

Uma Variação do Enunciado de Capacidade de Campo (CC): II) Uso de Dados de Drenagem em Infiltrômetros de Anel para Determinar CC

T.B. OTTONI⁽¹⁾, M.V. OTTONI⁽²⁾, M.B. OLIVEIRA⁽³⁾ & J.R. MACEDO⁽⁴⁾

RESUMO - Mesmo sendo um parâmetro de largo uso na Ciência do Solo aplicada, a capacidade de campo (CC) é uma variável cujo método-padrão *in situ* de determinação não é de execução simples, principalmente devido à adução de grandes quantidades de água aos locais do teste. Trabalhando com os mesmos solos do presente estudo, Ottoni Filho *et al.* [1] revisou a definição de CC e mostrou que ela pode ser estimada por uma função de pedotransferência (FPT) linear simples de umidade no solo à sucção de 6kPa ($\theta(6)$). Para evitar as grandes áreas de alagamento dos testes de CC, propomos usar dados de drenagem sob infiltrômetros de duplo-anel a fim de ajustar FPTs para CC. Isso é vantajoso, já que a mesma aplicação hídrica dos testes de infiltração poderia ser utilizada para a determinação de CC. Descobrimos que os dados de CC no anel foram, em média, 0,03m³m⁻³ maiores do que a CC-padrão. Nossa proposta é promissora, pois uma FPT linear que foi desenvolvida para os dados modificados de CC no anel (subtraídos de 0,03m³m⁻³), baseada apenas em $\theta(6)$, foi tão precisa quanto a FPT similar mostrada em [1], que foi desenvolvida para os dados de CC-padrão. Os erros médios quadráticos de determinação da CC a partir de ambas as FPTs foram aproximadamente de 0,02m³m⁻³.

Introdução

Capacidade de campo (CC) é um parâmetro de solo largamente aplicado em hidrologia, gestão das terras e engenharia. Em Ottoni Filho *et al.* [1] a CC foi reenunciada numa base que permite maior reprodutibilidade e precisão para este termo, mas mantendo seu significado prático original. O procedimento-padrão *in situ* de determinação de CC é pelo alagamento de uma área quadrada (ou retangular) de um solo nu [1]. O principal inconveniente do experimento de campo é a adução de volumosas quantidades de água, devida ao grande tamanho tanto da lâmina d'água para saturar o perfil quanto da área mínima da parcela experimental que é imaginada ser necessária para garantir infiltração e drenagem verticais. Hillel [2] e Cassel & Nielsen [3]

recomendaram parcelas com áreas de 5m² e 9m², respectivamente, mas tem sido usados tamanhos bem menores (Paige & Hillel [4] usaram 1,2m x 1,2m; Embrapa [5] recomenda 1,0m x 1,0m). Em [6] concluiu-se que a CC obtida em parcelas de 1,0m x 1,0m reproduziu a distribuição de CC em experimentos *in situ* similares conduzidos em colunas de solo indeformado, contidas num cilindro de 0,80m de diâmetro, cravado 0,70m no terreno. Em [7] mostrou-se que um disco de infiltração interno (com raio de 50mm) permitiu um fluxo de infiltração vertical quasi-saturado, quando envolvido por um disco externo com 150mm de raio, ao testar-se um infiltrômetro de tensão com discos concêntricos sob uma larga faixa de condições, sugerindo que pequenas áreas de contorno podem induzir escoamentos verticais internos em testes de campo. Levando em consideração os procedimentos do enunciado de CC contidos em [1], será aqui apresentado um método *in situ* alternativo para determinar CC a partir de dados de umidade de solo referentes à drenagem sob o anel interno de um infiltrômetro de duplo anel. Isso é vantajoso, já que a mesma aplicação hídrica de um teste de infiltração pode ser utilizada como fase de molhamento de um teste de drenagem subsequente, além do fato de que a aplicação hídrica é muito mais operacional em infiltrômetros de anéis do que nas grandes bacias dos testes-padrões de CC.

Palavras-Chave: capacidade de campo, função de pedotransferência, infiltrômetro de anel.

