

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Analyse de la résistance au cisaillement des argiles gonflantes

Analysis of the shear strength of expansive clays

Z. Derriche & F. Bouzid – Institut de Génie Civil, USTHB, Alger, Algérie

M. Tas – Institut de Génie Civil, Université de Blida, Algérie

RESUME: Il a été longtemps observé que le gonflement d'un sol expansif s'accompagne toujours d'une diminution substantielle de sa résistance au cisaillement. Sur la base d'une investigation expérimentale en laboratoire, on analyse dans cette étude, la résistance au cisaillement de sols compactes, testés sous différentes conditions physico-chimiques. On effectue une comparaison entre les caractéristiques de gonflement de ces sols mesurées à l'oedomètre et la résistance au cisaillement obtenue par des essais de cisaillement annulaire (Bromhead). On met en évidence une importante influence des phénomènes physico-chimiques sur le gonflement et de la même manière sur le cisaillement des sols étudiés. On propose des relations phénoménologiques intéressantes entre le gonflement et la résistance au cisaillement des sols gonflants.

ABSTRACT: The swell of an expansive soil is always accompanied by a substantial reduction of its shear strength. The results of a large laboratory experimental research are taken as a basis to analyse the shear strength of compacted soils subjected to different physico-chemical conditions. A comparison is made between the swell characteristics measured in a consolidometer on one hand and the shear strength given by a ring shear apparatus on the other hand. We show an important influence of the physico-chemical conditions on the swell behaviour as well as on the shear behaviour of the soils analyzed. We propose some interesting phenomenological relations between swell and shear behaviours of expansive clays.

1 INTRODUCTION

Le gonflement d'un sol s'accompagne toujours d'une réduction substantielle de sa résistance mécanique. Muller-Vonmoos et Loken (1989) attribuent cette réduction de la résistance au cisaillement à l'affaiblissement des forces interparticulaires qui régissent la cohésion argile-eau et de manière concomitante à l'augmentation des forces de répulsion interparticulaires. En l'absence de contraintes mécaniques, ces variations des forces d'attraction/répulsion sont une expression directe de phénomènes physico-chimiques qui se développent entre les particules argileuses.

Le problème du stockage des déchets domestiques et industriels a mandaté la compréhension des phénomènes qui lient les caractéristiques géotechniques des sols à la chimie des espèces contenues dans les déchets. A cet effet, de nombreuses études ont analysé les effets de la chimie des lixiviats de décharge sur la compressibilité, la conductivité hydraulique et le gonflement des argiles compactées. Cependant très peu de travaux se sont penchés sur la perte de résistance au cisaillement qui se produit lors du gonflement d'un sol expansif (Holtz et Gibbs, 1956).

Par ailleurs, la droite de Mohr-Coulomb est utilisée en pratique pour toutes les études touchant à la résistance au cisaillement des sols irrespectivement de la nature de ces sols. Même si cette approximation est acceptable pour différentes catégories de sols, une évidence expérimentale a permis de montrer qu'elle était loin de l'être pour les sols argileux généralement et pour les sols gonflants plus spécifiquement (Mitchell, 1993). Pour ces sols la non linéarité de la courbe de rupture est manifeste. Sur la base de résultats d'essais de cisaillement direct (Karti, 1978) et de cisaillement triaxial (Babu-Shanker et al., 1990), une relation bilinéaire entre la résistance au cisaillement et la contrainte de confinement a été proposée pour les argiles gonflantes.

Concernant l'importance de l'impact des conditions physico-chimiques sur la résistance au cisaillement des sols les conclusions ne sont pas encore tranchées. Bjerrum (1965) a montré que la résistance au cisaillement (mesurée in-situ) d'argiles marines norvégiennes décroît avec la concentration saline du milieu interstitiel. Par ces travaux, Bjerrum a mis en

évidence l'effet du lessivage des sols par les eaux de ruissellement sur leur résistance au cisaillement. Pour sa part, Sridharan et al (1973) a montré une nette diminution de la résistance drainée (mesurée à la boîte) de la kaolinite et de la montmorillonite avec la constante diélectrique du fluide interstitiel. Cette diminution traduit distinctement l'influence des attractions interparticulaires sur la résistance des argiles testées. Par ailleurs, Mesri et Olson (1970) ont montré que la courbe de rupture de la montmorillonite n'est pas affectée par la concentration en électrolytes du milieu interstitiel du moins dans la gamme des concentrations qu'ils ont utilisées (0.001 à 0.1 N). Ces résultats ont permis à ces auteurs de suggérer que les mécanismes qui génèrent la résistance au cisaillement des argiles sont indépendants de la composition chimique du milieu interstitiel.

