

Compactação dos Solos

Mecânica de Solos

Prof. Fabio Tonin

Compactação

É o processo mecânico de aplicação de forças externas, destinadas a reduzir o volume dos vazios do solo, até atingir a massa específica máxima, resistência e estabilidade.

Operação e importância

- Simples
- De grande importância pelos seus efeitos sobre a estabilização de maciços terrosos
- Relaciona-se com os problemas de pavimentação e barragens de terra

Compactação_{AR} ≠ Adensamento_{H2O}

Objetivos

- Aumento da resistência de ruptura
- Redução de possíveis variações volumétricas (pela ação de cargas ou pela ação da água)
- Impermeabilização, pela redução do coeficiente de permeabilidade, resultante do menor volume de vazios

Fatores relacionados

- Natureza do solo
 - requer equipamento adequado
- Teor de umidade
 - corresponde à quantidade mínima de água, necessária para atingir a umidade ótima para a compactação
- Energia de compactação (fornecida pela ação dos equipamentos compactadores)
 - número de passadas do rolo compactador
 - espessura da camada
 - velocidade de compactação
- Processo de compactação
 - método de aplicação da energia necessária

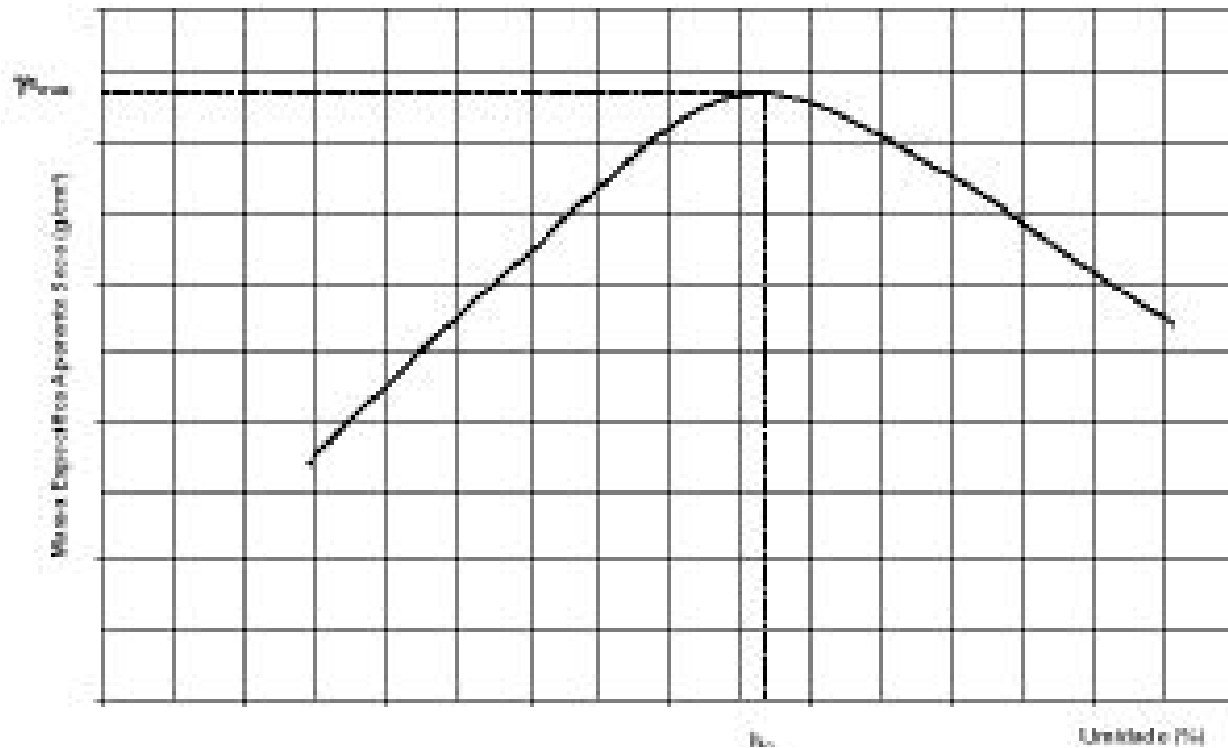
Natureza dos solos

Para fins de compactação, os solos são divididos em dois grupos:

granulares

coesivos

- Em qualquer um deles, apenas no teor de umidade ótima se atinge a máxima massa específica seca (kg/m^3), que corresponde à maior resistência do solo.

