UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA OU MECÂNICA

DOUGLAS FADUL VILLIBOR

SÃO CARLOS
2021

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Departamento de Vias de Transporte e Topografia - STT

Estabilização Granulométrica ou Mecânica

Eng. Douglas Fadul Villibor

São Carlos - 1978

ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA OU MECÂNICA

S U M Á R I O

I - Conceitos: Estabilização e Estabilização Granulométrica e Fatores que influem no comportamento das Composições Granulométricas.

II - Especificação de Materiais para Camadas Estabilizadas Granulométricamente em Pavimentos.

III - Dosagem dos componentes na Estabilização Granulométrica.

IV - Alguns aspectos pouco conhecidos de Estabilização Granulométrica apresentados no V Congresso Panamericano de Mecânica dos solos pelo Relator Engº LUIZ M. ZALAZAR (Argentina), 1975.

V - Estabilização Granulométrica com Solos Lateríticos.

VI - Sugestões para a Ampliação das Especificações de Camadas Estabilizadas Granulométricamente em Áreas Lateríticas do Brasil.

VII - Execução.

VIII - Controle.

IX - Bibliografia.

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
BIBLIOTECA
U.S.P.

I - CONCEITOS: ESTABILIZAÇÃO, ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA e FATORES QUE INFLUEM NO COMPORTAMENTO DAS COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS.

1. CONCEITO DE ESTABILIZAÇÃO

A estabilização do solo, em seu sentido mais lato, pode ser compreendida como a alteração de qualquer propriedade do mesmo, que melhore seu comportamento sob o ponto de vista de aplicação à engenharia.

Em sentido mais restrito, entretanto, a estabilização do solo consiste em um tratamento artificial do mesmo pela adição de um material, denominado estabilizante, com uma ou mais das seguintes finalidades:

1.1. Melhorar suas propriedades geotécnicas

a) Aumentar a resistência, inclusive a resistência à deformação, sob efeito de carregamento contínuo ou repetido.

b) Reduzir a compressibilidade.

c) Reduzir a sensibilidade à ação de variações externas, principalmente a umidade.

d) Aumentar ou reduzir a permeabilidade.

1.2 Garantir a permanência dessas propriedades no decorrer do tempo (durabilidade) e sob ação de cargas.

A compactação, embora sem ser considerada por si só um tipo de estabilização, faz, entretanto, parte integrante de qualquer dos processos de estabilização, sendo sempre executada após a mistura com o estabilizante.

2. CONCEITO DE ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

A estabilização granulométrica ou mecânica consiste na combinação e manipulação de solos, em proporção adequada, de forma a obter um produto final de estabilidade maior que os solos de origem, e adequado para a aplicação em cada caso particular.

Para um solo estável, é necessário uma granulometria bem proporcionada de material grosso, podendo conter certa dose de li

gante argiloso.

A Estabilização Granulométrica tem sua maior aplicação na área de Estradas e atualmente específicamente na de Pavimentos.

Quando se iniciou o estudo de Estabilização de Solos para Estradas, considerava-se que o conhecimento dos critérios de Granulometria e Índices Plásticos seriam suficientes devido a uma relação direta entre Granulometria e Estabilidade, e entre Índices Plásticos (LL e IP) e a permanência relativa desta estabilidade em função de perda e absorção de água. Portanto, nas especificações correntes os valores máximos LL e IP são fixados para uma determinada finalidade.

A fixação de valores rígidos para LL e IP parece realmente pouco defensável pois a influência daqueles valores sobre o comportamento de Solo depende da quantidade de material que passa na peneira 40 (0,42 mm) e também das condições climáticas que vão prevalecer, não compreendendo que sejam os mesmos valores máximos de LL e IP a adotar tanto em uma região chuvosa como seca.

Estudos posteriores correlacionaram novos Limites Plásticos em função da precipitação pluviométrica como exemplo da Escola Espanhola e Francesa.

Também o F.L.D. Wooltorton procura estabelecer os valores extremos admissíveis para LL e IP em função de Granulometria do Solo Estabilizado.

Posteriormente em decorrência das restrições apontadas, desenvolveu-se um outro procedimento para o controle de Estabilização de Solos com base num ensaio mecânico, que traduz a resistência do solo após o processo de Estabilização, como por exemplo o Método do Índice de Suporte Califórnia desenvolvido pelo corpo de Engenheiros do Exército dos E.E.U.U..

Estão assim configuradas as duas maneiras clássicas de encarar a Estabilização Granulométrica. Atualmente há uma tendência generalizada para fusão das duas escolas em vários organismos rodoviários; entre eles o DER-SP e DNER (em 1971) fizeram a fusão dessas duas escolas, sobretudo no que se refere a Bases Estabilizadas Granulométricamente exigindo sempre um valor mínimo de CBR, características granulométricas e índices de plasticidade.

Atualmente a maior utilização de solos estabilizados é para execução de camadas de Pavimentos Flexíveis e eventualmente-

para revestimento primário de estradas de terra.

3. FATORES QUE INFLUEM NO COMPORTAMENTO DAS COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS.

Tendo em vista que uma das maiores aplicações da estabilização Granulométrica está na execução de Bases de Pavimentos - Flexíveis, o assunto se desenvolverá principalmente baseado em resultados de ensaios de laboratório que visam correlacionar os fatores referidos com o provável comportamento das composições - Granulométricas a serem utilizadas como Base ou Sub-Base. -

As bases podem ser constituídas de materiais granulares diversos, tais como britas, pedregulhos, areias, etc., enquanto que as sub-bases podem ser constituídas de materiais mais pobres e mais fáceis de serem obtidos nas imediações da obra. As mesmas devem ser dimensionadas de forma a receber as cargas impostas ao pavimento, transmitindo-as e distribuindo-as de forma inofensiva-as estruturas inferiores.

3.1. Natureza das partículas - As partículas devem apresentar resistência suficiente e não sofrerem alterações indesejáveis. Essa cautela é importante, pois a fragmentação de material em uso provoca formação de finos, alterando as propriedades da composição.

3.2. Estabilização da Composição - O material precisa ser levado a uma consistência ótima. Ao ser submetido à pressões, os grãos se aproximam, e os finos existentes vão enchendo os vazios deixados pelos grossos (Ver fig. 1).

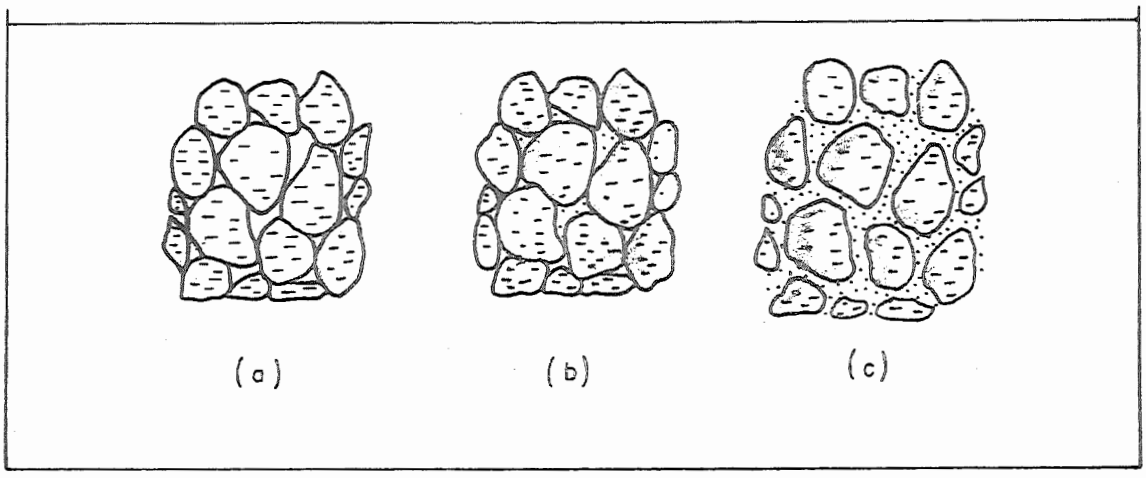


Fig. 1 - Estados Físicos de uma composição solo-agregado.

A otimização da estabilização depende portanto do intercorrelacionamento das características dos grãos, sua distribuição granulométrica, formato, etc., à primeira vista a densidade relativa pode parecer um parâmetro suficiente para caracterizar a estabilização; deve-se ter em vista que, com finos de densidade menor que o agregado grosso, a mesma densidade máxima pode indicar uma situação como a (a) da Fig. 1, com a estabilização pouca afetada pelas propriedades dos finos, ou como a (1.c) onde as propriedades dos finos importam. A fig. 2 mostra os resultados obtidos em ensaios de densidade seca feitos com composições solo-pedregulho, variando-se a porcentagem de material fino. Os valores das densidades são os máximos obtidos em cada compactação. A máxima densidade máxima foi obtida com composições contendo de 8 a 10% de material que passa na peneira 0,074 mm.

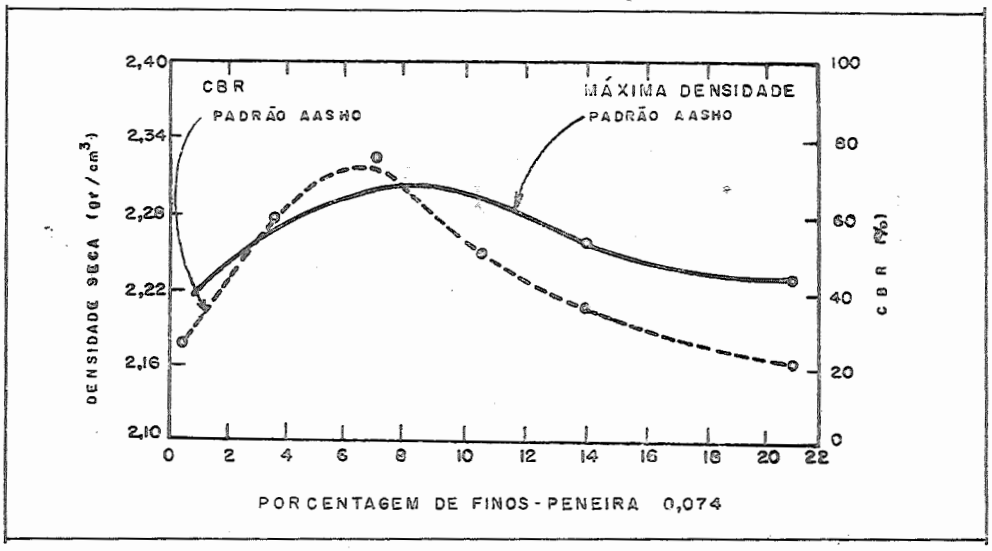


Fig. 2 - Variação da densidade e do CBR com as quantidades de finos.

Foram transportados para a mesma figura os resultados obtidos com o mesmo material, e ensaios para determinar os valores do Índice de Suporte Califórnia; vemos que uma mesma densidade pode implicar em resistências diferentes. Observamos que existindo pouco ou nenhum fino, a resistência depende do contato grão a grão do agregado; portanto é influida pelas dimensões e formatos destes, que implicam em maior ou menor área de transmissão de esforços e no entrelaçamento entre os grãos. À medida que os espaços entre os grãos maiores vão sendo enchidos com material fino, este vai travando os grãos maiores, firmando-os me

lhor em suas posições, com melhoria para a estabilidade, até que os espaços fiquem completamente preenchidos. Como os grãos britados se entrelaçam mais firmemente que os arredondados, este efeito de travamento é mais visível para agregados constituídos por pedregulhos. A fig. 3 mostra os resultados de ensaios feitos da mesma maneira que os indicados na fig. 2, mas com materiais britados, percebendo-se a menor sensibilidade desses materiais à variação da quantidade de finos. Atinge-se a otimização da estabilidade com o material grosso resistindo aos esforços e travado pelo material fino intergranular; introduzindo-se mais material fino, este, até a composição atingir a máxima densidade, comprime-se nos espaços entre os grossos, aliviando a transmissão direta de forças entre os grãos maiores; passam assim a participar cada vez mais da absorção das cargas; pesando assim suas características- cada vez mais nas da composição; verifica-se, nas figuras 1 e 2, que no máximo CBR ocorre com proporções de finos ligeiramente inferiores (6 a 8%) às proporções necessárias para a máxima densidade (8 a 10%). Aumentando mais e mais a proporção de finos, os grãos de agregado grosso vão perdendo o contato entre si, tendendo as características da composição para as características dos finos. A fig. 4 mostra os resultados de ensaios de densidade de CBR para três materiais diferentes, ressaltando as características devidas à predominância de diferentes granulações.

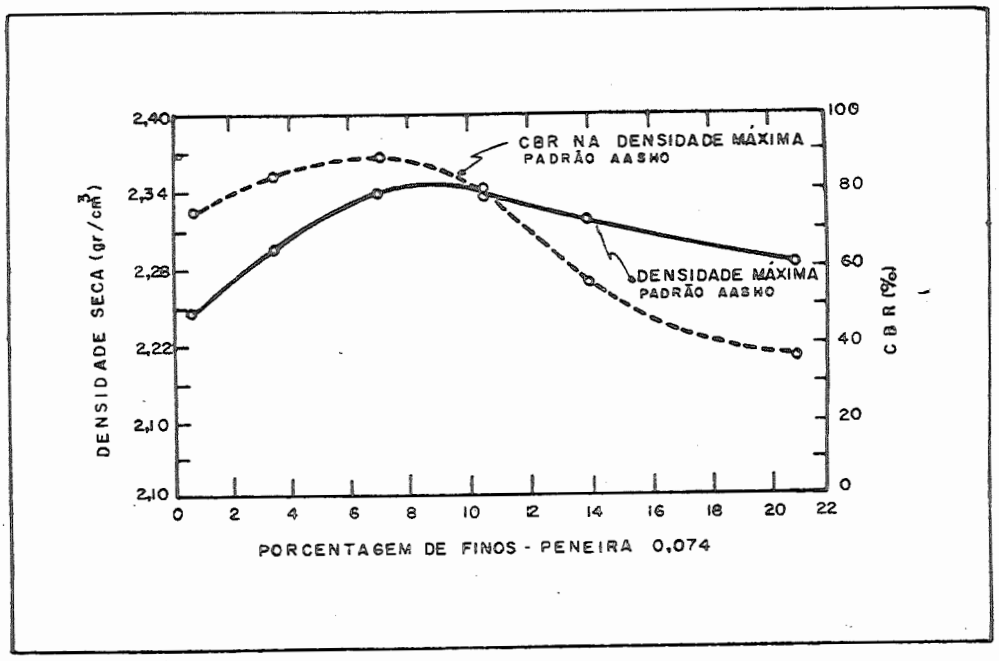


Fig. 3 - Variação da densidade e do CBR com a quantidade de finos (pedra britada).