Sur la base de résultats d'essais de cisaillement annulaire, et de gonflement on avance des interprétations à même d'éclaircir les relations phénoménologiques qui existent entre le gonflement et la résistance au cisaillement des sols expansifs.

2 ANALYSE DE LA COURBE DE RUPTURE

2.1 Matériaux utilisés

Pour ce volet de l'étude on a utilisé des mélanges à différentes proportions de bentonite et de sable. La bentonite est obtenue du commerce. Son origine primaire est le gisement de Mostaganem. Sa composition chimique indique une prépondérance de silice (65%) et à un degré moindre d'alumine (17%). Elle se caractérise par une plasticité relativement élevée : limite de liquidité = 196%, limite de plasticité = 33%. Le sable est d'origine marine, il provient de la plage de Douaouda dans la wilaya de Tipaza. Seule la fraction de sable dont la taille des grains est comprise entre 0.2 et 0.4 mm a été utilisée.

2.2 Préparation des échantillons, procédure d'essais

Les échantillons ont été préparés par compactage statique à une densité sèche de 1.3. Après leur introduction dans la cellule de

cisaillement cylindrique (H=40mm, D=60mm), ces derniers ont été saturés puis consolidés sous des charges allant de 20 à 500 kPa.

Une fois la consolidation achevée, les échantillons ont été cisailés à une vitesse choisie conforme au cisaillement de type CU (1mm/min).

2.3 Résultats - Discussion

Les résultats de la résistance au cisaillement non drainée obtenus pour les échantillons de sol compactés sont donnés dans la figure 1. Il ressort de ces résultats aussi bien pour les échantillons de bentonite que pour les mélanges de bentonite-sable, que la courbe de rupture n'est pas linéaire. Il se dégage aussi et d'une manière assez nette que la courbure des enveloppes de rupture diminue avec le pourcentage de sable.

Ce résultat est en parfait accord avec la conclusion de Babu Shanker et al (1990) selon laquelle la différence entre les 2 angles de frottement correspondant aux 2 branches de la courbe de rupture, considérée bilinéaire, augmente avec la compacité du matériau argileux. En effet, à densité sèche égale des mélanges bentonite-sable la densité propre de la bentonite à l'intérieur des mélanges diminue avec le pourcentage de sable.

La dépendance de l'angle de frottement de la contrainte de confinement a été vérifiée pour des sols intacts : les marnes gonflantes d'El-Achour. Ces marnes se caractérisent par une assez forte compacité, une teneur en fines comprise entre 57% et 67%, une limite de liquidité allant de 50 à 60% et un indice de plasticité entre 26 à 35%. Deux échantillons ont été testés. Le premier a été prélevé à une profondeur de 2 à 3 mètres, il a une densité sèche de 2 et une teneur en eau initiale de 23%. Le second a été prélevé à une profondeur de 19 à 20 mètres, il a une densité de 2.2 et une teneur en eau initiale de 15%.

On peut observer dans la figure 2 la nette différence de courbure des enveloppes de rupture obtenues pour les 2 échantillons testés, la courbure la plus importante correspondant à l'échantillon surconsolidé.

Les résultats de la figure 2 montrent qu'une relation bilinéaire représente une bonne approximation pour les courbes de rupture obtenues. Dans leurs travaux, Katti (1978) et Babu Shanker et al (1990) ont pu montrer que la contrainte normale correspondant au point d'intersection des 2 branches est comparable à la pression de gonflement du sol considéré.

3 ANALYSE DES EFFETS PHYSICO-CHEMIQUES

3.1 Matériaux utilisés

Dans cette partie de l'étude, on a utilisé des mélanges de bentonite et de sable et différentes solutions pour l'hydratation des échantillons. Le sable provient de la plage de Dellys. C'est un sable fin (entre 0.1 et 1 mm). Il est lavé et sèche avant utilisation. Les solutions utilisées pour l'hydratation sont des chlorures préparés à différentes concentrations. Le choix des chlorures a été dicté parcequ'ils sont prépondérants dans la nature d'une part et parcequ'ils ne donnent lieu à aucune réaction parasite en solution (Moore, 1991). On a retenu les chlorures de Sodium, de Potassium et de Calcium utilisés dans une large gamme de concentrations. Ces concentrations vont en molarité de 0 à 1 mole/l et en normalité de 0N à 1N pour les cations monovalents et de 0N à 2N pour les cations divalents.

