} \end{array} \right. \\
 p_1 + p_2 + p_3 = 100\%
 \end{array}$$

(B) MÉTODOS GRÁFICOS

b1) Método gráfico de **Rothfuchs**

Seqüência

b2) Método do **Instituto do Asfalto**

5.4 ESTABILIZAÇÃO COM ADITIVOS

a) ESTABILIZANTE COM AÇÃO CIMENTÍCIA

- CAL
- CIMENTO
- CINZAS VOLANTES
- CLORETO DE CÁLCIO
- SULFONATO DE LIGNINA

b) ESTABILIZANTE COM AÇÃO IMPERMEABILIZANTE

- MATERIAIS ASFÁLTICOS

5.4.1 ESTABILIZANTE COM AÇÃO CIMENTÍCIA

Processo de estabilização físico-química que visa à melhoria das características do solo acrescentando a resistência e reduzindo a sensibilidade à umidade e temperatura.

MATERIAIS: Cal, Cimento, Cal - Cinzas Volantes, Cloreto de Cálcio, Lignina.

CARACTERÍSTICAS:

(A) CAL (Aditivo Ativo) → Reação química com agregado

→ Maiores Mudanças

- Plasticidade: ↑LP e ↓LL

1 a 3 % → Trabalhabilidade

3 a 5% → Solo não plástico

- Mudança de Volume: reduz a expansão / provoca retração.

- Resistência: aumenta até um teor ótimo e depois cai

- **Reações:** Aglomeração

Carbonatação

Reação pozolânica ou cimentante

- **Efeitos nas propriedades:** Aglomeração dos grãos finos
 - Redução da plasticidade do solo
 - Reduzir a variação volumétrica
 - Aumenta a resistência à compressão e o CBR
 - Reduz densidade e teor ótimo
 - Facilita a ação do betume, cimento ou cinzas

(B) CIMENTO (Aditivo Intermediário)

- Plasticidade: Provoca alterações das propriedades com menor intensidade que a cal.
- Resistência: grandes ganhos
- Mudança de Volume: Provoca retração (mais ameno que a cal)

ETAPAS DA ESTABILIZAÇÃO COM CIMENTO

1. ENSAIOS PRELIMINARES NO SOLO

- Material passante na peneira # 0,05mm < 50% (Silte + Argila)
- Material passante na peneira # 0,005mm < 20% (Argila)
- Índices físicos (LL e LP)