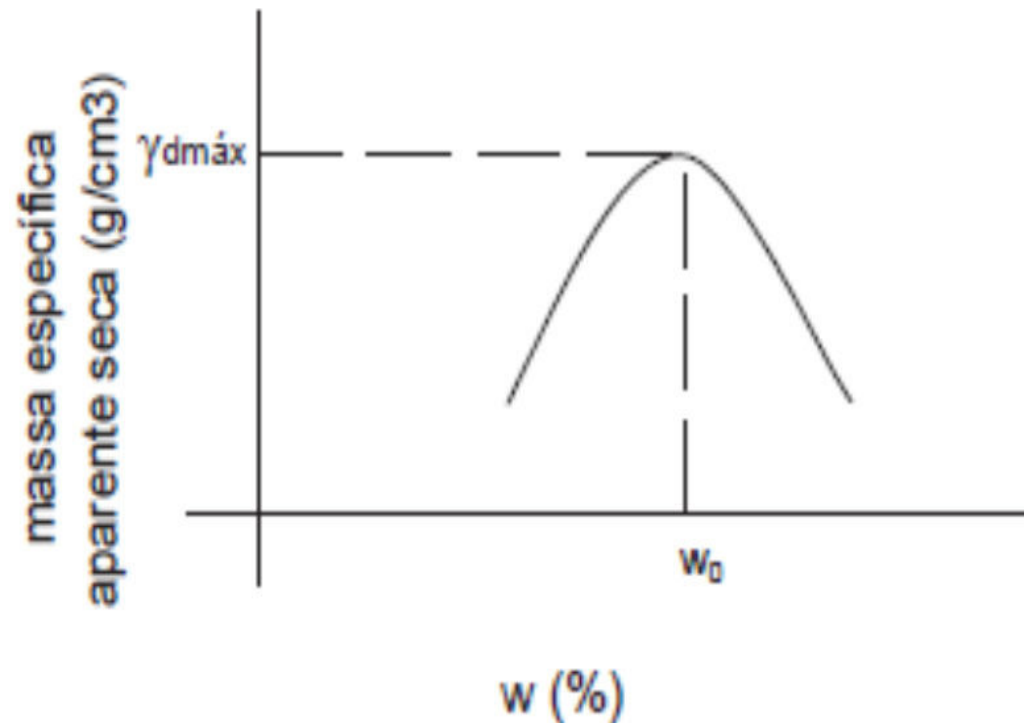


Teor de umidade

- Para umidades muito baixas:
 - o atrito grão a grão do solo é muito alto e não se consegue uma densidade adequada.
- Para umidades mais elevadas:
 - a água provoca efeito de lubrificação entre as partículas que se acomodam em um arranjo mais compacto.
- À partir de certa umidade:
 - não se consegue mais expulsar o ar dos vazios, ficando envolto por água, não conseguindo sair do interior do solo.

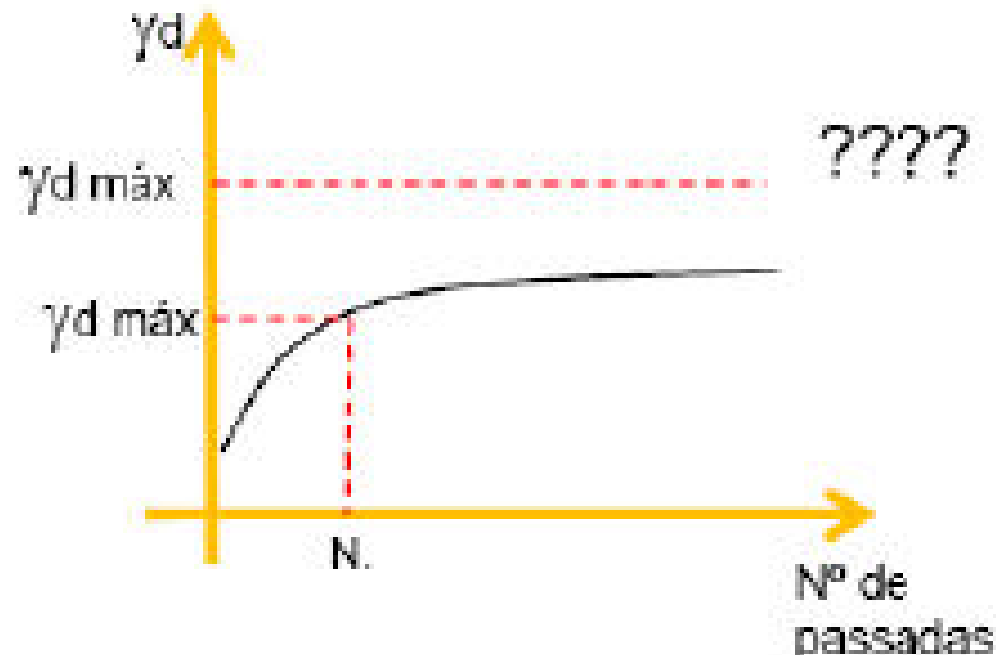
- A densidade de um solo aumenta à medida que o teor de água vai aumentando, passando por um valor máximo para depois diminuir.
- A densidade máxima corresponde à quantidade mínima de vazios do solo.

- Para uma determinada energia aplicada no solo (nº de golpes), existe apenas uma umidade que conduz ao máximo valor de densidade ou massa específica.

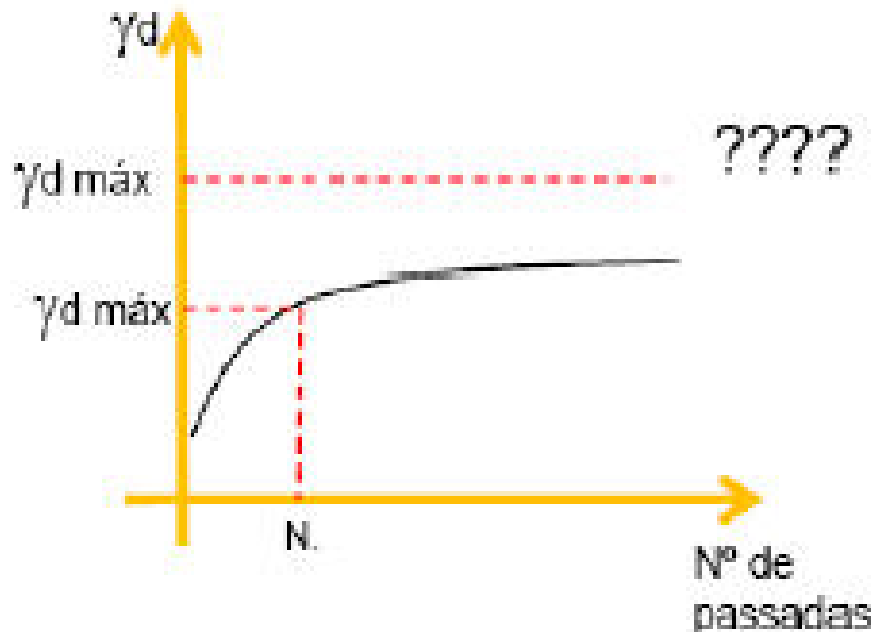


Energia de compactação:

- número de passadas do compactador
- O grau de compactação aumenta substancialmente nas primeiras passadas, e as seguintes não contribuem significativamente para essa elevação.



- Insistir em aumentar o número de passadas pode produzir perda no grau de compactação.
- Geralmente é preferível adotar número de passadas entre 6 e 12 e aumentar o peso e/ou diminuir a velocidade.



