



# Determinação da resistência não drenada através do método do Cone Sueco ou Fall Cone em solos marinhos

Camila Woldam Clemente

Universidade Federal do Paraná/Fugro, Curitiba, Brasil, [camilawclemente@yahoo.com.br](mailto:camilawclemente@yahoo.com.br)

Vítor Pereira Faro

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, [vpfaro@ufpr.br](mailto:vpfaro@ufpr.br)

**RESUMO:** A resistência não drenada ocorre na prática quando um carregamento externo é aplicado a uma velocidade mais rápida do que a velocidade em que a poropressão induzida é dissipada, podendo ser determinada através de ensaios de campo e de laboratório. Geralmente, os ensaios de campo fornecem valores de resistência não drenada de uma maneira mais rápida e em maior quantidade que os ensaios de laboratório, no entanto alguns destes valores são obtidos por meio de formulações empíricas. O objetivo do presente trabalho foi determinar a resistência não drenada pelo método de Cone Sueco (Fall Cone) e avaliar sua aplicabilidade comparando-o com métodos clássicos, como o ensaio triaxial não adensado não drenado (UU) e ensaio de palheta de laboratório. O Cone Sueco foi desenvolvido entre 1914 e 1922 por John Olsson com o intuito de obter de forma simples e rápida os valores de limite de liquidez e resistência não drenada. Foram ensaiadas 16 amostras de solo de origem marinha com variadas características geotécnicas e três cones suecos com diferentes dimensões. Os resultados demonstraram que os ensaios de cone apresentam compatibilidade com os ensaios convencionais, dependendo do cone utilizado, fator que deve ser considerado. Entretanto, a variabilidade de valores observados sugere que o ensaio de cone não substitui os ensaios clássicos e sim, fornece uma complementação e suporte para definição do parâmetro de resistência não drenada de solos moles.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resistência não drenada, Ensaio de Fall cone, Amostras marinhas.

## 1 INTRODUÇÃO

A aquisição de parâmetros geotécnicos acurados está relacionada com os requisitos de qualidade, segurança e viabilidade de projetos de engenharia (Yanez; Gonçalves, 2010). Para a determinação destes parâmetros em solos moles algumas situações devem ser consideradas, como variabilidade natural do terreno, obtenção de dados experimentais, análises de recalque e estabilidade, além das propriedades de resistência, deformação e de condutividade hidráulica (Lemos, 2014).

Um dos parâmetros importantes de resistência para a execução de projetos geotécnicos é a resistência não drenada, conhecida como a resistência mobilizada

quando a ruptura ocorre antes de qualquer dissipação significativa da poropressão induzida (Terzaghi; Peck, 1996). Pode ser determinada por ensaios de campo e de laboratório, geralmente os ensaios de campo geram dados de resistência não drenada de uma forma mais rápida e em maior quantidade do que os ensaios de laboratório, entretanto alguns desses dados são baseados em correlações empíricas (Lemos, 2014).

Os seguintes ensaios de laboratório podem ser utilizados: compressão simples, ensaio triaxial não adensado não drenado (UU), ensaio de Fall Cone e ensaio de palheta de laboratório (Mini Vane). Os ensaios de Fall Cone e palheta de laboratório possuem alguns benefícios, como simplicidade, rapidez na execução e baixo custo



em que são determinados os valores de resistência não drenada, permitindo um maior número de ensaios em uma amostra quando comparado com os ensaios tradicionais (Lemos, 2014).

O equipamento de Fall Cone (ou Cone Sueco) foi desenvolvido entre 1914 e 1922 para determinar de uma maneira fácil e rápida a resistência não drenada e o limite de liquidez, o que encorajou muitos países, como Canadá, Suécia e Inglaterra, a aplicá-lo como equipamento regularizado por norma (Tanaka et al., 2012). No Brasil, ainda não existe norma para a utilização do Cone Sueco.