Material e métodos

Trabalhamos com 13 unidades de solos e, para cada uma, as seguintes propriedades foram determinadas em várias profundidades e em dois locais: CC, frações de areia, silte, argila e matéria orgânica (MO), densidade global (DG) e umidade volumétrica no solo às sucções de 6kPa, 33kPa e 1500kPa ($\theta(6)$, $\theta(33)$ e $\theta(1500)$). Em [1] acha-se uma melhor descrição da área de estudo, solos e métodos experimentais. Os procedimentos para a determinação *in situ* da CC-padrão seguem o enunciado de CC apresentado no artigo acima. Dois infiltrômetros de duplo-anel ($\Phi_i = 20\text{cm}$, $\Phi_o = 39\text{cm}$), inseridos 5cm no

⁽¹⁾ Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 21945-970, Cx. Postal 68570. E-mail: teottoni@poli.ufrj.br.

⁽²⁾ Divisão de Matérias Primas e Minerais – Comissão Nacional de Engenharia Nuclear, R. General Severiano, 90, Rio de Janeiro, RJ, 22290-901.

⁽³⁾ Faculdade Redentor, Av. Zulamith Bittencourt, 22, Itaperuna, RJ, 28300-000.

⁽⁴⁾ Embrapa – Centro Nacional de Pesquisa de Solos, R. Jardim Botânico, 1024, Rio de Janeiro, RJ, 22460-000.

Apoio financeiro: FINEP (CTHidro/GBH-02/2002).

terreno, foram instalados próximos à cada tabuleiro de teste da CC, que tem dimensões de 1,0m x 1,0m. Cada anel externo estava a 1,0 do meio de dois lados opostos do tabuleiro. Os testes de infiltração foram realizados simultaneamente ao teste de inundação no tabuleiro contíguo. Em certos anéis foi aplicado um volume adicional de água logo após o término do teste, caso a infiltração acumulada durante a duração do mesmo fosse menor do que 15cm; porém, tal regra não foi seguida em todos os locais. Foi aplicada água em ambos os anéis interno e externo, mantendo seus níveis aproximadamente à mesma altura ($h = 6 \pm 1$ cm sobre o terreno durante os testes de infiltração), mas as lâminas de infiltração foram apenas medidas nos anéis internos. Assim, o experimento de drenagem foi apenas realizado naqueles pares associados de duplo-anéis nos quais mais que 15cm de água tivesse infiltrado em cada par. Apenas em duas unidades de solo a aplicação hídrica nos anéis foi significativamente maior que 20cm. Para todos os demais locais onde o experimento de drenagem foi realizado nos anéis (sete solos), a aplicação hídrica foi de cerca de 20cm (± 5 cm na maioria dos casos), compatível com as lâminas d'água aplicadas nos tabuleiros de CC. Em tais infiltrômetros, sua área molhada foi coberta por um plástico por 48h. Após esse tempo, a distribuição da umidade volumétrica no solo sob o anel interior foi caracterizada pelo método gravimétrico, pela amostragem por um anel de Kopeck, às mesmas profundidades amostradas no tabuleiro de inundação contíguo. A média de tais medidas de umidade em duplicata, por profundidade e tabuleiro, foi o valor correspondente à CC no anel.

Como mostrado em [1], as funções de pedotransferência (FPTs) são uma ferramenta valiosa na determinação indireta de CC para os solos estudados, baseada apenas no conhecimento de dados básicos disponíveis de solo. Como os dados de CC-padrão e no anel foram correlacionados, calibraram-se por regressão linear FPTs para os dados no anel, e avaliaram-se as mesmas como estimadoras de CC. Os dados de entrada testados dessas FPTs foram as variáveis de solo mencionadas no último parágrafo (à exceção de CC). Assim, tal método pode ser visto como sendo um procedimento de regressão para determinar CC, tendo, como dados de entrada, parâmetros de laboratório (as variáveis de entrada da FPT para CC), mas, também, informação de campo em drenagem (a CC no anel). Os erros médios quadráticos (EMQs) e o teste não-paramétrico de Wilcoxon [8,9] foram usados para avaliar a CC medida contra a CC estimada.

