



Stabilisation et Imperméabilisation
de tout type de sol dans le Monde



ROCAMIX[®] ...une révolution en marche...

ROCAMIX[®]
Distributeur exclusif
Consult Management Know How Company
Société anonyme capital 150 000 usd
Calle Elvira Méndez-Edificio Banco de Boston-Oficina 1708
Ciudad de Panamá - Panamá
www.rocamiX.com
info@rocamiX.com



CUJAE

Facultad de Ingeniería Civil

CECAT

Departamento de Ingeniería Civil

*Instituto Superior Politécnico
"José Antonio Echeverría"*

CUJAE

*Centro de Estudios de Construcción
y Arquitectura Tropical*

CECAT

Ciudad La Habana CUBA

Professeurs chargés des cours

“Stabilisation et Imperméabilisation
de tout type de sol ”

Dr. ing. Jorge Acevedo Catá.

MSc. Ing. Rolando Armas Novoa.

MSc. Ing. Pedro Morales Quevedo.

Comunication

Dr. Ing. William Cobelo Cristiá.

Directeur CECAT

wcobelo@civil.cujae.edu.cu

Conférence de présentation du Système Rocamix

Ing. François Lasserre

President Rocamix

f.lasserre@rocamix.com

www.rocamix.com



$$\text{Saturation } = s = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

Poids spécifique de la masse du sol, poids volumétrique =

$$\gamma_f = \frac{W}{V} = \frac{W_w + W_s}{V} \quad (\text{Poids spécifique humide})$$

$$\gamma = \left(\frac{G_s + s e}{1 + e} \right) \gamma_w$$

$$\gamma_d = \frac{W}{V} = \frac{W_s}{V} \quad (\text{Poids spécifique sec})$$

$$\gamma_{SAT} = \frac{W}{V} = \frac{W_w + W_s}{V_w + V_s} ; \text{ et que } s = 100\% \quad (\text{Poids spécifique saturé})$$

$$\gamma' = \gamma_{SAT} - \gamma_w \quad (\text{Poids spécifique immergé})$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (\text{Poids spécifique des particules solides})$$

Poids spécifique relatif des particules solides (G_s)

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w} \quad \gamma_w = \text{Poids spécifique de l'eau}$$

$$\gamma_w = 9.81 \text{ KN/m}^3$$

Taille et forme des grains

Essais:

- Criblé ou tamisé
- Hydromètre (Ley Stokes) } Courbe Granulométrique

En fonction de la taille des particules les sols se divisent:

Sols épais $\left\{ \begin{array}{l} \text{Graves} \\ \text{Sables} \end{array} \right.$ Plus de 50 % retenu par la maille No 4 } **SUCS**

Tamis N° 200 (0.075mm)

Sols fins $\left\{ \begin{array}{l} \text{Limens} \\ \text{Argiles} \end{array} \right.$ Plus de 50 % retenu par la maille No 200 } **SUCS**

- Graves: Particules de taille supérieures de 4.75mm
- Sables: Particules de taille entre 4.75 et 0.075mm
- Limons et Argiles: Particules qui passent au tamis 200 (moins de 0.075mm)

Différence entre des Boues et des argiles (la forme des grains):

- Gravier, Sables et Boues : Manière sphérique (dimension égale dans les 3 axes). Prédominent sur les particules les forces gravitationnelles.
- Argiles : La dimension d'un de ses axes est bien plus petit que dans les autres directions. Prédominent sur les particules des forces électromagnétiques.

Physico-chimique des argiles : Des particules chargées électriquement capables d'adhérer à des couches d'eau (double couche de diffusion) Sur les particules d'argile agissent des forces d'attraction entre les masses (Vont der Wal) et de répulsion entre les charges électriques de la double couche de diffusion.

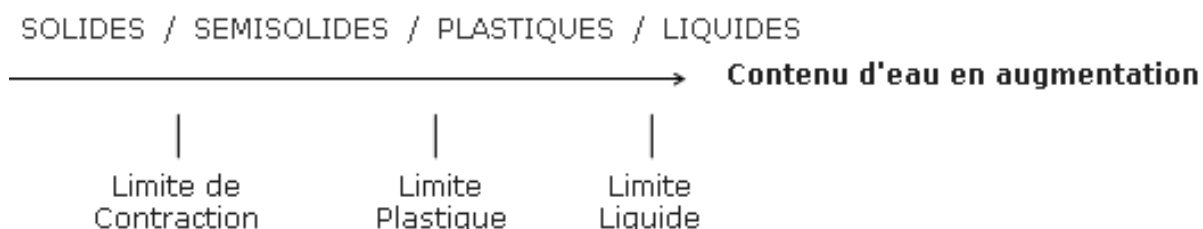
En fonction de qui prédomine s'organisent les structures :

- Floconneuse : Dominent les forces d'attraction sur celles de répulsion.
- Dispersée : Dominent les forces de répulsion sur celles d'attraction.

Tout ce qui précède donne naissance au phénomène "Plasticité", caractéristiques propres des sols argileux (argiles)

Plasticité: propriété des sols à grains fins avec contenu de minéraux argileux qui permet d'être remodelés en présence d'une certaine teneur en eau, sans s'effriter.

En dépendance de la teneur en eau (humidité) la nature du comportement du sol est arbitrairement classée en quatre états de base :



Limite liquide: "Méthode de Casagrande"

Limite Plastique: "Mettre la terre en forme de doigts "

Classification des sols: Basée sur les essais de granumélométrie et de plasticité, elle donne une idée générale du comportement mécanique des sols.