- Fazer um aterro experimental;
- Associar γ_d ao número de passadas;
- Calcular o $\gamma_{d \text{ máx}}$ no laboratório e encontrar o número de passadas ideal através do gráfico.

Energia de compactação:

- espessura da camada

- A espessura deve está condicionada:
 - às características do material (solo)
 - tipo de equipamento
 - finalidade do aterro
- Geralmente se adotam espessuras menores que as máximas, para garantir compactação uniforme em toda a altura da camada.
- Em obras rodoviárias, fixa-se em 30 cm a espessura máxima compactada de uma camada.
- Para materiais granulares, recomenda-se no máximo 20 cm compactados.

Homogenização da camada:

- A camada solta deve estar bem pulverizada, sem torrões muito secos, blocos ou fragmentos de rocha, antes da compactação.
- Feita com motoniveladoras, grades e arados especiais.

Energia de compactação:

- velocidade de compactação

- A velocidade de um rolo compactador é função da potência do trator.
- A movimentação do pé-de-carneiro em baixa velocidade acarreta maior esforço de compactação.
- Velocidades admitidas para:
 - Rolos pneumáticos: de 10 a 15 km/h
 - Rolos pé-de-carneiro: de 5 a 10 km/h
 - Rolos vibratórios: de 3 a 4 km/h

Processo de compactação

- Amassamento

→ rolo pé-de-carneiro



- Compressão

→ rolo liso



- Impacto

→ sapo mecânico



- Vibração

→ rolo liso e rolo pé-de-carneiro



Processo de compactação

- Amassamento

– consiste na aplicação simultânea de forças verticais e horizontais, provenientes do equipamento utilizado.



Processo de compactação

- Compressão

- o esforço é proveniente da aplicação de uma força vertical. Este deslocamento permite uma melhor arrumação das partículas, visando a diminuição do volume de vazios do solo.



Processo de compactação

- Impacto

- pequenas áreas e de acesso difícil para rolos (com repetição de até 500 golpes por minuto)



Processo de compactação

- Vibração

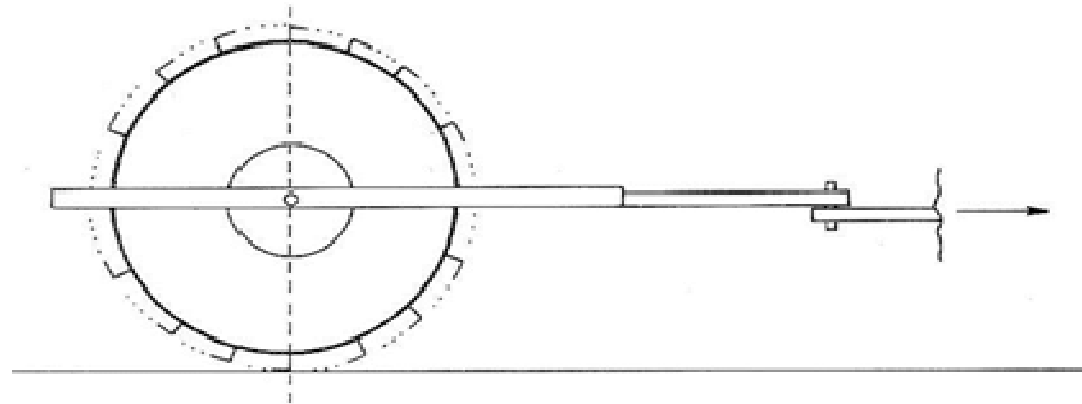
- a aplicação das forças verticais se dá com uma frequência de repetição acima de 500 golpes por minuto. Além da frequência, considera-se também a amplitude da vibração (altura da queda da massa).



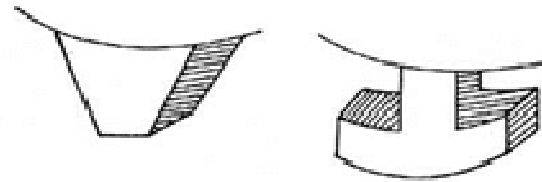
Equipamentos

Pé-de-carneiro (estático ou vibratório):

- Mais eficientes para solos coesivos (argilosos e siltosos)
- A compactação é realizada de baixo para cima.
- À medida que o solo é compactado o afundamento da pata vai diminuindo, até o ponto em que o rolo praticamente passeia na superfície.
- Não deve ser usado em solos granulares, pois tem efeito quase nulo.