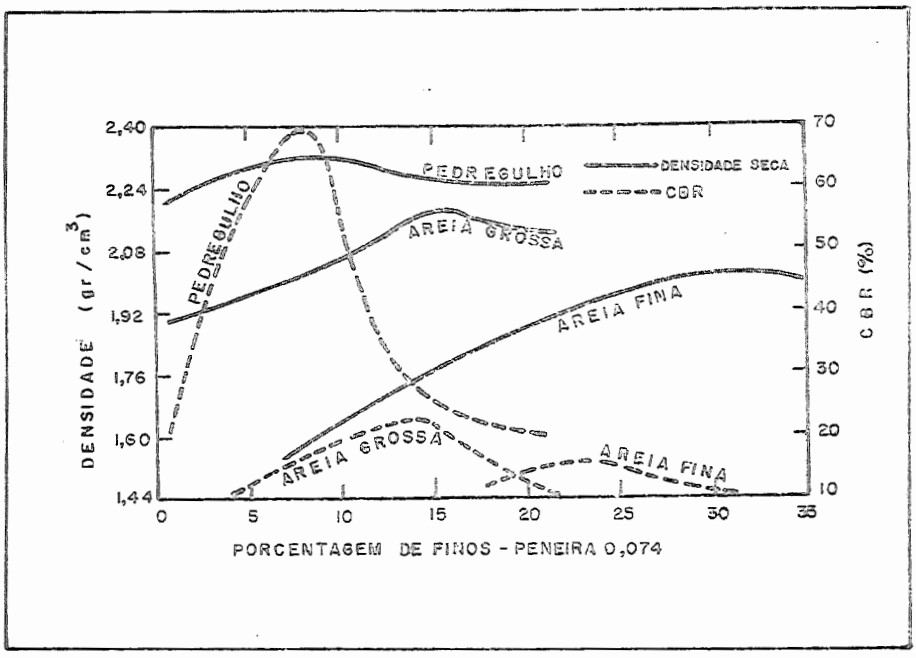


Fig. 4 - Variação da densidade e do CBR com os finos e com o tamanho máximo do agregado.

- Propriedades físicas dos finos. Entre elas temos de considerar a plásticidade; a fig. 5 mostra o efeito de plasticidade sobre a resistência triaxial.

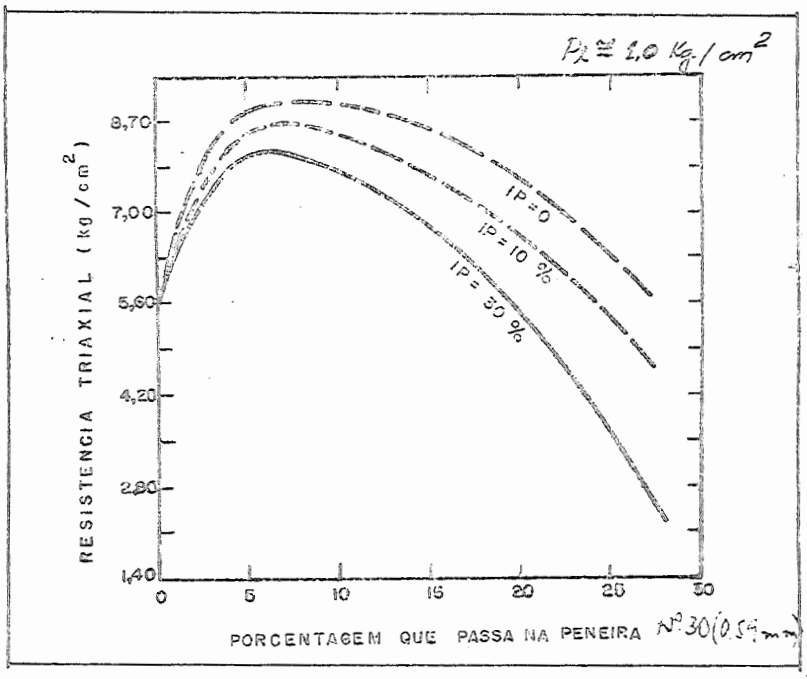


Figura 5 - Efeito da Plasticidade sobre a resistência triaxial - de um pedregulho. O tamanho máximo do agregado é de 25,40 mm.

Vemos que para IP = 0, a resistência praticamente permanece a mesma entre 5 e 15% de material que passa na peneira e à medida em que aumenta o IP, temos quedas cada vez maiores da resistência.

- Granulometria - A distribuição granulométrica da composição afeta o preenchimento dos vazios, e portanto, a estabilidade. Podemos representar uma distribuição bem graduada pela equação:

$$P = 100\left(\frac{d}{D}\right)^n$$

Onde:

p = porcentagem em peso do material que passa na peneira em questão.
d = abertura da peneira.
D = máxima dimensão do agregado.

A densidade máxima ocorre geralmente para n = 0,5. No caso indicado na figura 5, temos D = 1,0" e d = 0,0234"; portanto:

$$p = 100\sqrt{\frac{0,0234}{1,0}} \simeq 15\%;$$ qdade ótima na #30

Vemos confirmado o que indicamos anteriormente, isto é, que as características dos finos pesam sensivelmente à medida em que passam a participar mais diretamente na distribuição dos esforços. Podemos encontrar pedregulhos e britados com distribuição granulométrica conveniente, mas isso pode também não decorrer. Quando temos que trabalhar com agregados de graduação descontínua, onde faltam um ou mais tamanhos no espéctro da distribuição granulométrica, precisamos estabelecer critérios apropriados, à vista do preenchimento irregular dos vazios.

- Permeabilidade - A permeabilidade das composições granulométricas depende da distribuição do tipo de agregado, do aglutinante e da densidade relativa.

II - ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAIS PARA CAMADAS ESTABILIZADAS GRANULOMÉTRICAMENTE EM PAVIMENTOS.

O desenvolvimento deste capítulo será mais amplo pois julgamos que inicialmente será necessário realizarmos - algumas considerações de como se obter uma "Especificação de Materiais para Camadas Estabilizadas Granulométricamente" a partir da análise dos parâmetros que influem na mesma.

Os Parâmetros,abaixo indicados, que entrarão em consideração foram escolhidos tendo em vista que na maioria das especificações para obras rodoviárias em que constam esse- tipo de material os mesmos sempre estão presentes.

- Granulometria - Deverá ser tal que nos conduza a maior densidade possível; de uma maneira geral tem-se recorrido às fórmulas - de Fuller-Talbot (Granulometria Densa).

- Limite de Liquidez (LL) - O limite de liquidez avalia a " tendência" a absorção d'água do Solo Estabilizado. Está ligado à manutenção da Estabilização com variação do teor de umidade.

- Limite de Plasticidade - Avalia a "tendência" da expansão do Solo Estabilizado. Também está ligado com a manutenção das propriedades do solo com a variação do teor de umidade.

- Resistência - Tem-se recorrido ao ensaio de CBR (Califórnia - Bearing Ratio) para avaliar indiretamente a resistência do material quando submetido ao trânsito.

- Abrasão do Material - Avalia a manutenção da qualidade do material, consequentemente a manutenção da Estabilização do Solo será utilizado o Ensaio de "Abrasão Los Angeles".

Apresentaremos o estudo para obtenção de uma especificação para "Base" de Pavimento pois é uma das camadas - mais solicitadas do pavimento e que exige mais cuidados para um bom desempenho do mesmo.

II.1. Considerações para Elaboração de uma Especificação para Base.

1. Faixa Granulométrica

Para sua obtenção seguiremos os seguintes passos:

1.1. Escolha do diâmetro da maior partícula do agregado.

1.2. Cálculo da curva granulométrica de maior densidade (Fuller-Talbot).

1.3 Determinação da "Faixa Granulométrica".

1.4. Outros Parâmetros de Granulometria.

1.1. O diâmetro da maior partícula do agregado será tomado em função do tráfego para o qual estamos especificando a base e quanto mais pesado e intenso, o mesmo deverá ser maior.

Por motivos construtivos, o máximo - diâmetro da partícula admitido é de 50.8 (2") e geralmente o mínimo, por motivo de estabilidade, é de 25.4 (1").

1.2. Cálculo da Curva Granulométrica - trabalhos de Fuller e Talbot indicam que o solo granular que pode ser compactado a maiores pesos específicos aparentes secos é aquele cujas dimensões das partículas tem uma distribuição de - frequência acumulada que obedece à fórmula anunciada inicialmente em 1907 para misturas de concreto representada por:

$$\% P = 100 \left(\frac{d}{D}\right)^n \text{ em que:}$$

d = diâmetro da partícula

P = porcentagem em peso que corresponde ao diâmetro da partícula.

D = diâmetro maior da partícula.

n = coeficiente variável que na maioria dos casos é tomado com 1/2, resultando:

$$P\% = 100 \left(\frac{d}{D}\right)^{1/2}$$

Para o cálculo da curva granulométrica para a Base tomaremos D = 1" (diâmetro da maior partícula) e escolhemos - para peneiras de controle as normalmente utilizadas nos serviços rotineiros de controle de execução de Bases.

Cálculo das Porcentagens nas Peneiras de Controle

Peneiras Controle (mm)	p = Material Desejado % passa
25,4	100
9,52	61,2
2,00	28,0
0,42	12,7
0,074	5,4

$$P\% = 100 \left(\frac{d}{D}\right)^{1/2}$$

1.3 Determinação da Faixa Granulométrica - A experiência mostra que para facilitar a execução da Base é necessário a presença de uma proporção de finos maior que a indicada na equação, porém esse aumento, se exagerado, poderá diminuir a estabilidade da Base. É de norma estabelecer maiores tolerâncias em torno da curva para os materiais mais grossos, portanto, a maior tolerância seria na peneira de 9,52 mm e a menor na de 0,074 mm.

As tolerâncias citadas são da ordem de + 10% a + 40%.

Levando em consideração os fatos acima e com a experiência acumulada do comportamento das Bases Estabilizadas, cada Organismo Rodoviário fixou uma série de faixas granulométricas para materiais granulares, partindo de diferentes partículas máximas.

No caso particular, poderíamos, portanto, montar a seguinte faixa granulométrica para material de Base, considerando a curva obtida praticamente como linha inferior da mesma (Fig. 1).

Peneira	Curva de Fuller-Talbot	Tolerância Proposta	Faixa Especificada - Graduação Obtida.
25,4	100	0	100
9,52	61,2	40	60 - 100
2,00	28,0	30	25 - 55
0,42	12,7	20	12 - 30
0,074	5,4	10	5 - 15

Abaixo apresentamos, para efeito de análise, a graduação C e D do DER-SP, que usam também o tamanho máximo das partículas 1", e a graduação obtida.

Peneiras (mm)	Graduação DER-SP		Graduação Obtida.
	C	D	
25,4	100	100	100
9,52	50 - 85	60 - 100	60 - 100
2,00	25 - 50	30 - 65	25 - 55
0,42	12 - 30	15 - 40	12 - 30
0,074	4 - 12	5 - 15	5 - 15

Podemos verificar que a graduação obtida é praticamente igual a D e muito próxima de C.

1.4. Outros parâmetros de Granulometria

Com o passar dos tempos já em 1935 se verificou a necessidade de que na parte inferior da curva de máxima - densidade podia haver uma perigosa acumulação de finos, quando o material passando na peneira 40 (0,42 mm) (fração em que se medem as propriedades plásticas) se aproximava muito da fração abaixo da peneira 200 (0,074 mm) (fração silte + argila).

Para evitar a situação referida foi imposta- a relação:

$$\frac{\text{\% que passa na peneira 200}}{\text{\% que passa na peneira 40}} \leq \frac{2}{3}$$

Essa relação é a que mais geralmente aparece em todas as especificações.

No nosso caso com a curva obtida teríamos:

$$\frac{\text{\% passando na peneira 200}}{\text{\% passando na peneira 40}} = \frac{5,4}{12,7} = 0,425 < \frac{2}{3} \quad \text{OK.}$$

Consideraremos agora que se vá utilizar a graduação obtida e o material a ser utilizado apresente os seguintes valores:

$$\frac{\text{\% passando na peneira 200}}{\text{\% passando na peneira 40}} = \frac{15}{20} = 0,75 > \frac{2}{3}$$

Verificamos portanto que apesar dos valores individuais do material passando nas peneiras 200 e 40 estarem dentro da especificação, a relação proposta não foi atendida, portanto o material deveria ser rejeitado.

Na Argentina as especificações, por medida de segurança, tomam a relação citada como sendo menor ou igual a 0,5.

2. Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade

Para se excluir os finos muito sensíveis à água as especificações normalmente fixam os seguintes parâmetros de Plasticidade: Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade.

É comum esses valores serem fixados empíricamente por cada organismo rodoviário e para cada finalidade em vista.

Normalmente para base temos:

$$LL \leq 25\% \quad e \quad IP \leq 6\%$$

Aí vem o maior erro de muitas especificações estrangeiras e, no caso nacionais (DER-SP e DNER, etc.) pois é inadmissível que para qualquer faixa granulométrica esses valores permaneçam fixos.

É intuitivo que se a faixa granulométrica é de material graúdo e as porcentagens de finos da mesma é pequena, esses finos terão um comportamento na mistura completamente diferente

daquela em uma faixa granulométrica de agregados menores e com uma grande quantidade de finos.

Abaixo, apresentamos a Graduação A e F do DER, para efeito de análise.

Peneiras (mm)	Graduação A	Graduação F
50,8	100	100
25,4	---	100
9,52	30 - 65	---
2,00	15 - 40	55 - 100
0,42	8 - 20	30 - 70
0,074	2 - 8	8 - 25
LL	≤25	≤25
IP	≤ 6	≤ 6

Nota-se, portanto, que para o caso da Graduação A o valor médio do material que passa na peneira de 0,42 (que se usa para executar ensaios LL e IP) é de 14%, enquanto na graduação F é de 50% e para ambas o IP e LL limites são os mesmos.

Diante do exposto entendemos que os limites de Liquidez e Índice de Plasticidade máximos admissíveis não deveriam ser rígidos, mas sim, variáveis em função da porcentagem passando na peneira nº 40.

WOOLTORTON em "The Scientific Basis of Road Design" sobre Limites de Liquidez e Índice de Plasticidade de materiais tendo em vista seu emprego em sub-bases e bases estabilizadas granulométricamente propõe que os máximos admissíveis de IP e LL da fração fina devem ser tais que o aumento de volume dessa fração, ao passar por absorção de água do LP para o LL, não exceda o volume de vazios cheio de ar da fração grossa e admite, ainda, que a fração fina após a compactação do material na umidade ótima, está no seu limite de plasticidade.

Através dos conceitos acima e desprezando a umidade da fração grossa, propõe WOOLTORTON as seguintes equações para o LL e IP:

$$\frac{x}{100} \cdot IP \leq \frac{100}{\gamma s} - \left(x \cdot \frac{LP}{100} + \frac{100}{\gamma g} \right) \quad (I)$$

$$\frac{x}{100} \cdot LL \leq \frac{100}{\gamma s} - \frac{100}{\gamma g} \quad (II)$$

Em que:

x = porcentagem em peso do material passando na peneira 40 (0,42 mm).

IP = Índice de Plasticidade máximo admissível

LL = Limite de Liquidez máximo admissível

LP = Limite de Plasticidade do material que passa na peneira 40 (0,42 mm).

γs = peso específico aparente seco após a compactação

γg = peso específico da partícula sólida do material

Concluindo sugerimos que para as Bases Estabilizadas Granulométricamente para o LL e IP máximo seja seguido o critério de WOOLTORTON.

Para elucidar a questão consideraremos que após executada a composição granulométrica, realizamos os ensaios de compactação, peso específico dos grãos e Limite de Plasticidade, e obtivêmos os seguintes valores:

$\gamma s = 2,15\ g/m^3$

LP = 15%

$\gamma g = 2,60\ g/m^3$

x = 30%.

Resolvendo a questão I e II teríamos para o Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade admissíveis os seguintes valores:

$LL \leq 30,53$

$IP \leq 10,73$

Portanto, verificamos que se o material da Base Estabilizada, por exemplo, tivesse LL = 29 e IP = 9 seria aceitável, enquanto que pelas especificações normais ($LL \leq 25$ e $IP \leq 6$) - seria rejeitado.