3.2 Préparation des échantillons - procédure d'essai

Afin de garantir les mêmes conditions de départ pour tous les essais, les échantillons ont été préparés avec l'eau distillée comme liquide mouillant. Les échantillons testés au gonflement ont été préparés par compactage statique à une densité de 1.2 et une teneur en eau de 34%. Les essais de gonflement ont été réalisés conformément à la méthode du prégonflement. Pour les échantillons destinés aux essais de cisaillement annulaire, on a

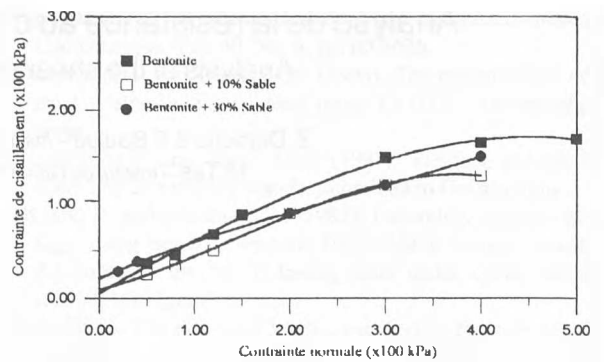


Figure 1. Courbe de rupture de mélanges bentonite - sable

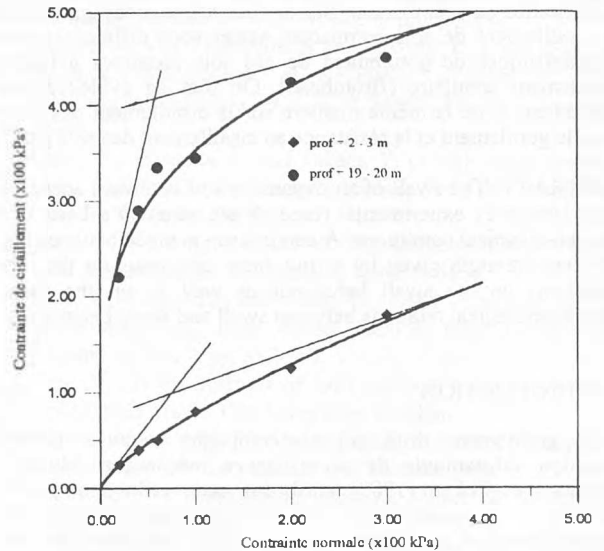


Figure 2. Courbes de rupture de la marne gonflante d'El-Achour

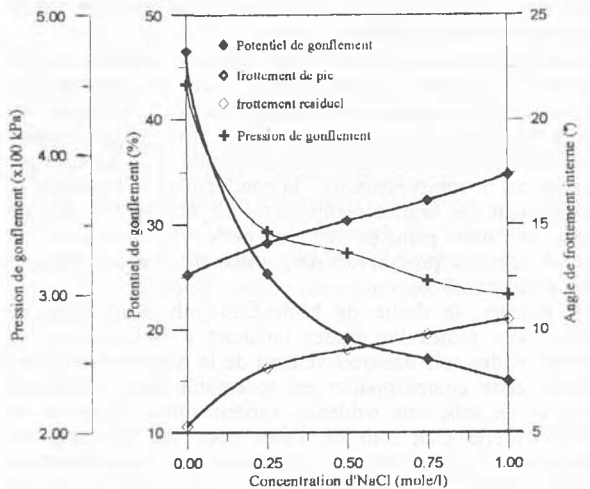


Figure 3. Effet de la concentration en NaCl sur le gonflement et l'angle de frottement de pic et résiduel de la bentonite compactée

utilisé une pâte homogène préparée à une teneur en eau proche de la limite de liquidité. L'échantillon est installé dans l'enceinte annulaire de l'appareil par une simple introduction de la pâte en utilisant une spatule.

Après la phase de consolidation, le cisaillement est réalisé en utilisant la plus faible vitesse disponible dans l'appareil (0.024d/min) jusqu'à rupture. A ce stade de l'essai, les paramètres de résistance de pic peuvent être déduits.

Pour la détermination de la résistance résiduelle, on réalise manuellement une surface de cisaillement en opérant 5 tours de manivelle. On reconsolide l'échantillon sous la charge courante pendant 24 heures avant de procéder alors avec l'opération de cisaillement en utilisant cette fois une vitesse double de la première.