Um dos benefícios práticos do Fall Cone é o tempo de execução, que pode ser executado em alguns minutos e a obtenção da resistência não drenada é realizada através de uma formulação simples, permitindo a identificação de uma argila quanto às propriedades índice e físicas (Garneau; LeBihan, 1977). O ensaio triaxial não adensado não drenado é definido como rápido pois não há drenagem durante o cisalhamento, portanto o fator tempo está vinculado com a escolha da velocidade de cisalhamento. No ensaio de palheta de laboratório, o tempo pode influenciar em dois aspectos: na demora entre a inserção da palheta e o início da rotação, e a velocidade de rotação (Pérez-Foguet et al., 1998).

O objetivo deste trabalho é demonstrar a aplicabilidade do equipamento de Cone Sueco para solos brasileiros, verificando se os valores obtidos são consistentes quando comparados com os ensaios clássicos de determinação da resistência não drenada.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

A presença de depósitos de solos moles ao longo da costa brasileira impulsiona seu estudo, dado que a obtenção dos parâmetros deste tipo de solo é essencial para locação de infraestrutura industrial e urbana (Hallal; Schnaid; Dias, 2002).

Os materiais utilizados no presente trabalho provêm de amostragem offshore. As amostras são indeformadas e possuem características geotécnicas variadas com profundidades variando de 0,91 até 12,40 metros. A identificação dos materiais está apresentada na tabela 1.

Tabela 1 - Identificação das amostras utilizadas

Amostra	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	% Finos	SUCS
1	1,74	48,0	93,70	CH
2	1,64	50,4	87,21	CH
3	1,67	53,9	96,36	CH
4	1,36	122,2	96,16	MH
5	1,48	88,0	97,34	MH
6	1,48	74,9	93,76	CH
7	1,49	90,9	91,44	MH
8	1,47	79,7	87,14	CH
9	1,73	45,8	71,43	MH
10	1,74	44,3	60,84	MH
11	1,75	43,9	44,28	ML
12	1,81	38,3	57,75	ML
13	1,68	52,0	61,79	MH
14	1,80	34,0	61,01	MH
15	1,74	46,3	61,84	MH
16	1,72	48,6	53,51	ML

Legenda:  $\gamma$  - peso específico, W – teor de umidade, % Finos – percentual de finos e SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos.

As amostras foram identificadas de acordo com o sistema unificado de classificação do solo (SUCS) como C – argila e M – silte, H – alta plasticidade e L – baixa plasticidade. Não se observou nem odor nem cor característica de presença de matéria orgânica, por esta razão a influência do teor de matéria orgânica não foi considerado na avaliação. Na figura 1 abaixo apresenta-se as amostras plotadas em uma carta de plasticidade.

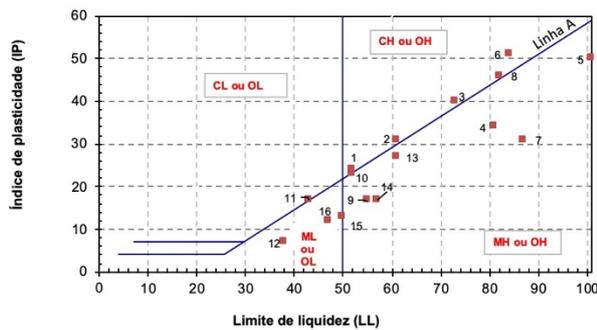


Figura 1 - Carta de plasticidade

## 2.2 Métodos

O método de Fall Cone consiste em um cone de metal com um determinado ângulo de abertura  $\beta$  e determinada massa  $m$  suspenso verticalmente apenas com a ponta encostando na superfície horizontal da amostra. O cone é liberado sobre a amostra e a penetração do cone na amostra é medida. O ensaio foi executado de acordo com as recomendações da norma ISO17892-6 (2014).