3 - Suporte e Qualidade do Material:

Dependendo da utilização do material estabilizado, os valores de Suporte e Qualidade são fixados.

A grande maioria das especificações, principalmente no Brasil, utiliza para medir o Suporte do material o ensaio de CBR, que nos dá o Índice de CBR e a expansão.

Para o caso da qualidade do material é realizado um ensaio indireto que é o da Abrasão Los Angeles, que impírica - mente correlaciona o comportamento do mesmo com sua durabilidade em serviço.

Um material de baixa qualidade, quando submetido ao ensaio de Los Angeles pode se desintegrar totalmente, efeito esse que se supõe que iria refletir quando o mesmo estivesse submetido ao efeito do trânsito.

Para o caso de Sub-Bases e Bases Estabilizadas - Granulométricamente, tem-se adotado os seguintes valores:

a) - Para Base:

Trânsito até 5×10^6 solicitações eixo padrão 8,2 t.
CBR $\geq$ 60% Energia Intermediária
Exp $\leq$ 0,5
Abrasão Los Angeles $\leq$ 50%
Trânsito $\geq 5 \times 10^6$
CBR $\geq$ 80 Energia Modificada
Exp $\leq$0,5
Abrasão Los Angeles $\leq$ 50%

b) - Para Sub-Base:

CBR $\geq$ 30% Energia Intermediária
Exp $\leq$ 1%

II.2. Exemplo de Especificações correntes em organismos rodoviários.

BASE ESTABILIZADA GRANULOMÉTRICAMENTE

1) D.N.E.R.

a) Deverão possuir composição granulométri-

ca enquadrada em uma das faixas abaixo:

PENEIRAS (mm)		FAIXA			
		A	B	C	D
2"	50,8	100	100	...	...
1"	25,4	...	75-90	100	100
3/8"	9,5	30-65	40-75	50-85	60-100
nº 4	4,8	25-55	30-60	35-65	50-85
nº10	2,0	15-40	20-45	25-50	40-70
nº40	0,42	8-20	15-30	15-30	25-45
nº200	0,074	2-8	5-15	5-15	5-20

b) A fração que passa na peneira nº 40 deverá apresentar limite de liquidez inferior ou igual a 25% e índice de plasticidade inferior ou igual a 6%, quando esses limites forem ultrapassados, o equivalente de areia deverá ser maior que 30%.

c) A porcentagem do material que passa na peneira nº 200 não deve ultrapassar 2/3 de porcentagem que passa na peneira nº 40;

d) O índice de Suporte Califórnia não deverá ser inferior a 60% e a expansão máxima será de 0,5%, determinados segundo o método do DNER-ME 49-64 e com energia do método DNER-ME 48-64. Para rodovias em que o tráfego previsto para o período de projeto ultrapassa o valor $N = 5 \times 10^6$, o índice de suporte Califórnia do material da camada da base não deverá ser inferior a 80%; neste caso, se for necessário, as Especificações Complementares poderão fixar a energia de compactação do método T-180-57 da AASHO.

2. DER-SP

a) Deverão apresentar uma das graduações da tabela seguinte:

PENEIRAS DE MALHAS QUADRADAS ABERTURA EM (mm)	GRADUAÇÃO					
	A	B	C	D	E	F
	% que passa					
50,8	100	100	...	...	...	...
25,4	...	...	100	100	100	100
9,52	30-65	40-75	50-85	60-100	...	...
2,00	15-40	20-45	25-50	30-65	40-100	55-100
0,42	8-20	10-25	12-30	15-40	20-50	30-70
0,074	2-8	3-10	4-12	5-15	6-20	8-25

A porcentagem que passa pela peneira de 0,074 mm deve ser inferior a 2/3 da porcentagem que passa pela peneira de 0,42 mm.

b) Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade:- Os finos do solo ou os materiais das misturas de diâmetro máximo inferior a 0,42 mm, devem satisfazer as características seguintes:

Limite de Liquidez.....25%
Índice de Plasticidade.....6%

c) Abrasão - Os grãos ou fragmentos (fração pedregulho ou pedra britada) devem apresentar abrasão Los Angeles- inferior a 50%.

d) Substâncias nocivas e impurezas - as misturas estabilizadas devem estar isentas de terra vegetal, matéria orgânica, grãos ou fragmentos facilmente alteráveis ao intemperismo e de outras substâncias estranhas, nocivas ou impurezas.

3 - A.S.T.M.

a) Distribuição Granulométrica

ABERTURAS DAS PENEIRAS (mm)	PORCENTAGEM (EM PESO) QUE PASSA				
	A (areia-argila) BASE OU REVESTIMENTO	B (Pedregulho-areia-argila) BASE		REVESTIMENTOS.	C BASE OU REVEST.
		máx.= 2 pol	máx.= 1 pol		
50,8	....	100	....	....	....
38,1	....	70-100	....	....	....
25,4	....	55-85	100	100	....
19,1	....	50-80	70-100	85-100	100
9,6	....	40-70	50-80	65-100	....
4,8	....	30-60	35-65	55-85	70-100
2,0	100	20-50	25-50	40-70	35-80
0,84	55-90	....	....	....	....
0,42	35-70	10-30	15-30	25-45	25-50
0,074*	8-25	5-15	5-15	10-25	8-25

(*) A porcentagem que passa na peneira de abertura 0,074 mm não deve ser maior do que a metade da que passa na peneira de abertura 0,42 mm.

b) Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade.

	I.P.	LL
A B	6%	25%
C	3%	

Nota:-Na presente especificação não apresentamos os valores de CBR e Abrasão Los Angeles que são similares a do DER-SP.

III - DOSAGEM DOS COMPONENTES NA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

O problema a ser resolvido pode apresentar-se da seguinte maneira:

- Dado uma especificação para o material a ser utilizado em uma camada do Pavimento ou em Revestimento primário.
- Dados dois ou mais materiais disponíveis
- Pede-se o cálculo das proporções dos materiais disponíveis para a obtenção do "Solo Estabilizado Granulométricamente" que atenda a especificação solicitada.

Podemos ter especificações para revestimento primário, Sub-base e Base.

A metodologia a ser desenvolvida será para atender o problema específico para uma base de pavimento por ser a solução mais geral de todos eles.

- Requisitos a serem atendidos para material de base.

  a) Composição Granulométrica
  b) Limites de Consistência dos finos
  c) Características de Resistência da Mistura -Índice de Suporte da Califórnia - CBR.
  d) Abrasão Los Angeles (Abrasão dos grãos).

Os itens c e d deverão ser resolvidos por ensaios a serem efetuados após a composição granulométrica dos componentes.

a) Composição Granulométrica ou Dosagem dos Componentes:

O problema poderia ser resolvido pelos Métodos analíticos ou gráfico. Escolhemos o método gráfico e entre eles o de ROTHFUCHS, pois é bastante rápido e simples e pode ser aplicado à mistura de qualquer número de componentes.

O processo* consiste nos seguintes passos:

a.1) Dada a granulometria do material desejado, leva-se a sua curva granulométrica a um gráfico em que as porcentagens acu

muladas do material que passa nas diversas peneiras são colocados em ordenadas, em escala linear, e os diâmetros das peneiras respectivas, em abcissas, são postos em escala tal que a curva de distribuição do material desejado seja representada por um segmento de reta MN. (f.1).

* transcrito da publicação 102 da E.E.S.C. dos Prof. EVELYNA B. S. SILVEIRA e ARAKEN SILVEIRA.

a.2) Levam-se no mesmo gráfico e mesma escala as curvas da distribuição granulométrica de cada um dos componentes, os quais em geral não corresponderão às retas. (Fig. 2).

a.3) Traça-se a seguir um segmento de reta médio por cada umadas curvas, de modo a contrabalançar as áreas circunscritas.

a.4) Unindo com retas as extremidades opostas dos segmentos, os pontos de intersecção dessas retas de união com a reta correspondente à distribuição granulométrica do material desejado (pontos R e S) fornecem diretamente na escala vertical as proporções dos materiais a serem misturados. (Fig. 2).

- Além de satisfazer a faixa granulométrica especificada a curva granulométrica da mistura terá que atender à seguinte relação de finos:

$$\frac{\text{material que passa na peneira 40}}{\text{material que passa na peneira 200}} \leq \frac{2}{3}$$

b) Limites de Consistência dos Finos:

Considerando que pelo menos um dos componentes tenham Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade maior que os especificados é necessário calcular o IP e LL da mistura.

Para tanto, após termos calculado as porcentagens para atender a granulometria do Solo Estabilizado, teremos que aplicar as seguintes fórmulas para obtermos o LL e IP da mistura:

$$IPm = \frac{\Sigma^{N}}{\Sigma} \frac{\% \text{ Ai} \cdot \text{IPi} \cdot \% \text{ 0,42 Ai}}{\% \text{ Ai} \cdot \% \text{ 0,42 Ai}}$$

$$LLm = \frac{\Sigma^{N}}{\Sigma_{i=1}} \frac{\% \text{ Ai} \cdot \text{LLi} \cdot \% \text{ 0,42 Ai}}{\% \text{ Ai} \cdot \text{0,42 Ai}}$$

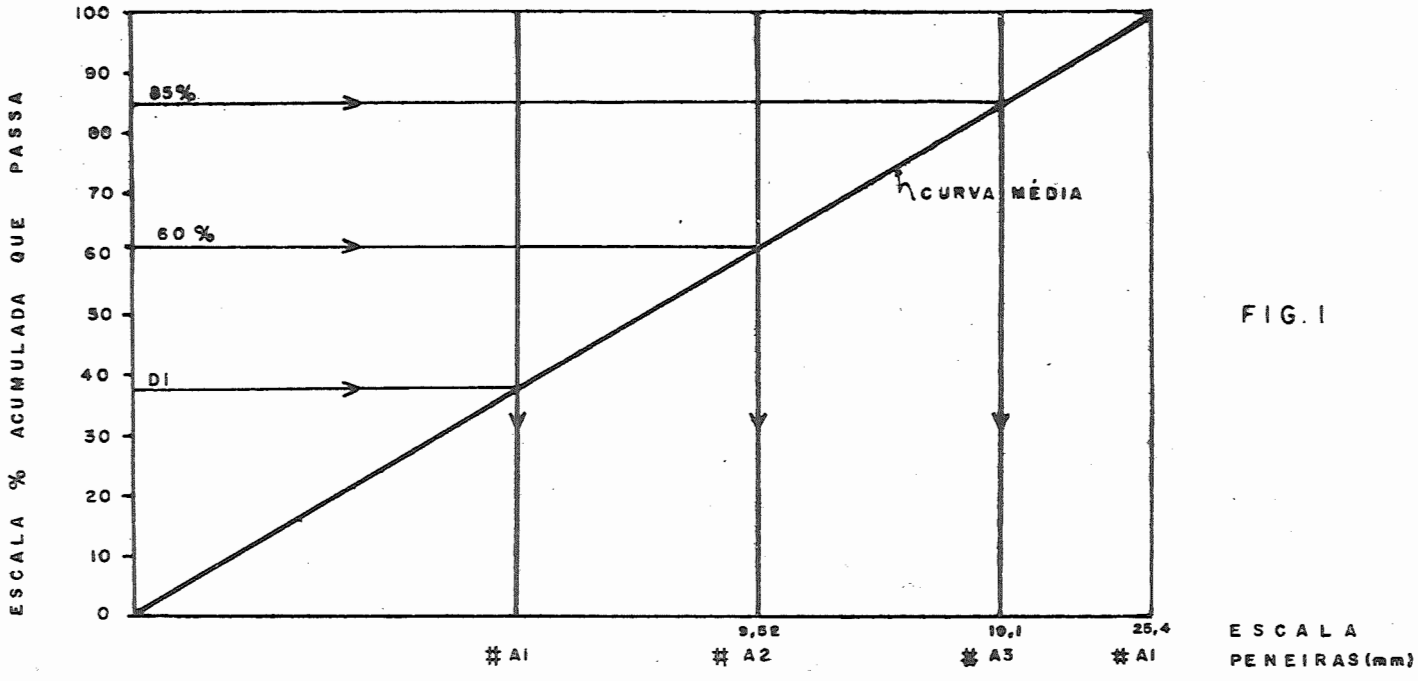


FIG. 1

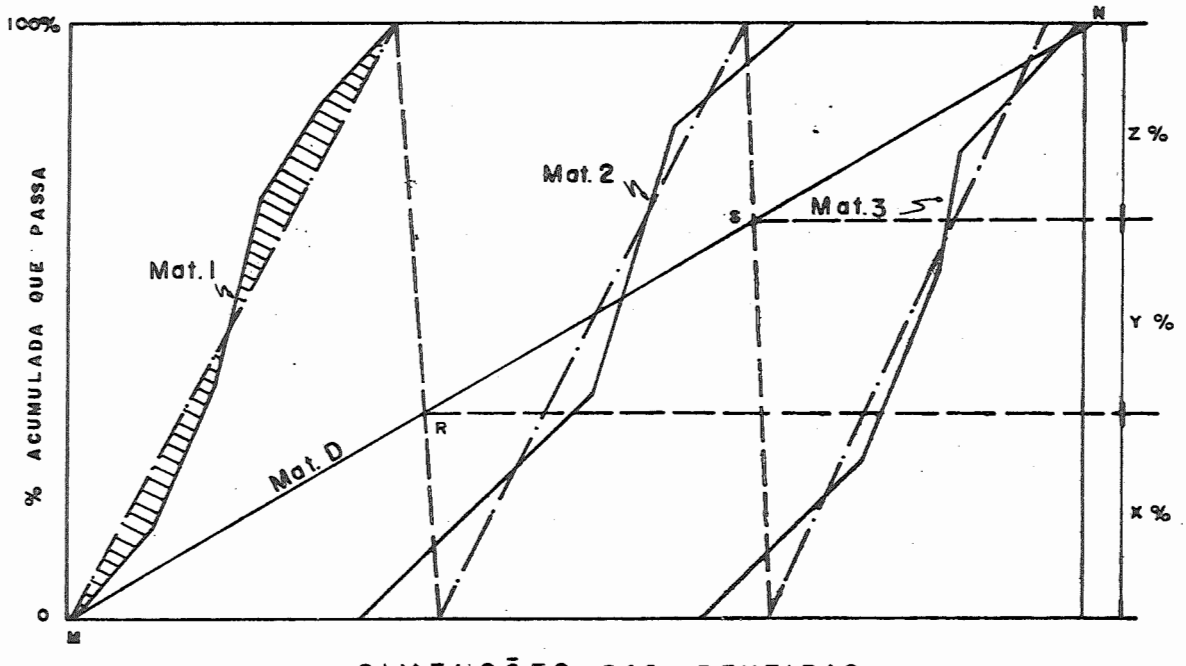


FIG. 2

DIMENSÕES DAS PENEIRAS
ESCALA PROPORCIONAL A % QUE PASSA DO MATERIAL DESEJADO

DADOS PARA OBTENÇÃO DE ESCALA POR PENEIRAS DA fig-1		
ESPECIFICAÇÕES		CURVA MÉDIA
PENEIRAS (mm)	% PASSA FAIXA	% PASSA
A1 = 25,4	100	100
A2 = 19,1	80 - 90	85
A3 = 9,52	40 - 80	60
A1	Bi - Ci	$\frac{Bi + Ci}{2} = Di$