2. SELEÇÃO DE TEOR DO CIMENTO

CLASSIFICAÇÃO HBR	TEOR DE CIMENTO SUGERIDO EM PESO (%)
A1-a	5
A1-b	6
A2	7
A3	9
A4	10

3. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

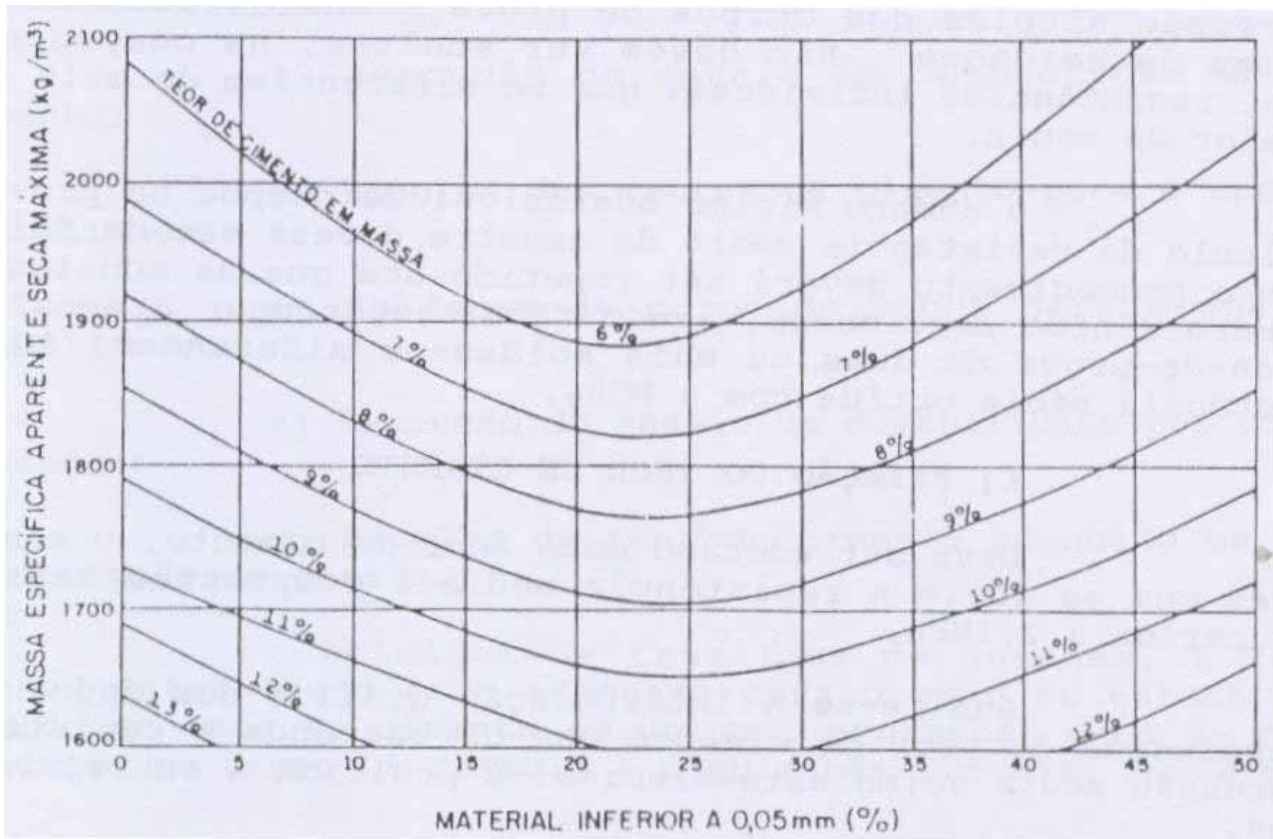
- 7 (sete) Teores de cimento variando entre si de 0,5%
- Determinação de valores de umidade ótima e massa aparente seca máxima.

4. MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

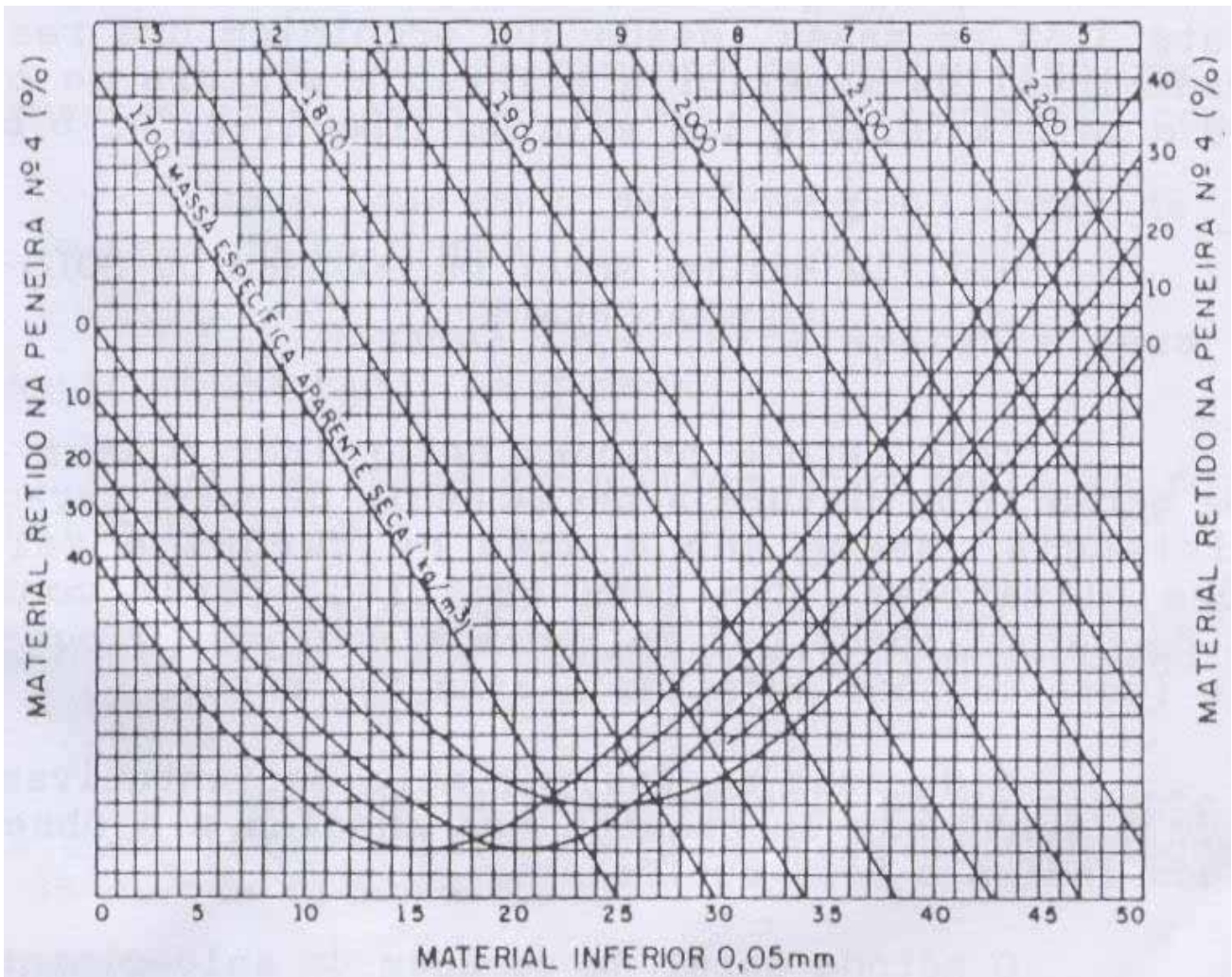
- Mínimo de 3 CP's cilíndricos para cada teor selecionado
- Cura em câmara úmida:
 - Temperatura: 23°C+2°C
 - Umidade do ar ≥ 95%

5. ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

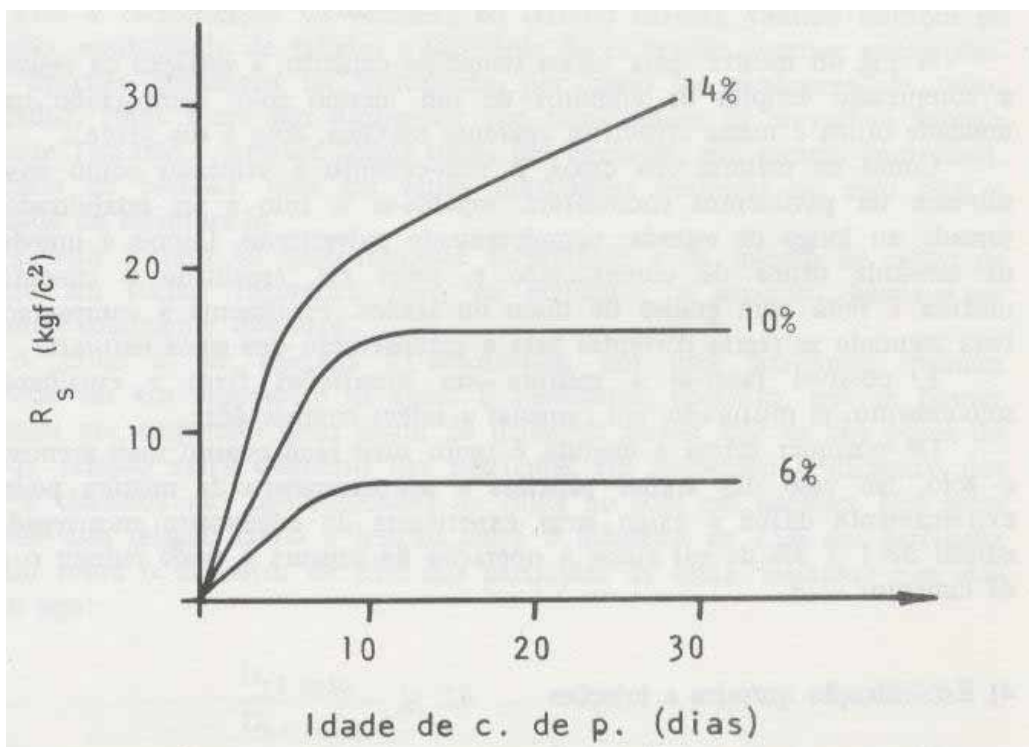
- Solo tratado com cimento: $RCS_7 - 1,5$ a $2,1$ MPa
- Solo Cimento: $RCS_7 \geq 2,1$ MPa



Teor de cimento para o ensaio à compressão simples (100% PASS. N°4)



Teor de cimento para o ensaio à compressão simples (com material retido na peneira # N°4)



Variação da resistência à Compressão Simples de c. de p. de Solo-Cimento com a idade.

