

CISALHÔMETRO: EQUIPAMENTO PNEUMÁTICO PARA MEDIÇÃO DA COESÃO APARENTE E ÂNGULO DE ATRITO INTERNO DO SOLO EM CONDIÇÕES DE CAMPO

R. B. SILVA¹; K. P. LANÇAS²

1. Eng^o Agrônomo, Professor Doutor, Unidade de Registro, UNESP, Registro – SP, Fone: (0XX13) 3828.2900, rbsilva@registro.unesp.br.
2. Eng^o Mecânico, Professor Titular, Departamento de Engenharia Rural, FCA/UNESP, Botucatu-SP.

Escrito para apresentação no
XXXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola
31 de julho a 4 de agosto de 2006 - João Pessoa - PB

RESUMO: O trabalho teve como objetivo projetar e desenvolver um equipamento pneumático, que em condições de campo permitisse construir a envoltória de Coulomb ($\tau = c + \sigma_n \tan \phi$), e determinar a coesão aparente (c) e o ângulo de atrito interno do solo (ϕ). O princípio de funcionamento do equipamento consiste na aplicação de níveis de σ_n utilizando um cilindro hidráulico, cujas leituras são obtidas por meio da relação $F = P/A$ onde, F é a força, P é a pressão e A é a área. A partir da relação $F = T/d$ onde, F é a força, T é o torque e d é o comprimento do braço de alavanca foram obtidas as leituras de τ indicadas por um torquímetro com ponteiro de arrasto. A avaliação do equipamento foi feita através da comparação das leituras obtidas pelo Cisalhômetro e pelo Sheargraph, equipamento desenvolvido por Cohron (1963). Os coeficientes de correlação e de determinação de 0,84** e de 0,99**, respectivamente, para os valores de tensão cisalhante máxima (τ_m), obtidos nos ensaios de campo entre os dois equipamentos comprovam o bom funcionamento e desempenho do Cisalhômetro. A facilidade de manuseio, agilidade na obtenção dos dados e a excelente repetibilidade o credenciam na utilização em estudos da avaliação da resistência dos solos ao cisalhamento em condições de campo.

PALAVRAS-CHAVE: resistência ao cisalhamento, mecânica do solo do solo, corte do solo

SUMMARY: The purpose of this work was project and develop a pneumatic equipment that is able in field conditions built a *Coulomb Equation* ($\tau = c + \sigma_n \tan \phi$), determine the apparent cohesion (c) and the soil internal attrition angle (ϕ). The principle of the equipment functionality consists in the σ_n application with a hydraulical cylinder. The values were obtained by the relation $F = P/A$, where, F is the Power, P is the Pressure and A is the area. The values of τ obtained by an analogical torquimeter indicates the relation $F = T/d$, where, F is the Power, T is the Torque and d is the length of the toggle. The equipment evaluation was made by the comparison of the registers obtained from the Cisalhometer and Sheargraph, whose was developed by Cohron (1963). The correlation and the determination coefficients were 0,84** and 0,99**, respectively. The maximum values of shear stress (τ_m), obtained from the field tests between the two evaluated equipments, showed that the Cisalhometer got a good functionality and well field performance. The easy manipulation, the agility to get the results and excellent repeatability allow the equipment to be used in field condition to evaluate the soil shear strength.

KEYWORDS: shear stress, shear strain, soil mechanics, soil physic

INTRODUÇÃO: O uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas, adotado pelas mais variadas formas de manejo, tem sido responsável pelas deformações e modificações de alguns atributos dos solos agrícolas (Gill & Van Den Berg, 1967). Entre atributos está a resistência do solo ao cisalhamento, considerada uma das mais importantes propriedades dinâmicas na interação máquina-solo (Baver et

