



HAL
open science

Etude fiabiliste de la liquéfaction du sol

Souad Benahchilif, Djawad Zendagui, Salah Bouguerba

► **To cite this version:**

Souad Benahchilif, Djawad Zendagui, Salah Bouguerba. Etude fiabiliste de la liquéfaction du sol. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167740

HAL Id: hal-01167740

<https://hal.science/hal-01167740>

Submitted on 24 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude fiabiliste de la liquéfaction du sol

Benahchilif Souad¹, Zendagui Djawad², Bouguerba Salah Eddine³

1 Département de Génie Civil, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Abou Bakr Belkaid BP 813 nesouad@yahoo.fr

2 Département de Génie Civil, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Abou Bakr Belkaid BP 813 medjawad@hotmail.com

3 Département de Génie Civil, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Abou Bakr Belkaid BP 813 swilah32@gmail.com

RÉSUMÉ. L'application de l'analyse probabiliste de liquéfaction n'est pas encore une pratique courante dans la communauté de l'ingénierie géotechnique. Pourtant, des calculs de fiabilité offrent un moyen d'évaluer les effets combinés d'incertitudes, et un moyen de distinguer entre les conditions où les incertitudes sont élevés ou faibles. La méthode simplifiée proposée par Seed et Idriss (1971) est la plus utilisée pour évaluer le potentiel de liquéfaction dans un dépôt de sol. En utilisant la méthode déterministe, le sol est liquéfiable si le coefficient de sécurité est inférieure à 1, pas de liquéfaction si $FS > 1$. Pour tenir compte des aléas et incertitude inhérents aux différents paramètres, la théorie de la fiabilité est actuellement de plus en plus utilisées en géotechnique. Pour une application de cette méthode, la cité de Boumerdes a été investiguer pour la liquéfaction du sol. L'analyse à été effectuée en appliquant la méthode FORM.

ABSTRACT. The application of probabilistic liquefaction analysis is not yet a common practice in geotechnical engineering community. However, reliability calculations provide a way to evaluate the combined effects of uncertainties, and a way to distinguish between conditions where the uncertainties are high or low. The simplified method proposed by Seed and Idriss (1971) is the most used to evaluate the liquefaction potential in a soil deposit. Using the deterministic method, the ground is liquefiable if the safety factor is less than 1, no liquefaction if $FS > 1$. To take account of risks and uncertainties inherent to different parameters, reliability theory is being increasingly used in geotechnical engineering. For an application of this method, the city of Boumerdes was to investigate soil liquefaction. The analysis was carried out by applying the method FORM

MOTS-CLÉS : Fiabilité, Liquéfaction, Corrélation, Form.

KEY WORDS: Reliability, liquefaction, correlation, Form.

1. Introduction

La liquéfaction des sols est un phénomène d'instabilité ou de perte de résistance qui peut avoir lieu sur un milieu généralement granulaire saturé ou partiellement saturé. Elle se manifeste par une augmentation de la pression interstitielle liée au comportement contractant du sol lors de l'application d'un chargement rapide (séisme, chocs, raz de marée, etc.). Le phénomène de liquéfaction est à l'origine d'une brusque instabilité des sols qui en s'écoulant sous l'effet de la pesanteur et les charges peuvent alors provoquer des dommages irréparables aux ouvrages et structures situés à proximité.

L'occurrence de la liquéfaction dans les sols est souvent évaluée suivant le procédé simplifié à l'origine proposé par Seed et Idriss (1971) basés sur l'essai de pénétration standard (SPT), qu'il est possible de caractériser le potentiel de liquéfaction d'un sol en fonction de deux paramètres : un paramètre de résistance mécanique (donné par le SPT) et un paramètre granulométrique (classification des sols, pourcentage en fines).

La méthode simplifiée proposée par Seed et Idriss (1971) est la plus utilisée pour évaluer le potentiel de liquéfaction dans un dépôt de sol. En utilisant la méthode déterministe, le sol est liquéfiable si le coefficient de sécurité est inférieure à 1, pas de liquéfaction si $FS > 1$.