3.3 Résultats - Discussion

En égard à la dépendance de l'angle de frottement de la contrainte normale démontrée ci-dessus, il est nécessaire de préciser que contrairement à l'usage, les angles de frottement déterminés dans cette section représentent non pas des valeurs ultimes, mais des valeurs initiales correspondant à la gamme des faibles contraintes.

3.3.1 Analyse de l'effet de la chimie du fluide hydratant

Parmi les fluides hydratants utilisés seuls ceux à cations monovalents ont produit des variations régulières des paramètres mesurés tant en gonflement qu'en résistance. Ces fluides ont donné des résultats comparables. Afin d'éviter de surcharger les figures, on présente uniquement les résultats obtenus avec le chlorure de sodium.

Un examen rapide de la figure 3 permet de constater la grande influence qu'exerce la concentration du fluide en cations monovalents sur les caractéristiques de gonflement (potentiel et pression) de la bentonite. Les potentiel et pression de gonflement diminuent avec la concentration du fluide hydratant. On remarque aussi que les diminutions du potentiel et de pression s'opèrent dans la plage des faibles concentrations (de 0 à 0.25 mole/l). Dans cette plage, le potentiel de gonflement chute de près de 50% et la pression de gonflement de 25% relativement à leurs valeurs à concentration nulle. Pour les concentrations au delà de 0.25 mole/l, les variations du gonflement sont nettement moins importantes et à la limite potentiel et pression de gonflement devraient tendre vers des paliers de stabilisation. Par ailleurs, la forme de la relation gonflement-concentration, tout comme la relation plasticité-concentration non présentée ici, permet d'indiquer que le potentiel de gonflement, suit une loi analogue à celle donnant l'étendue moyenne de la double couche diffuse (Derriche, 1994).

Les résultats de cisaillement réalisés avec les mêmes fluides hydratants présentés dans la même figure, montrent que la résistance au cisaillement de pic et résiduelle est elle aussi particulièrement affectée par la concentration du fluide hydratant utilisé. Ces résultats montrent que la résistance augmente avec la concentration des fluides en cations. En effet, l'angle de frottement de pic passe de 12 à 17.5 et l'angle résiduel de 5.3 à 10 lorsque la concentration passe de 0 à 1 mole/l. Il apparaît aussi d'après les résultats de la figure 3, que l'influence de la concentration sur la résistance résiduelle est plus importante que sur la résistance de pic dans la plage des faibles concentrations. Les résultats trouvés dans cette étude sont en parfait accord avec ceux de Sridharan et al. (1973) selon lesquels la résistance de pic des argiles augmente avec la diminution de la constante diélectrique du fluide interstitiel. La constante diélectrique des solutions électrolytiques diminue avec la concentration de la solution.

La dépendance de la résistance résiduelle des conditions physico-chimiques mise en évidence par de nombreux auteurs (Kenney, 1967 ; Muller-Vonmoos, 1989) est confirmée dans les résultats de la figure 3.

3.3.2 Comportement des mélanges bentonite-sable

Les résultats de cette partie sont résumés dans la figure 4. On peut directement constater à partir de ces résultats que le gonflement mesuré pour les mélanges augmente avec la teneur en argile suivant une loi puissance conforme à celle introduite par Seed et al. (1962). De la même manière la pression de

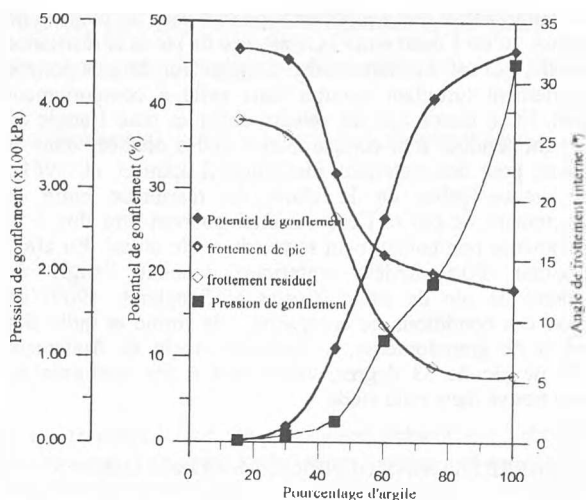


Figure 4. Comportement des mélanges bentonite-sable en gonflement et en résistance au frottement.