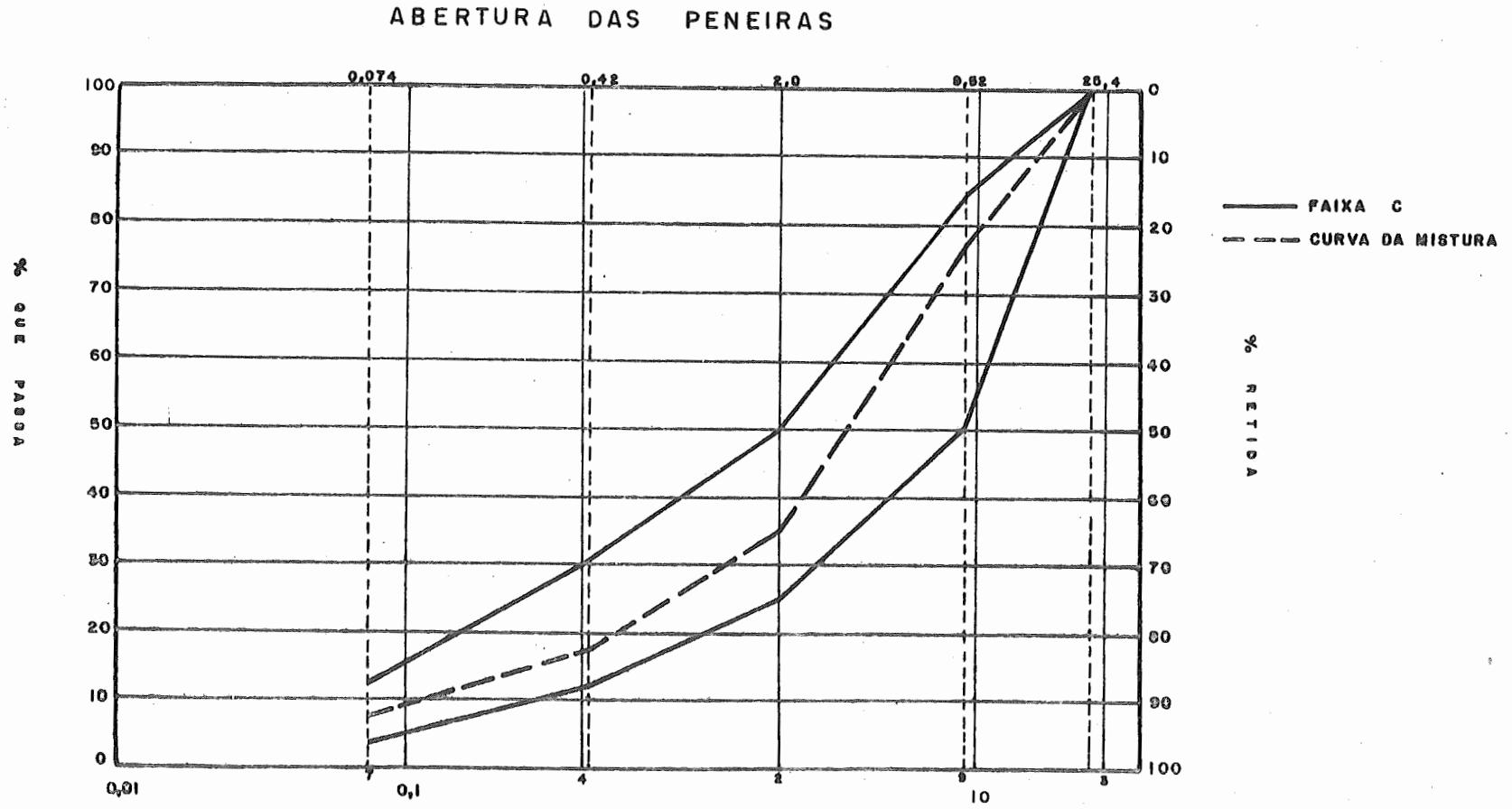

ABERTURA DAS PENEIRAS
0,074
0,42
2,0
9,52
25,4
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
% QUE PASSA
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
% RETIDA
0,01
0,1
10
FAIXA C
CURVA DA MISTURA

FIG. 2-A

onde:

N = número de componentes

Ai = porcentagem de um componente na mistura

% 0,42 Ai = porcentagem que passa na peneira 0,42 do componente A.

IPi e LLi = Índice de plasticidade e limite de liquidez do componente A.

Obtidos os valores IP_m e LL_m, se forem menos que os especificados, as porcentagens achadas são aceitáveis, caso isso não ocorra deverá ser mudada a porcentagem dos componentes para atender além da granulometria, os índices plásticos simultâneamente.

Esses valores têm que ser confirmados após, por ensaios da mistura.

Exemplos Numéricos:

DADOS:- Granulometria dos agregados disponíveis material 1, material 2, material 3, indicados na figura 3.

Índices Plásticos

AGREGADOS	LL	IP
Material 1	28	7
Material 2	NP	
Material 3	NP	

SOLUÇÃO DO PROBLEMA (Fig. 3)

a) Composição Granulométrica da mistura

- primeiro escolheremos a graduação C (DER-SP) para base estabilizada como a desejável após calcularemos a sua curva média.

PENEIRA DE CONTROLE	GRADUAÇÃO C	CURVA MÉDIA % QUE PASSA
25,4	100	100
9,52	50 - 85	67,5
2,00	25 - 50	37,5
0,42	12 - 30	21
0,074	4 - 12	8

- Com a curva média e aplicando o processo mediante de Roth - fucs, conforme o indicado na figura obtivemos a seguinte solução:

  % de material 1 - 15%
  % de material 2 - 35%
  % de material 3 - 50%

- A curva da mistura tem a seguinte granulometria: (Fig. a.A)

PENEIRA DE CONTROLE (mm)	CONTROLE DA MISTURA % QUE PASSA
25,4	100
9,52	77,50
2,00	34,50
0,42	17,75
0,074	7,75

- Verificação da relação de finos:

$$\frac{\text{material que passa na peneira 200}}{\text{material que passa na peneira 40}} = \frac{7,75}{17,75} = 0,44 \leq \frac{2}{3}$$

Portanto, quanto à granulometria, o problema acha-se resolvido.

b) Limites de Consistência dos Finos

Como valores limites tomaremos os do DER-SP para Base Estabilizada Granulométrica:

$$LL \leq 25$$
$$IP \leq 6$$

Tendo em vista que um dos agregados MAT_1 tem LL e IP maiores que os admissíveis, calcularemos o IP e LL da mistura; portanto teremos:

$$IP_m = \frac{15.7.95 + 35.0 \times 10 + 50.0.0}{15 \times 95 + 35 \times 10} = 5,6 \leq 6$$

$$LL_m = \frac{15.28.95 + 35.0.10 + 50.0.0}{15 \times 95 + 35 \times 10} = 22,5 \leq 25$$

AGREG. / PENEIRA # (mm)	% PASSA			VERIFICAÇÃO				ESPECIFICAÇÃO % PASSA
	MAT. 3	MAT. 2	MAT. 1	0,50 MAT. 3	0,35 MAT. 2	0,15 MAT. 1	MISTURA %	GRADUAÇÃO
50,8								
25,4	100			50,00	35,00	15,00	100	100
9,52	55	100	–	27,50	35,00	15,00	77,50	50 – 85
2,00	4	50	100	2,00	17,50	15,00	34,50	25 – 50
0,42	–	10	95	0	3,50	14,25	17,75	12 – 30
0,074	–	5	40	0	1,75	6,00	7,75	4 – 12

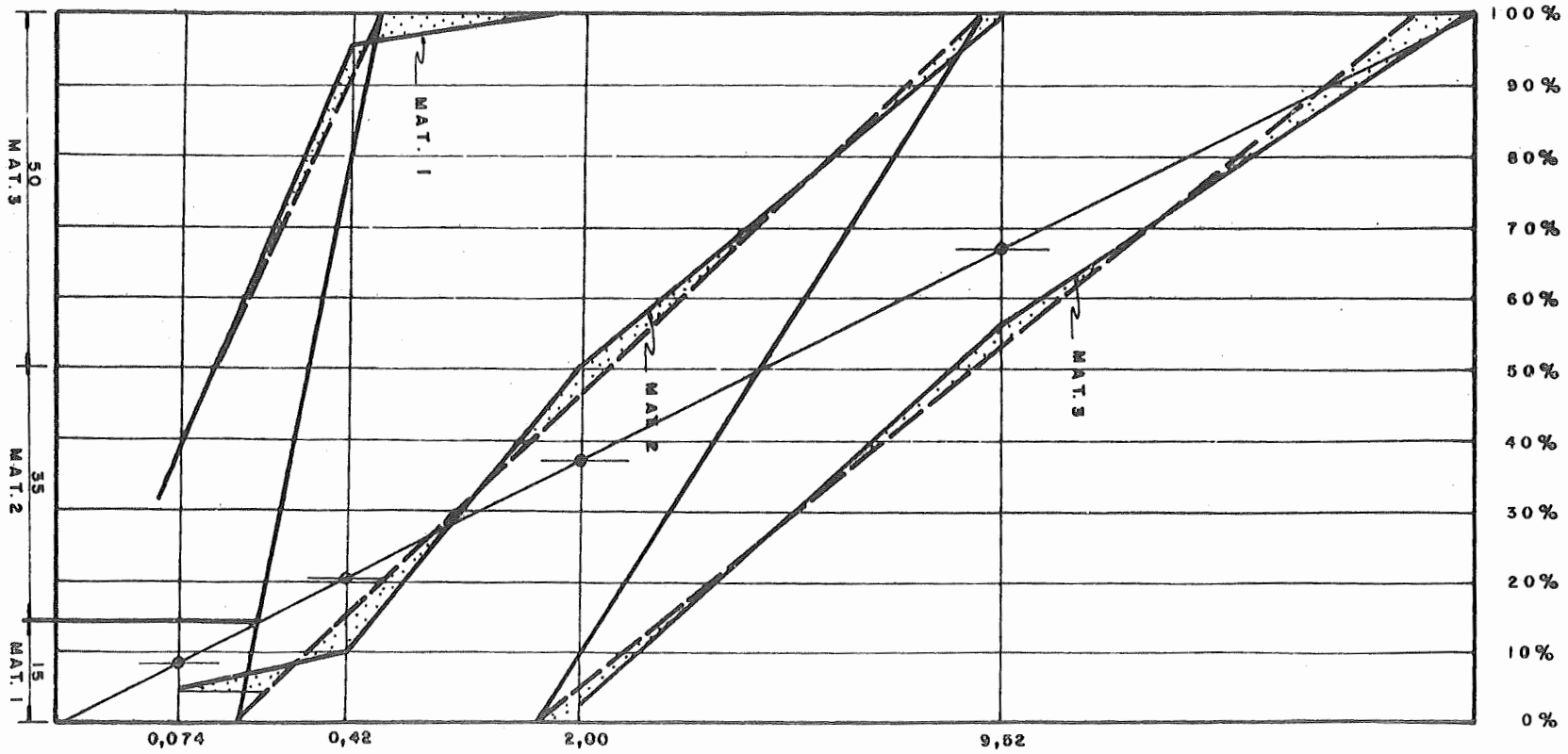


FIG. 3

Portanto, os limites de consistência ficarão dentro dos valores especificados.

c) Característica de resistência da mistura - avaliada pelo ensaio de CBR.

Para o caso em questão o Índice CBR da mistura terá que apresentar valor superior a 80% quando compactada na Energia Modificada, e expansão no ensaio CBR menor que < 0,5.

Executar com a mistura ensaios de Compactação de Energia Modificada de Moldagens Simultâneas com variação da umidade e submeter os corpos de prova ao Ensaio de CBR.

Consideremos que obtivémos as curvas abaixo indicadas com os dados do ensaio. (Fig. 4).

d) Quanto ao ensaio de Abrasão.

Normalmente, é medido pelo ensaio de Los Angeles.

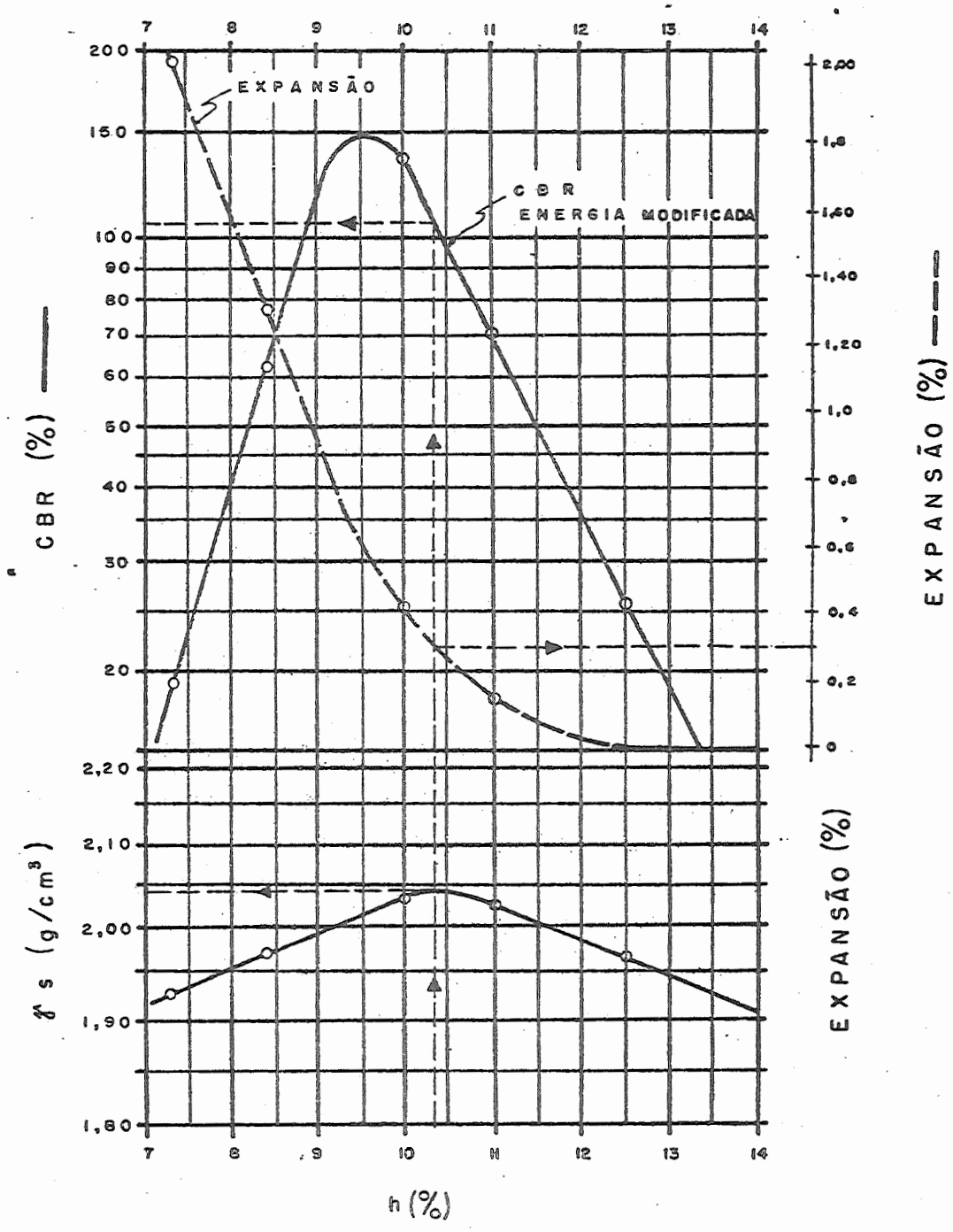
O valor admissível do desgaste é no máximo 50%.