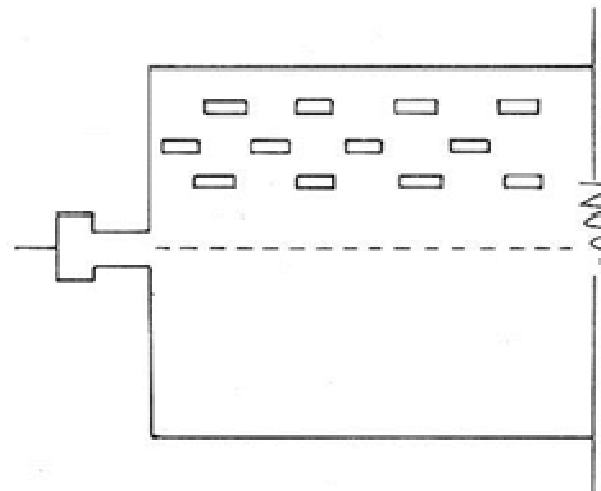


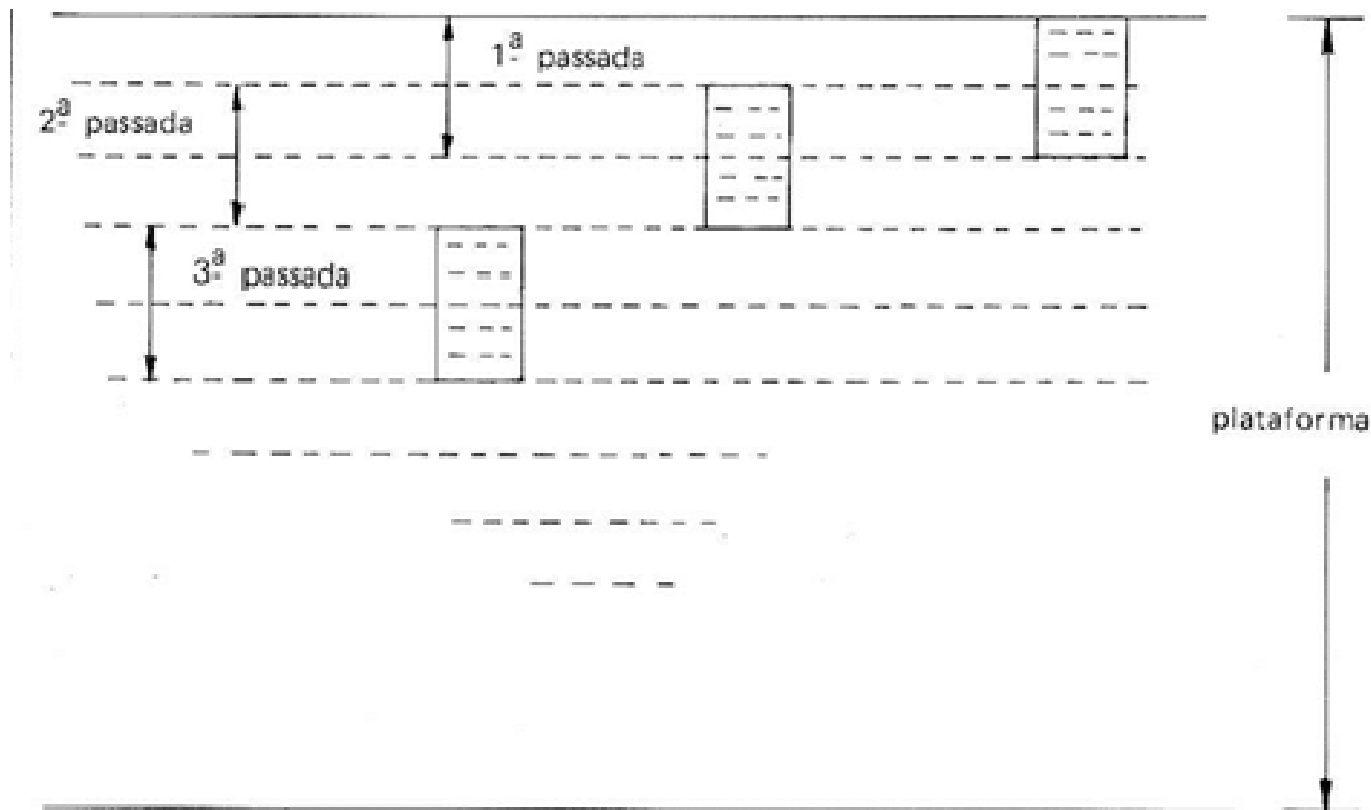
ROLO PÉ-DE-CARNEIRO



PATAS

Tronco de pirâmide ou pés de carneiro.





O esquema de penetração das patas no solo





Equipamentos

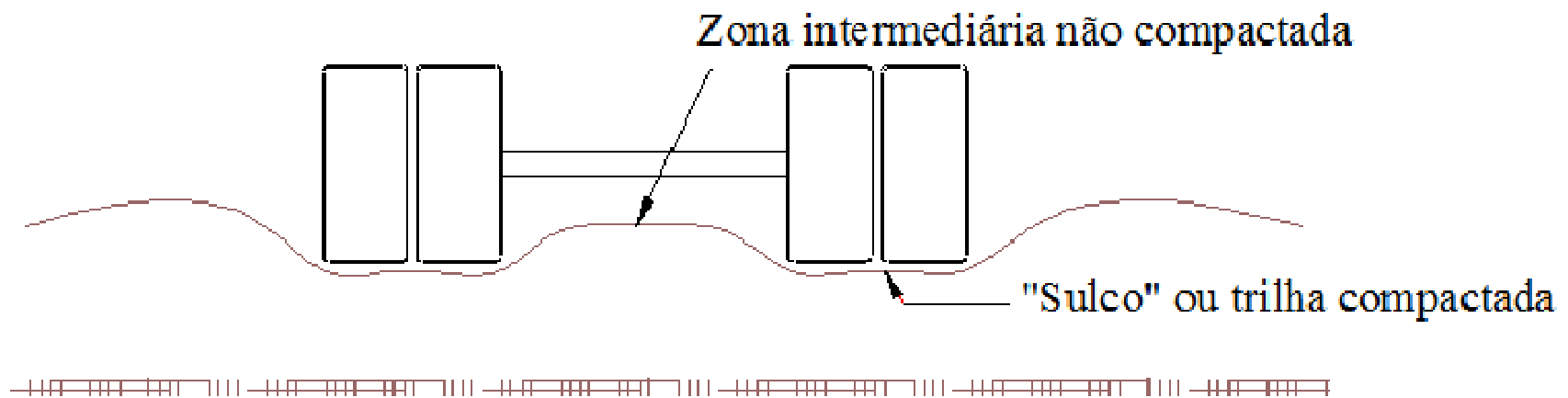
Rolos de pneus (compressão fixa ou variável):

- A pressão efetiva de compactação depende do número de pneus e da área de contato com a camada.
- Este rolo é mais versátil e pode ser usado desde solos coesivos até massas asfálticas.
- Tem vantagem pelo efeito de amassamento dos pneus.
- A compactação se dá em toda a espessura da camada



ATENÇÃO: tráfego de veículos

- eficiência análoga ao dos rolos de pneus;
- os maiores problemas são os “sulcos” ou trilhos, pois são de difícil recuperação mesmo com compactação;
- o tráfego de veículos sobre o aterro deve ser tal que evite a formação de “sulcos”.