Resultados e Discussão

A base de dados da CC no anel (CCa) é de tamanho $n=56$ (9 solos). Chamamos micro (microporosidade) o

valor $\theta(6)$. Os coeficientes de correlação entre CCa e as outras variáveis de solo são apresentados na Tabela 1, onde se mostra que apenas silte, MO and DG não são correlacionadas significativamente com a CCa. Entre as variáveis de umidade, micro é a menos correlacionada com a CCa, o que contrasta com as correspondentes correlações com a CC expressas pela Tabela 1 de [1], onde a micro foi o parâmetro de solo de maior correlação com a CC ($r \geq 0,926$). Na Fig. 1b são mostrados os dados e a equação de regressão de CCa vs. micro (Eq.1) e CC vs. micro (Eq.2):

$$CCa_c = 0,6542\text{micro} + 0,08735 \quad [1]$$

$$CC_c = 0,7814\text{micro} + 0,01767 \quad [2]$$

Percebe-se que $CCa_c > CC_c$ na faixa testada de CC, o que é consequência da tendência observada de CCa ser maior do que CC (Fig. 1a). A previsão da CC pela Eq. 1 é mostrada na Fig. 1c, onde o resíduo médio correspondente é $0,0435\text{m}^3\text{m}^{-3}$, que é menor do que o resultante EMQ de $0,0486\text{m}^3\text{m}^{-3}$ quando a própria micro é usada como uma estimativa de CC (Fig. 1d). Isso indica que a FPT ajustada para CCa (Eq.1) incorpora precisão relativamente à sua variável independente de umidade (micro) utilizada como uma estimativa de CC. Tal uso da umidade do solo a uma sucção conhecida é uma forma tradicional de estimativa de CC [1]. Entretanto, a Eq.1 apresenta uma tendência em superestimar a CC, que é consequência da tendência geral dos dados de CC no anel serem maiores do que a CC-padrão. Introduzindo a seguinte anamorfose à medição de CCa, pode-se eliminar este inconveniente:

$$CCa' = CCa - 0,03 \quad [3]$$

Os dados CCa' são representados na Fig. 2a, contra os correspondentes valores de CC. A Fig. 2b apresenta os dados de CCa' vs. micro e seu correspondente modelo de regressão:

$$CCa'_c = 0,6542\text{micro} + 0,05735 \quad [4]$$

Testa-se a Eq. 4 como um avaliador de CC na Fig. 2c, onde se mostra que tal estimativa, baseada num ajuste de dados de CCa com anamorfose, é aproximadamente de mesma acurácia que a previsão da Eq.2, que foi calibrada para os dados da CC-padrão. Os EMQs são de $0,0253\text{m}^3\text{m}^{-3}$ (pela Eq.4) e $0,0232\text{m}^3\text{m}^{-3}$ (pela Eq.2), próximos ao EMQ de $0,0222\text{m}^3\text{m}^{-3}$ da Eq.2 (Fig. 2c1) de Ottoni Filho *et al.* [1], que é uma pedofunção baseada apenas na micro, mas ajustada para a base de dados maior da CC-padrão (13 solos, $n=92$). Mostra-se também que, de acordo com o Teste de Wilcoxon ($P=1\%$), a estimativa de CC pela Eq. 4 não é tendenciosa. Com respeito à validação das Eq. 4 e 2 para o conjunto de dados remanescentes ($n=36=92-56$), onde a informação de CCa não é disponível, nota-se na Fig. 2d que há uma leve deterioração nas estimativas de CC. Nesse caso, as Eq. 4 e 2 tendem a subestimar a CC, mas os respectivos resíduos médios

(0,0377 e 0,0309m³m⁻³) são próximos e não grandes. Tais erros individuais são maiores quando $CC > 0,30m^3m^{-3}$, provavelmente porque a maioria dos dados usados na calibração de ambas as equações são para solos em que $CC < 0,30m^3m^{-3}$, como indicado na Fig. 2c.

Pode ser feita uma aplicação direta dos dados de CCa (ou CCa') para inferir a CC sem FPTs, mas neste caso os erros são largamente majorados, se comparados com a previsão da Eq.1 (ou Eq.4), como mostrado pelas Fig.1a e 1c (ou pelas Fig. 2a e 2c). Isso demonstra os efeitos benéficos de utilizar FPTs nesse método. Ambas as Eq. 1 e 4 podem ser consideradas PTFs aceitáveis para CC. A vantagem é que seus coeficientes somente dependem da regressão dos dados de CCa (ou CCa') com a microporosidade. A Eq.4 tem melhor desempenho que a Eq.1, e é quase tão eficiente quanto o modelo equivalente (Eq.2 em [1]) que foi calibrado para todos os dados medidos de CC (n=92). O desempenho local da Eq.4, para os dados de uma única unidade de solo, é também satisfatório. Nesse caso, o máximo EMQ local entre os nove solos onde havia informação de CCa é de 0,042m³m⁻³.

