

Efeitos de Velocidade em Ensaios de Palheta em Solos Argilosos

Emanuele Amanda Gauer

Centro Universitário UNIVATES, Lajeado - RS, Brasil, eagauer@gmail.com

Fernando Schnaid

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, Brasil, fschnaid@gmail.com

RESUMO: Os ensaios de palheta são frequentemente utilizados na estimativa da resistência não-drenada de depósitos de argilas moles devido à simplicidade do equipamento, rapidez de execução e baixo custo. A velocidade de deformação em ensaios de palheta de campo é, geralmente, de 6°/min. Contudo, os resultados destes ensaios são influenciados por vários fatores, como a velocidade de rotação da palheta, o tempo transcorrido entre a inserção da palheta e o início do ensaio, a forma da palheta e o índice geométrico (relação entre altura e diâmetro), as condições de drenagem durante o ensaio, a anisotropia de resistência, entre outros. Dentre todos os fatores que influenciam os ensaios de palheta, a velocidade de rotação é considerada um dos mais importantes. Sob condições não-drenadas, os materiais argilosos apresentam ganho de resistência com o aumento da velocidade de cisalhamento, resultante da viscosidade da água adsorvida nas partículas de solo. Desta forma, o objetivo deste trabalho consiste na avaliação da influência da velocidade de rotação do ensaio de palheta na resistência de solos argilosos. Além disto, procura-se identificar padrões de comportamento de solos para considerar os efeitos de variação de velocidade. Para tal, foram realizados ensaios de palheta em laboratório, utilizando palhetas de 20,2, 25,5 e 40,0 mm de diâmetro e com relação altura-diâmetro igual a 2 a velocidades de rotação de 0,68 a 10800°/min, utilizando uma mistura composta por 85% caulim e 15% bentonita com 130% de umidade. A partir dos resultados dos ensaios de palheta, observou-se que a resistência não-drenada do solo argiloso aumenta com a velocidade, sob condições não-drenadas. A resistência não-drenada também é influenciada pelo diâmetro da palheta. A resposta viscosa dos ensaios de palheta ao longo de toda a faixa não-drenada pode ser descrita por uma equação potencial, para valores de velocidade normalizada (V) maiores que 10. O torque medido durante os ensaios é influenciado pelas dimensões da palheta. Porém, não foi verificada qualquer tendência de variação na resistência normalizada (T/T_{ref}) decorrente das dimensões da palheta. A velocidade normalizada considera diretamente, além da velocidade, a geometria da palheta e o coeficiente de adensamento do solo e reflete os efeitos de permeabilidade, rigidez e velocidade de cisalhamento, fatores que também controlam a viscosidade. Desta forma, os efeitos viscosos dos ensaios de palheta são representados com precisão no espaço normalizado ($T/T_{ref} \times V$).

PALAVRAS-CHAVE: Velocidade de cisalhamento, condições de drenagem, solos coesivos, efeitos viscosos, ensaio de palheta.

1 INTRODUÇÃO

Os resultados do ensaio de palheta são influenciados por vários fatores, como a velocidade de rotação da palheta, o tempo transcorrido entre a inserção da palheta e o início do ensaio, dimensões e relação entre a altura e o diâmetro da palheta, condições de

drenagem, efeitos de amolgamento e não-uniformidade na distribuição de tensões (conduzindo à ruptura progressiva) e anisotropia de resistência (Chandler, 1988).

Leroueil e Marques (1996) observaram que a velocidade de rotação está entre os fatores mais importantes que influenciam as medições da resistência não-drenada. Segundo Cadling e

Odenstad (1950), a sua importância foi reconhecida ainda no início do desenvolvimento dos ensaios de palheta.

A maioria das pesquisas relacionadas ao efeito da velocidade de rotação do ensaio de palheta datam da década de 1980 e avaliam principalmente influência do uso de velocidades superiores à padrão na avaliação da resistência não-drenada de argilas. Nestes casos, o aumento da velocidade de rotação do ensaio de palheta leva a uma superestimativa da resistência não-drenada do solo argiloso, devido à viscosidade destes materiais. Como exemplo de pesquisas relacionadas a estes efeitos viscosos, podemos citar: Monney (1974), Smith e Richards (1975), Sharifounnasab e Ullrich (1985), Leroueil e Marques (1996), etc.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho consiste na avaliação da influência da velocidade de rotação do ensaio de palheta na resistência de solos argilosos. Além disto, procura-se identificar padrões de comportamento de solos para considerar os efeitos de variação de velocidade.