Système Unifié de Classification des Sols: (SUCS) Casagrande

Graves (G)

- W - Bien granulée
- P - Pauvrement granulée
- M - Limoneux
- C - Argileux

Sables: (S)

- W - Bien granulée
- P - Pauvrement granulée
- M - Limoneux
- C - Argileux

Graves sables: C'est quand plus de 50% du matériau en poids est retenu par la maille No200.

Graves: C'est quand plus de 50% de la partie la plus grosse est retenue par la maille No4.

Sable: C'est quand plus de 50% du matériau en poids est retenu par la maille No4.

Limons: En dessous de la ligne A de la carte de plasticité.

Argiles: Au dessus de la ligne A de la carte de plasticité.

Limons:

- ML-limon de faible compressibilité
- MH- limon de haute compressibilité

Argiles:

- CL- argiles de faible compressibilité
- CH - argiles de haute compressibilité

Si la limite liquide est supérieure à 50%: haute compressibilité

Si la limite liquide est inférieure à 50%: faible compressibilité

_ Système de classification AASHTO (Anciennement HRB)

Son usage est mondialement utilisé pour la construction des routes :

- Sols épais: Quand plus de 35% est retenu au tamis 200.
- Sols fins: Quand moins de 35% est retenu au tamis 200.
- Sols épais: A-1; A-3 y A-2.
- Sols fins. A-4; A-5; A-6 y A-7.
- Tourbes: A-8.

On entre dans la table de la gauche à droite et d'en haut en bas, jusqu'à rencontrer le premier groupe et sous groupe qui correspond en accord avec les données de granulométrie et de plasticité.

Il faut utiliser le concept d'indice de groupe (IG) qui est un numéro entier entre 0 et 20 et se termine par le sous groupe. Par exemple A-7-6 (18).

$$IG=0.2a+0.005ac+0.01bd$$

a y b sont obtenus en fonction des paramètres de granulométrie (maille No.200),

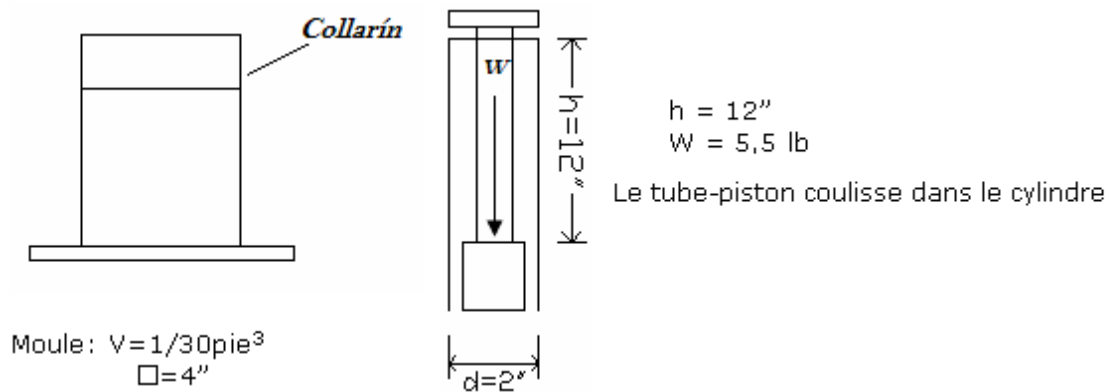
c y d sont obtenus en fonction des paramètres de plasticité (limite liquide et limite plastique).

L'indice de groupe définie, à l'intérieur d'un même sous groupe, la qualité du matériau comme matériau de base pour les routes. Plus le chiffre est grand moins bon est le sol pour la construction de routes.

Amélioration des sols et modification du terrain

- Compactation.-(le + ancien et le + économique).
- Vibro flottaison.
- Pré compression.
- Drains de sables.
- Stabilisation mécanique .
- Stabilisation chimique : chaux-ciment-acide formique-cendres.

Toute stabilisation mécanique ou chimique de sol oblige implicitement l'usage de la compactation, d'ou l'importance du thème.



Le moule est $\phi = 4''$, avec un volume de $1/30 \text{ pie}^3$. Un cylindre de sol est rentré dans le cylindre en 3 couches successives à peu près égales. Chaque couche est compactée avec 25 coups du piston, en le laissant tomber librement d'une hauteur de 12".

Énergie par unité de volume de l'essai Proctor:

$$E_c = \frac{W * h * n * N}{V} = \frac{5.5 \text{ lb} * 1 \text{ pie} * 3 * 25}{1/30 \text{ pie}^3} = 12375 \frac{\text{lb} - \text{pie}}{\text{pie}^3} \quad (1)$$

n = 3 capas

N = 25 golpes/ capa

Si nous appliquons l'énergie de compactation Proctor à des échantillons d'un même sol mais avec des humidités différentes, ω , nous obtenons des valeurs différentes de poids spécifiques humides, γ_f , avec le matériau contenu dans le moule.

Connaissant les valeurs de ω et γ_f de chaque échantillon compacté avec la même énergie, nous pouvons calculer le poids spécifique sec, γ_d , en appliquant l'équation:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_f}{1 + \omega} \quad (2)$$

Donde:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad \gamma_f = \frac{W}{V} \quad \gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

V = volumen del molde Proctor = $1/30 \text{ pie}^3$

Si nous utilisons les valeurs (γ_d vs ω) nous obtenons Figura 1.