Equipamentos

Rolos liso (estático ou vibratório):

- São rolos metálicos dotados de um sistema vibratório que permite aplicar ao solo determinado número de golpes por minuto (frequência).
- Este rolo é de alta eficiência na compactação de todo tipo de solo.
- Inicialmente, estando o solo solto, toda energia vibratória é absorvida pelo deslocamento das partículas sólidas. Porém com o aumento da densidade, parte da energia vibratória é devolvida.





roadwaygroup.en.alibaba.com



hbsf.en.alibaba.com



roadwaygroup.en.alibaba.com

Considerações sobre rolos lisos:

- Deve-se evitar a vibração do rolo quando parado para não provocar efeito de devolução.
- Atenção especial ao controle de umidade, evitando utilização desnecessária do equipamento.
- Os rolos lisos estáticos tem pouca aplicação em terraplenagem.



Equipamentos

Sapo mecânico:

- Controlados manualmente, geralmente movidos a gasolina.
- Compactação de pequenas áreas cujo acesso é difícil ou o uso de equipamentos maiores não se justifica.
- Não funcionam em solos de graduação uniforme.
- Muito utilizados para compactação de reaterros e valas.



Tipo de Equipamento	Peso Máximo (t)	Espessura Máxima Compactada (cm)	Uniformidade Da Camada	Tipo de Solo
Pé-de-carneiro estático	20	40	Boa	Argila e silte
Pé-de-carneiro vibratório	30	40	Boa	Mistura areia-silte-argila
Pneumático leve	15	15	Boa	Mistura areia-silte-argila
Pneumático pesado	35	35	Muito boa	Praticamente todos
Liso vibratório (com rodas metálicas)	30	50	Muito boa	Areia, cascalho, material granular
Liso estático (com 3 rodas metálicas)	20	10	Regular	Material granular, brita
Grade (malha)	20	20	Boa	Material granular ou em blocos
Combinados	20	20	boa	Praticamente todos

Teste de compactação

- Ensaio Proctor

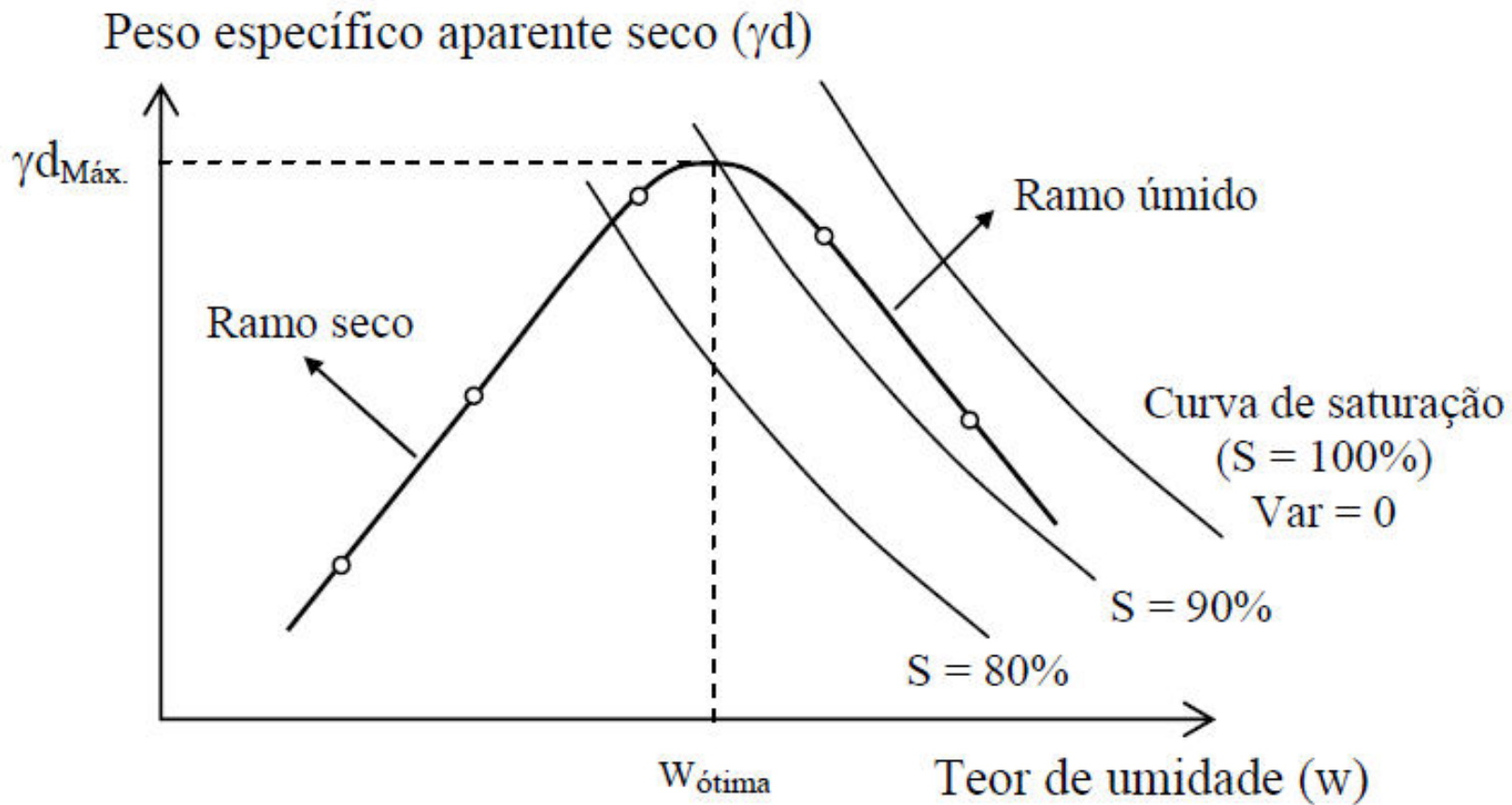
- o engenheiro americano Ralph Proctor (1933) estabeleceu os princípios básicos da técnica e controle de compactação.

“A densidade que um solo atinge quando compactado, sob uma determinada energia de compactação, depende da umidade do solo no momento da compactação”.

Curva de compactação

Ao realizar-se a compactação de um solo, sob diferentes condições de umidade e para uma determinada energia de compactação, obtém-se uma curva de variação dos pesos específicos aparentes secos (γ_d) em função do teor de umidade (w).