Para tal, foram realizados ensaios de palheta em laboratório, utilizando palhetas de 20,2, 25,5 e 40,0 mm de diâmetro e com relação altura-diâmetro igual a 2 a velocidades de rotação de 0,68 a 10800°/min, utilizando uma mistura composta por 85% caulim e 15% bentonita com 130% de umidade.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização geotécnica dos materiais

As misturas caulim-bentonita vem sendo utilizadas em laboratório com o objetivo de simular argilas típicas do leito marinho brasileiro.

O caulim e a bentonita são comercializados em sacos de 25 ou 30 kg. Os materiais foram recebidos no laboratório e armazenados em sacos plásticos devidamente vedados. A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica do caulim, da bentonita e da mistura composta por 85% caulim e 15% bentonita.

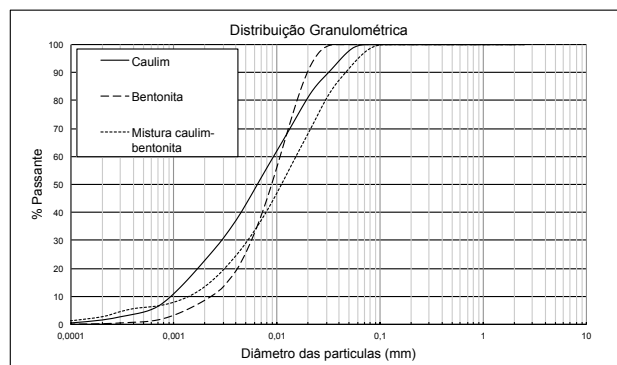


Figura 1. Distribuição granulométrica dos materiais.

Foram realizados ensaios de adensamento com o objetivo de determinar os parâmetros de compressibilidade dos solos em estudo. Nesta pesquisa, como trabalhou-se com amostras remoldadas, deu-se especial atenção ao coeficiente de compressão (c_c) e, para que fosse possível determinar as condições de drenagem do solo durante o ensaio, obteve-se coeficiente de adensamento (c_v) da mistura. Os parâmetros obtidos nos ensaios de adensamento, juntamente com os limites de consistência e peso específico real dos grãos da mistura podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1. Características geotécnicas da mistura caulim-bentonita

Parâmetro	Valor representativo
LL	108
PL	31
IP	77
γ_s (kN/m ³)	25,5
e_0	3,44
c_c	1,1
c_v (cm ² /s)	$8,8 \cdot 10^{-5}$

2.2 Programa experimental

O programa experimental desta pesquisa consiste na avaliação do efeito da velocidade de rotação na resistência ao cisalhamento de uma mistura composta por 85% caulim e 15% bentonita, bem como na avaliação das condições de drenagem impostas ao solo durante os ensaios de palheta de laboratório.

Foram realizados ensaios a 10 velocidades de rotação distintas (de 0,68 a 10800°/min) com palhetas de 20,2 mm, 25,5 mm e 40,0 mm de diâmetro (apresentadas na Figura 2). Os ensaios realizados estão listados na Tabela 2 e foram

denominados E01 a E30. Foram realizadas três repetições para cada um dos pontos ensaiados. Estas velocidades foram escolhidas de acordo com as possibilidades do equipamento utilizado.

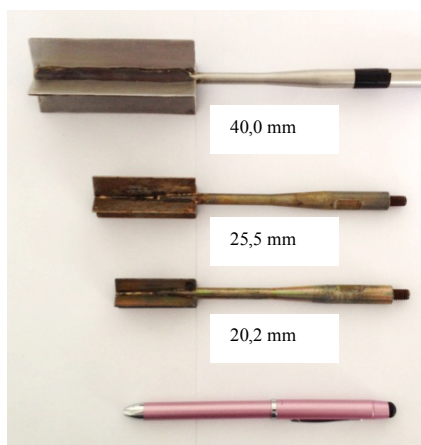


Figura 2. Palhetas.