A fórmula da resistência não drenada foi desenvolvida por Hansbo em 1957 e está apresentada abaixo. O cálculo considera que a resistência ao cisalhamento de um solo é proporcional a massa do cone ( $Q$ ) e inversamente proporcional ao quadrado da penetração ( $P$ ) conforme equação 1, o coeficiente  $K$  depende do ângulo de abertura do cone, da sensibilidade das argilas e taxa de cisalhamento e  $g$  é a aceleração da gravidade (igual a  $9,81 \text{ m/s}^2$ ). A norma ISO17892-6 (2014) considera os valores de 0,27 para cones de  $60^\circ$  e 0,80 para cones de  $30^\circ$ . Para ensaios na condição indeformada utilizando cones de  $30^\circ$ , o coeficiente  $K$  passa a ser 1,0.

$$Su = K \cdot g \cdot \frac{Q}{P^2} \quad (1)$$

Na condição indeformada, a norma aplica um fator de correção baseado na experiência empírica da mesma maneira que é realizado no ensaio de palheta em campo, conforme equação

2. O fator de correção  $\mu$  é relacionado ao limite de liquidez e é calculado conforme a equação 3.

$$S_{u \text{ corr}} = S_u \cdot \mu \quad (2)$$

$$\mu = \left(\frac{0,43}{w_L}\right)^{0,45} \text{ e } 1,2 \geq \mu \geq 0,5 \quad (3)$$

A variável tipo do cone foi considerada com a intenção de definir qual cone é o mais indicado para os solos estudados e qual apresenta maior coerência com os ensaios mais usuais da prática de engenharia geotécnica no país. Três tipos de cone foram usados para determinar a resistência não drenada nas condições indeformada e amolgada. Os cones estão apresentados na tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Tipos de cone

Cone	Ângulo de abertura ( $^\circ$ )	Massa (g)
Cone 1	30	100
Cone 2	60	60
Cone 3	60	10

Outra variável considerada foi o tamanho do recipiente em que a amostra amolgada é colocada, dado que dependendo da norma selecionada as dimensões do recipiente variam. O propósito foi avaliar a influência da altura e diâmetro nos resultados de resistência não drenada. No trabalho foram utilizados quatro recipientes: o próprio amostrador, o recomendado pela norma ISO17892-6 (2014), o sugerido por Karlsson (1981) e um recipiente utilizado pela autora em um trabalho anterior. As dimensões estão apresentadas na tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Dimensões do recipiente

Recipiente	Diâmetro (mm)	Altura (mm)
Amostrador ISO17892-6 (2014)	100	100
Karlsson (1981)	55	40
Clemente (2015)	50	25
	70	22



A análise de dados será dividida em duas condições: indeformada e amolgada. Para as amostras indeformadas foram realizados os ensaios de Cone Sueco apenas no amostrador, ensaio triaxial não adensado não drenado (UU) e palheta de laboratório. Para a condição amolgada serão avaliados os ensaios de palheta de laboratório e cone, não foram realizados ensaios triaxiais UU reconstituídos.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro aspecto avaliado foi sobre a resistência não drenada em amostras indeformadas e a penetração atingida pelos três tipos de cone. O cálculo da resistência não drenada foi através da equação 1 com a aplicação do fator de correção  $\mu$  para a condição indeformada. Os resultados de resistência obtidos para cada cone estão apresentados na figura abaixo.

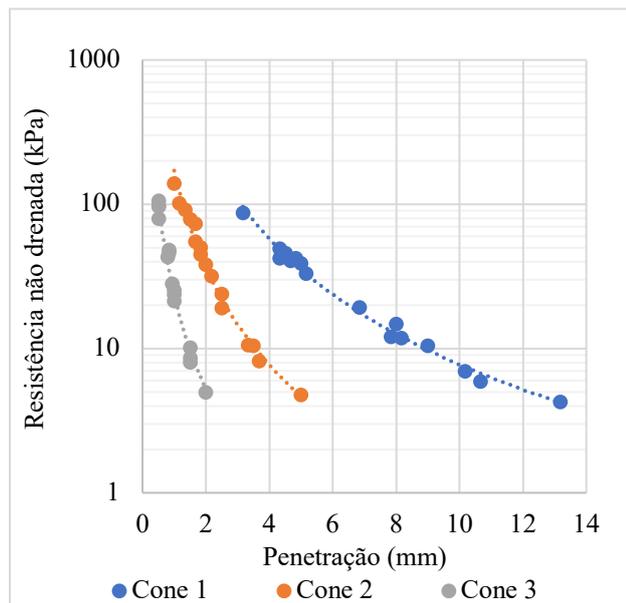


Figura 2 - Resistência não drenada indeformada x penetração para condição indeformada