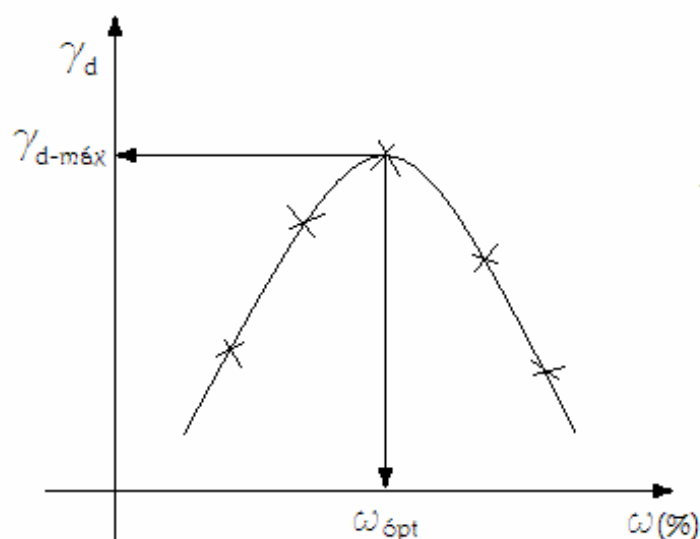


Figure 1 : Courbe de compactation Proctor

Évidemment, l'intérêt de Proctor était de réussir une très bonne compactation de la manière la plus économique. C'est pourquoi la définition d'humidité optimale contient un caractère purement économique, puisque c'est l'humidité avec laquelle on obtient un poids spécifique sec maximal avec un même coût de compactation, c'est à dire avec une même énergie.

Du graphique réalisé, avec une même énergie de compactation Proctor, on obtient ce que l'on appelle la "courbe de compactation": On observe, que dans la mesure où l'humidité augmente on obtient des poids spécifiques secs plus grands, du fait que l'eau dans les pores du sol lubrifie les particules, en provoquant un meilleur accrochage de celles-ci, jusqu'à une valeur maximale, à partir de laquelle l'augmentation d'humidité empêche, avec l'espace occupé par l'eau, que les particules soient unies. L'eau des pores absorbe l'énergie de compactation appliquée et par conséquent le poids spécifique sec diminue. La branche d'augmentation du poids spécifique sec est appelée branche sèche et celle de diminution, branche humide.

Proctor a défini comme humidité optimale, ω_{opt} , la valeur de l'humidité avec laquelle on obtient le poids spécifique sec maximal, γ_{d-max} , pour l'énergie de compactation constant de l'essai :

$$E_c = 12375 \frac{lb - pie}{pie^3}$$

Nota 1: Cet essai a été perfectionné et normalisé par l'ASTM (D-698) et l'AASHTO (T-99) comme preuve pour déterminer les relations entre la teneur en eau (humidité) et le

pois spécifique sec. Pour cela il est appelé Essai Proctor Standard. Il a été conçu pour doubler dans le laboratoire les résultats qui pouvaient être obtenus avec l'équipement utilisé communément dans la décennie des trente du siècle XX, pour la compactation de sols dans la campagne.

Le développement des équipements de compactation dans les chantiers de construction de routes en campagne a obligé à obtenir des poids spécifiques secs plus grands que par la procédure Proctor Standard, dus aux exigences dans la construction de pistes d'aéroports et barrages de terre. Pour cela on a conçu un autre essai de compactation type Proctor, appelée Proctor Modifié, basée sur le même principe, mais en variant le poids et la hauteur de chute du marteau.

$$W=10lb \quad h=18''=1.5\text{pie} \quad n=5\text{capas} \quad N=25\text{golpes/capa}$$

$$E_c = \frac{W * h * n * N}{V} = \frac{10lb * 1.5 * 5 * 25}{\frac{1}{30}} = 56250 \frac{lb - pie}{pie^3}$$

Nota 2: Note 2 : Cet essai a été perfectionné et normalisé par l'ASTM (D-1557) et par l'AASHTO (T-180). On le connaît comme Essai Proctor Modifié. On peut observer que l'énergie de compactation du Proctor Modifié est 4.55 fois l'énergie du Proctor Standard. Les résultats des deux essais de compactation Proctor : Standard et Modifié, sur un même sol, sont montrés dans la Fig 2 qui suit :

Les résultats des 2 essais de compactation Proctor: Standard et Modifié, sur un même sol, sont sur la Fig 2 ci-dessous:

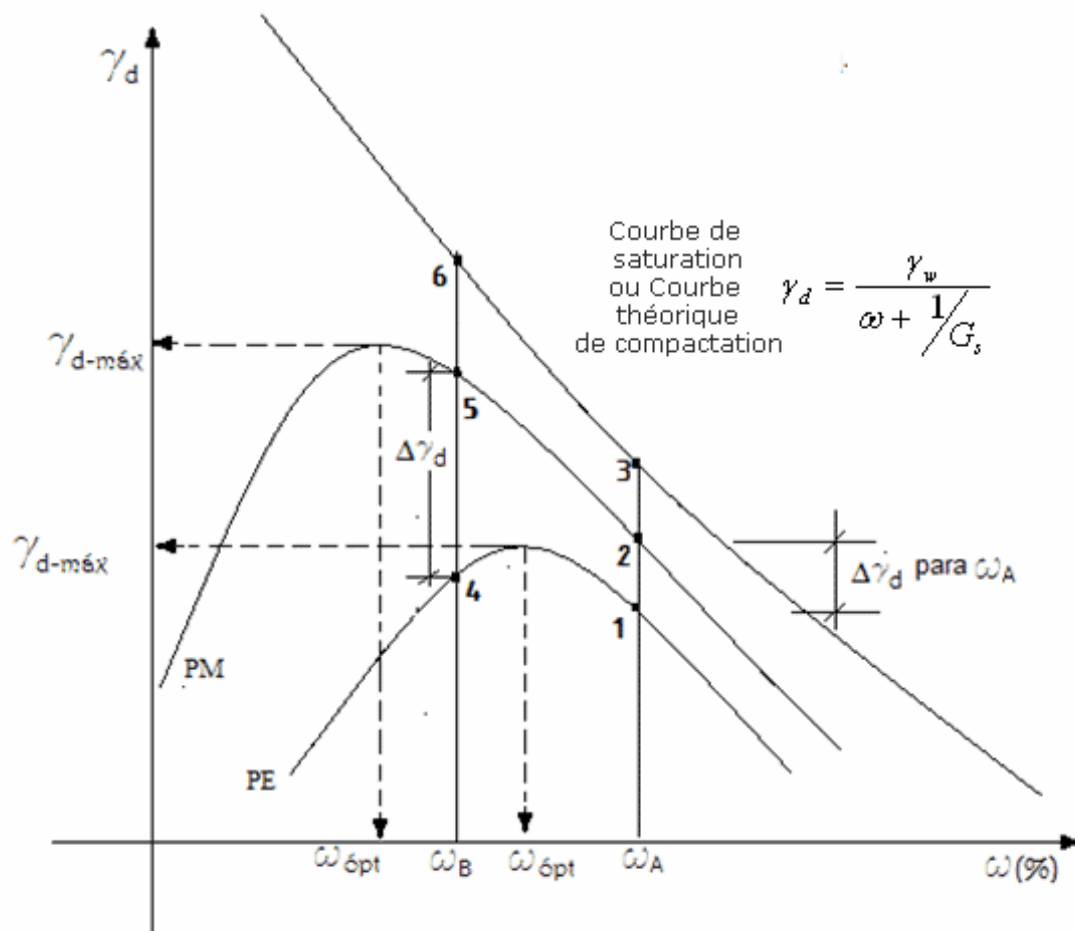


Figure 2 : Courbes de compactation Proctor Standard et Modifié et Courbe de saturation

Conclusion

Pour un même sol, l'accroissement de l'énergie de compactation implique des humidités optimales les plus petites et des poids spécifiques secs maximaux les plus grands. Les concepts de ω_{opt} et $\gamma_{d-\text{m}\acute{a}\text{x}}$ sont associés à une énergie de compactation. Par exemple, il faut dire : "l'humidité optimale et le poids spécifique sec maximal de l'énergie du Proctor Standard est....." Détermination de la courbe de saturation ($s = 100\%$) L'humidité du sol ne varie pas avec le compactation, ce pourquoi si nous compactons un sol et arrivons à éliminer tout l'air des pores on obtiendrait la saturation ; $s = 100\%$. Cette condition est exprimée par l'expression : (Voir Figure 2)

1. Pour un même sol, l'augmentation de l'énergie de compactation implique un minimum d' humidité maximum et des poids spécifiques secs maximum les plus élevés.

2. Les concepts de w_{opt} et gd_{max} sont associés à l'énergie de compactation. Par exemple, il faut dire: "l'humidité optima et le poids spécifique sec maximum de l'énergie du Proctor Standard est....."

Détermination de la courbe de saturation ($s = 100\%$)

L'humidité du sol ne varie pas avec la compactation, c'est ainsi que si nous compactons un sol et réussissons à éliminer tout l'air des pores on arriverait à la saturation; $s = 100\%$. Cette condition s'exprime suivant la formule: (Voir Figure 2)

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{\omega + 1/G_s} \quad (3)$$

Donde:

γ_w = Peso específico del agua = 10kN/m³

ω = humedad, expresada en tanto por uno

G_s = peso específico relativo del las partículas sólidas

Conclusion

1. Un sol avec une certaine humidité, malgré toute l'énergie de compactation que l'on peut lui appliquer, ne peut pas atteindre le poids spécifique sec donné par l'expression (3), pour cette humidité. Cette valeur de γ_d , obtenue par l'expression (3), est appelée "*poids spécifique sec maximal théorique*".
2. La courbe de saturation ou courbe théorique de compactation des sols, est inaccessible, malgré l'application d'un maximum d'énergie de compactation.

Analyse des augmentations du poids spécifique sec avec l'énergie de compactation

En accord avec la définition d'humidité, nous voyons que celle-ci varie seulement si on lui rajoute ou élimine l'eau du sol. Par conséquent, dans le processus de compactation l'humidité du sol ne varie pas et l'accroissement d'énergie de compactation provoque un accroissement du poids spécifique sec, γ_d ; soit, sur le graphique de (γ_d vs ω), (voir Figure 2), si l'humidité du sol est ω_A et si on augmente l'énergie à l'équivalent à l'essai du Proctor Standard, on atteint le poids spécifique sec représenté par le point 1.1.- Si on augmente l'énergie jusqu'à arriver à l'équivalent de celle du Proctor Modifié, on atteindrait le poids spécifique sec représenté par le point 2. -

Avec cette même humidité w_A , malgré que l'on augmente beaucoup l'énergie de compactation, il n'est pas possible d'arriver au point 3 qui appartient à la courbe de saturation ou courbe théorique de compactation, inaccessible et impossible, comme il a été déjà mentionné.

On déduit donc, qu'avec l'humidité w_A , l'accroissement du poids spécifique sec Δw , qui est obtenu en augmentant l'énergie du Proctor Standard au Proctor Modifié (point 1 à le 2) est petit.