Ce facteur est souvent appelé facteur d'ignorance car il représente notre ignorance des incertitudes des différents paramètres, pour tenir compte des aléas et incertitude inhérents aux différents paramètres, la théorie de la fiabilité est actuellement de plus en plus utilisées en géotechnique. Ceci est devenu possible grâce aux avancées importantes au niveau de la quantification des incertitudes des paramètres du sol.

2. Approche déterministe de la liquéfaction des sols

La charge sismique causant la liquéfaction du sol est généralement exprimé en termes de rapport de la contrainte cyclique (CSR) par : (Seed et al)

$$CSR = 0,65 \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \frac{a_{max}}{g} r_d / MSF \quad [1]$$

Ou :

a : L'accélération maximale induite par le tremblement de terre

σ_v : La contrainte verticale totale (kPa).

σ_v' : La contrainte verticale effective (kPa) .

g : l'accélération de la pesanteur

r_d : coefficient de réduction décroissant avec la profondeur.

Tokimatsu et Yoshimi ont proposé une relation simple pour le coefficient r_d :

$$r_d = 1 - 0,015Z \quad [2]$$

La formule de MSF donnée par Youd et Idriss (2001) comme suit:

$$MSF = 10^{2.24} / M^{2.56} \quad [3]$$

M : La magnitude du moment

La deuxième étape des procédés simplifiés est de déterminer le rapport de résistance cyclique (CRR) du sol. Le CRR représente la résistance de liquéfaction du sol. Les méthodes utilisées pour déterminer la résistance de liquéfaction est utilisant les données obtenues à partir d'essais in-situ (SPT, CPT, DMT, et la mesure des vitesses d'ondes de cisaillement...), ou à partir d'essais de laboratoire (Triaxial cyclique, cisaillement simple...).

La valeur de CRR est exprimée par la formule suivante :

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad [4]$$

Pour tenir compte de pourcentage de fine, récemment, Seed et Idriss (1997) ont proposé une correction qui a été validée par le groupe de travail du NCEER (National Centre for Earthquake Engineering Research) qui s'est tenu à Salt Lake City en Janvier 1996. Cette correction à apporter sur le $(N_1)_{60}$ est la suivante :

$$(N_1)_{60cs} = a + b(N_1)_{60} \quad [5]$$

Les valeurs a et b sont donné dans le tableau suivant.

Tableau 1. Facteurs de correction pour le passage de $(N_1)_{60}$ à $(N_1)_{60cs}$ (Seed et Idriss, 1997)

FC en %	a	b
$FC \leq 5\%$	0	1.0
$5\% \leq FC \leq 35\%$	$\exp\left[1.76 - \left(\frac{190}{FC^2}\right)\right]$	$\left[0.99 + \left(\frac{FC^{1.5}}{1000}\right)\right]$
$5\% \leq FC$	5.0	1.2

3. Modèle fiabiliste de la liquéfaction

Dans l'analyse probabiliste, une démarche appropriée pour l'évaluation de la sécurité contre la liquéfaction est l'application de l'indice de fiabilité. Cet indice exprime mieux la sécurité, que l'indice FS car il exprime la variation statistique en contrainte et résistance pour chaque paramètres.

Dans l'analyse fiabiliste de la liquéfaction du sol, la fonction de performance peut être définie par $Z=R-S$. Par conséquent, si Z est inférieur à 0 alors la fonction de performance est «instable», la liquéfaction se produit. Si Z est supérieur à 0 alors la fonction de performance est «stable», pas de liquéfaction et si Z est égal à 0, alors on est sur la frontière ou la limite entre la liquéfaction et ne liquéfaction. Nous pouvons traiter R et S comme des variables aléatoires comme il y aurait des incertitudes dans les valeurs des deux CRR et la CSR respectivement, par conséquent, la fonction de la performance de liquéfaction sera également une variable aléatoire.