6. FIXAÇÃO DO TEOR DE CIMENTO

- Menor dos teores que atenda a condição de Resistência

7. TRANSFORMAÇÃO DE TEOR DE CIMENTO EM PESO PARA VOLUME

- Fórmula para conversão:
- Possibilita a obtenção direta da quantidade necessária para um determinado serviço.

SOLO-CIMENTO			
SOLO MISTURA		BASE	SUB-BASE
	LL Máx	25%	40%
	IP Máx	6%	18%
	ISC	80%	30%
	Exp	0,5%	1%
	RSC	1,5 – 2,1 MPa	1,2 MPa

(C) CAL – CINZAS VOLANTES (Intermediário)

Principal característica: aumentar a resistência dos materiais granulares.

5.4.2 ESTABILIZAÇÃO COM MISTURAS DE CAL E CINZAS

- Mistura íntima de solo, cal e cinza volantes (fly ash) e água
- Utilizadas em camadas estabilizantes de reforço, sub-bases e base e melhoria dos subleitos
- Processo construtivo os mesmos descritos no solo-cal com a adição de um terceiro material, o fly ash
- Aplica-se fly ash quando o solo não tem pozolana

5.4.3 ESTABILIZAÇÃO COM CLORETO DE CÁLCIO

- $\text{CaCl}_2 \rightarrow$ higroscópico e deliçescente
- Apresenta-se para uso em palhetas brancas, condicionadas em sacos de 50 Kg ou tambores de 300 Kg
- Necessita de cuidados especiais para conservá-lo
- Age como redutor de pó e consolidante

5.4.4 ESTABILIZAÇÃO COM SULFONATO DE LIGNINA

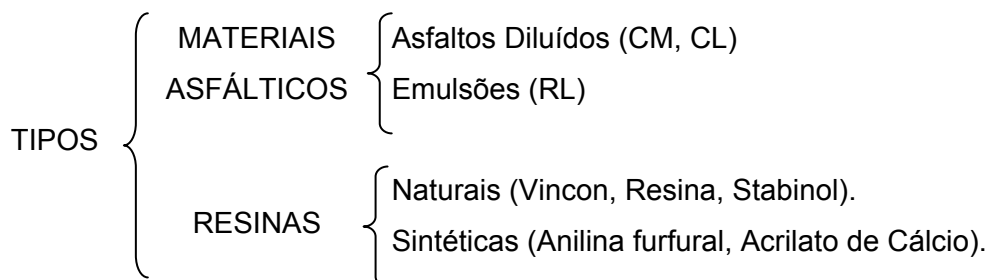
- Subproduto químico do despolpamento da madeira
- Em estradas encascalhadas e poeirentas se aglutina com os finos formando uma argamassa que elimina a poeira

- Experiência durante vários anos nos EUA (Wisconsin) mostraram bons resultados em estradas de terra contendo pedregulho, areia e argila.

5.4.5 ESTABILIZANTE COM AÇÃO IMPERMEABILIZANTE (Inativo)

FINALIDADES: - Aglutinação das partículas

- Impermeabilização
- Alterar ou melhorar as propriedades dos solos



- MATERIAIS USADOS:

- Emulsões asfálticas de ruptura lenta
- *Cut-Backs*: cura rápida e médias
- Asfalto Líquido
- Alcatrões

As RESINAS SINTÉTICAS são compostas basicamente de materiais orgânicos sólidos (semi-sólidos) produzidos pela união de moléculas de grandes polímeros (Plastificação).