A linha de tendência que melhor se ajustou para o gráfico de resistência não drenada e penetração foi a linha potencial. Em uma avaliação considerando todos os resultados obtidos, o valor de  $R^2$  ficou em 0,3412 indicando um ajuste inadequado. Entretanto, se

a avaliação for feita para cada cone, o valor de  $R^2$  se mostra mais coerente, atingindo valores acima de 0,97 e demonstrando uma boa correlação entre os resultados obtidos. As variabilidades entre as penetrações para os três tipos de cone para uma mesma amostra não são constantes devido à anisotropia dos solos e aos parâmetros de massa e ângulo de abertura de cada cone.

Neste gráfico, pode-se observar que cada cone produz uma curva com inclinação diferenciada das demais, confirmando a formulação de Hansbo (1957) em que a penetração é inversamente proporcional a resistência não drenada. Este gráfico se assemelha com os resultados obtidos por Garneau e LeBihan (1977).

Os resultados de resistência não drenada para os ensaios de Fall Cone, palheta de laboratório e triaxial UU para condição indeformada foram avaliados através das linhas de tendência lineares e comparados com o ajuste ideal de 45°, conforme figura 3 abaixo. As linhas pontilhadas se referem ao ensaio de palheta de laboratório e a linha cheia indica os ensaios de triaxial UU.

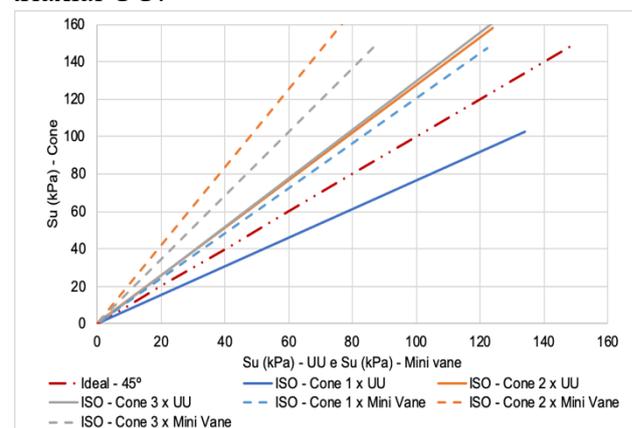


Figura 3 - Comparação entre os ensaios de Fall cone, palheta de laboratório (mini vane) e triaxial UU

Os resultados de resistência não drenada para os ensaios de Fall Cone se demonstraram, em geral, maiores que os ensaios de palheta de laboratório e triaxial UU. Observando os ensaios triaxiais UU e os ensaios realizados pelo cone 2 e 3, as linhas de tendência ficaram



próximas entre si e acima da linha ideal. Abaixo da linha ideal ficaram os ensaios pelo cone 1 e triaxial UU. No caso dos resultados alcançados pelo cone 2 e palheta de laboratório, a resistência não drenada pelo cone chega a ser 50% maior do que pelo ensaio de palheta. Entretanto, nos resultados de palheta de laboratório já haviam sido detectados pontos irregulares em que algum tipo de erro foi cometido, assim sendo seria interessante reavaliar este ensaio considerando suas variáveis e posteriormente, comparar novamente com o Cone Sueco.

Para a condição indeformada, o cone 3 não seria a opção mais indicada para a execução dos ensaios devido às baixas penetrações atingidas. Entre os cones 1 e 2, sempre há um valor que se correlaciona melhor ao resultado obtido nos ensaios triaxiais UU, isto se deve as características de consistência da amostra e a massa do cone utilizado.