Não se pode dizer se a tendência apresentada na Fig. 1a será reproduzida em experimentos de campo similares para outras áreas. Suspeita-se que a tendência geral dos dados de CCa serem maiores do que a CC-padrão seja devida a diferenças geométricas (efeitos de escala) entre os fluxos abaixo do tabuleiro e do dispositivo de duplo-anel. Sugere-se que a metodologia acima, de regressão dos dados de CCa para determinação de CC, seja aplicada quando amostras de vários solos estejam incorporados ao processo de calibração. A necessidade e extensão da anamorfose dos dados originais de CCa é uma questão de investigação posterior.

Conclusões

Quando se trata de CC, uma questão importante são as dificuldades operacionais de seu teste-padrão de campo. Como a CC é o resultado dos processos de infiltração por inundação e drenagem interna, é conveniente que se use a mesma aplicação hídrica para ambos os testes de infiltração e de CC. Nesse artigo, um infiltrômetro de duplo-anel foi o dispositivo escolhido para tal teste de campo de duplo objetivo. Recomenda-se que a fase de infiltração seja mantida até que seja aplicada a lâmina d'água (W) estipulada para a CC. Se o solo é permeável e W se infiltra antes do fim do teste de infiltração, propomos que se continue o teste, mas o termine tão logo possível. Descobriu-se que houve uma tendência para os dados de CC no anel serem, em média, 0,03m³m⁻³ maiores do que a CC medida nos tabuleiros de inundação adjacentes, mas mesmo com a anamorfose (diminuindo 0,03m³m⁻³) nas determinações originais no anel e sua utilização como previsões de CC, os erros de estimativa não foram pequenos (EMQ = 0,0595m³m⁻³).

3). Entretanto, uma FPT linear calibrada para os dados de CCa com anamorfose, baseada apenas em $\theta(6)$ (Eq.4), foi tão acurada (EMQ=0,0253m³m⁻³) quanto à FPT similar ajustada para os dados de CC-padrão medidos. Logo, sempre que se possa determinar a CC a partir de propriedades básicas dos solos, o método *in situ* proposto é promissor. A grande conveniência de se usar dados de drenagem dos testes de infiltração para a estimativa de CC encoraja a continuidade na pesquisa desta proposta.

Referências

- [1] OTTONI FILHO, T.B.; OTTONI, M.V.; OLIVEIRA, M. B. & MACEDO, J. R.. 2007. Uma variação do enunciado de capacidade de campo (CC): I) Uso de funções de pedotransferência para determinar CC. *Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*.
- [2] HILLEL, D. 1980. *Applications of soil physics*. Academic Press.
- [3] CASSEL, D. K. & NIELSEN, D. R. 1986. Field capacity and available water capacity. p. 901-926. In KLUTE, A., (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1, Physical and mineralogical methods*. 2nd ed. Madison, Amer. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Agron.
- [4] PAIGE, G. B. & HILLEL, D. 1993. Comparison of three methods for assessing soil hydraulic properties. *Soil Sci.* 155(3): 175-189.
- [5] EMBRAPA. 1979. *Manual de métodos de análise do solo*, Rio de Janeiro.
- [6] FABIAN, A. J. & OTTONI FILHO, T. B. 2000. Determinação de capacidade de campo "in situ" ou através de equações de regressão. *Pesq. agropec. bras.* 35(5): 1029-1036.
- [7] ZHANG, Y.; SMITH, R. E.; BUTTERS, G. L. & CARDON, G. E.. 1999. Analysis and testing of a concentric-disk tension infiltrometer. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 63(3):544-553.
- [8] BRADLEY, J. V. 1968. *Distribution-free statistical tests*. Prentice Hall, New Jersey.
- [9] ZAR, H. Z. 1984. *Biostatistical analysis*. 2nd ed.. Prentice Hall, New Jersey.

Tabela 1. Coeficientes de correlação entre capacidade de campo no anel e propriedades básicas dos solos, incluindo a capacidade de campo (CC) (n=56)

CC	Areia	Silte	Argila	Micro	θ (33)	θ (1500)	MO	DG
0,509**	-0,846**	-0,181	0,860**	0,664**	0,735**	0,789**	0,071	-0,096