al., 1960) que, por falta de metodologias padronizadas e, ou equipamento de baixo custo e fácil manuseio, está sendo desconsiderada em estudos dessa natureza. A determinação da resistência do solo ao cisalhamento é feita pela quantificação dos parâmetros intercepto de coesão (c) e o ângulo de atrito interno do solo (ϕ) (Cooper & Nichols, 1959), cujos valores variam consideravelmente de acordo com o teor de água, tamanho das partículas, preparo do solo, entre outros (Terzaghi et al., 1996). Segundo Cooper & Nichols (1956); Vargas (1981) e Terzaghi et al. (1996), esses dois parâmetros podem ser estimados pela equação empírica de Coulomb ($\tau = c + \sigma_n \tan \phi$), onde τ é a tensão cisalhante (kPa), c é o intercepto de coesão (kPa), σ_n é a tensão normal (kPa) e $\tan \phi$ é o coeficiente de atrito, cujo arco \tan é o ângulo de atrito interno do solo. Segundo Lambe (1951), dos métodos existentes (cisalhamento direto, triaxial, compressão e torcional), os mais utilizados para a determinação dos parâmetros mencionados e, por conseguinte, da resistência do solo ao cisalhamento, são os ensaios de cisalhamento direto e o triaxial. Todavia, o alto preço dos equipamentos utilizados nesses ensaios, a falta de padronização de metodologias tem retardado os estudos dessa natureza. Propostas de metodologias e equipamentos alternativos têm sido apresentadas desde a década de 60. Cohron (1963) desenvolveu o sheargraph que apesar de ainda utilizado nos dias de hoje, apresenta dois aspectos que limitam a sua utilização: Primeiro, é a utilização de um papel gráfico específico que geralmente é importado e o seu alto custo limita a utilização do equipamento, principalmente em grandes áreas que solicite muitas amostragens. O segundo aspecto diz respeito a tensão normal e cisalhante, que não ultrapassa os 15 psi, isto é 103 kPa. Em solos tropicais, especialmente os muitos argilosos e com baixos conteúdos de água, tornam-se quase que impraticável a sua utilização. Este trabalho teve como objetivo projetar e desenvolver um equipamento pneumático, que em condições de campo, a partir da atuação de níveis crescentes de tensão normal (σ_n) e tensão tangencial (τ), permitisse construir a envoltória de Coulomb ($\tau = c + \sigma_n \tan \phi$), e determinar a coesão aparente (c) e o ângulo de atrito interno do solo (ϕ).

MATERIAL E MÉTODOS: O equipamento foi construído em uma estrutura metálica com formato de tripé, isto é, possui três hastes de sustentação, as quais são apoiadas em sapatas como cravos que ajudam na fixação do equipamento ao solo. Uma das hastes é regulável, permitindo, portanto, o nivelamento do equipamento em terrenos, normalmente irregulares (Figura 1). O equipamento é constituído de três corpos distintos: a) *Eixo onde atua a força normal e se dá à fixação do prato cisalhante*: na extremidade, através de um dispositivo de engate rápido, os pratos de cisalhantes são facilmente trocados, de acordo com o tipo e grau de consistência do solo. Assim, quanto mais resistência oferecer o solo que está sendo ensaiado, menor deverá ser a área de contato do prato cisalhante e, por conseguinte menor esforço do operador durante a aplicação da tensão normal. É por meio deste eixo que a tensão normal (σ_n) é aplicada ao solo; b) *Dispositivo pneumático e indicador analógico de pressão*: consiste de um cilindro de dupla ação e com capacidade que varia de 0 a 1000 kPa. O acionamento desse cilindro se dá por meio de uma bomba pneumática manual, cujo trabalho obedece à norma VDMA 24562–ISSO 6341. Fazendo comunicação entre a saída da bomba e o cilindro existe um manômetro com capacidade de 0 a 400 kPa que indica quanto de pressão (kgf cm^{-2}) está sendo aplicada na base do pistão que tem a função de empurrar a haste e o prato cisalhante contra o solo. No mesmo bloco onde está assentado um manômetro, há uma válvula, a qual permite retirar a pressão e retornar o cilindro ao seu estado de repouso original; c) *Dispositivo de torque*: na extremidade superior do eixo que fixa o prato cisalhante está acoplado um torquímetro de relógio com ponteiro de arraste e com capacidade de 30 Nm, o qual permite registrar depois de aplicados os movimentos torcionais (tensão tangencial) no sentido horário o *momento* e, por conseguinte a força resistida pelo solo no momento do seu rompimento. **Princípio do Ensaio:** A partir de valores de tensão normal aplicados ao solo e de valores de tensão cisalhante é obtida a envoltória de Coulomb, da qual é estimado os valores de c e ϕ . **Utilização do equipamento:** a) Fixar e nivelar o equipamento na área que vai ser avaliada, mantendo invariável o peso do operador sobre as sapatas de fixação; b) Definir de acordo com a consistência e o tipo de solo o prato cisalhador e encaixá-lo na parte inferior da haste; c) Acionar a bomba até que a pressão no cilindro (indicada pelo manômetro analógico) seja equivalente a tensão normal preterida; d) Encaixar o torquímetro na parte superior da haste. Zere o relógio comparador e gire a manopla do sentido horário até que o prato cisalhador rompa o solo. Neste