La fonction de densité de probabilité et la fonction cumulative son définies par $f_z(z)$ et $F_z(z)$ respectivement. Il en résulte que la probabilité de liquéfaction (PL) peut être présenté par la zone sous $Z=R-S$ d'où:

$$P_{L=}(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f_z dZ = F_z(0) \quad [6]$$

Dans la figure, la probabilité de liquéfaction est représentée par une zone hachurée sous la courbe de densité de probabilité de la fonction $f_z(Z)$. Les paramètres de moyenne et écart type liés à la R et S sont présentés par μ_R et μ_S et σ_R , σ_S , respectivement.

Par conséquent, la μ_z moyenne, écart type σ_z et le coefficient covariance δ_z en fonction Z est calculé comme suit

$$\begin{aligned} \mu_z &= \mu_R - \mu_S \\ \sigma_z &= \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \\ \delta_z &= \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \end{aligned} \quad [7]$$

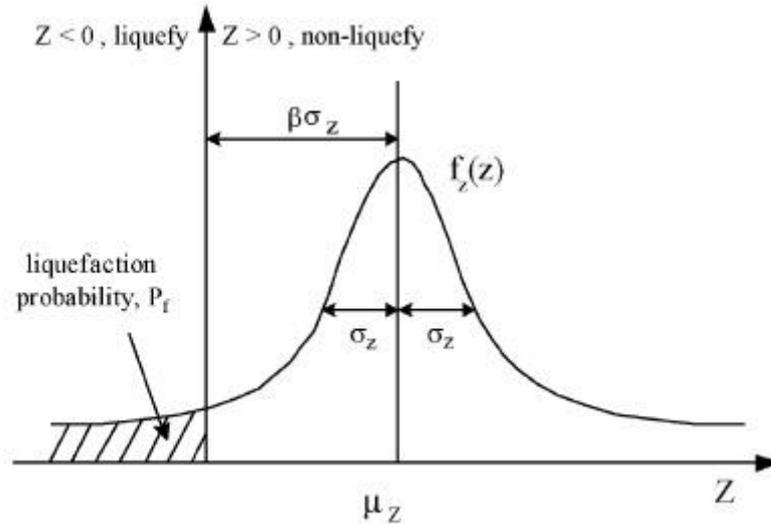


Figure 1. Variation de la densité de probabilité.

Par ces équations, le Z peut être simplement calculé, en utilisant les statistiques pour les variables de base R et S. Ceci est l'avantage de premier ordre et deuxième méthode des moments. Un indice de fiabilité β peut être écrit comme:

$$\beta = \frac{1}{\delta_z} = \frac{\sigma_z}{\mu_z} \quad [8]$$

Maintenant, si la probabilité de liquéfaction est notée P_f alors nous pouvons dire qu'il a une relation unique avec P_f et peut être utilisé comme un indice pour le calcul de la probabilité liquéfaction.

Nous pouvons donc écrire P_f :

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_z(Z) dz = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-\mu_z}{\sigma_z}\right)^2} dZ \quad [9]$$

Avec la nouvelle variable $t=(Z-\mu_z)/\sigma_z$, on obtient:

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_z}{\sigma_z}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \Phi\left(-\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) \quad [10]$$

$$PL = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad [11]$$

4. Application

Le terrain étudié est localisé à Boumerdes, cette région fait partie du tell septentrional de l'Algérie du nord. Elle est caractérisée par une forte activité sismique qui est liée à un contexte dynamique créée par la remontée de la plaque africaine contre la plaque eurasiatique.

Le séisme le plus fort qui à durement frappé la région de Boumerdes est celui du 21 Mai 2003 , et dont la magnitude était de 6.8. Suite à cet événement, Boumerdes a été classée en zone III.

Dans le but de définir la nature lithologique des couches constituant le terrain et de déterminer leur épaisseur, a été réalisé sur site (09) sondages carottés, dont 2 profonds de 12m, 4 profonds de 21m, 2 profonds de 25m et 1 profond de 32m. Le niveau de la nappe étant localisé à 7.8 de profondeur.

L'étude à été réalisée suivant les données disponible sur le site. Pour chaque profondeur, les valeurs de CSR, CRR, l'indice de fiabilité et la probabilité de liquéfaction ont été calculé.