Tabela 2. Programa experimental

Velocidade (°/min)	Palhetas		
	20,2 mm	25,5 mm	40,0 mm
0,68	E01	E11	E21
0,9	E02	E12	E22
1,8	E03	E13	E23
5,4	E04	E14	E24
180	E05	E15	E25
360	E06	E16	E26
1800	E07	E17	E27
3600	E08	E18	E28
5400	E09	E19	E29
10800	E10	E20	E30

2.3 Equipamento e procedimentos de ensaio

O equipamento utilizado nesta pesquisa consiste de um equipamento de palheta de laboratório fabricado pela Via Test que foi automatizado por Gauer (2010) para aplicação de diferentes velocidades de rotação. Para tal, foi acoplado um motor de passo ao eixo de rotação do equipamento que inicialmente era manual. O equipamento obedece aos padrões recomendados pela ASTM D 4648-13 e pode ser visualizado na Figura 3.



Figura 3. Equipamento de palheta de laboratório.

O ensaio de palheta de laboratório, normatizado pela ASTM D 4648M-13, consiste em inserir uma palheta com 4 lâminas em um tubo contendo uma amostra indeformada ou remoldada e rotacionando-a a uma velocidade constante para determinar o torque requerido para induzir a ruptura do solo por cisalhamento, assumindo uma superfície de ruptura cilíndrica causada pela rotação da palheta. O torque pode ser medido por uma mola calibrada ou por um transdutor acoplado diretamente à palheta.

Nesta pesquisa, a medição de torque, e consequente determinação da resistência ao cisalhamento, foi realizada por meio de um sensor (ou célula) de torque que foi projetada e confeccionada especialmente para esta pesquisa, para um torque máximo de 0,5 N.m. A sua calibração foi realizada aplicando ciclos de carga e descarga em um braço de alavanca de 10 cm a ela fixado, registrando a leitura correspondente no software MatLab por 30 segundos. Desta forma, verificou-se que a sua histerese é desprezível, uma vez que as medições obtidas nos carregamentos coincidem com os respectivos descarregamentos.

A calibração da célula de torque foi analisada similarmente às especificações da norma americana de ensaios de piezocone (ASTM D5778-12), atendendo a todas as recomendações.

As amostras foram acomodadas em um molde de 50 cm de diâmetro e 24 cm de altura. Optou-se pela utilização deste tamanho de amostra, pois a norma americana ASTM D

4648M-13 recomenda que as amostras tenham diâmetro suficiente para permitir uma distância de pelo menos dois diâmetros da palheta entre todos os pontos de circunferência da superfície de ruptura e a extremidade (borda) externa da amostra. Assim, respeitando estas distâncias mínimas, pode-se executar no mínimo 5 furos com cada amostra (utilizando a maior palheta, de 40,0 mm de diâmetro) ou até 9 furos utilizando qualquer um dos três diâmetros de palheta.

A profundidade média de ensaio foi a 12 cm de profundidade, pois a norma americana supracitada recomenda que a palheta seja inserida no solo a uma profundidade tal que a distância entre a extremidade superior da palheta e a superfície do solo seja igual a altura da mesma. Desta forma, também assegura-se que as especificações da norma americana sejam cumpridas para a palheta de maior dimensão, além de realizar todas as medições sob as mesmas condições de contorno e sob a mesma tensão efetiva.

A palheta foi inserida delicadamente na amostra garantindo que a superfície externa da amostra e a superfície de ruptura dos outros furos de ensaios anteriores estivessem a mais de 2 diâmetros de distância da superfície de ruptura imposta pela palheta, como recomendado pela norma americana. Em seguida, a palheta foi rotacionada a velocidades controladas pelo motor de passo acoplado ao eixo de rotação do equipamento, monitorando a tensão de saída da célula de torque através do software MatLab. Para que não houvesse influência do tempo entre a inserção da palheta e o início do ensaio na medida de resistência, a palheta foi inserida no solo e rotacionada em menos de um minuto. A Figura 4 apresenta uma foto da execução do ensaio de palheta.