Na condição amolgada, o gráfico de resistência não drenada versus penetração apresentou correlação com o obtido para a condição indeformada, a linha de tendência utilizada também foi a linha potencial. Na figura 4 abaixo foram considerados o ensaio de Fall Cone para os três tipos de cone e os diferentes recipientes estudados.

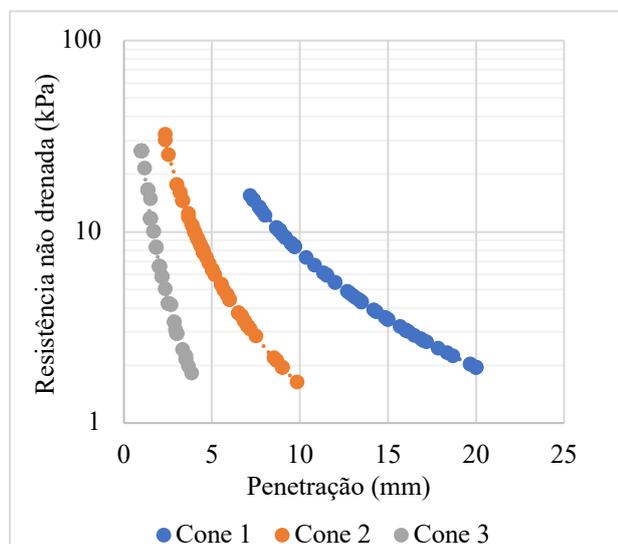


Figura 4 - Resistência não drenada amolgada x penetração para condição indeformada

Da mesma forma que para a condição indeformada, curvas com inclinações diferentes para cada tipo de cone também são observadas, confirmando novamente a formulação proposta por Hansbo em 1957. Analisando os resultados obtidos para cada cone, as linhas de tendência apresentaram  $R^2$  acima de 0,99, indicando uma boa correlação.

As variabilidades entre as penetrações para os três cones para uma mesma amostra também não são constantes nesta condição, porém neste caso eles apresentam um padrão de comportamento: a diferença de penetração entre os valores de cone 1 e 2 é de, no mínimo, 1,3 vezes a diferença entre os valores obtidos pelos cones 2 e 3. Quando se considera os vários recipientes para uma mesma amostra, os valores são similares, variando em torno de 2 milímetros para penetrações até 10 milímetros.

Avaliando os resultados obtidos com o Fall Cone e a palheta de laboratório, observa-se que os valores de Cone Sueco são geralmente menores. Em alguns casos, os resultados apresentam boa convergência e em outros, indicam uma dispersão considerável. Para a condição amolgada não foram realizados ensaios triaxiais UU reconstituídos. Os resultados são apresentados na figura 5 abaixo.

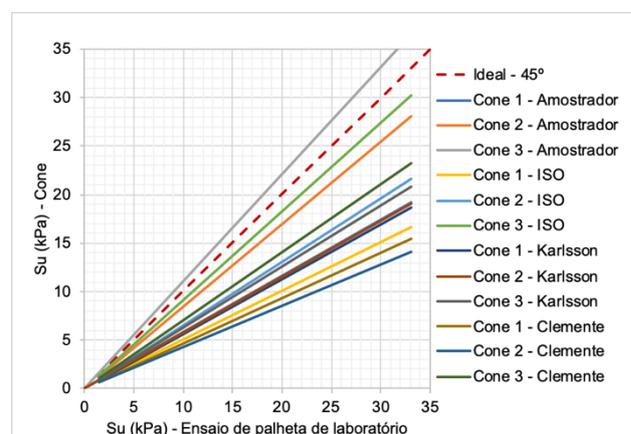


Figura 5 - Comparação dos resultados de ensaios de Cone Sueco e palheta de laboratório

Para a condição amolgada, o cone que melhor se aplica para estes materiais é o cone 1 e os valores de penetração correspondentes



estão dentro do intervalo recomendado pela norma ISO17892-6 (2014). O cone 2 apresenta alguns valores dentro do intervalo, mas não todos e para o cone 3, todos os valores ficaram abaixo do mínimo aceito pela norma. Assim como na condição indeformada, pode-se constatar que baixas penetrações são imprecisas e acabam superestimando os valores de resistência não drenada.