4.1. Variable aléatoire

Dans cette étude les données du site de Boumerdes ont été collectées. Les paramètres a_{max} , M_w , σ_v , σ_v' , et $(N_1)_{60}$ sont traités comme variables aléatoires, l'accélération sismique a_{max} est nt la relation estimer en utilisant la relation empirique d'atténuation.

La fonction d'état limite est exprimée par la formule suivante.

$$g(x)=CRR-CSR=g(a_{max}, M_w, \sigma_v, \sigma_v', (N1)_{60})=0 \quad [12]$$

4.2. L'incertitude des paramètres

Pour une estimation réaliste de la probabilité de liquéfaction, l'analyse fiabiliste exige la considération de l'incertitude dans les paramètres. Pour chaque variable d'entrée, le processus impose l'estimation de la moyenne et de l'écart type si les variables sont supposées suivre une distribution normal ou lognormal.

Duncan (2000) suggère que l'écart type d'une variable aléatoire peut être obtenu par une des trois méthodes : (1) calcul direct des données, (2) une estimation basée le coefficient de variation COV, (3) une estimation basée sur « three sigma rule » (Dai and wang 1992).

Dans cette dernière, la connaissance de la grande valeur (HCV) et la petite valeur (LCV) de la variable est utilisé pour calculer l'écart type σ par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{HCV - LCV}{6} \quad [13]$$

Le coefficient de covariance de plusieurs variables ont été publiées (tableau.2) :

Tableau 2. Coefficient de variation des paramètres aléatoires

Variable aléatoire	CV	Références
$N_{1.60}$	0.10-0.40	Harr (1987) Gutierrez et al.,(2003) Phoon and kulhawy.,(1999)
FC	0.05-0.35	Gutierrez et al.,(2003)
σ_v'	0.05-0.20	Juang et al.,(1999)
σ_v	0.05-0.20	Juang et al.,(1999)
a_{max}	0.10-20 ^b	Juang et al.,(1999)
M_w	0.05-0.10	Juang et al.,(1999)

Dans notre étude, le coefficient de corrélation des cinq paramètres aléatoires est montré dans le tableau suivant :

Tableau 2. Coefficient de corrélation entre les variables

	$(N_1)_{60}$	σ_v	σ'_v	a_{max}	M_w
$(N_1)_{60}$	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
σ_v	0.00	1.00	0.95	0.00	0.00
σ'_v	0.00	0.95	1.00	0.00	0.00
a_{max}	0.00	0.00	0.00	1.00	0.90
M_w	0.00	0.00	0.00	0.90	1.00

4.3. Corrélation entre les paramètres aléatoire

La corrélation entre les variables aléatoire d'entrée doivent être considéré dans l'analyse fiabiliste. Les caractéristiques des variables aléatoires sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 3. Variables aléatoires et leurs caractéristiques

Variable aléatoire	indice	LA MOYENNE	COEFFICIENT DE VARIATION	DISTRIBUTION
$(N_1)_{60}$	X1	*	0.30	Normal
σ_v	X2	*	0.10	Normal
σ'_v	X3	*	0.15	Normal
a_{max}	X4	0.3	0.15	Normal
M_w	X5	6.3	0.15	Normal

La variation du coefficient de sécurité et Nspt en profondeur est montré dans la figure (2). Trois couches montrent un risque de liquéfaction ou le facteur de sécurité est inférieur à 1.