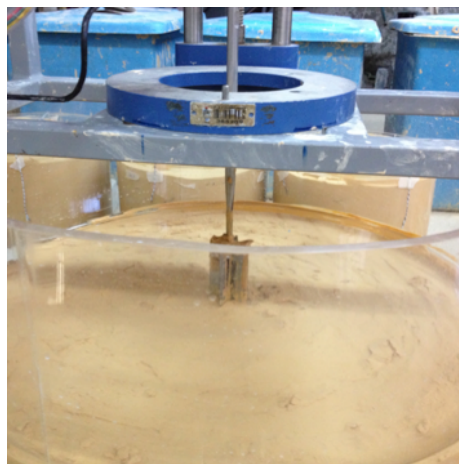


Figura 4. Execução do ensaio de palheta.

Em cada amostra foram realizados no mínimo 5 furos (com a palheta maior, de 40,0 mm de diâmetro) e no máximo 9 furos (com as palhetas menores, de 20,2 e 25,5 mm de diâmetro), conforme apresentado na Figura 5.



Figura 5. Amostra ensaiada.

A Tabela 3 apresenta os índices físicos utilizados na preparação das amostras da mistura caulim-bentonita.

Tabela 3. Índices físicos de moldagem das amostras da mistura caulim-bentonita

γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	e	S (%)
13,9	6,7	100	3,44	100

3 RESULTADOS

Na Figura 6 apresenta-se o gráfico relativo à relação entre o torque máximo medido em cada ensaio com a velocidade periférica para os três diâmetros de palheta ensaiados (20,2, 25,5 e 40,0 mm). Observa-se na que a resistência da

mistura caulim-bentonita aumenta com a velocidade, pois todos os ensaios foram realizados sob condições não-drenadas e, sob estas condições, este aumento de resistência com o aumento da velocidade de cisalhamento ocorre devido à viscosidade do material. Ainda, pode-se observar que quanto maior o diâmetro da palheta maior o valor de torque máximo medido. Para a palheta de 20,2 mm de diâmetro, os valores de torque variam entre 0,013 e 0,061 N.m. Estes valores de torque medido correspondem a uma resistência não-drenada (S_u) de 0,43 a 2,0 kPa. Para a palheta de 25,5 mm de diâmetro, por sua vez, os valores de torque variam entre 0,02 e 0,11 N.m, cujos valores de torque medido correspondem a S_u de 0,32 a 2,0 kPa. Já, para a palheta de 40,0 mm de diâmetro, os valores de torque variam entre 0,046 e 0,25 N.m e os valores correspondem a S_u entre 0,2 e 1,1 kPa. Desta forma, a palheta de 25,5 mm mediu torques de 1,5 a 2 (duas) vezes maiores que a palheta com 20,2 mm de diâmetro, enquanto que a palheta de 40,0 mm de diâmetro apresenta valores de torque 3, 5 a 4 vezes maiores que os obtidos para a palheta de 20,2 mm de diâmetro e 2 (duas) vezes maiores que os valores obtidos para a palheta de 25,5 mm.

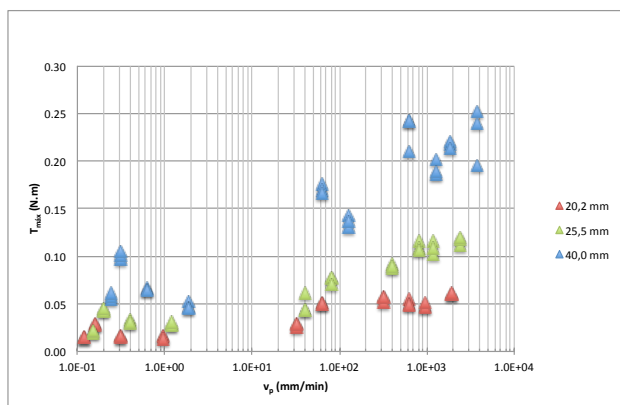


Figura 6. Variação do torque máximo com a velocidade periférica.