** Correlação significativa a P=5%, de acordo com Teste de Pearson.

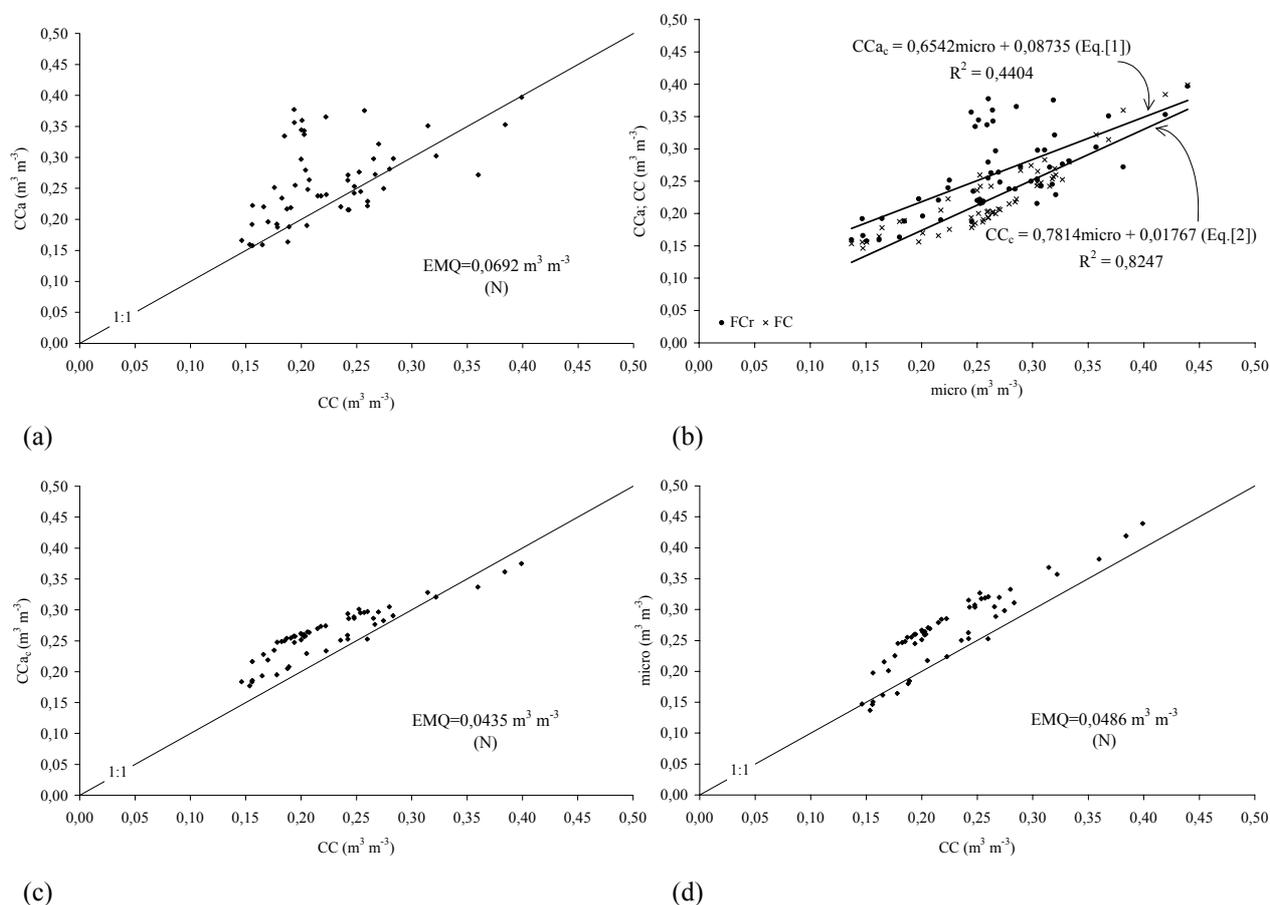


Figura 1. Relações envolvendo dados de capacidade de campo medida (CC), capacidade de campo no anel (CCa) e microporosidade (micro). Em (a) e (d), CC é comparada com CCa e micro, respectivamente. Em (b), são representadas as equações de regressão CCa vs. micro (Eq.1) e CC vs. micro (Eq.2). Em (c), os dados de CC são avaliados contra os valores calculados pela Eq.1. (N) significa que, de acordo com o Teste de Wilconxon (n=56), a variável do eixo vertical não é estatisticamente coincidente com CC.