momento ficará registrado através do ponteiro de arraste o torque máximo resistido pelo solo no momento do seu rompimento; d) Converta as leituras de torque em força (tensão tangencial) utilizando a seguinte expressão: $F=T/d$ onde, F é a força, T é o torque e d é o comprimento do braço de alavanca. **Avaliação do equipamento:** foi feita em uma área da Fazenda Experimental do Lageado, UNESP – FCA, campus de Botucatu, Estado de São Paulo. A área utilizada do experimento foi de 500 m² dividida em grade de cinco metros, cujo solo sob sistema convencional, ensaiado foi um Latossolo Vermelho Distroférrico (Embrapa,1999), Os ensaios de resistência ao cisalhamento foram realizados com o Cisalhômetro e com Sheargraft (Cohron, (1963), cujas leituras foram utilizadas como testemunha. As medidas da resistência ao cisalhamento do solo foram feitas “in situ”, na camada superficial, e a partir de níveis crescentes de tensão normal (σ_n) e tensão tangencial (τ), foi ajustada reta de Coulomb $\tau = c + \sigma_n \tan\phi$, e determinou-se a coesão aparente (c) e o ângulo de atrito interno do solo (ϕ). A diferença estatística entre as equações ajustada para cada equipamento foi avaliada pelo método proposto por Snedecor & Cochran (1989) e correlação entre as leituras de ambos os equipamentos foi testada através dos coeficientes de correlação (Pearson) e de determinação (regressão linear simples).

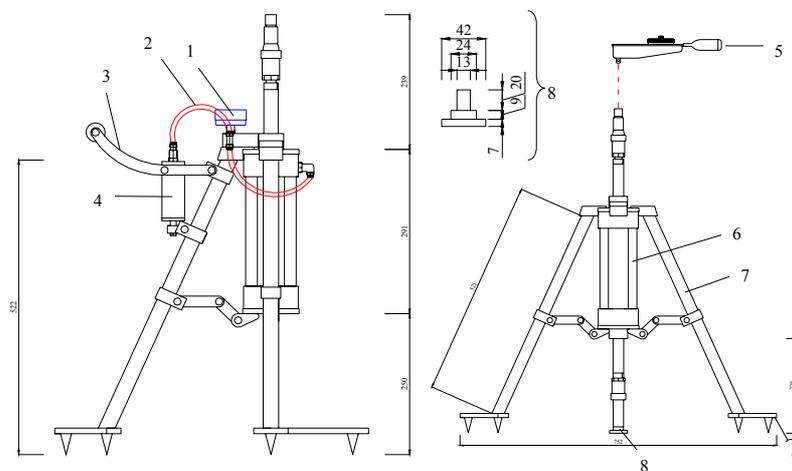


Figura 1. Cortes esquemáticos do Cisalhômetro. 1- manômetro; 2- alimentação de ar; 3-manopla de acionamento da bomba; 4 cilindro da bomba pneumática; 5-torquímetro; 6- cilindro; 7- haste de sustentação; 8- prato cisalhante; 9- saparas de apoio

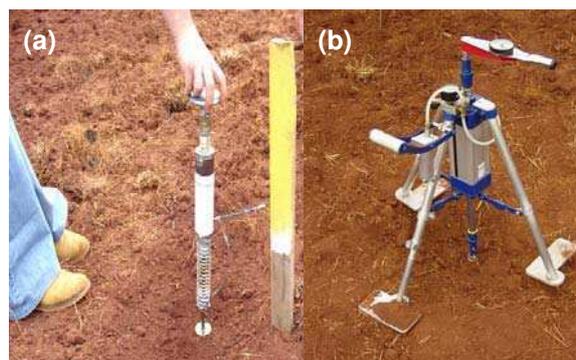


Figura 2. Avaliação do equipamento em condições de campo. A-Sheargraph (Cohron, 1963); B-Cisalhômetro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Segundo a correlação de Pearson, as leituras de tensão de cisalhamento máxima (τ_m) obtidas pelo Sheargraph (Cohron, 1963) e Cisalhômetro, para níveis crescentes de tensão normal (σ_n) e suas respectivas tensões tangenciais (τ) apresentaram um coeficiente de correlação de correlação, altamente significativo, de 0,84** (Figura 3a). Considerando apenas os valores médios de τ_m obtidas pelo Sheargraph (Cohron, 1963) e Cisalhômetro para cada