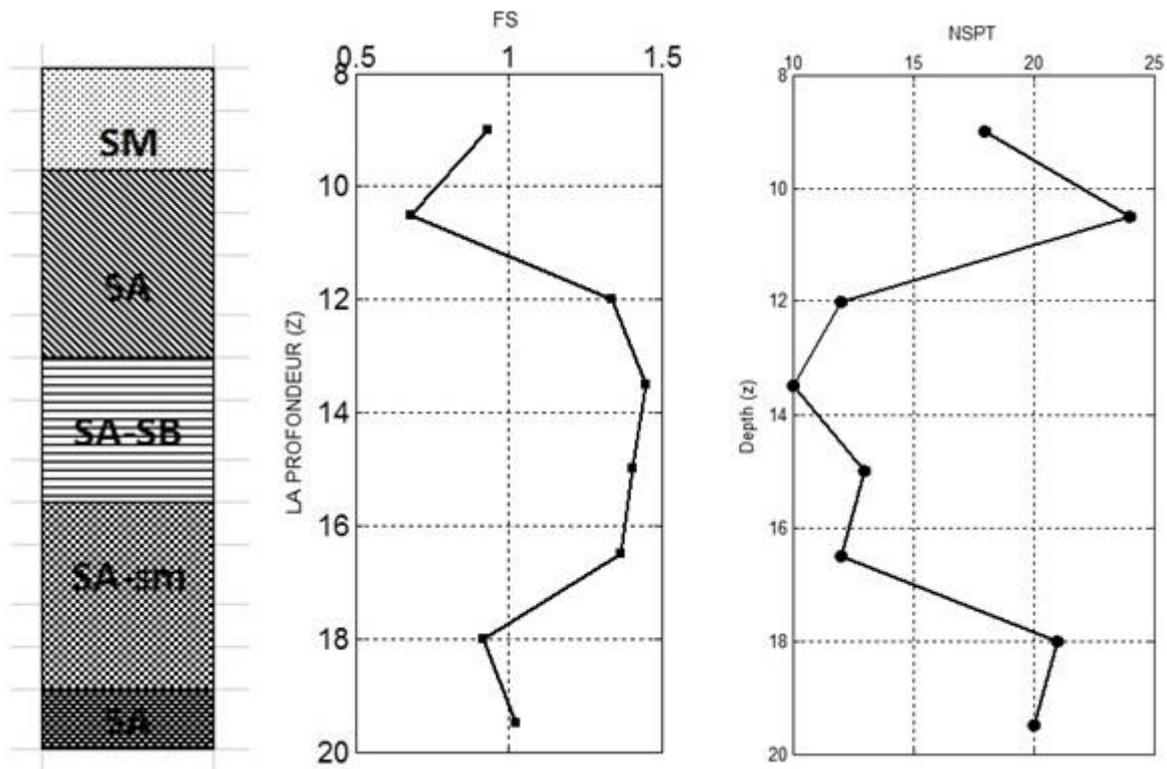


Figure 2. Variation du coefficient de sécurité et du Nspt en profondeur

Le nombre de coups mesuré était compris en général entre 10 et 30 coups, il s'agit d'un sol moyennement compact.

Pour une profondeur de 13 m, le calcul déterministe par le coefficient de sécurité est supérieur à 1, donc pas de risque de liquéfaction. Par contre, le calcul fiable par la méthode FORM (Figure 3), montre que pour la même profondeur le sol présente un risque de liquéfaction supérieur à 80%. Ce résultat montre bien l'intérêt et l'importance études fiables en géotechniques

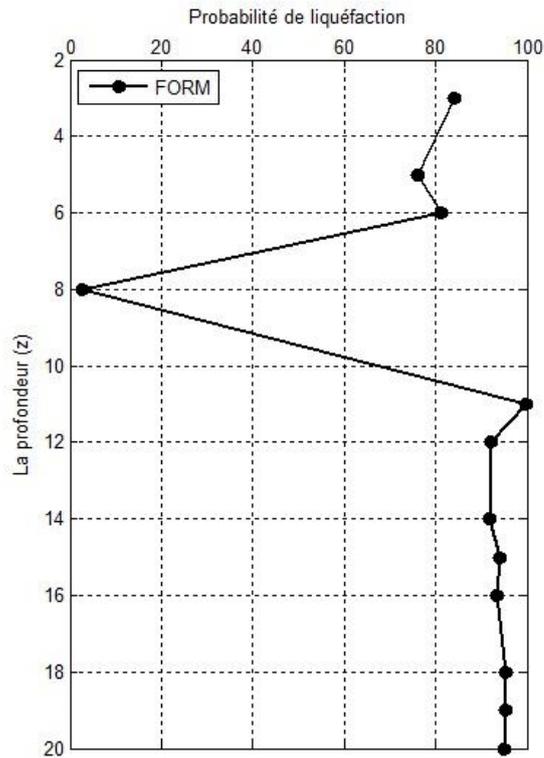


Figure 3. Variation de la probabilité de rupture en profondeur

Cela montre que l'adoption d'un facteur de sécurité minimum autorisée égal à 1 dans le calcul déterministe implique un risque énorme et une grande probabilité de rupture ainsi, la conception fiable des structures nécessite l'adoption de facteurs sécurité 1,2 à 1,3.