D'autre part, si l'humidité du sol est w_B et si on augmente l'énergie à l'équivalent de l'essai Proctor Standard, on atteint le poids spécifique sec représenté par le point 4. Si nous continuons à augmenter l'énergie jusqu'à arriver à l'équivalent du Proctor Modifié, on atteindrait le poids spécifique sec représenté par le point 5. - Avec cette même humidité w_B , le point 6 est aussi inaccessible et impossible, malgré le maximum d'énergie appliquée sur le sol. Dans ce cas, en effet on obtient un accroissement appréciable du poids spécifique sec, quand on augmentera l'énergie du Proctor Standard à celle du Proctor Modifié.

Conclusion

3. En partant du fait que l'accroissement de l'énergie de compactation signifie un accroissement des coûts, les sols avec de hautes humidités (plus grands que w_{opt} du Proctor Standard) ne nécessitent pas de grandes dépenses d'énergie pour les compacter par exemple en appliquant le Proctor Modifié ; toutefois, les sols avec des faibles humidités ($<w_{opt}$ du Proctor Standard) c'est justifié de les compacter avec beaucoup d'énergie, similaire à celle employée pour le Proctor Modifié.

Objectifs de la compactation

Le compactation des sols n'est pas une fin en elle-même, mais un moyen pour obtenir une fin. La fin est précisément le but de la compactation, qui n'est autre que d'améliorer les propriétés mécaniques des sols : résistance à la compression et au cisaillement, à la perméabilité et à la flexibilité. La seule propriété mécanique qui n'est pas améliorée avec le compactation est l'expansion.

C'est pour cela qu'on définit aussi le compactation comme la méthode d'amélioration de sols la plus ancienne et la plus économique.

Bien que la compactation dans les chantiers: routes, pistes d'aéroports, terre pleins. retenues d'eau, etc., utilisent les mêmes procédures et équipements, les objectifs de compactation de de celles-ci diffèrent. Par exemple, l'objectif

pour lequel se compacte une route ou une piste d'aéroport, est d'atteindre des hautes résistances à la déformation, tandis que l'objectif pour lequel on compacte les parois d'une retenue d'eau est d'atteindre une grande flexibilité et une faible perméabilité.

Pour réussir à obtenir ces résultats différents, nous devons étudier comment faire varier les propriétés mécaniques, en tenant compte de l'humidité, du poids spécifique sec et de l'énergie de compactation.

Variation de la perméabilité avec l'humidité et le poids spécifique sec, pour une énergie de compactation

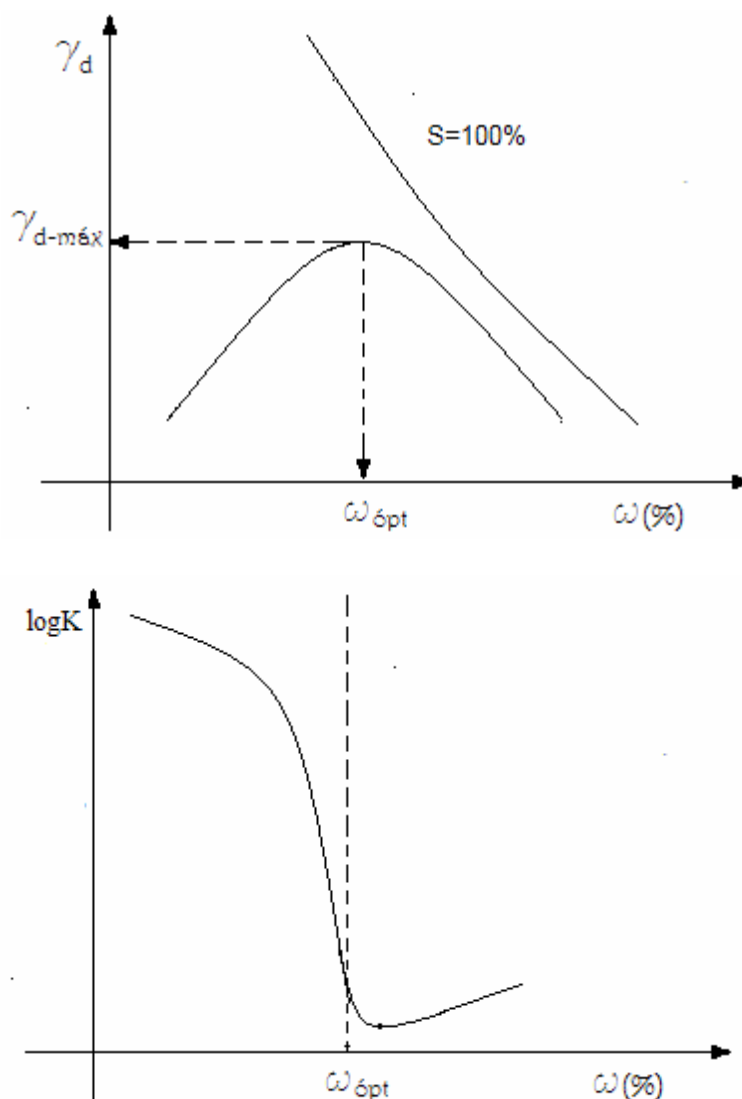


Figure 3 : Variation de la perméabilité avec l'humidité et le poids spécifique sec pour une énergie de compactation

Comme il est observé dans la Figure 3, les perméabilités les plus faibles, pour une même énergie de compactation et par conséquent pour un même

coût de compactation, sont atteintes avec des humidités légèrement supérieures à la optima de cette même énergie (2 ou 3%).

Dans tout sol argileux, en compactant avec l'énergie du Proctor Standard on atteint des perméabilités de l'ordre de 100 cm/seg au plus bas, quand ces sols sont compactés avec des humidités légèrement supérieures à ce qui est optimale, que quand ils se compactent avec des humidités légèrement inférieures.