σ_n , foi ajustada a equação linear de primeira ordem: $\tau_s = 15,15 + 0,600 \tau_c$ e com coeficiente de determinação de 0,99**, onde τ_s é a tensão de cisalhamento obtida pelo sheargraph e τ_c é a tensão de cisalhamento obtida pelo cisalhômetro. Estes resultados ratificam o bom desenvolvimento do projeto e funcionamento do Cisalhômetro. As envoltórias e suas respectivas equações para cada equipamento estão apresentadas na Figura 3b. De acordo com os procedimentos proposto por Snedecor & Cochran (1963), apesar de se constatar diferenças estatísticas entre as inclinações das retas (ângulo de atrito interno do solo), não foi diferenças significativas pelo teste F entre os interceptos (coesão aparente) e nem entre as envoltórias.

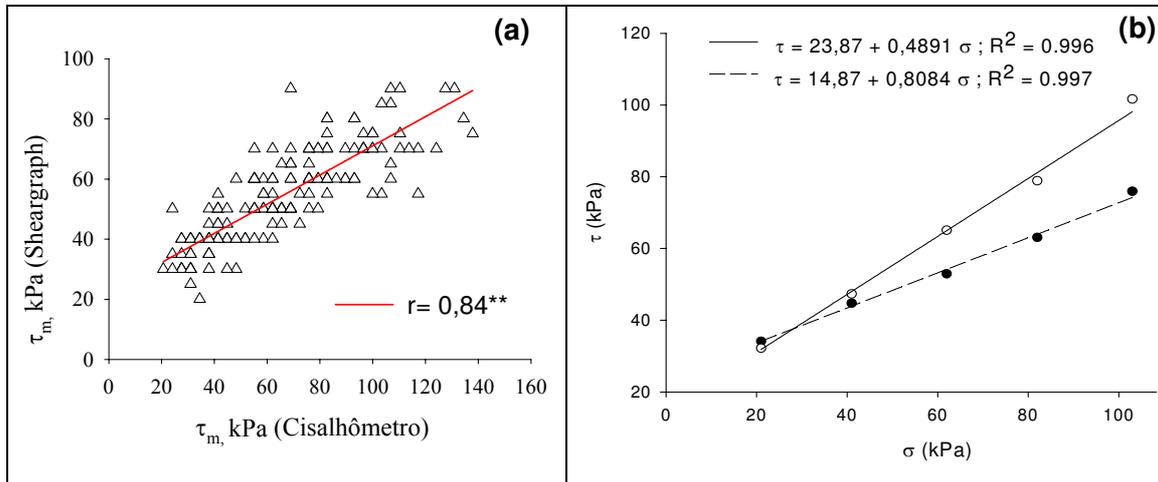


Figura 3. Correlação entre as leituras de tensão de cisalhamento máxima (τ_m) em (a) e envoltórias de resistência do solo ao cisalhamento em (b), obtidas pelo Sheargraph (Cohron, 1963) e o Cisalhômetro.

CONCLUSÕES: A boa correlação entre as leituras de tensão cisalhante máxima, assim como a inexistência de diferença estatística entre as envoltórias obtidas pelo equipamento proposto e Sheargraph, atestam o bom funcionamento e desempenho do Cisalhômetro. A facilidade de manuseio e agilidade na obtenção das leituras credencia sua utilização em estudos de avaliação da resistência dos solos ao cisalhamento, em condições de campo.

REFERÊNCIAS:

- COHRON, G. T. **Soil sheargraph**. Agricultural Engineering, p. 554-556, 1963.
- COOPER, A. W.; E NICHOLS, M. L. Some observations on soil compaction tests. **Agricultural Engineering**, Michigan, v. 40, n. 5, p. 264-267, May 1959.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999, 412p.
- GILL, W. R.; VAN DEN BERG, G. E. **Soil dynamics in tillage and traction**. Washington: USDA, 1967. Manual, n. 316,
- LAMBE, T. W. **Soil testing for engineers**. New York: John Wiley, 1951. 165p.
- SILVA, R. B. S. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados**. Lavras, 2002, 142p. Tese (doutorado em agronomia, área de concentração em solos e nutrição de plantas) – Universidade Federal de Lavras, 2002.
- SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. Ames: Iowa State University, 8. ed., 503p. 1989.
- TERZAGHI, K.; PERCL, R. B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3. ed. New York: John Wiley and Sons, 1996