

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE CÁPSULAS POROSAS PARA USO NA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

PEDRO IDELANO DE ALENCAR FELÍCIO¹; RENATO SÍLVIO DA FROTA RIBEIRO¹; ALEXSANDRO OLIVEIRA DA SILVA¹; JOSÉ CARLOS DE ARAÚJO¹ E RAIMUNDO NONATO TÁVORA COSTA¹

¹ Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Av. Mr. Hull, s/n, Pici, CEP:60356-001, Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: idelano.felicio@gmail.com; renato@ufc.br; alexandro@ufc.br; jcaraujo@ufc.br; rntcosta@ufc.br

1 RESUMO

Há diversos usos para as cápsulas porosas na agricultura, contudo, estas devem ser caracterizadas por parâmetros de avaliação como pressão de borbulhamento e condutância hidráulica. O objetivo da pesquisa foi aferir as características físicas de cápsulas porosas para uso na irrigação localizada. Para o sistema de irrigação proposto, utilizaram-se dez cápsulas porosas na execução do ensaio experimental que consistiu em um delineamento inteiramente casualizado com três tratamentos, constando de diferentes manejos de irrigação (manejo via clima, via solo e via cápsula porosa) com dez repetições, totalizando 30 unidades experimentais, tendo sido avaliados parâmetros de produção e crescimento da cultura do rabanete. A pressão de borbulhamento média observada foi de 2,34 atm, enquanto a condutância hidráulica apresentou valor médio de $9,27 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. Para a cultura em estudo não houve diferenças entre os tratamentos estudados, sendo que a massa fresca da raiz apresentou valores de 7,4 g planta⁻¹ para o manejo via clima e 4,7 g planta⁻¹ para o manejo via cápsula porosa, não sendo estatisticamente diferentes pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). O uso de sistema de irrigação por cápsulas porosas apresenta-se como uma alternativa viável para o cultivo de hortaliças em pequenas áreas.

Palavras-chave: Pressão de borbulhamento, condutância hidráulica, emissor.

FELÍCIO; P. I. A.; RIBEIRO, R. S. F.; SILVA, A. O.; ARAÚJO, J. C.; COSTA, R. N. T.

PHYSICAL CHARACTERISTICS OF POROUS CAPSULES FOR USE IN IRRIGATION SYSTEM LOCATED

2 ABSTRACT

There are different uses for porous capsules in agriculture, however they must be characterized by assessment parameters like bubbling pressure and hydraulic conductance. The objective of this work was to measure physical characteristics of porous capsules for localized irrigation use. For the proposed irrigation system, porous capsules were used in the execution of experimental trial, consisting of a completely randomized design with three treatments, different irrigation managements (climate management, soil management and porous capsule management) with 10 replications, totaling 30 experimental units, the culture chosen was

radish, and parameters of production and growth were assessed. The average bubbling pressure found was 2.34 atm, while conductance presented values of $9.27 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. For the crop study, differences between the treatments studied by the Tukey test ($p < 0.05$) were not found; fresh root mass presented values of 7.4 g plant^{-1} for the climate management and 4.7 g plant^{-1} for management of porous capsule. The use of porous capsule irrigation systems is a viable alternative for growing vegetables in small areas.

Keywords: Bubbling pressure, hydraulic conductance, emitter.

3 INTRODUÇÃO

As cápsulas porosas, também conhecidas como cápsulas de cerâmicas, embora sejam fabricadas em série, guardam características distintas (MORAES et al., 2006). Isto se deve primordialmente às formas geométricas das partículas que as constituem e ao fato de que as acomodações entre as partículas não se repetem, em consequência do material usado e a forma em que a cápsula é fabricada, originando-se assim, diferentes poros, fissuras, microgalerias e rugosidade das paredes internas, dando a cada cápsula características próprias (SOCCOL et al., 2005). Sendo assim, características importantes, como transudação, condutância hidráulica e pressão de borbulhamento podem apresentar elevada amplitude entre as cápsulas.

É importante entender que as cápsulas porosas devem atender à dinâmica do uso para a qual se propõem. Cápsulas usadas em tensiômetros, por exemplo, devem apresentar condutância hidráulica elevada e baixa pressão de borbulhamento, para que se tenha resposta de medidas mais rápidas, conforme Moraes et al. (2006) e Soccol et al. (2005), enquanto cápsulas usadas como emissores de irrigação localizada (SILVA et al., 2005) devem ter baixos valores de condutância e alta pressão de borbulhamento, proporcionando um fluxo hídrico lento. Contudo, a mensuração desses valores é pouco abordada na literatura, principalmente para uso na irrigação localizada.

A irrigação localizada caracteriza-se, basicamente, pela aplicação da água numa fração do volume do solo explorado pelas raízes, através de gotejadores, tubo poroso ou microaspersores, geralmente com distribuição da vazão pressurizada em curtos intervalos de rega (FRIZZONE et al., 2012). O sistema consiste em aplicar a água diretamente na região radicular em pequenas intensidades e alta frequência, mantendo o solo próximo à capacidade de campo (BERNARDO et al., 2019). Esses sistemas utilizam pequenas vazões, quando comparados a outros sistemas de irrigação, devido ao emprego de emissores com diâmetros de saída reduzidos submetidos a baixas pressões. Os emissores são fixos na tubulação disposta na superfície do solo, ou enterrados, acompanhando as linhas de plantio (TESTEZLAF, 2017).