Sabendo que, sob condições não-drenadas, um aumento na velocidade de cisalhamento leva a um aumento na resistência não-drenada S_u , é possível estabelecer a relação entre a velocidade de cisalhamento e a resistência não-drenada através de uma equação semi-logarítmica e de uma equação potencial, dadas pelas Equações 1 e 2.

$$\frac{T}{T_{ref}} = 1 + \alpha \left(\frac{v_p}{v_{p0}} \right) \quad (1)$$

$$\frac{T}{T_{ref}} = \left(\frac{v_p}{v_{p0}} \right)^\beta \quad (2)$$

Randolph e Hope (2004) apresentaram uma relação definida em função da velocidade de penetração do piezocone (v), do diâmetro da sonda (d) e do coeficiente de adensamento (c_v), expressa na forma adimensional, conforme a Equação (3).

$$V = \frac{v \cdot d}{c_v} \quad (3)$$

Conforme mencionado anteriormente, sob condições não-drenadas, um aumento na velocidade implica em um aumento na resistência não-drenada. Desta forma, uma equação semi-logarítmica e uma equação potencial podem ser ajustadas, analogamente à relação estabelecida para T/T_{ref} e v_p/v_{p0} (Equações 4 e 5), resultando na relação entre T/T_{ref} e V apresentada na Figura 7.

Para o cálculo do torque normalizado T/T_{ref} , utilizou-se como torque de referência T_{ref} o menor valor de torque medido, pois indica que a partir deste valor torque, correspondente a uma dada velocidade de rotação (ou periférica), a ruptura do solo ocorre sob condições completamente não-drenadas.

$$\frac{T}{T_{ref}} = 1 + \alpha_N(V) \quad (4)$$

$$\frac{T}{T_{ref}} = (V)^{\beta_N} \quad (5)$$

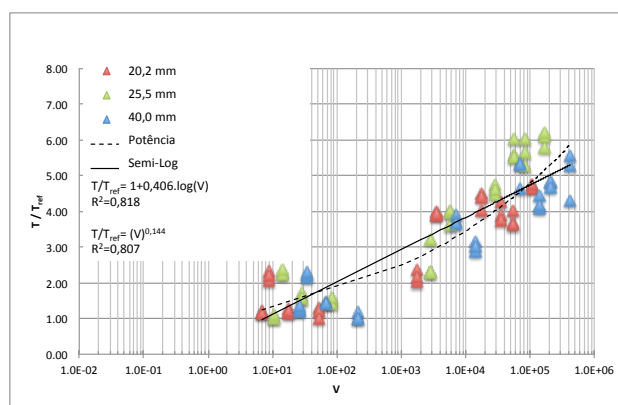


Figura 7. Relação entre torque normalizado e velocidade adimensional

A partir das equações ajustadas para cada um dos conjuntos de resultados obtidos para as

palhetas de 20,2, 25,5 e 40,0 mm de diâmetro separadamente, obtém-se os valores dos parâmetros α , β , α_N e β_N característicos de cada tipo de solo. Os valores de α , β , α_N e β_N para a mistura estudada podem ser visualizados na Tabela 4. Os valores médios obtidos para os parâmetros α e β são de 40,2% e 0,145, respectivamente e para os parâmetros α_N e β_N são de 40,6% e 0,144, respectivamente. Os valores encontrados para α e α_N e para β e β_N são semelhantes, indicando que os ajustes adotados para a relação entre T/T_{ref} e v_p/v_{p0} e T/T_{ref} e V resultam a um mesmo nível de acurácia e representatividade.

Tabela 4. Parâmetros do solo.

D (mm)	α (%)	β	α_N (%)	β_N
20,2	34,4	0,137	35,6	0,135
25,5	47,3	0,155	47,3	0,155
40,0	38,9	0,142	38,9	0,142

A Figura 8 apresenta a relação entre o torque normalizado e a velocidade adimensional da mistura caulim-bentonita em comparação com os resultados obtidos por Biscontin e Pestana (2001) para uma mistura levemente cimentada composta por caulim, bentonita e cinza volante. Nesta figura, observa-se que Biscontin e Pestana (2001) também observaram um aumento de resistência no intervalo de velocidades utilizado (para V entre $4 \cdot 10^{-1}$ e $8 \cdot 10^2$), com valores de T/T_{ref} máximos da ordem de 2. Com o aumento da velocidade normalizada acima de 10^3 a resistência cresce potencialmente atingindo valores máximos de T/T_{ref} iguais a aproximadamente 6. Apesar das diferentes dimensões das palhetas utilizadas, os dados dos outros autores apresentam-se sobrepostos com os resultados da presente pesquisa, evidenciando um padrão de comportamento para os solos argilosos.