Variation de la résistance avec l'humidité et le poids spécifique sec, pour une énergie de compactation

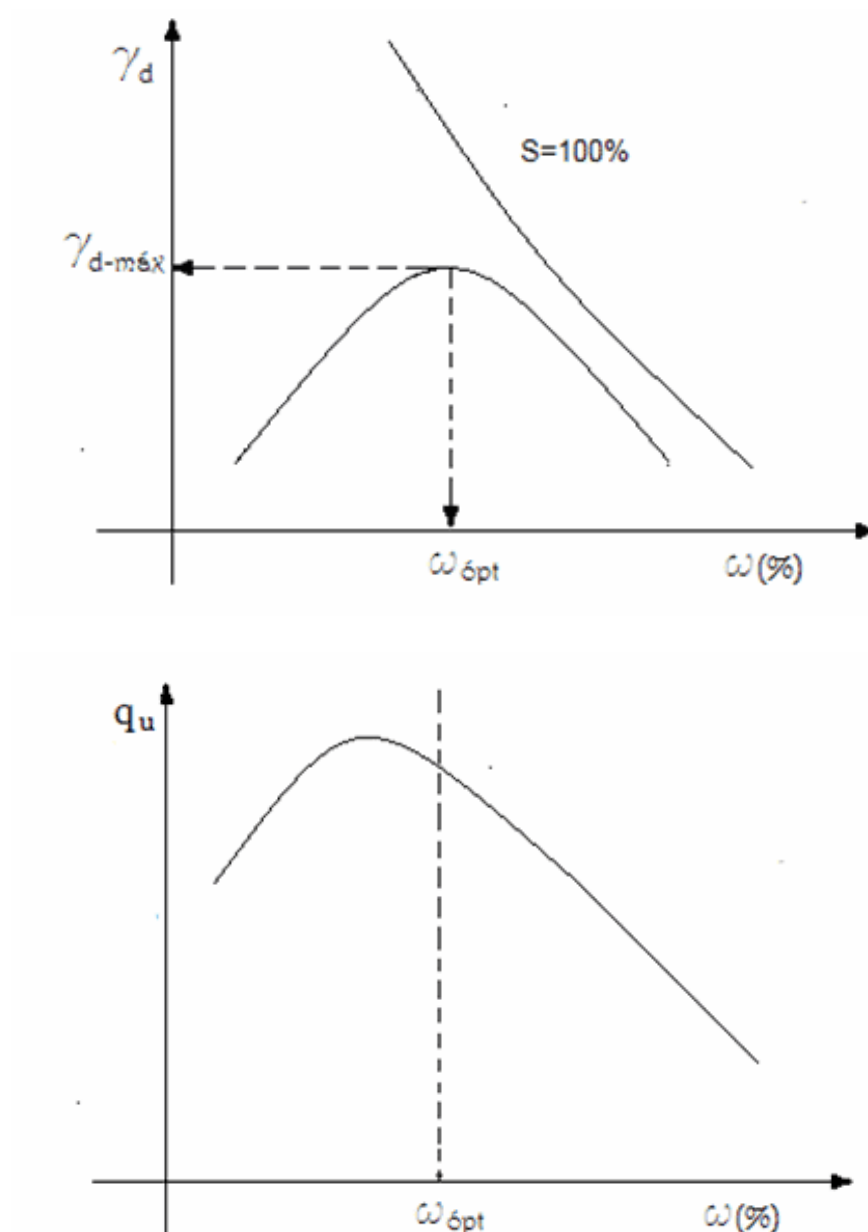


Figure 4 : Variation de la résistance avec l'humidité et le poids spécifique sec pour une énergie de compactation

L'épreuve de compression simple nous donne un indice de la résistance du sol, à la compressibilité et au cisaillement. Dans des sols argileux saturés on peut prouver que la résistance à l'éclatement, en essai rapide, est : $c=qu/2$.

Dans la Figure 4 on observe que la plus grande résistance, pour une même énergie de compactage et par conséquent pour un même coût de compactage, est atteinte légèrement avec des humidités inférieures à celui de l'énergie optimale (2 ou 3%). On observe aussi que quand on compacte avec des humidités supérieures à la optima, la résistance diminue brusquement.

Variation du degré de saturation en fonction de l'humidité et du poids spécifique sec