Curva de compactação



Ensaio de compactação

Ensaio de Proctor Normal

ou

A.A.S.H.O Standard

No Brasil foi normalizado pela

ABNT/NBR 7182/86.

A.A.S.H.O. = American Association of State Highway Officials

Ensaio Proctor Normal

- cilindro metálico de volume 1000 cm^3 ,
- amostra de solo com três camadas,
- compacta-se cada camada com 26 golpes,
- utilizando soquete de 2,5 kg,
- caindo de uma altura de 30,5 cm.

Materials

- Soquete
- Cilindro



Ensaio Proctor Normal

- As espessuras finais das camadas compactadas devem ser aproximadamente iguais,
- A energia de compactação deverá ser uniformemente distribuída, resultando um plano superior quase horizontal.

- Com os valores, do peso específico do solo e teor de umidade, pode-se calcular o peso específico aparente seco mediante a fórmula de correlação:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{(1 + w)}$$

- Junto com a curva de compactação, sempre que necessário, pode-se desenhar as curvas representativas de um mesmo grau de saturação, a partir da equação:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s \cdot S \cdot \gamma_w}{S \cdot \gamma_w + \gamma_s \cdot w}$$

Onde:

γ_d = peso específico aparente seco

γ_s = peso específico real dos grãos

γ_w = peso específico da água

S = grau de saturação

w = teor de umidade

- A energia de compactação por unidade de volume pode ser calculada, através da fórmula:

$$E = \frac{P \cdot h \cdot N \cdot n}{V}$$

Onde:

E = energia de compactação por unidade de volume

P = peso do soquete

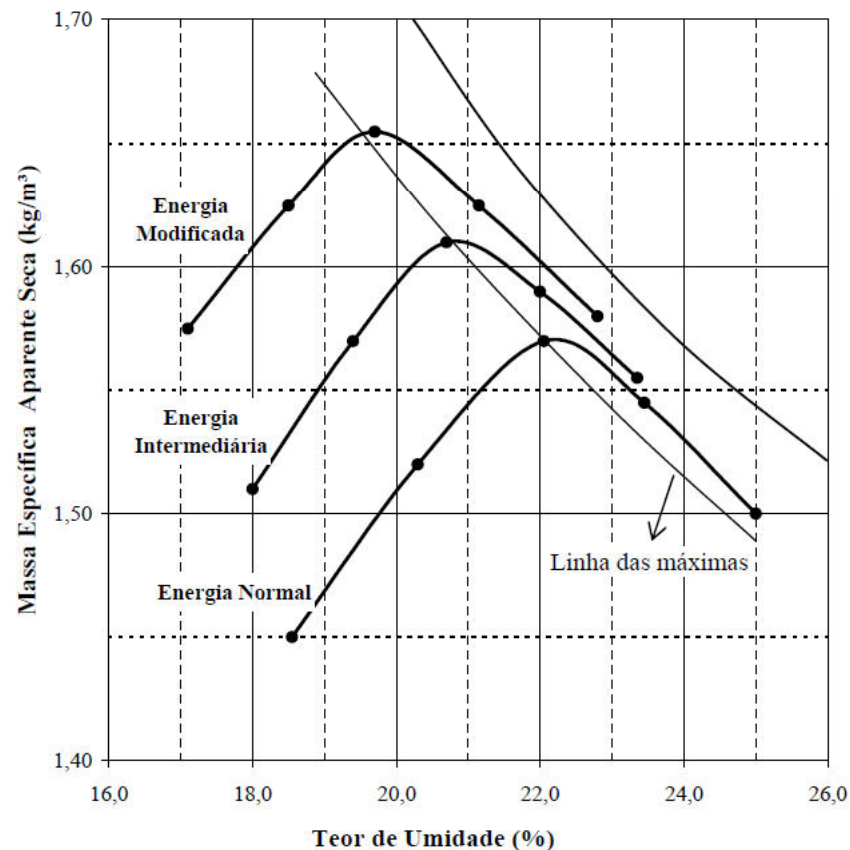
h = altura de queda do soquete

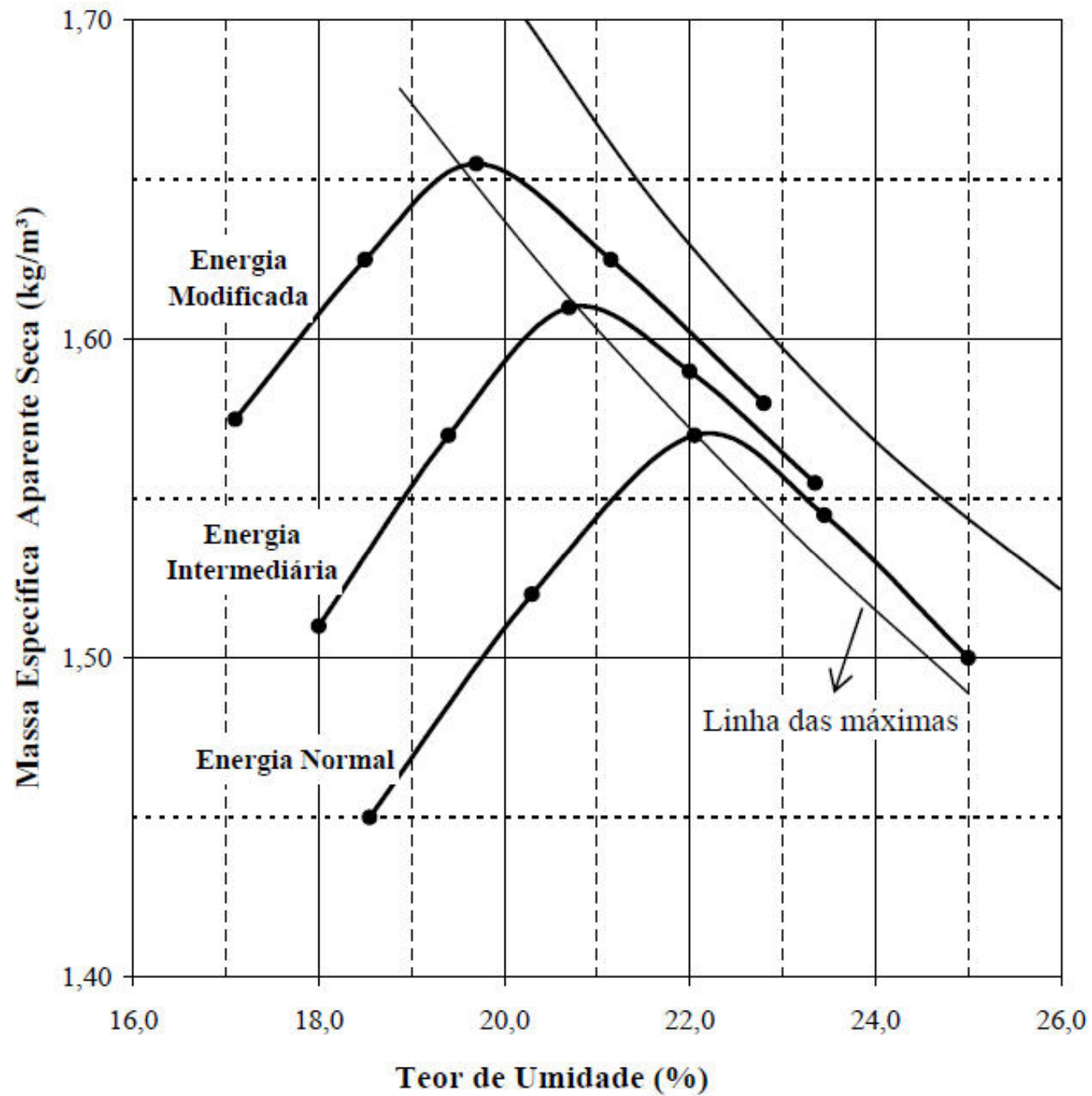
N = número de golpes por camada

n = número de camadas

V = volume do solo compactado

Um mesmo solo, quando compactado com energias diferentes, apresentará valores de peso específico aparente seco máximos maiores e teor de umidades ótimas menores, para valores crescentes dessa energia, o ponto se deslocará para cima e para a esquerda.





Ensaio Proctor Modificado

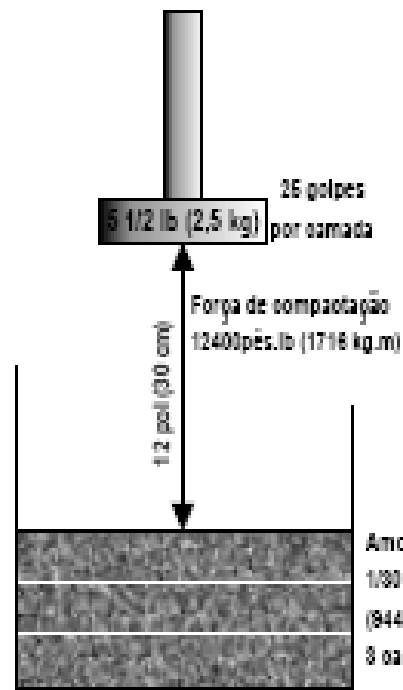
Tendo em vista o maior peso dos equipamentos atualmente, tornou-se necessário alterar as condições de ensaio:

- amostra compactada no mesmo molde,
- com **5 camadas**,
- 25 golpes,
- peso de **4,5 kg**,
- altura de queda de **45 cm**,
- energia de **25 kg.cm/cm³**

Energias de compactação utilizadas nos ensaios.

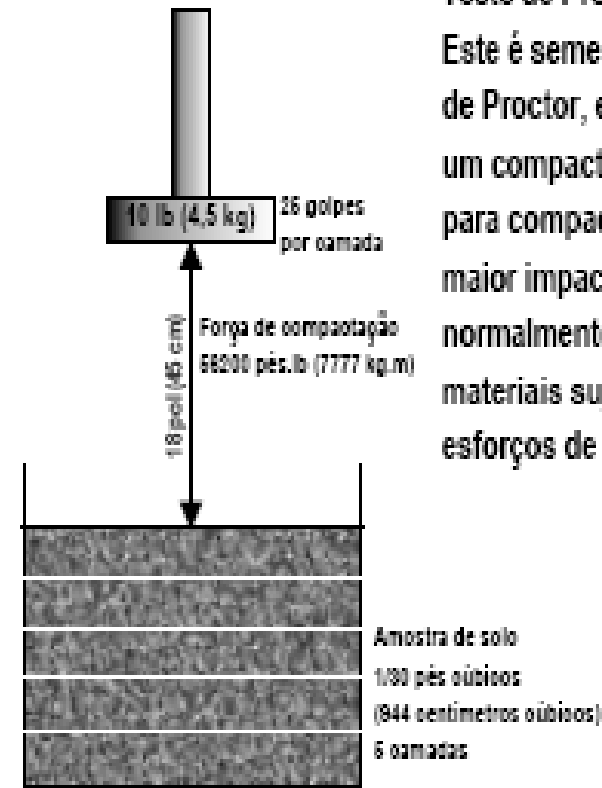
Ensaio de Compactação	P (kg)	h (cm)	N	n	V (cm ³)	E (kg.cm/cm ²)
Normal	2,5	30,5	3	26	1000	5,7
Intermediário	4,5	45,7	5	26	2085	12,6
Modificado	4,5	45,7	5	55	2085	26,6

TESTE DE PROCTOR



Padrão AASHTO

Proctor Test
Uma pequena amostra do solo é levada do local da obra. Um peso padrão é deixado cair várias vezes sobre a amostra. O material é pesado e secado no forno durante 12 horas a fim de se avaliar o seu teor de água.



Padrão AASHTO Modificado

Teste de Proctor Modificado
Este é semelhante ao Teste de Proctor, exceto porque um compactador é usado para compactar material de maior impacto. Este teste é normalmente preferido para materiais sujeitos a maiores esforços de cisalhamento.