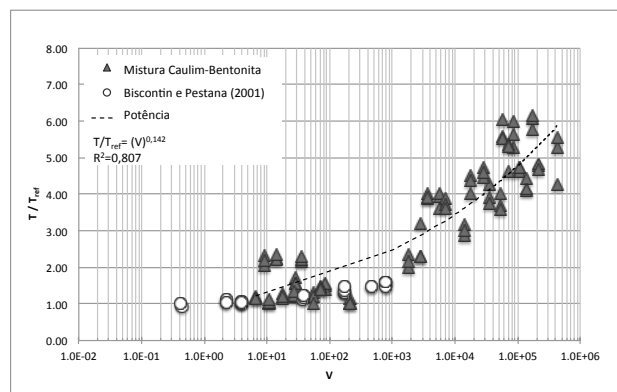


Figura 8. Relação entre torque normalizado e velocidade adimensional

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos ensaios de palheta observa-se que a resistência não-drenada dos solos argilosos aumenta com o aumento da velocidade de cisalhamento. Este resultado é esperado, uma vez que todos os ensaios nas misturas argilosas foram realizados sob condições completamente não-drenadas e este efeito ocorre devido à viscosidade da água adsorvida no entorno das partículas do solo. Este aumento da resistência com a velocidade torna-se mais pronunciado para velocidades adimensionais maiores que $2 \cdot 10^2$ e é da ordem de 6 vezes. Para estes materiais, as condições completamente não-drenadas durante o cisalhamento são asseguradas para velocidades adimensionais maiores que 10.

Ainda, o diâmetro da palheta também influencia na medida de resistência, uma vez que palhetas maiores mediram torques maiores.

A resposta viscosa dos ensaios de palheta ao longo de toda a faixa não-drenada pode ser descrita por uma equação potencial. O torque medido durante os ensaios é influenciado pelas dimensões da palheta. Porém, não foi verificada qualquer tendência de variação na resistência normalizada (T/T_{ref}) decorrente das dimensões da palheta.

A velocidade normalizada considera diretamente, além da velocidade, a geometria da palheta e o coeficiente de adensamento do solo e reflete os efeitos de permeabilidade, rigidez e velocidade de cisalhamento, fatores que também controlam a viscosidade. Desta forma, os efeitos viscosos dos ensaios de palheta são representados com precisão no espaço normalizado ($T/T_{ref} \times V$).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem especialmente ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à PETROBRAS pelo apoio financeiro durante parte da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- American Society of Testing and Materials (2013). *D 4648M-13 - Standard test method for laboratory miniature vane shear test for saturated fine-grained clayey soil*.
- American Society of Testing and Materials (2012). *D 5778-12 - Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils*.
- Biscontin, G., Pestana, J. M. (2001). *Geotechnical Testing Journal*. ASTM, v. 24, No 4, p. 423-429.
- Cadling, L.; Odenstad, S. (1950) *The vane borer: an apparatus for determining the shear strength of clay soils directly in the ground*. Royal Swedish Geotechnical Institute, *Proceedings*, V. 2, p. 1-87.
- Chandler, R. J. (1988). *The in situ measurement of the undrained shear strength of clays using the field vane*. In: Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies. ASTM STP 1014, Filadélfia: A. F. Richards, pp. 13-44.
- Gauer, E. A. (2010). *Influência da velocidade de rotação da mini-palheta na resistência de um solo siltoso*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 118 p.
- Leroueil, S.; Marques, M. E. S. (1996). *Importance of strain rate and temperature effects in geotechnical engineering, in measuring and modeling time dependent soil behavior*. ASCE GSP 61, Sheahan, T. C. and Kaliakin, V. N. (Eds). Washington D.C.
- Monney, N.T. (1974). *An analysis of the vane shear test at varying rates of shear*, On Deep Sea Sediments, O.L. Inderbitzen, Ed., Plenum Press, pp.151-167.
- Sharifounnasab, M.; Ullrich, R. C. (1985) Rate of Shear Effects on Vane Shear Strength. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 111 (1), 135-139.
- Smith, A. D.; Richards, A. F. (1975). Vane shear strength at two high rotation rates. ASCE, *Proceedings Civil Engineering in the Oceans III*, Delaware, Vol I, 421-433.