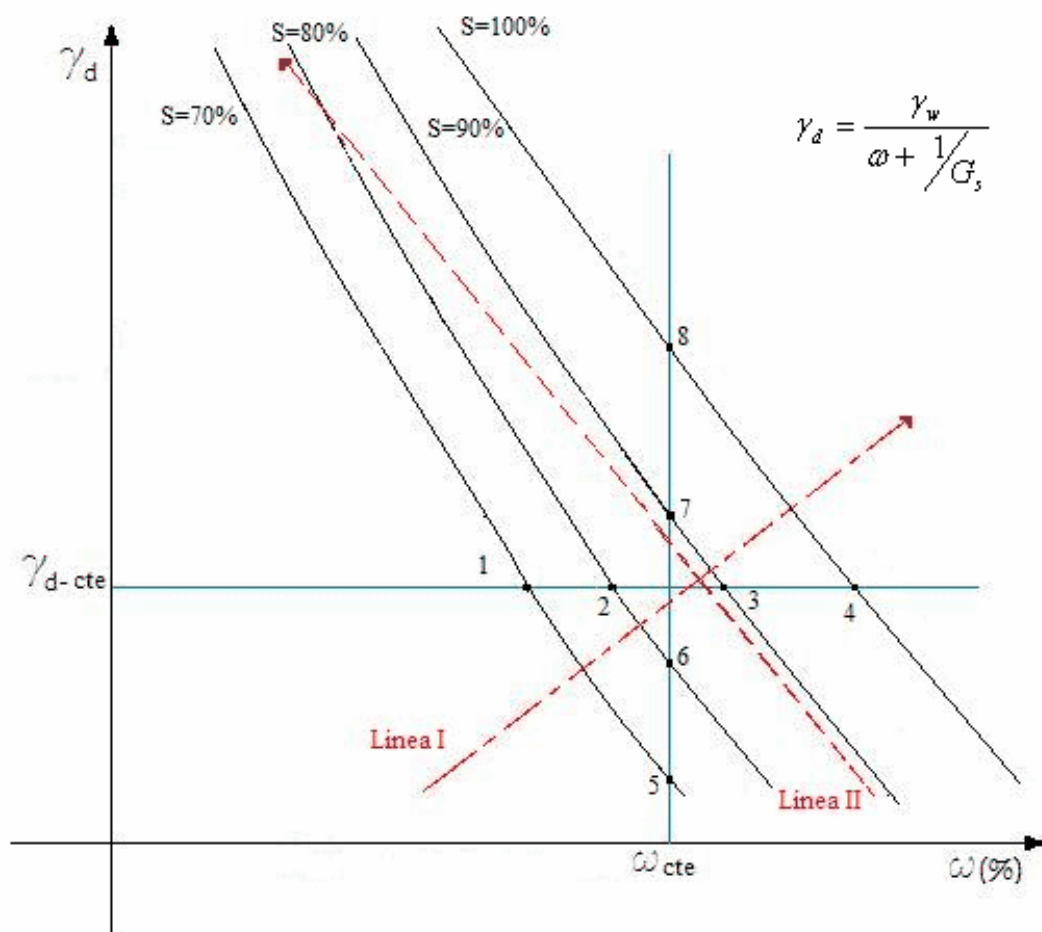


Figure 5 : Variation du degré de saturation avec l'humidité et le poids spécifique sec

Dans la Figure 5 on observe que pour un même poids spécifique sec, $\gamma_s =$ constante, au fur et à mesure qu'augmente l'humidité du sol, augmente la

saturation de ce dernier (points 1-2-3-4). Nous observons aussi dans cette figure, que pour une même humidité, $w = \text{constante}$, au fur et à mesure qu'augmente le poids spécifique sec, ou ce qui est la même chose, au fur et à mesure qu'augmente l'énergie de compactation (et ainsi le coût), est augmenté la saturation du sol (points 5-6-7 et 8).

Conclusion

1. Dans la Figure 5, la ligne I montre la direction dans laquelle augmente la résistance du sol dans la mesure ou augmente la saturation de ce dernier.
2. Dans la Figure 5 la ligne II montre la direction dans laquelle diminue la perméabilité du sol pour une saturation presque constante.

Quelle énergie de compactation utiliser?

La réponse à cette question doit être donnée en fonction des objectifs par lesquels se compacte, qui comme nous avons déjà vu, est d'améliorer les propriétés mécaniques du sol, de la manière la plus économique.

Étant donné ceci, les intérêts des constructeurs de remblais pour routes, pistes d'aviation ou plate formes stabilisées diffèrent de ceux qui construisent des retenues d'eau ou digues ou canaux. Tandis que les premiers ("Routiers") travaillent pour obtenir des remblais résistants, les deuxièmes ("Barragistes") donnent la priorité aux propriétés mécaniques de flexibilité et imperméabilité.

Pour tout cela et dans le but d'arriver à une réponse ferme à la question formulée dans cet alinéa, nous analyserons les aspects suivants qui interviennent dans chaque type de construction ou de structure de terre.

1. Sélection des sols à compacter.
2. Humidité naturelle des sols.
3. Relation entre les accroissements d'énergie et d'amélioration des propriétés mécaniques du sol, de manière économique.

"Routiers" : Pour atteindre l'objectif qui est principalement d'obtenir une plus grande résistance, il faut utiliser des sols granulaires, qui se trouvent dans la nature avec des faibles taux d'humidité, dus à la grande perméabilité de ces sols. En augmentant l'énergie de compactation on obtient des accroissements substantiels du poids spécifique sec, et par conséquent de la résistance, ce qui justifie par conséquence l'augmentation des coûts de compactation.

Conclusion

3. Les "Routiers" utilisent l'énergie de compactation de laboratoire correspondant à l'essai de compactation Proctor Modifié.

"Barragistes" : Pour atteindre l'objectif qui est principalement d'obtenir une plus grande flexibilité et une plus petite perméabilité, on utilise des sols avec du matériau "plastique" (argileux), qui se trouvent dans la nature et qui contiennent une forte humidité du à la faible perméabilité. Dans ces sols un accroissement de l'énergie de compactation augmente la rigidité du remblai, en la mettant en danger car cela augmente les risques de fissurations. A cause de cela on recommande de compacter ces remblais avec un taux d'humidité au-dessus de la Limite Plastique, qui dans l'immense majorité des sols est très proche de l'humidité optimale de l'essai Proctor Standard.

Conclusion

4. Les "Barragistes" utilisent l'énergie de compactation de laboratoire correspondant à l'essai Proctor Standard.

Compactation sur chantier

Le compactation sur chantier, tout comme celle de laboratoire, est fonction de l'humidité, du poids spécifique sec et de l'énergie de compactation. L'énergie de compactation dans la campagne dépend de de :

1. Type, poids et quantité de passes de l'équipement de compactation
2. Type de sol
3. Épaisseur des couches

Toutefois, cette énergie de compactation ne peut pas être quantifiée comme nous avons fait dans le laboratoire avec l'énergie dynamique, Proctor type, entre autres choses parce que l'énergie qui est appliquée sur le chantier est de type statique, par vibration ou pré malaxé, ou une combinaison de celles-ci dans la majorité des cas.