Deverá ser realizado o ensaio conforme o método e para efeito de aceitação deverá ser verificado o valor do desgaste obtido.

Consideremos que no nosso caso tivémos o desgaste de 40%; portanto aceitável.

BASE ESTABILIZADA GRANULOMETRICAMENTE

AGREGADOS NATURAIS



$\gamma s max$ = 2,04 g/cm³
Ho = 10,4 %
CBR = 120 % ≥ 80%
EXP = 0,3 % ≤ 0.5%

FIG. 4

Portanto, o material é aceitável quanto ao Suporte.

IV - ALGUNS ASPECTOS POUCO CONHECIDOS DA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA APRESENTADOS NO V CONGRESSO PANAMERICANO DE MECÂNICA DOS SOLOS PELO RELATOR ENGº LUIZ ZALAZAR (ARGENTINA)-1975 -

1. PREVISÃO DOS LIMITES DE CONSISTÊNCIA DE UMA MISTURA DE SOLOS:

Correntemente se conhece a forma pela qual se chega a obter o índice de plasticidade de uma mistura de solos.

É uma fórmula muito conhecida; no numerador é indicada a soma dos produtos de índice de plasticidade de cada componente, pela porcentagem de finos abaixo da peneira de 0,42 mm e pela porcentagem com que cada solo compõe a mistura; no denominador indicamos a soma dos finos, ou seja, a soma dos produtos de cada porcentagem, pela quantidade que passa na peneira 0,42mm em cada componente.

Essa fórmula é mais ou menos boa quando os dois materiais são ligantes; porém no caso (o que frequentemente acontece na estabilização granulométrica) da mistura de um inerte com um ligante, a fórmula não é certa.

Há grande facilidade em se obter, teórica ou praticamente, o índice de plasticidade de uma mistura de dois materiais plásticos; quando um é plástico e o outro não, os valores individuais são muito diferentes, e geralmente os resultados apontados pela fórmula são maiores que os obtidos na prática. A explicação é de que na realidade as areias, sem inclusão de partículas finas ligantes, têm uma plasticidade "negativa", diminuindo a plasticidade do outro material, até chegar a um valor de plasticidade 0, e a partir daí é que começam a funcionar como materiais coesivos e deduzida esta porcentagem de material fino intercalado pode-se aplicar a teoria da plasticidade dada pelas fórmulas correntes, o que significa nada mais que fazer uma espécie de média ponderada das plasticidades dos dois componentes.

2. FATORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO DE MISTURAS GRANULARES.

Vamos detalhar os fatores mais importantes que a nosso juízo se consideram de maior peso.

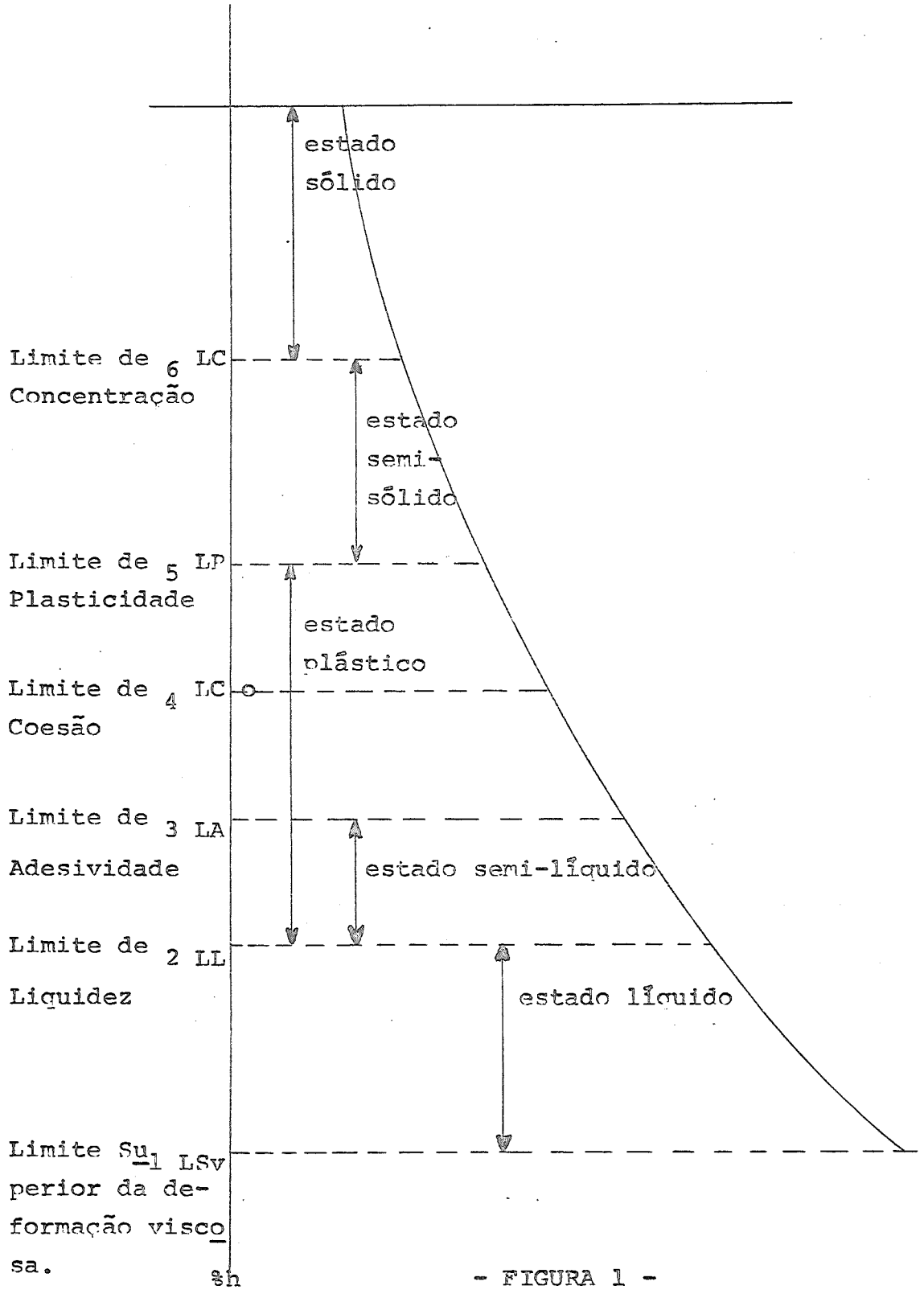
2.1. Efeitos da Plasticidade

Ao analisar este efeito, consideraremos primeiro a influência de uma baixa plasticidade que nos primeiros tempos se considerava perniciosa e que atualmente não tanto, pois os inconvenientes de compactação têm sido superados com equipamento vibrante, moderno, que permitem atingir um ótimo estado de confinamento com materiais totalmente arenosos.

Por outro lado, o efeito da plasticidade excessiva foi reputado como inconveniente no passado e o é ainda mais atualmente, tendo-se em conta a experiência dos últimos tempos, que têm mostrado, com equipamentos de laboratório, como a "keneading-compactor" que a mescla, com repetição de cargas pesadas, pode entrar no estado de "Fluência Plástica" bastante rapidamente e mesmo com valores de índice de plasticidade reduzidos.

Com referência à correlação entre a plasticidade e a coesão, nos primeiros tempos se tomava como muito estreita, isto é, que o aumento de plasticidade implicava sempre em aumento de coesão, porém desde já há bastante tempo se considera que um material pode ser plástico e ter coesão baixa, quando esta é resultante da ação de películas de água intercaladas entre as partículas de silte, e especialmente quando existe um complexo argilo-úmido, na fração fina.

Se trataria neste caso de uma coesão aparente que nada tem a ver com a parte atração provocada pelas frações de minerais argilosos e que constitui a verdadeira coesão. Tudo isto está bem esclarecido no gráfico da fig. 1, onde figuram todos os limites de consistência compreendidos entre o estado líquido e o estado sólido de um solo.


estado
sólido
Limite de Concentração 6 LC
estado
semi-
sólido
Limite de Plasticidade 5 LP
estado
plástico
Limite de Coesão 4 LC
Limite de Adesividade 3 LA
estado semi-líquido
Limite de Liquidez 2 LL
estado líquido
Limite Superior da deformação viscosa. 1 LSv
%h

- FIGURA 1 -

A diferença entre os limites 2 e 5, isto é, o intervalo de conteúdo de umidade para o qual a massa de solo é plástica, se chama Índice de Plasticidade e mede essa qualidade, definida por outro lado como a propriedade que tem o material de "sofrer uma deformação rápida sem mudança de volume e sem ruptura" ; porém na realidade a coesão é outra coisa e estaria medida pela - diferença entre os limites 2 e 4. Vemos então que um solo de baixa plasticidade terá também coesão baixa, e que porém um solo de plasticidade média (12 a 15) pode apresentar coesão baixa, já que esta propriedade depende do limite 4 e em essência de sua porcentagem de argila (coesão verdadeira, conforme Hansel); a diferença entre os limites 2 e 5 pode estar afetada pelo silte e humus e disso resultar a explicação de porque existem solos siltosos e de horizonte "A" nos pampas Argentinos, com plasticidade entre 12 e 15 e escassa coesão.

Com respeito ao solo ligante em particular, pode-se afirmar a grande importância que têm as propriedades "físico-químico" do mesmo com respeito às do material inerte que conglomera e ele é um fato que foi largamente observado na Argentina.

Com efeito, em diferentes obras se obtiveram valores elevados para a estabilidade CBR em misturas compostas por areias de superfície lisa com material grosso e solos lateríticos como ligante. Um exemplo disso corresponde à ligação Caseros-Concepcion del Uruguay, Rota Nacional Argentina nº 131 (Entre Rios), onde se obteve um CBR maior de 100 a 2,54 mm de penetração em amostra embebida, empregando-se granulometria padrão Argentina, ou seja, com tamanho máximo de 25,4 mm. WINTERPORN explicou este caso, mencionando que a carga eletro-negativa do pedregulho e areia silicosa, em contato com a positiva do solo laterítico, se atraem e ajuda a estabilização. O mesmo ocorre com pedregulho calcáreo - (eletropositivo) e argila silicosa (eletronegativa) que também se atraem.

Outros exemplos do mesmo assunto se encontram na vasta experiência Argentina de utilização de mesclas granulares - finas tipo "sand-clay" com ligante laterítico, empregados extensamente na Rota Nacional nº 11, que faz parte do sistema Panamericano de rodovias.

As citadas mesclas acusam uma estabilidade muito - superior a que se poderia supor com a simples análise de sua gra

nulometria e natureza física de suas partículas pétreas que correspondem a areias finas, sem rugosidade.

Há um aspecto sumamente interessante que se refere à plasticidade das mesclas granulares, referidas à porcentagem de finos, abaixo da peneira 0,42. Segundo a opinião de alguns investigadores da alta categoria, entre eles WINTERKORN e WOOLTORNTON, o último dos quais trabalhou por longo tempo na Birmânia e posteriormente em Kênia e África do Sul, pode-se estabelecer, em princípio, a seguinte expressão:

$$(I.P.) \cdot F = C^N \text{ , onde:}$$

I.P. = Índice de Plasticidade

F = porcentagem de finos abaixo da peneira 0,42.

C = constante, dependente do tipo dos materiais componentes.

N = expoente variável, que é uma função do clima da região.

A aplicação deste conceito leva à obtenção de resultados diametralmente opostos, conforme o tipo dos materiais - componentes da mescla (inertes e ligantes) e o clima da região, - pois a combinação de efeitos para um bom comportamento implica - prover, ao conjunto da mescla, propriedades que não signifiquem uma expansão excessiva da parte fina, que separe em demasia os componentes do esqueleto granular.

O "Texas Highway Department" dos E.E.U.U. de N.A., tem corroborado este conceito com gráficos estatísticos de comportamento de pavimentos sob trânsito (Figura 2).

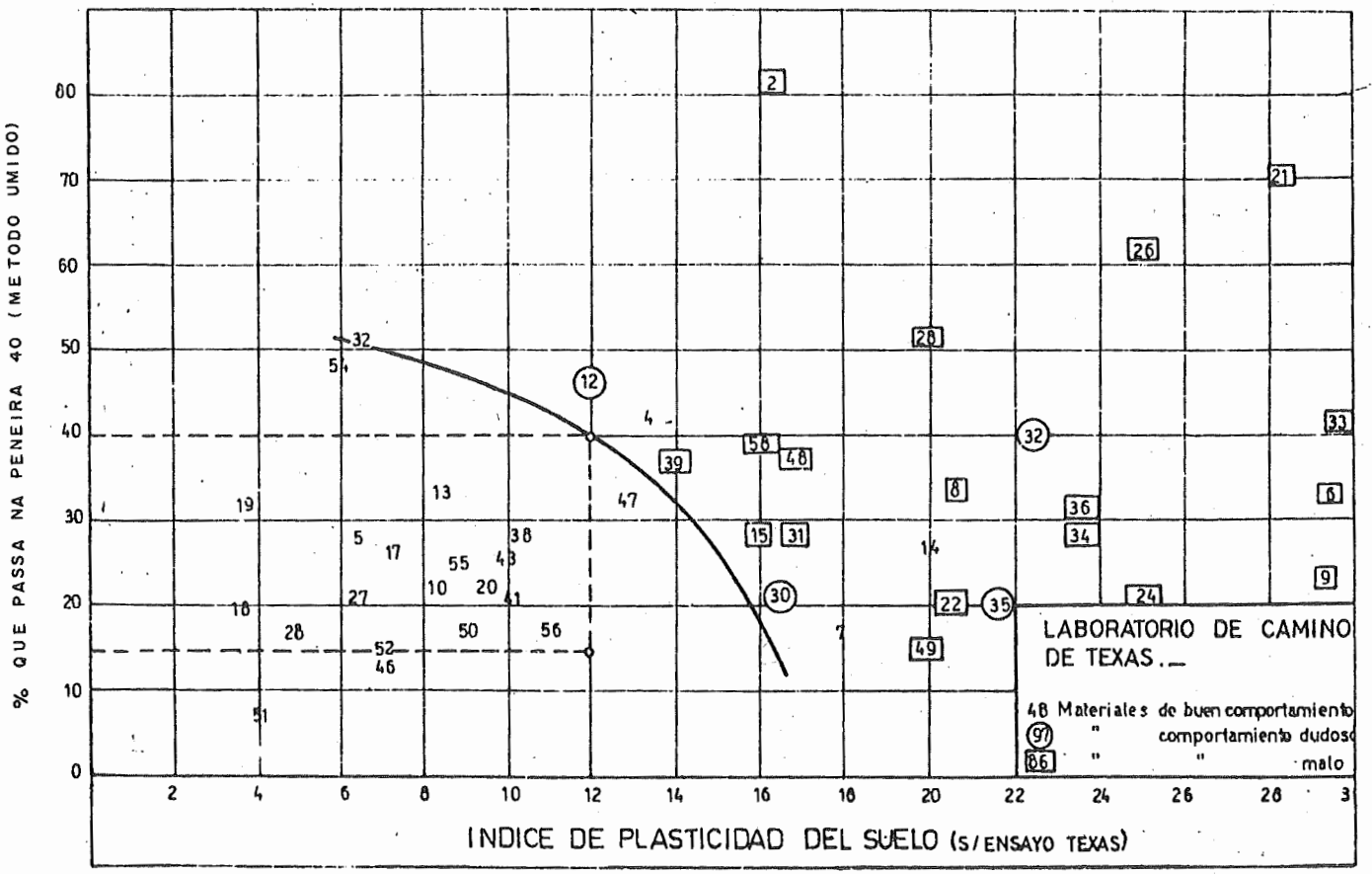

% QUE PASSA NA PENEIRA 40 (METODO UMIDO)
INDICE DE PLASTICIDAD DEL SUELO (S/ENSAYO TEXAS)
LABORATORIO DE CAMINO DE TEXAS.—
48 Materiales de buen comportamiento
97 " comportamiento dudoso
86 " " malo

FIG. 2

A experiência Argentina é extensa neste aspecto, podendo-se citar, como um dos casos, o executado com o trecho da Rota Nacional nº 3 da Província de Buenos Aires, Argentina, compreendido entre as localidades de Juárez e Três Arroyos, onde se melhoraram consideràvelmente as propriedades de solos siltosos - com alta porcentagem de matéria orgânica, mediante a adição de finos calcáreos obtidos como excedente da britagem de rochas da mesma natureza.