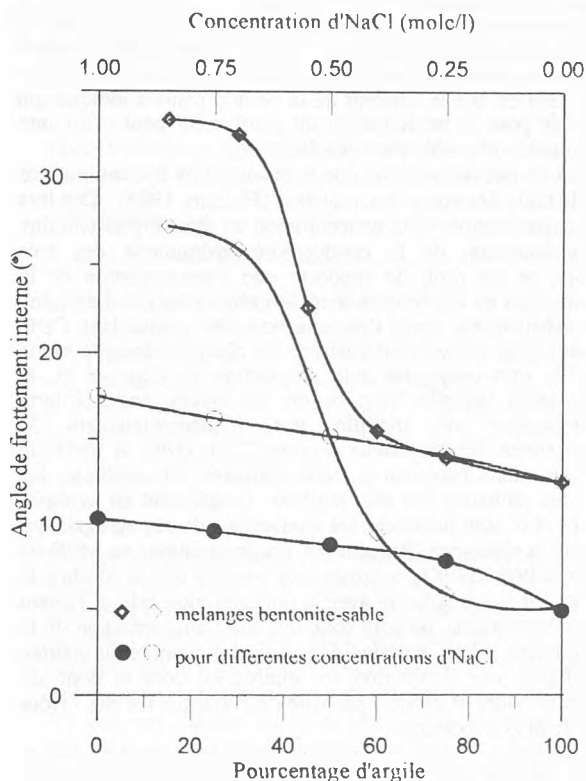


Figure 5. Comparaison de l'effet de l'ajout granulaire à celui de la concentration du fluide hydratant sur la résistance des sols testés.

gonflement augmente avec la teneur en argile suivant une relation puissance tout à fait classique (Seed et al, 1962).

Par ailleurs, on retrouve dans la figure 4, l'allure des courbes exprimant l'influence de la fraction argileuse sur le frottement de pic et le frottement résiduel des mélanges bentonite-sable trouvée par de nombreux auteurs (Kenney, 1967 ; Lupini et al., 1981). On peut en effet distinguer sur ces courbes les trois plages de comportement telles que présentées par ces auteurs. On retrouve la zone de comportement turbulent dans laquelle la fraction argileuse étant faible exerce très peu d'effet sur la résistance, la zone de comportement glissant dans laquelle la fraction argileuse importante masque quelque peu la présence du sable et la zone de comportement intermédiaire ou transitoire dans laquelle une faible variation de la composition influe considérablement sur la résistance.

Un fait toutefois assez marquant apparaît dans les courbes de résistance : c'est l'écart entre la résistance de pic et la résistance résiduelle, qui est du même ordre de grandeur dans la zone à comportement turbulent comme dans celle à comportement glissant. Etant donné que les valeurs obtenues pour l'angle de frottement résiduel sont comparables à celles données dans la littérature pour des matériaux identiques (Lupini et al, 1981), cette quasi-égalité de la chute de résistance entre le comportement de pic et l'état résiduel pourrait être due à la granulométrie particulièrement serrée du sable utilisé. En effet, l'utilisation d'un modèle empirique donnant l'angle de frottement de pic de sable (Costet et Sanglerat, 1969) en fonction des conditions de compacité, de forme et taille des grains et de granulométrique, a donné un angle de frottement interne de pic de 33 degrés, valeur tout à fait conforme au résultat trouvé dans cette étude.

4 INTERPRETATIONS GENERALES-CONCLUSIONS

Sur la base des résultats donnés dans la figure 5, on compare l'importance de l'effet sur la résistance (de pic et résiduelle) de la composition granulaire et de la composition chimique du fluide hydratant. La représentation des données sur cette figure permet de mettre facilement en évidence une influence égale à plus importante de la concentration d'électrolytes sur la résistance comparée à celle de la teneur en sable dans la gamme des faibles concentrations (0-0.25 mole/l) et teneurs (0-40%) en sable. Est-ce que le concept de la double couche ionique qui est valide pour la modélisation du gonflement peut offrir une interprétation plausible à ces résultats.

Il est de nos jours admis que la conductivité hydraulique est liée à la taille des voies de circulation (Halitim, 1984). Dès lors que l'augmentation de la concentration en électrolytes entraîne une amélioration de la conductivité hydraulique des sols argileux, on est droit de supposer que l'augmentation de la concentration en électrolytes dans le milieu interstitiel entraîne des modifications dans l'organisation des particules. Cette supposition se trouve confortée par les résultats de cette étude lorsqu'ils sont conjugués à la proposition de Chauvel et al (1976) selon laquelle "tout ce qui ne touche pas à l'unité morphologique ne modifie pas fondamentalement le comportement des matériaux argileux". En effet, la particule argileuse existe rarement à l'état primaire. En pratique, les particules primaires des sols argileux s'organisent en agrégats ou flocs et ce sont justement les interactions de ces agrégats qui génèrent la résistance. Par ailleurs, les observations au MEB de Tessier et Pedro (1981) ont permis de montrer que le nombre de feuillets par floc augmente avec la concentration saline. Partant de ces observations, on peut conclure que l'augmentation de la concentration saline entraîne dans un sol à quantité de matière sèche égale, une diminution du nombre de flocs et donc du nombre de vides et produit par voie de conséquence des vides de taille plus importante.