	PÉ DE CARNEIRO DE ROLO VIBRATÓRIO IMPACTO	PÉ DE CAENEIRO ESTÁTICO ROLO COM GRADE NIVELADORA PRESSÃO COM AMASSAMENTO	COMPACTADOR DE PLACA VIBRATÓRIA ROLO VIBRATÓRIO PÉ DE CARNEIRO DE ROLO VIBRATÓRIO. VIBRAÇÃO	NIVELADORA COMPACTADOR DE ROLO EMBORRACHADO CARREGADOR ROLO COM GRADE AMASSAMENTO COM PRESSÃO
CASCALHO 12+	POBRE	NÃO	BOM	MUITO BOM
AREIA 10+/-	POBRE	NÃO	EXCELENTE	BOM
SILTE 6+/-	BOM	BOM	POBRE	EXCELENTE
ARGILA 6+/-	EXCELENTE	MUITO BOM	NÃO	BOM

Especificação para compactação

As especificações modernas de compactação diferem bastante das antigas, porque estas estabeleciam minuciosamente os parâmetros, fixando o tipo de equipamento a ser usado, a espessura da camada, o número de passadas, etc.

Atualmente, fixa-se apenas o peso específico a ser atingido no campo, deixando-se todos os fatores já citados a critério do executor e da fiscalização da obra. Assim, terão estes ampla liberdade de testar os equipamentos disponíveis no solo existente, somente ajustando os diversos parâmetros no sentido de se conseguir a compactação bem feita e de maneira econômica.

Chama-se grau de compactação (G_c) à relação:

$$G_c = \frac{\gamma_{d_{\text{Campo}}}}{\gamma_{d_{\text{Máx}}}} \cdot 100\%$$

na qual:

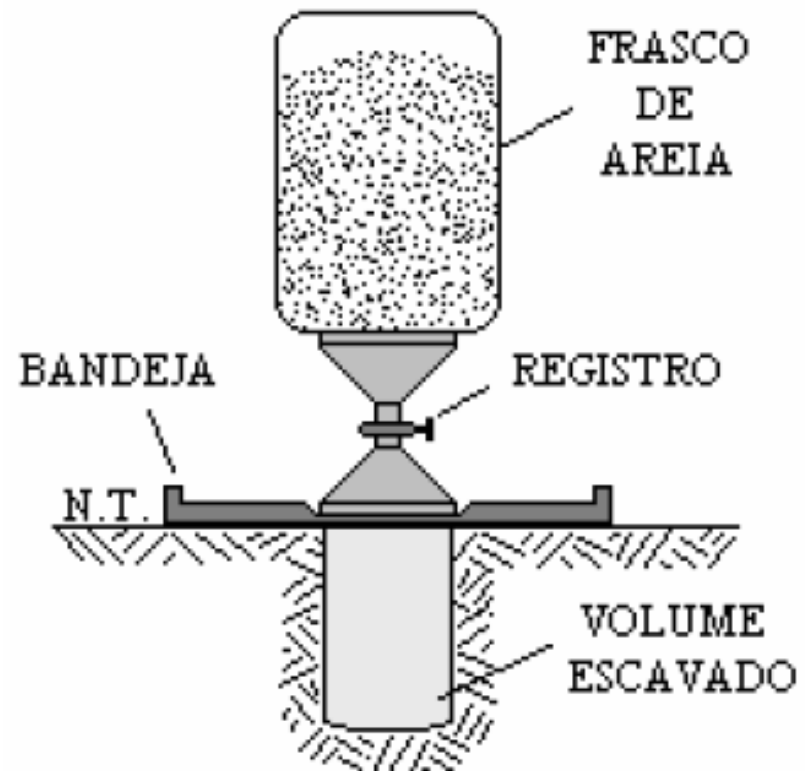
$\gamma_{d_{\text{Campo}}}$ = peso específico aparente seco “in situ” (no aterro executado).

$\gamma_{d_{\text{Máx}}}$ = peso específico aparente seco máximo obtido no ensaio de Proctor, no laboratório, com a energia de compactação especificada.

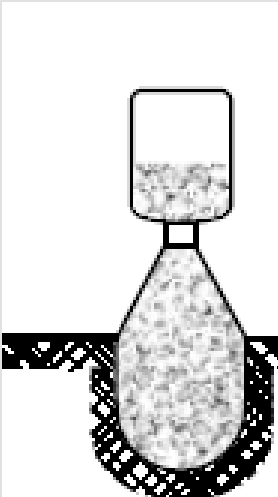
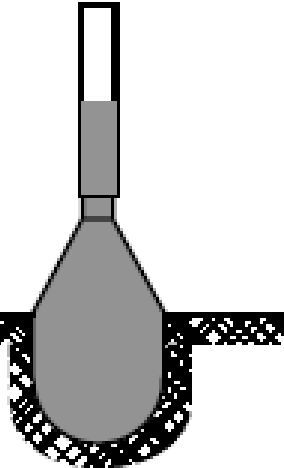
Método da areia

ABNT/NBR 7185/86:

Determinação da massa específica aparente, *in situ*, com o emprego do frasco de areia.



MÉTODOS DE TESTE DE DENSIDADE DE CAMPO

	Cone de Areia	Balão Densímetro
Vantagens	 <ul style="list-style-type: none">• Amostragem grande• Preciso	 <ul style="list-style-type: none">• Amostragem grande• Obtenção de leitura direta• Material de classificação livre
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">• Muitas etapas• Necessidade de grande área• Lento• Equipamento de parada• Passível de coincidências	<ul style="list-style-type: none">• Lento• Rompimento do balão• Complicado
Erros	<ul style="list-style-type: none">• Vazio sob a placa• Aumento de areia• Areia compactada• Bombeamento do solo	<ul style="list-style-type: none">• Superfície fora de nível• Bombeamento do solo• Vazio sob a placa
Custo	<ul style="list-style-type: none">• Baixo	<ul style="list-style-type: none">• Moderado