Com respeito às proporções de ligante na mistura - total, convém mencionar alguma experiência a respeito, que corrobore o conceito que tem sido verificado na prática Argentina e Sul-Americana e por meio do qual se estabelece que contando-se - com bons inertes e ligantes, a mistura ótima e aquela onde as partículas pétreas grossas não têm contato íntimo, pois o mesmo se estabelece através da massa do solo, devendo-se mencionar que tão pouco é conveniente separar excessivamente as partículas pétreas grossas que foram o esqueleto fundamental.

O aparente excesso de ligante, na mistura correta, aumenta a estabilidade por coesão, até o ponto correspondente à mistura ótima em que a diminuição da resistência de atrito não é compensada pela resistência coesiva.

Como experiência de laboratório referente a este assunto, mencionaremos a investigação feita nos E.U.A. por EUGENE A. MILLER, Soils Engineer (DAMES and MORE, Consulting Engineers) e GEORGE F. SOWERS, Professor da Geórgia Institute of Technology- (12).

Os nomeados empregaram um quartzo angular como material inerte, com granulometria fina, passada completamente pela peneira 4, mas com um solo 18% abaixo da peneira 0,42 e totalmente retido pela 0,074.

O ligante era um "sand-clay" vermelho, com índice-plástico igual a 6 que passava 8% na peneira 0,42 e 60% na 0m074.

A mescla ótima de máxima capacidade de suporte, avaliada segundo o critério Tergaghi de Capacidade de Suporte, balanceando as resistências de atrito e coesivo, correspondem a cerca de 26% de ligante e 74% de inerte.

A referida porcentagem de ligante se encontra dentro de uma faixa de melhores resultados de estabilidade, compreen

dida entre 16% 26%.

2.2. Influência da fração inerte sobre a mistura.

Isto corresponde à parte mais fundamental que regula a estabilidade da mistura, a qual em essência deve ser eminente - mente de atrito, para obter-se os melhores resultados.

A experiência Argentina dos últimos 35 anos, tem mostrado a influência de três fatores fundamentais que são os seguintes, em ordem de importância:

a. Rugosidade superficial das partículas
b. Máximo diâmetro das partículas individuais
c. Regularidade granulométrica

A rugosidade superficial tem demonstrado ser o fator mais importante para se obter um elevado valor de atrito, compreendido neste último os distintos atritos individuais, quer dizer, o devido ao deslizamento, à rotação e ao travamento (interloching).

Como exemplo da experiência Argentina, poderíamos citar o caso das mesclas paragônicas, executadas com materiais provenientes de jazidas do setor atlântico, como as da Rota Nacional nº 3, nas províncias de Chubut e Santa Cruz (Argentina), nas quais os materiais naturais sem britagem, de superfícies extremamente lisa, nunca permitiram que se conseguisse um valor de suporte CBR- de 80; para se conseguir este foi necessário recorrer-se a um processo de trituração parcial, apesar de ficarem prejudicadas as parcelas de maior tamanho e a boa granulometria.

Outro caso, dentre muitos que poderiam ser citados na Argentina, ocorreu com a utilização de detritos de canteiros de rochas eruptivas, que ainda que com granulometria deficiente e máximo diâmetro médio, porém com grande rugosidade superficial, acusaram valores elevados em ensaios CBR, muitas vezes superiores a 100.

O máximo tamanho das partículas se segue em importância para a obtenção de um elevado atrito interno do conjunto. Este fator influe preponderantemente na resistência de atrito, um exemplo dos muitos que temos experimentado na Argentina, corresponde a

uma obra executada pelo autor, na província de Santiago del Estevo, Caminho Provincial de Santa Catarina a la Punta, com uma mescla granular de granulometria aceitável e rugosidade média.

A inclusão de uns 20% de material compreendido entre 25,4 mm, e 38,1 mm, melhoram consideràvelmente a estabilidade do conjunto, verificada pràticamente com o comportamento sob trânsito.

Quanto à regularidade granulométrica, que permite uma curva de compacidade aceitável, tem sua influência apreciàvelmente menor que os fatores mencionados anteriormente.

Não é que deva ser abandonada, porém, do ponto de vista econômico não é aceitável extremar a análise da mesma, motivo pelo qual as especificações modernas têm suprimido algumas exigências quanto ao tamanho de malhas de peneiras utilizadas para definir a curva granulométrica.

Estritamente, sòmente fariam falta as seguintes:

1) A peneira superior, para definir o diâmetro máximo, limitado pela espessura da estrutura e pelo equipamento de trabalho.

2) A peneira nº 10 que define a massa de solo com a fração passada pela mesma.

3) A peneira 0,42 que define os finos de mistura, como fração.

4) A peneira 0,074 que define aproximadamente a fração argilo siltosa.

Para aprimorar um pouco, pode-se intercalar uma peneira entre as duas primeiras, para efetuar um pequeno controle da regularidade granulométrica, sem ser isso indispensável.

Vamos mencionar algo referente à necessidade de uma resistência mínima a abrasão no material inerte. Antigamente se considerava desnecessária essa condição, por não estarem as partículas formadoras das mesclas de base e sub-base submetidas à ação direta do trânsito.

A situação atual de trânsito pesado e muito repetido nas rodovias importantes, modificam esse conceito ao verificar-se que as partículas pétreas brandas são trituradas pelo efeito de martelar da carga de trânsito muito pesado e/ou repeti-

do, perdendo grande porcentagem de sua granulometria inicial, com a consequente formação de pó, em muitos casos.

Em consequência, deve ser exigido um valor mínimo como resistência à abrasão, que por tentativas poderia fixar-se - em um valor Los Angeles de 40 a 500 revoluções.

2.3. Contornos Granulométricos

Apesar do tempo transcorrido, todavia segue como critério muito válido o gráfico do F. OLMSTEAD (1943) sobre os contornos granulométricos gerais para as mesclas granulares de bom comportamento o que mostramos na fig. 3.

Com o mesmo se pode economizar tempo e fixar idéias genéricas especialmente quando as jazidas de material não permitem cumprir rigorosamente os limites granulométricos clássicos.

V - ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA COM SOLOS LATERÍTICOS

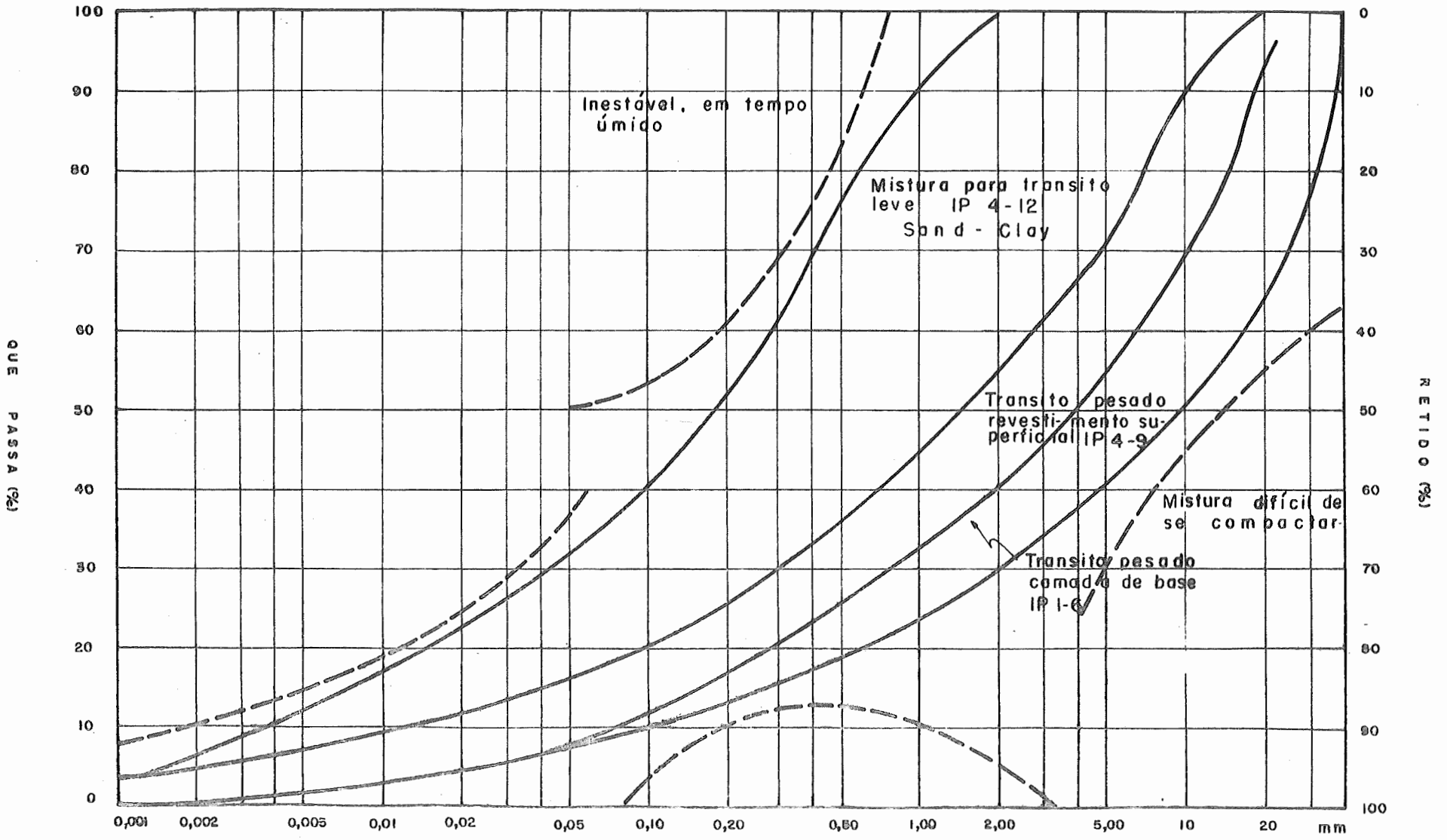
Em climas tròpicais, devido aos fenômenos de meteorização, há o aparecimento das lateritas; existindo no Brasil grandes áreas lateríticas, julgamos o presente estudo do maior interêsse.

Poderíamos dizer que as lateritas são solos ricos em óxidos de ferro e alumínio. De uma maneira geral, podemos defini-los através da relação $K = \frac{Si\ O2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$ proposta pelos portugueses, conforme o indicado abaixo:

Solo de Laterita.....$K < 1,33$
Solo Laterítico.....$1,33 \leq K \leq 2,0$
Solo não Laterítico.....$K > 2,0$

Lembramos aqui que no conceito de solo está entendido como tal também o cascalho de laterita. Esses solos têm sido estudados principalmente pelos portugueses e seu comportamento anômalo já é reconhecido internacionalmente.

Podemos dizer que são solos que apresentam um com



ARGILA	SILTE	AREIA MUITO FINA	AREIA FINA	AREIA MED.	AREIA GROSSA	PEDREG FINO	PEDREGULHOS

FATORES RELACIONADOS AO PROJETO DE MISTURAS ESTABILIZADAS (F.R. OLMSTEAD 1943)

FIG. 3

portamento excepcional, mesmo quando fora dos padrões convencionais.

Devido aos fatos acima, muitos organismos rodoviários vêm utilizando especificações diferentes quando o solo tem essas características. É comum a utilização de solos lateríticos em Bases de Pavimento no Brasil (DNER), porém mantendo-se o critério de faixas granulométricas e, ainda, com o conceito da necessidade da existência de "agregado graúdo" no material para Base Estabilizada Granulométricamente.

No Ultramar Português (Guiné, Angola, Moçambique e Índia), foi bem estudado o problema, principalmente pelo laboratório de Engenharia de Angola, auxiliado pelo LNEC; estudos esses que tiveram grande influência nas especificações do DNER para Bases com solos lateríticos.

Para efeito de elucidação, damos abaixo o critério para seleção de solos lateríticos para Base de rodovias, de acôrdo com orientação da USAID (1971). Conforme se verifica abaixo, o critério de granulometria acha-se restrito à peneira 200.

Esse critério práticamente coincide com o proposto pelo GT-40 do DER-SP o qual aplicado desde 1968 até 1971 em caráter experimental e a partir de 1971 em alguns trechos de rotina no DER-SP.

C R I T É R I O	CLASSE I	CLASSE II	CLASSE III
(IP) x % passa na 200	máx. 200	máx. 400	máx. 600
(LL) x % passa na 200	máx. 600	máx. 900	máx. 1.250
CBR	mín. 100	mín. 70	mín. 50
$N_{8,2t}$ por dia	1.800/dia	180/dia	18/dia
Período Proj. 15 anos			

$N_{8,2t}$ = número de solicitações equivalentes ao eixo simples 8,2t.

Já o DNER tendo em vista atender as áreas lateríticas do Brasil em 1971, propôs, através do DNER-ES-P-10-71 a seguinte especificação para solos lateríticos em Base Estabilizada Granulométricamente:

No caso de solos lateríticos apresentarem expan

são inferior a 0,2%, no ensaio do Índice de Suporte Califórnia - realizado com energia do método DNER-ME 48-64, com sobrecarga - de 10 libras, são exigidos os seguintes requisitos:

a) Para um tráfego previsto para o período de projeto de $N \leq 5 \times 10^6$, o Índice de Suporte Califórnia mínimo será de 60%, obtido no ensaio realizado com a energia do método DNER-MER 48-64.

O limite de liquidez deverá ser inferior ou igual a 40% e o Índice de Plasticidade inferior ou igual a 12%.

Tolera-se uma porcentagem passando na peneira nº 200 de até 1,4 vezes os valores das faixas granulométricas para materiais de base, alterando-se as porcentagens nas demais peneiras de modo a manter a continuidade da curva granulométrica.

b) Para tráfego previsto para o período de projeto $N \leq 5x10^6$, o Índice de Suporte Califórnia mínimo será de 80%, obtido no ensaio realizado com a energia do método DNER-ME - 48-64.

O limite de liquidez deverá ser inferior ou igual a 35% e o Índice de Plasticidade inferior ou igual a 10%.

Deverão ser obedecidas todas as demais características exigidas para a base.

Para qualquer tráfego, a fração retida na peneira nº 10, constituída de pedregulho lateríitico, deverá apresentar-no ensaio Los Angeles um desgaste máximo de 65%.

Para fins desta especificação, entende-se como solo laterítico o solo cuja fração coloidal (abaixo de 2 micras) apresenta relação molecular sílica/sesquióxidos menor que 2 e, em conjunto as seguintes características: presença apreciável de sesquióxido de ferro, tendência para o concrecionamento e endurecimento sob exposição ao sol, baixa expansibilidade e fraco teor de matéria orgânica.