C'est pour cela que pour contrôler la compactation sur chantier on a recourt à un paramètre qui met en rapport le poids spécifique sec qui est atteint dans le remblai avec le poids spécifique sec maximal obtenu dans le laboratoire avec le Proctor correspondant, utilisé comme patron.

Degré de compactation

$$G_c = \frac{\gamma_d - \text{corrigé}}{\gamma_d - \text{max}} * 100$$

Tout comme les concepts humidité optimale et poids spécifique sec maximal, le degré de compactation requiert de le comparer à un patron de laboratoire : Proctor Standard ou Modifié.

Contrôle de compactation sur chantier

Le contrôle de compactation sur chantier, comme une partie du contrôle de qualité du remblai compacté, consiste à atteindre un degré de compactation dans un rang d'humidités fixées, pour garantir les propriétés mécaniques par lesquelles on devra compacter, de la manière la plus économique.

Étant donné que l'énergie de compactation à utiliser est définie par le type de propriété mécanique à améliorer ("Routiers" et "Barragistes"), le degré de compactation est fixé en fonction de l'importance économique du remblai compacté et par rapport au patron de compactation à utiliser dans le laboratoire. Par exemple, il est fixé dans les routes d'atteindre G_c 95% de l'énergie du Proctor Modifié.

Bien que dans beaucoup de projets de routes les essais se pratiquent seulement comme contrôle de compactation pour atteindre le degré de compactation souhaité, sans fixer le degré d'humidité avec lequel le résultat doit être obtenu, il est démontré que c'est une erreur grave, tant pour l'aspect technique, que pour l'aspect économique de ne pas fixer ce degré d'humidité comme un paramètre obligatoire .

Ci-dessous, un exemple de cela, observé par l'auteur dans une visite au Vietnam:

Dans le contrôle de compactation de l'étrier d'un pont sur la rivière Rouge, il est exigé d'obtenir sur le chantier, 98% de degré de compactation, hypothétiquement basés sur le Proctor Modifié, ce pourquoi on donnait des valeurs d'humidité optimale égale à 14% et le poids spécifique sec maximal égal à 1.68 GR/cm³. il s'agissait d'un sable noir (black sand). Le laboratoire a analysé deux échantillons de la couche compacté et obtenu les résultats suivants:

Échantillon N°1

$$\omega = 7\%$$

$$\gamma_d = 1.66 \text{ gr/cm}^3$$

Échantillon N°2

$$w = 9\%$$

$$\gamma_s = 1.64 \text{ gr/cm}^3$$

En accord avec les résultats, le laboratoire a accepté l'Échantillon N°1 et a rejeté l'échantillon N°2, pour le fait qu'il n'atteignait pas les 98% de compactation, quand en réalité il aurait dû rejeter les deux échantillons, qui n'atteignaient pas les propriétés mécaniques pour lesquelles ils ont été compactés, et qui ont pour but d'améliorer la résistance du sol.

Si nous analysons dans un graphique de compactation (vs), nous observons le faible degré de saturation de l'échantillon N°1, $s = 31.1\%$ et l'échantillon N° 2, $s = 38.7\%$, en comparaison avec la saturation à atteindre, de 64.3% , si on obtenait sur le chantier la condition de compactation de laboratoire (w_{opt} et gd-max).

D'autre part, pour atteindre le degré de compactation de 98%, avec des humidités aussi faibles que 7 et 9%, a dû se faire en augmentant l'énergie de compactation, et par conséquent le coût, au-dessus de l'énergie du patron de laboratoire.

Par conséquent, la couche de compactation admis pour accomplir 98% de compactation exigé, en plus de ne pas avoir les propriétés mécaniques que l'on prétendait améliorer dans ce cas, a été obtenue avec un plus grand coût du compactation.

Si le constructeur avait augmenté l'humidité de compactation jusqu'à 14%, égal à la w_{opt} et il aurait utilisé une énergie de compactation plus basse, et il aurait obtenu des propriétés mécaniques (résistance), plus favorables, à un plus petit coût, puisqu'il est plus économique d'augmenter l'humidité que d'augmenter l'énergie de compactation.

Avec cette expérience on conclut que les "Routiers" doivent aussi exiger, outre le degré de compactation à atteindre sur chantier, le degré d'humidité avec lequel il doit être atteint, afin d'obtenir des remblais de meilleure qualité à moindre coût.

Dans le cas des "Barragistes", la fissuration étant la cause des infiltrations qui mènent à la destruction, c'est avec grand intérêt que pour le projet et la construction, le contrôle de compactation des sols utilisés doit premièrement se préoccuper du degré d'humidité exigé et deuxièmement, du degré de compactation.

Conclusion

1. Le contrôle de compactation de remblais, quel que soit l'objectif à atteindre, doit se baser pour obtenir sur chantier un certain degré de compactation correspondant à l'énergie de laboratoire, dans un rang d'humidité fixé.

Par exemple

$$\begin{array}{l}
 \text{"ROUTIERS"} \quad \left. \begin{array}{l} G_c \geq 95\% \\ W_1 \leq W \leq W_2 \end{array} \right\} \text{Proctor Modifié} \\
 \\
 \text{"BARRAGISTES"} \quad \left. \begin{array}{l} W_{opt} - 2\% \leq W \leq W_{opt} + 2\% \\ G_c \geq 95\% \end{array} \right\} \text{Proctor Standard}
 \end{array}$$