5. Conclusion

L'application de l'analyse probabiliste de liquéfaction n'est pas encore une pratique courante dans la communauté de l'ingénierie géotechnique. Pourtant, des calculs de fiabilité offrent un moyen d'évaluer les effets combinés d'incertitudes, et un moyen de distinguer entre les conditions où les incertitudes sont élevés ou faibles.

La fiabilité doit être familière à la plupart des ingénieurs en géotechnique, et il ne devrait pas être perçu comme nécessitant plus de données, le temps et les efforts que les calculs déterministes traditionnels.

4. Bibliographies

- [BOU 03] BOUHADAD Y., BENHAMOUCHE A., MAOUCHE S., BELHAI D., « Evidence for Quaternary liquefaction-induced features in the epicentral area of the 21 May 2003 Zemmour earthquake (Algeria, Mw = 6.8).
- [BEN 04] BENAHCILIF S., STOCHASTIC ANALYSIS OF SOIL LIQUEFACTION, THESIS MAGISTER, UNIVERSITY OF ABOU BAKR BELKAID, TLEMCEM ALGERIA, 2004.
- [SUZ 09] Suzuki K., Jha S., «Reliability analysis of soil liquefaction based on standard penetration test » *Computers and Geotechnics*, Vol.36, 2009, pp. 589–596.
- [IDR 04] Idriss M., Boulanger R., «Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes», *Proceedings of the 11th ICSDEE & 3rd ICEGE*, pp 32 – 56, January 7 – 9, 2004. .
- [DEM 94] DEMEURE I., FARHAT J., « Systèmes de processus légers : concepts et exemples », *Technique et Science Informatiques*, vol. 13, n° 6, 1994, p. 765-795.
- [JUA 99] JUANG, C. H., ROSOWSKY, D. V., TANG, W. H., « Reliability based method for assessing liquefaction potential of soils » *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.8, 1999, pp.684 – 689.
- [CHA 2009] CHAI S., LI S., REN Q., WANG Y., «Prediction of Liquefaction Potential and Pore Water Pressure due to Earthquake», *EJGE*, Vol.14, 2009, pp.1 – 14.
- [LIY 04] LIYANAPATHIRANA, D.S., POULOS, H. G., «Assessment of soil liquefaction incorporating earthquake characteristics», *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol – 24, 2004, pp. 867-875.
- [SEE 03] SEED R. B., CETIN, K. O., MOSS, R. E. S., KAMMERER, A. M., WU, J., PESTANA, J. M., RIEMER, M. F., SANCIO, R. B., BRAY, J. D., KAYEN, R. E., AND FARIS, A., *Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework*, 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, California, April 30, 2003.
- [FIN 94] Finn, W. L., Ledbetter, R. H., and Wu, G.L., «Liquefaction in silty soils: design and analysis, Ground failures under seismic conditions», *Geotechnical Special Publication No 44*, ASCE, 1994, Reston, 51–79.
- [SEE 79] SEED H. B., «Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquake», *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol 105, No. GT2, 1979, p. 201-225.
- [SEL 81] SELIG E.T., CHANG C.S., «soil failure modes in undrained cyclic loading», *J. Geotech. Engg. Div., ASCE*, Vol.107, No.GT5, May, 1981, pp 539-551 .
- [ROB 94] ROBERTSON P.K., suggested terminology for liquefaction, An Internal CANLEX Report, 1994, Canada.
- [SEE 81] SEED H.B., IDRISS I.M., «Simplified Procedure for Evaluation Soil Liquefaction Characteristics» Institute of Technology, 1981, Mass.