Concluindo, informamos que oficialmente o DER-SP não tem nenhuma especificação para solos lateríticos, porém atualmente a

cha-se pesquisando em rítmo acelerado a utilização de solos lateríticos finos para execução de Bases Estabilizadas.

VI - SUGESTÕES PARA A AMPLIAÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DE CAMADAS ESTABILIZADAS GRANULOMÉTRICAMENTE EM ÁREAS LATERÍTICAS DO BRASIL.

Essas sugestões são baseadas na nossa experiência e principalmente no estudo do comportamento de solos arenosos finos lateríticos para Base de Pavimentos no Estado de São Paulo, onde atuamos.

Tendo em vista a existência em regiões tropicais, como exemplo Brasil, de fenômeno de laterização, os solos das mesmas são substancialmente diferentes dos solos Europeus ou Norte Americano.

O solo laterítico é próprio do clima tropical, sendo rico em óxido de ferro e alumínio hidratado e tendo, geralmente, como argilo mineral predominante a caulita, menos ativa, em termos de expansão, do que outros tipos argilo minerais (Fig. 1 e Fig. 2).

Adotando o critério Português, solo laterítico é aquele que apresente a relação sílica sesquióxidos (K) menor que dois (2). Esse ensaio acha-se padronizado, por exemplo, pelo DER-SP, no método M 20-61.

As especificações adotadas no DER-SP não levam em consideração o solo laterítico, cuja área da ocorrência é grande, simplesmente porque elas foram "Traduzidas" de organismos americanos (A.A.S.H.O. etc.) que não se preocupam com esse tipo de Solo, pois não existem nos Estados Unidos; porém o DNER em suas especificações para Bases Estabilizadas Granulométricamente já prevê alterações para o caso de solo laterítico conforme o exposto no capítulo IV.

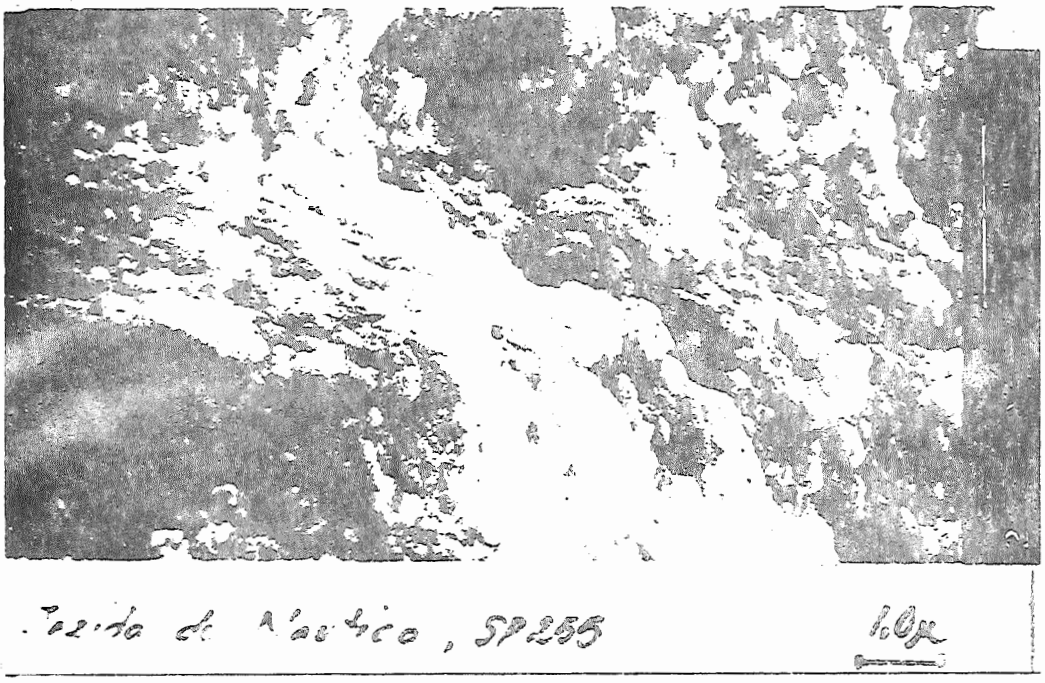


Fig. 1 - Solo laterítico - argilo minerais, caulita, óxidos de Fe e Al e outros

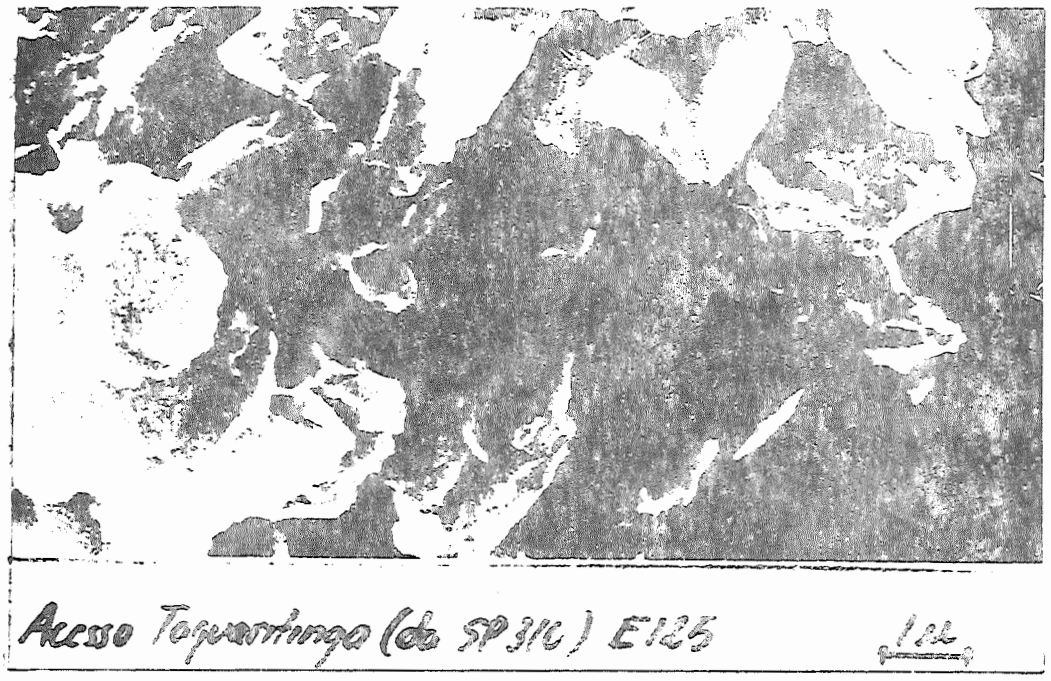


Fig. 2 - Solo não laterítico (Baixada) - argilo mineral montemorilonita e outros.

Um dos tipos de Base mais executadas atualmente - no Estado de São Paulo é a de Solo-Brita cuja dosagem exige que o solo desta mistura, além de outros parâmetros, tenha LL $\leq$ 25% e IP $\leq$ 6%.

Tem-se comprovado que essas exigências muitas vezes conduzem explorações de jazidas de solo à distâncias grandes- (em alguns casos chega-se a TM = 30 Km) com aumento de custo da Solução adotada.

Devido ao desconhecimento das possibilidades das jazidas de Solos Lateríticos que muitas vezes apresentam $10 \leq IP \leq 6$/ e $35\% \geq LL \geq 25\%$ as mesmas são desprezadas para compor as Bases Estabilizadas Granulométricamente de Solo-Brita e de materiais naturais.

Com os estudos que o DER-SP tem realizado a mais de 8 anos chega-se a conclusão que esses solos se comportam excepcionalmente na Base em questão não causando qualquer problema - tanto quanto ao suporte inicial como na manutenção do mesmo quando o pavimento é submetido às intempéries e as cargas do trânsito.

Portanto, para esses casos sugerimos que as especificações do DNER e DER-SP sejam ampliadas quanto aos seus Índices Plásticos, conforme o indicado abaixo, mantendo-se os outros parâmetros:

Valores Vigentes	Valores Propostos
LL $\leq$ 25	LL $\leq$ 30
IP $\leq$ 6	IP $\leq$ 10

Todo o desenvolvimento do estudo dos Solos Estabilizados Granulométricamente tem seguido, quanto a granulometria , as curvas de Fuller-Talbot. O DER-SP vem estudando desde 1968, a utilização de Bases de "Solo Arenoso Fino" com Solo Lateríticos - que apresentam uma curva granulométrica descontínua (Fig. 3) não atendendo os requisitos acima mencionados. Tendo em vista os resultados excepcionais obtidos em pistas experimentais e em trechos de observação, o DER-SP está utilizando, baseado nas especificações propostas pelo Grupo de Trabalho (GT-40), esse tipo de base para rodovias de tráfego leve (VDM inicial 600 veículos com 30% de veículos comerciais).

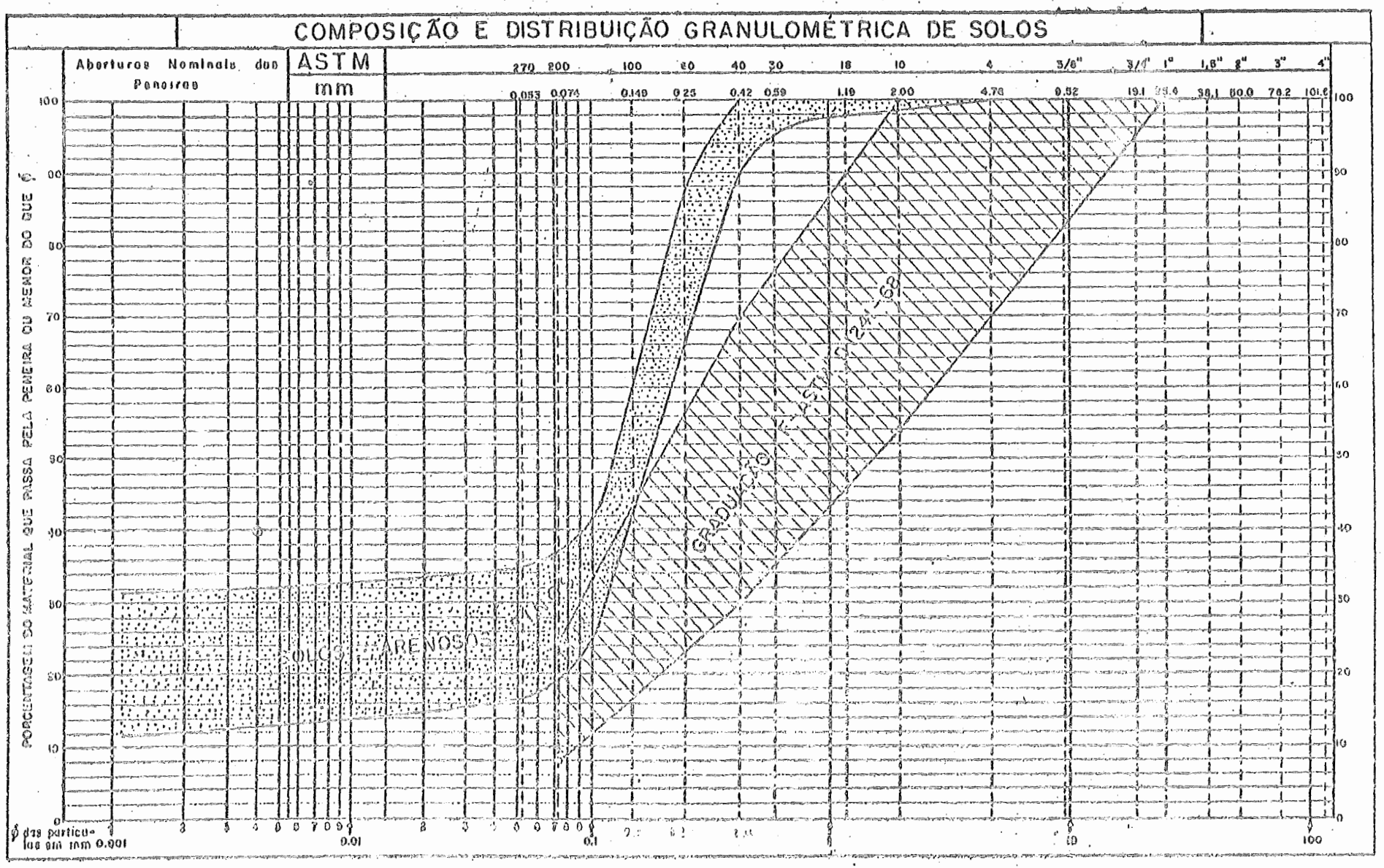
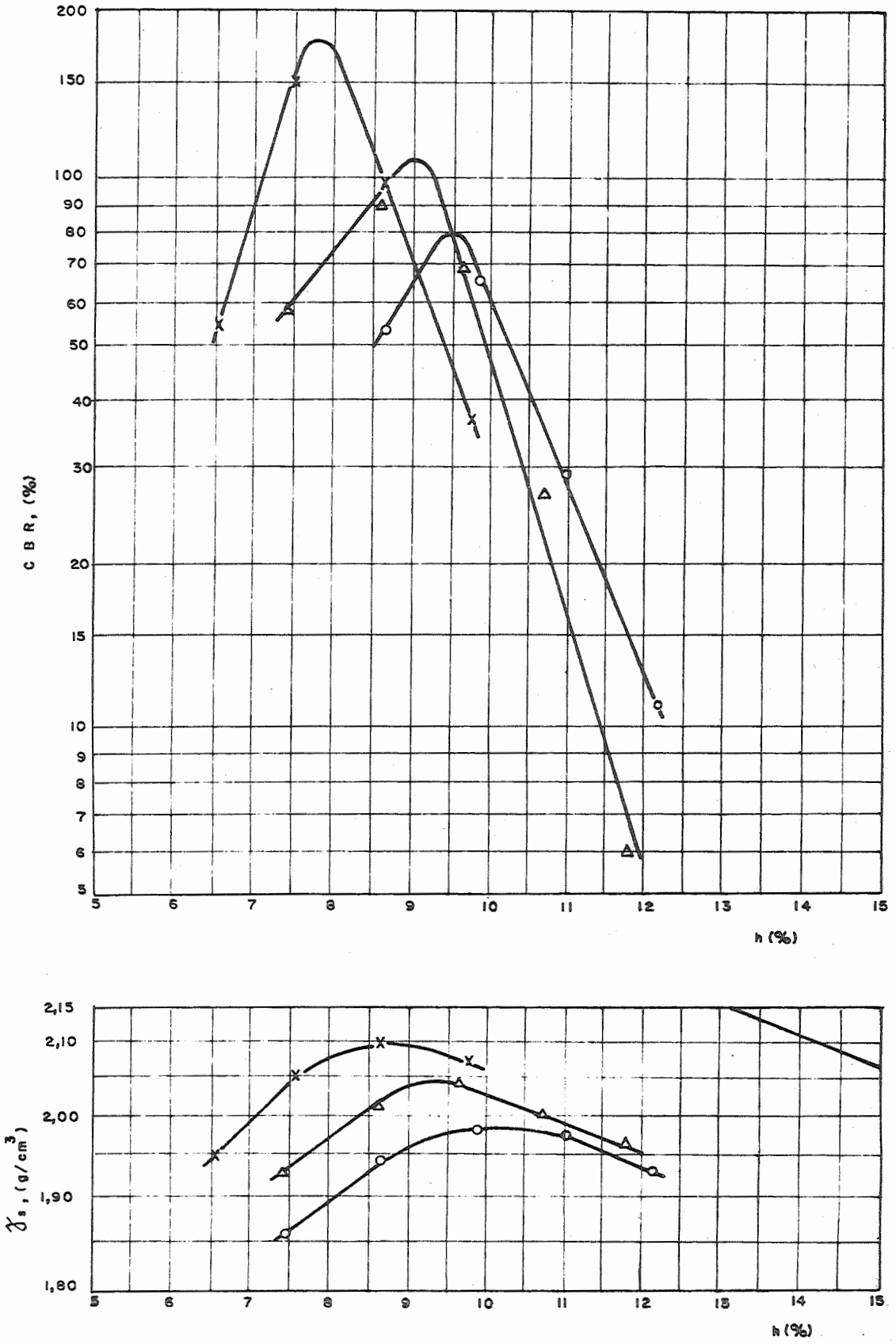


FIGURA 3 - GRANULOMETRIA DOS "SOLOS ARENOSOS FINOS".