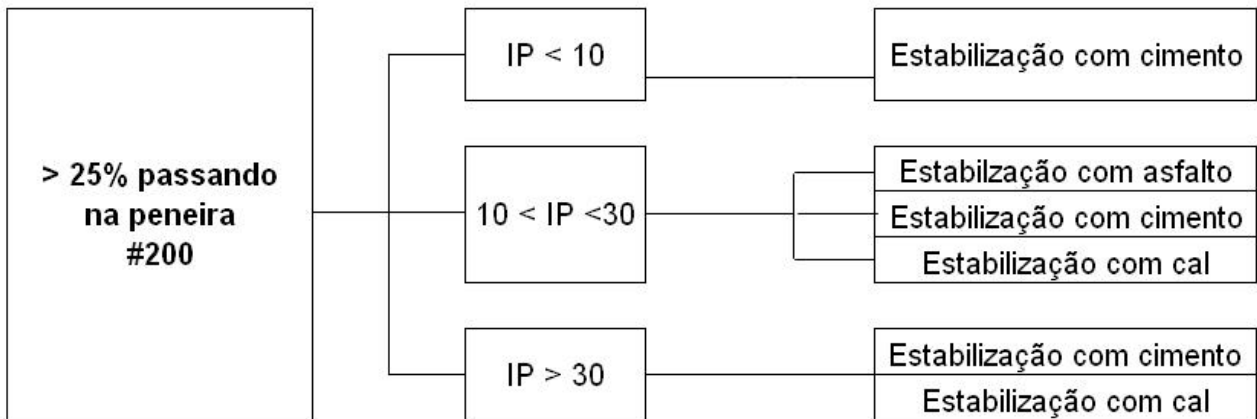
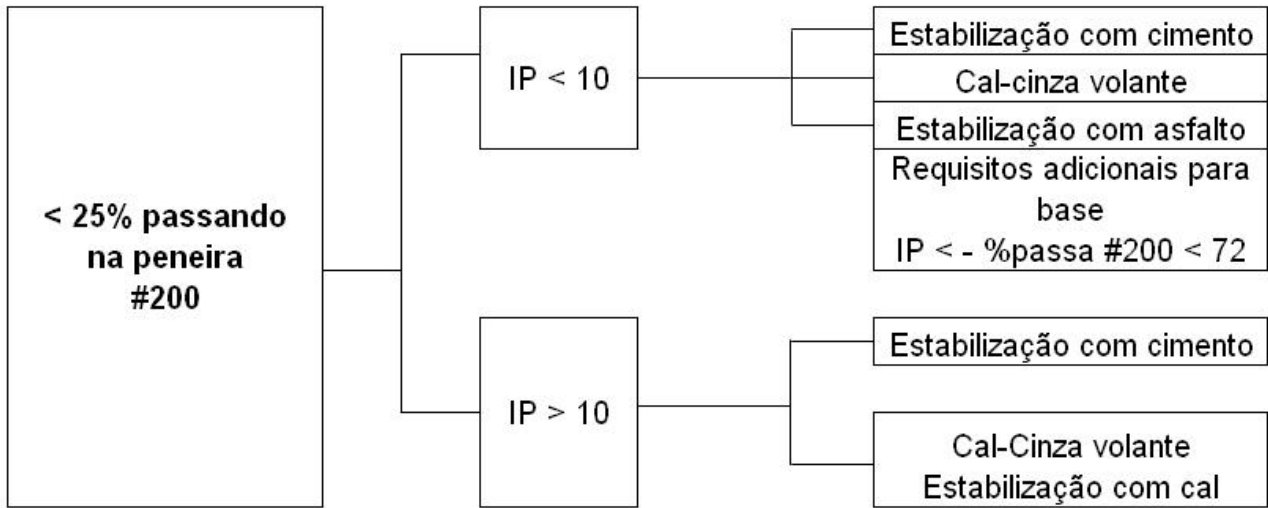
Os solos empregados neste gênero de estabilização devem ter a seguinte granulometria:

Peneiras	% que passam
Nº 4	50
Nº 40	35 – 100
Nº 200	10 - 50

5.4.6 SELEÇÃO DO ESTABILIZANTE

Critérios: - Material passante pela peneira # 200

- Análise de Plasticidade



CIMENTO → Todos

CAL → Plásticos (+ finos)

ASFALTOS → Não Plásticos (- graúdos)

CAL – Cinza Volante → + Graúdos

QUANTIDADES MÉDIAS DE ESTABILIZANTES (% em peso)			
ESTABILIZANTE	Graúda A1, A2, A3	Média a Fina A4, A5	Fina A6, A7
Cimento	3 – 11	7 – 13	9 – 16
Cal	1 – 2	3 – 7	5 – 9
Cal-Cinzas Volantes	10 – 30	15 – 30	40 – 50
Asfalto	4 – 8	5 – 10	15 – 30