#### 4 CONCLUSÕES

O ensaio de Fall Cone demonstra compatibilidade com os ensaios tradicionais (ensaio triaxial UU e palheta de laboratório), mas dependendo do cone utilizado, fator que deve ser sempre considerado. Para determinação expedita da resistência não drenada, o ensaio do Cone é um método simples e de rápida execução, possibilitando um maior número de determinações em uma mesma amostra e demanda uma pequena quantidade de material para sua execução, o que permite o uso como uma forma complementar aos ensaios clássicos, devido à variabilidade observada.

Neste trabalho experimental confirmou-se a relação entre resistência não drenada e penetração proposta por Hansbo (1957). O cálculo de resistência não drenada através da Equação 1 para baixas penetrações tende a superestimar os resultados, demonstrando valores não condizentes com a realidade.

A massa do cone influencia nos resultados de ensaios: quanto maior a massa do cone, maior é a penetração atingida. Quanto à avaliação verificando o ângulo de abertura do cone, o resultado foi inconclusivo, entretanto levou a duas constatações coerentes: a primeira indica que a resistência não drenada obtida com o cone de 60° foi maior do que com o cone de 30° e a segunda demonstra que a penetração atingida com o cone de 30° é maior, o que ocorre por ser o cone mais pesado entre os cones disponíveis. A sugestão do presente trabalho é a realização de uma campanha experimental de ensaios de Cone Sueco variando o ângulo de abertura em valores

diferentes dos convencionais (30° ou 60°). Para as amostras estudadas, foi o cone 1, com 100 gramas e ângulo de abertura de 30°, que melhor se ajustou para as condições indeformada e amolgada devido aos valores de resistência não drenada obtidos serem mais compatíveis com a realidade.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fugro e à Universidade Federal do Paraná pelo incentivo do desenvolvimento deste trabalho e pela receptividade, apoio técnico e administrativo.

#### REFERÊNCIAS

- International Organization for Standardization. (2014) ISO 17892: Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 6: Fall cone test.
- Clemente, C. (2015) *Determinação do limite de liquidez através do Cone Sueco*, Trabalho de graduação (Bacharelado em Engenharia Civil), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 75 p.
- Garneau, R. e LeBihan, J.P. (1977) Estimation of some properties of Champlain clays with the Swedish fall cone, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 14, p. 571-581.
- Hallal, R.R.; Schnaid, F.; Dias, C.R.R. (2002). Característica de depósitos de argilas moles no Estado do Rio Grande do Sul. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, COBRAMSEG, ABMS, Porto Alegre.
- Hansbo, S. (1957). *A new approach to the determination of the shear strength of clay by the Fall-Cone test*. Royal Swedish Geotechnical Institute, Proceedings n°14, Estolcomo, 46 p.
- Karlsson, R. (1981). *Consistency limits: a manual for the performance and interpretation of laboratory investigations*. Swedish Council for Building Research, Part 6, 46 p.
- Lemos, S.G.F.P. (2014) *Estudo da resistência não drenada de solo de baixa consistência por meio de ensaios de campo e laboratório* Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, 183 p.
- Pérez-Foguet, A.; Ledesma, A.; Huerta, A. (1998). Analysis of the vane test considering size and time effects, *Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 122.
- Tanaka, H.; Hirabayashi, H.; Matsuoka, T.; Kaneko, H. (2012). Use of Fall cone test as measurement of shear



strength for soft clay materials, *Soils and Foundations*, JGS, Vol. 52, p. 590-599.

Terzaghi, K.; Peck, R.B.; Mesri, G. (1996) *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 549 p.

Yañez, D.G.; Gonçalves, H.H.S. (2010). Parâmetros Geotécnicos das Argilas Marinhas da Região do Porto de Santos. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, COBRAMSEG, ABMS, Gramado.