Boa Esperança - Trabiju

X - MODIFICADO

Δ - INTERMEDIÁRIO

O - NORMAL

FIG.

Temos comprovado que muitas regiões de solos lateríticos argilosos a especificação proposta pelo GT-40 não são viáveis.

Para esses casos e para trânsito leve propomos que seja estudado, pelos organismos rodoviários, a introdução de uma nova especificação, proposta pelo GT-40, para Bases Estabilizadas Granulométricamente com materiais lateríticos finos, conforme o indicado abaixo.

Para efeito de análise comparativa apresentamos em conjunto a especificação DER-SP para Bases Estabilizadas Granulométricamente para o caso da faixa de material mais fino.

Especificação:

VALORES PROPOSTOS PARA ESPECIFICAÇÃO

Material que passa na peneira de Malha 0,074 mm.... 25 a 45%
Material que passa na peneira de Malha 0,42 mm..... 85 a 100%
Limite de Liquidez (LL)..... 20 a 30%
Índice de Plasticidade (IP)..... 6 a 9%
CBR na Energia "Modificada" e na H0 no Método
M-53-71 equivalente a AASHO T-180-59..... $\geqslant$ 80%
Expansão do CBR (Máxima)..... $\leqslant$ 0,10%

Comentários dos Valores Propostos tendo em vista os Critérios utilizados no DNER e no DER-SP para bases estabilizadas. Granulométricamente

Apresentamos abaixo a comparação entre a faixa granulométrica mais fina da instrução I-58-56 do DER e a especificação ora proposta:

PENEIRAS DE MALHAS QUADRADAS ABERTURA EM mm	GRADUAÇÃO F DA I-58-56 DER-SP	VALORES PROPOSTOS.
25,4	100%	----
9,52	----	----
2,00	55% - 100%	100%
0,42	30% - 70%	85% - 100%
0,074	8% - 25%	25% - 45%

Pelo quadro anterior verificamos que a granulometria proposta é bem fina do que a Graduação F do DER-SP a qual é praticamente equivalente à Graduação mais fina do DNER.

PARÂMETROS	CRITÉRIOS DNER E DER-SP	VALORES PROPOSTOS
LL	≤ 25%	20 a 30%
IP	≤ 6%	6 a 9%
CBR	≥ 80%	≥ 80%

Verifica-se pelo quadro acima que os valores propostos admitem tanto para Limite de Liquidez como para Índice de Plasticidade valores maiores que os máximos adotados pelo DNER e DER-SP.

Quanto ao CBR, foram adotados valores iguais aos do DER-SP e aos do DNER.

Na figura 4 apresentamos curvas da h x γ_s e h x CBR típicas de um material laterítico mostrando a excepcional qualidade desses materiais quanto ao suporte.

Para o DER-SP já iniciamos a aplicação desses conceitos nas Estradas de 1º de Maio - Sertanópolis - extensão de 12 Km.

Nesse caso a solução encontrada foi mistura de uma argila laterítica com areia de Cava, obtida próxima ao Rio Tibaji.

A finalidade foi obter uma base estável, atendendo aos requisitos propostos anteriormente.

Tratando-se de projeto e construção recente, o trecho, aberto ao tráfego há 5 meses, está comportando bem; através de medidas de deflexão para verificação do comportamento do pavimento tem evidenciado um provável êxito da solução adotada.

VII - PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DE BASES ESTABILIZADAS GRANULOMÉTRICAMENTE.

1 - Deverá ser seguido o seguinte processo para a construção de sub-base ou base estabilizada granulométricamente,

com o equipamento relacionado no item 4.1..

2 - Preparo do Sub-leito:

2.1. O Sub-leito será preparado pela forma prescrita na I-2-56t "Preparo do Sub-leito para pavimentação (DNER).

3 - Assentamento e remoção de formas

3.1. As formas, quando empregadas, deverão ser assentadas nos lugares indicados pelo projeto e ter altura suficiente para reter o material solto. O assentamento deverá estar rigorosamente de acordo com os alinhamentos e perfis determinados pela Fiscalização e de modo que as formas não possam se deslocar; deverão ser sustentados, no lado de fora, em toda a altura, por uma camada de terra ou outro material, perfeitamente compactada com largura mínima de 0,80 m. A posição e firmeza das formas serão verificadas imediatamente antes da colocação do material de sub-base ou base e os defeitos deverão ser corrigidos. As formas serão retiradas antes das operações de configuração e compactação de cada camada.

4 - Escarificação e pulverização do Sub-leito

4.1. Estas operações só serão efetuadas quando o material do Sub-leito for empregado na confecção da mistura estabilizada. A escarificação deverá ser executada uniformemente até uma profundidade que dependerá da proporção em que este material entrará na mistura estabilizada e da espessura da sub-base ou base a ser construída. Após a escarificação, o material será pulverizado com equipamento adequado. A pulverização deverá se processar sempre a partir das bordas para o centro e ser prolongada até que 80% do solo ou rocha alterada em peso seco, com exclusão do pedregulho ou pedra britada, passe na peneira de 4,76 mm; o teor de umidade na ocasião não deve exceder ao valor ótimo da mistura estabilizada. No caso onde a escarificação seja desnecessária o equipamento de mistura poderá ser utilizado imediatamente.

5 - Distribuição e colocação dos materiais importados.

5.1. O transporte dos materiais não será permitido quando, a juízo da Fiscalização as condições do tempo da estrada forem tais que as operações de transporte ocasionem sulcamento excessivo no leito do trecho em construção.

5.2. Os materiais importados deverão ser colocados em leiras uniformes, conforme a Fiscalização determinar e em seguida distribuídos uniformemente por toda a superfície a ser ocupada pela sub-base ou base. A colocação, quando Houver mais de um material, deverá ser feito em camadas sucessivas dos diferentes materiais, isto é, de maneira que nenhum tipo de material seja colocado antes que o anterior esteja perfeitamente distribuído em espessura uniforme. A Fiscalização poderá exigir a pulverização do material importado, essa operação poderá ser feita na própria pista ou fora dela.

6- Mistura e Umedecimento

6.1. Os materiais que entrarem na composição de mistura estabilizada deverão ser perfeitamente misturados e convenientemente umedecidos, antes de serem submetidos à compactação. No caso de não se dispôr de usinas ou pulvo-misturadoras, a mistura inicial deverá ser feita com arados de discos ou de dentes, de modo que não seja atingido o Sub-leito. A mistura final deverá ser feita pelo reviramento do material por meio do arado sulcador ou pelo reviramento e deslocamento do material de uma a outra faixa de rodagem por meio de plaina.

6.2. O umedecimento deverá ser iniciado após a homogeneização perfeita da mistura seca. Após o umedecimento deverão ser repetidas as operações de mistura. A Fiscalização fixará o grau de umidade a ser atingido pela mistura.

6.3. No caso de mistura em usinas o material será dosado e sua umidade será fixada pela fiscalização.

7 - Esparrame, compactação e acabamento

7.1. O material misturado e umedecido será uniformemente esparramado. A compactação só poderá ser iniciada após o exame da fiscalização, que verificará a uniformidade e a umidade da mistura. As camadas deverão ter espessuras iniciais tais que resultem na espessura exigida pelo projeto, após a compactação.

7.2. As operações de adensamento deverão progredir dos bordos para o centro da faixa nos trechos retos e da borda mais baixa para a mais alta nas curvas paralelamente ao eixo da entrada e deverão prosseguir até que a densidade aparente da camada iguale ou exceda a fixada pela Fiscalização. Nos lugares inacessíveis aos compressôres, ou onde seu emprego não fôr recomendável, a compressão deverá ser feita por meio de soquetes.

7.3. A fase final de compactação deverá ser efetuada com equipamento que permita a configuração da seção transversal do trecho à do projeto.

7.4. O acabamento da superfície deverá ser feito com aplainamento pela motoniveladora e rolagem por compressôres de roda lisa, ou rolo de pneus de pressão variável de modo que assuma a forma determinada pelos alinhamentos e perfis da seção transversal, estabelecidos pelo projeto.

8 - Processos alternativos de construção

8.1. A sequência das operações para construção de sub-base ou base estabilizada granulométricamente, poderá ser modificada pela Empreiteira, com aprovação da Fiscalização, desde que resulte sub-base de características idênticas às que se obteriam pelo processo de construção descrito.

8.2. No caso de utilização da máquina citada no item 4.1.6., deverá a Empreiteira apresentar o esquema de trabalho, contendo a sequência de operações, a fim de ser aprovado pela Fiscalização.

CUIDADOS COM A EXECUÇÃO

1 - Se a fiscalização determinar, a sub-base será submetida à ação do trânsito, devendo esse ser dirigido e distribuído por toda a superfície acabada.

PROTEÇÃO DA OBRA

1 - A sub-base ou base acabada deverá ser mantida pelo empreiteiro durante todo o tempo em que fôr submetida ao tráfego e até o seu recebimento definitivo, por meio das operações que se tornarem necessárias, de aplainamento, umedecimento, compressão, escarificação e adição ou remoção de materiais.

2 - Durante todo o período de construção da sub-base ou base e até o seu recebimento, os materiais, os trechos em construção e a sub-base pronta, deverão ser protegidos contra os agentes atmosféricos e outros que possam danificá-los.

VIII - CONTROLE

1 - Controle Tecnológico

1.1. Ensaios

Serão procedidos:

a) determinações da massa específica aparente "in situ", com espaçamento máximo de 100 m de pista, nos pontos onde foram coletadas as amostras para os ensaios de compactação;

b) uma determinação do teor de umidade, cada 100 m, imediatamente antes da compactação;

c) ensaios de caracterização (limite de liquidez, limite de plasticidade e granulometria) respectivamente segundo os métodos DNER-ME 44-64, ME 82-63 e ME 80-64, com espaçamento máximo de 150 m de pista, e, no mínimo, dois grupos de ensaios por dia;

d) em ensaio do índice de suporte Califórnia, com a energia de compactação do método DNER-ME 48-64, com espaçamento máximo de 300 m de pista, e, no mínimo um ensaio cada dois dias;

e) um ensaio de compactação, segundo o método DNER-ME 48-64, para determinação da massa específica aparente, seca, máxima de 100 m de pista, com amostras coletadas em pontos obedecendo sempre à ordem: bordo direito, eixo, bordo esquerdo, eixo, bordo direito, etc., a 60 m do bordo.

O número de ensaios de compactação poderá ser reduzido desde que se verifique a homogeneidade do material.

f) uma determinação do equivalente de areia, com espaçamento de 100 m, no caso de materiais com índice de plasticidade maior do que 6% e limite de liquidez maior que 25%.

1.2. Aceitação

Os valores máximos e mínimos decorrentes da amostragem, a serem confrontados com os valores especificados, serão calculados pelas seguintes fórmulas:

$$X_{max} = \overline{X} + \frac{1,29}{N} + 0,68$$

$$X_{min} = X - \frac{1,29}{N} - 0,68$$

Para o caso do índice de suporte Califórnia, o valor, calculado de acordo com a fórmula abaixo, deverá-ser igual ou superior ao valor mínimo especificado.

sendo: $= \overline{X} - \frac{1,29}{N}$

$$\overline{X} = \frac{X}{N}$$

$$= \frac{(X - X)^2}{N - 1}$$

N = 9 (nº de determinações feitas)

No caso da não aceitação dos serviços pela análise estatística, o trecho considerado será subdividido - em sub-trechos, fazendo-se um ensaio com o material coletado em cada um deles.

Para os ensaios do índice de suporte Califórnia, cada um destes sub-trechos terá uma extensão máxima - de 100 m, e, para os demais ensaios, uma extensão máxima de 50 metros.

Os sub-trechos serão dados como aceitos , tendo em vista os resultados dos ensaios, face aos valores exigidos pelas especificações.

2 - Controle Geométrico

Após a execução da base, proceder-se-á à relocação e nivelamento do eixo e dos bordos, permitindo-se as seguintes telerâncias:

a) = 10 cm, quanto à largura da plataforma.

b) até 20%, em excesso, para a flecha de abaulamento, não se tolerando falta.

Na verificação do desempenho longitudinal da superfície não se tolerarão maiores que 1,5 cm, quando determinadas, por meio de régua de 3,00 m.

c) A espessura média da camada de base, determinada pela fórmula:

$$= \bar{X} - \frac{1,29}{N}$$

$$\bar{X} = \frac{X}{N}$$

$$= \frac{(\bar{X} - X^2)}{N - 1}$$

N = 9 (nº de determinações feitas).

Não deve ser menor do que a espessura de projeto menos 1 cm.

Na determinação de $\bar{X}$ serão utilizados pelo menos 9 valores de espessuras individuais X, obtidas por nivelamento do eixo e bordos de 20 em 20 metros, antes e depois das operações de espalhamento e compactação.

Não se tolerará nenhum valor individual de espessura fora do intervalo de = 2 cm, em relação à espessura do projeto.

No caso de se aceitar, dentro das tolerâncias estabelecidas, uma camada de base com espessura média inferior à de projeto, o revestimento será aumentado de uma espessura estruturalmente equivalente à diferença encontrada.

No caso da aceitação de camada base dentro das tolerâncias, com espessura média superior à de projeto, a diferença não será deduzida da espessura do revestimento.

IX - BIBLIOGRAFIA

1 - "Sub-bases e Bases Estabilizadas Granulométricamente" - Departamento de Estradas de Rodagem (DER) - Instrução - I-58-56 - São Paulo - Brasil, 1956.

2 - "Considerações sobre limite de liquidez e Índice de Plasticidade máximos admissíveis para materiais de sub-base e base estabilizadas granulométricamente" - Hugo Alves Pequeno - DER - Junho de 1961.

3 - "Estabilización Granular Experiencia e Investigación Argentina y Sudamericana" - Luiz Maria Zalazar - 1965.

4 - "Os Solos Residuais do Estado de São Paulo - sua Caracterização para Finalidade Rodoviária" - Job Shuji Nogami - 1967.

5 - "Normas e Instruções" - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) - 1969.

6 - "Base Estabilizada Granulométricamente" - DNER-ES-P 10-71 - Especificações Gerais para Obras Rodoviárias-1971.

7 - "Análise Mineralógica de Cinco Amostras de Solos" - Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Relatório nº 7013 - São Paulo - Brasil, junho de 1973.

8 - "Utilização de Solo Arenoso Fino na Execução de Bases para Pavimento de Baixo Custo" - Douglas Fadul Villibor - EESC - USP - junho de 1974.

9 - "Principles of Pavement Design" - E.J. Yoder e M.W. Witczak - 1975.

10 - "Anais do V Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos (Argentina) - 1975.

11 - Field Performance of Laterite Soils.