En somme, selon le concept de la double couche ionique, l'augmentation de la concentration du fluide hydratant limite l'étendue de la double couche et favorise le rapprochement et donc l'agrégation des particules. Ce qui peut expliquer la diminution du gonflement, l'augmentation de la conductivité hydraulique, la diminution de la compressibilité et l'augmentation de la résistance avec la concentration.

Toutefois on peut penser qu'à de fortes contraintes normales, les doubles couches n'ayant pas la possibilité de se former, les liaisons à caractère physico-chimique, si elles peuvent exister, sont détruites et annulées et ainsi l'impact des conditions physico-chimiques sur la résistance développée ne peut pas être observé (Olson, 1974).

Il n'en demeure pas moins que les structures légères (routes, talus, membranes d'imperméabilisation de sites de décharge ...) font travailler le sol dans la gamme des faibles contraintes. Lorsque ce sol est gonflant, cette étude a montré que la conception de telles structures doit attacher une attention toute particulière aux caractéristiques physico-chimiques du milieu.

REFERENCES

- Babu Shanker N., V. Sai Krishna & A. Nagender Rao 1990. Shear strength characteristics of expansive clays. *Indian Geotechnical Journal* 20(3):225-232.
- Bayoumi et al 1995. Effect of chemical constituents on the shear strength of soil. *Proc. 11th. ARCSMFI*: 522-534. Cairo, Egypt.
- Bjerrum, L. 1954. Geotechnical properties of norwegian marine clays. *Geotechnique* 4: 49-69.
- Bromhead, F. N. 1979. A simple ring shear apparatus. *Ground Engineering* 12:40-44.
- Chauvel, A., G. Pedro & D. Tessier 1976. Rôle du fer dans l'organisation des matériaux kaoliniques. *Science du sol* 2:101-113.
- Costet, J., G. Sanglerat 1969. *Cours pratique de mécanique des sols*. tome I. Dunod.
- Derriche, Z. 1994. Influence du fluide hydratant sur le gonflement des argiles pures. *7ieme Cong. int. de AIGI*, Balkema.
- Halitim, A. 1984. *Sols des régions arides d'Algérie*. Office des publications universitaires.
- Holtz, W.G., H.J. Gibbs 1956. Engineering properties of expansive clays. *Trans. A.S.C.E.* 121:641-677.
- Katti, R. K. 1978. Search for solutions of problems in black cotton soils. 1st IGS lecture, *Indian Geot. Jl.* 9(1):1-78.
- Kenney, T.C. 1967. The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils. *Proc. Geot. Conf. Oslo* 1:123-129.
- Lupini, J.F., A.E. Skinner & P. R. Vaughan 1981. The drained residual strength of cohesive soils. *Geotechnique* 31:181-213.
- Mesri, G., R.E. Olson 1970. Shear strength of montmorillonite. *Geotechnique* 20:261-270.
- Mitchell, J. K. 1993. *Fundamentals of soil behaviour*. 2nd edition. John Wiley & Sons.
- Moore, R. 1991. The chemical and mineralogical control upon the residual strength of pure and natural clays. *Geotechnique* 41:35-47.
- Muller-Vonmoos, M., T. Loken 1989. The shearing behaviour of clays. *Applied clay sciences* 4:125-141.
- Olson, R.E. 1974. Shearing strengths of kaolinite, illite and montmorillonite. *J. Geotech. Eng. Div.*, GT11:1215:1229.
- Seed, H.B., R.J. Lundgreen & R. Lundgren 1962. Prediction of swelling potential for compacted clays. *Jl. Soil Mech. Found. Div. ASCE* 90, SM4:107-131.
- Sridharan A., G. Venkatappa Rao 1973. Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of the effective stress concept. *Geotechnique* 23:359-382.
- Tessier, D., G. Pedro 1981. Electron microscopy of Na smectite. role of layer charge, salt concentration ... *Inst. clay conf.* Elsevier, 165-176.