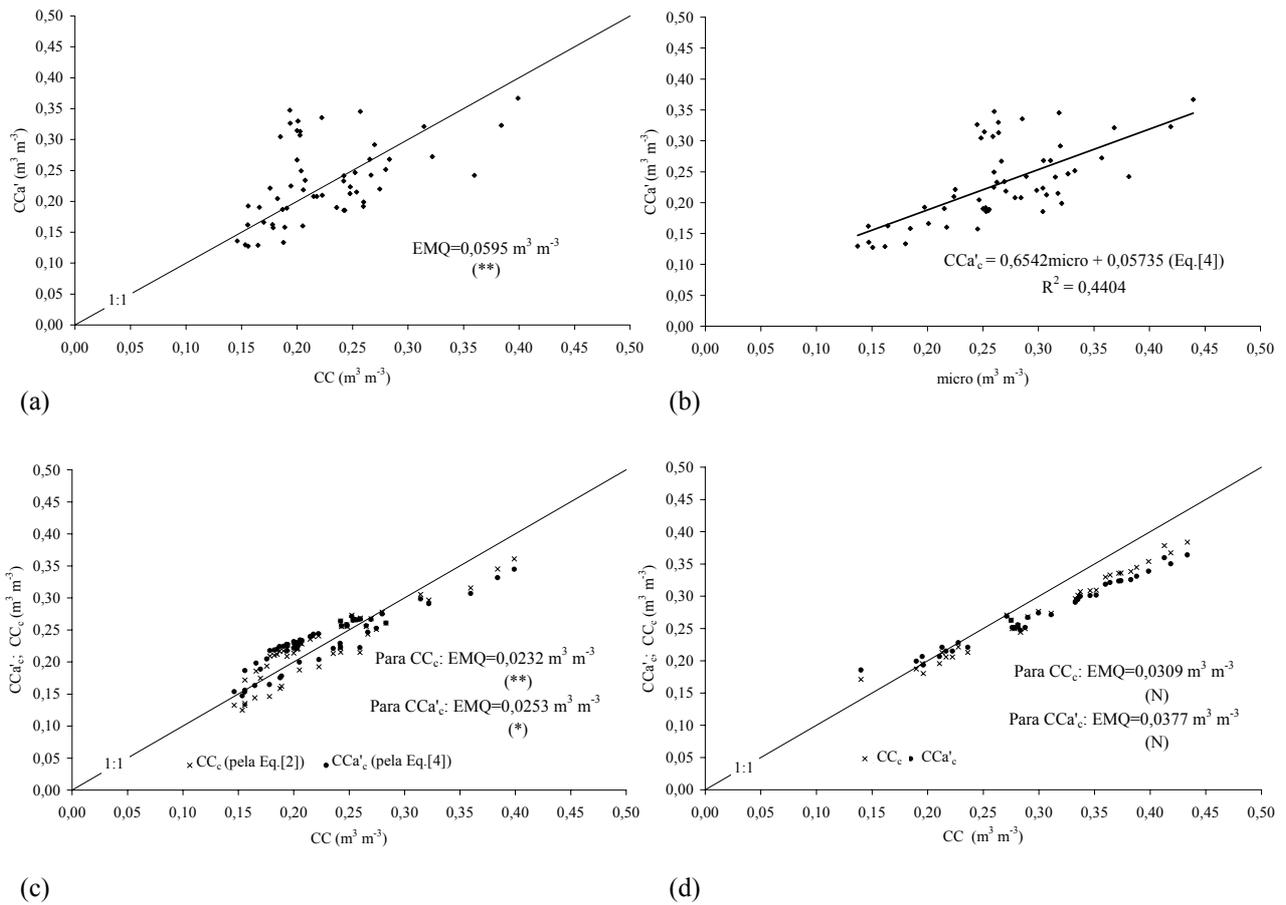


Figura 2. Relações envolvendo dados de capacidade de campo medida (CC), capacidade de campo no anel com anamorfose (CCa') e microporosidade (micro). Em (a) CC é comparada com CCa'. Em (b), é representada a equação de regressão CCa' vs. micro (Eq.4). Em (c), os dados de CC são avaliados contra os valores calculados pelas Eq. 2 e 4. As três figuras são para a base de dados (n=56) onde há disponibilidade de informação sobre CC no anel. Em (d), a CC predita pelas Eq.2 e 4 é validada para as amostras (n=36) onde a informação correspondente de CC no anel não era disponível. (*) e (**) significam que, de acordo com o Teste de Wilconxon, a variável do eixo vertical é estatisticamente coincidente com CC (a P=1 ou 5%, respectivamente); (N) significa que a variável não é estatisticamente coincidente com CC.