A irrigação localizada se desenvolveu em função da escassez de água, pois como aplica água em apenas parte da área, reduz a superfície molhada do solo exposta às perdas por evaporação, fazendo com que, dessa maneira, se tenha maior eficiência de aplicação se comparada a outros sistemas (FRIZZONE et al., 2012; BERNARDO et al., 2019; MANTOVANI et al., 2009). Nos últimos anos, tal método tem apresentado significativo crescimento, ocupando dentro das áreas irrigadas maior espaço, mostrando-se como atividade promissora para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil, principalmente pelo uso da fertirrigação (SILVA et al., 2016).

Apesar de poderem ser utilizadas como emissores na irrigação (SILVA et al.,

2005), as cápsulas porosas apresentam elevada heterogeneidade, o que interfere na uniformidade do sistema, devendo assim, antes de sua utilização, serem avaliadas para o seu uso. Trabalhos como os de Silva et al. (2005) apontam para a viabilidade desse sistema em pequenas áreas, tendo como vantagem a redução da evaporação no sistema, já que seus emissores funcionam enterrados no solo.

Outra vantagem de sistemas de irrigação por cápsulas porosas está relacionada às baixas pressões requeridas para o funcionamento do sistema, diferentemente de outros sistemas localizados (ALMEIDA et al., 2016), o que reduz os custos fixos e variáveis. Nesse contexto, cabe destacar que o sistema com cápsulas porosas tem potencial para requerer menor pressão que o sistema de irrigação *bubbler* ou borbulhamento (RAWLINS, 1977), desenvolvido pela Universidade do Arizona (USA).

A pesquisa teve como objetivo avaliar as características de cápsulas porosas utilizadas como emissores em sistema de irrigação localizada.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Departamento de Engenharia Agrícola (DENA) do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, nos meses de setembro e outubro de 2016. Os equipamentos utilizados nesses ensaios foram desenvolvidos e adaptados no DENA e aferidos no Laboratório de Metrologia Mecânica – Pressão – Força – Dimensional – Torque ASTEF (UFC), registrado sob o N° 26983 (manômetro da câmara de pressão, fixador de cápsulas, difusor).

4.1 Estrutura investigada através de nanomicroscopia

Visando entender a microestrutura das cápsulas porosas, amostras de dez cápsulas foram levadas para análise na Central Analítica do Departamento de Física da UFC, onde foram observadas em microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta 450 FEG, com resolução de 1nm, que permite magnificação de até 2MX.

Análises químicas elementares foram realizadas por EDS com resolução de 131 e V e detector Apollo X, que permite verificar a microestrutura física da cápsula. As análises foram realizadas com temperatura controlada de ambiente a + 1000 °C. Imagens foram obtidas com aumento do tamanho em 500, 1500, 3500 e 50.000 vezes sob pressão controlada entre 10 a 400 Pa (modo ambiental) antes e depois da realização do teste de borbulhamento.

As amostras foram levadas à análise do microscópio após metalização das mesmas. A metalização foi procedida através de aparelho QUORUM modelo Q 150 T ES (Figura1). Após as fixações, as amostras foram pulverizadas com ouro, por ser este o metal ideal para propagação do fluxo magnético necessário para a ampliação das imagens. A análise microscópica também permitiu identificar e quantificar os elementos químicos que compõem a cápsula, através de imagens espectrográficas e colorimétricas.

4.2 Pressão de borbulhamento, condutância hidráulica e transudação das cápsulas.

A pressão de borbulhamento (PB) está associada ao fenômeno em que um fluxo de ar comprimido passa através das paredes da cápsula saturada. Nos ensaios, as cápsulas foram imersas num recipiente translúcido contendo água destilada, permitindo assim que se visualisassem as

borbulhas de ar saindo da superfície exterior da cápsula conforme descrito por Libardi (2013).

No procedimento do ensaio, utilizou-se um compressor e uma minicâmara de pressão, ambos munidos de manômetros previamente aferidos, interligados através de uma tubulação que levava a uma cápsula porosa devidamente saturada e imersa num recipiente translúcido contendo água destilada. O compressor era acionado a uma pressão crescente até 2,5 atm, registrando-se o valor da pressão no momento em que as bolhas de ar eram visualizadas. Após os testes de borbulhamento, as cápsulas foram novamente submetidas a imagens microscópicas para observação de sua microestrutura física, a fim de analisar alterações físicas nas suas estruturas.

Nos ensaios de condutância hidráulica das cápsulas (CH), utilizou-se metodologia preconizada por Libardi (2013), na qual através do permeâmetro de carga variável se observam e mensuram as relações do fluxo de água através das paredes da cápsula, quando submetida a diferentes pressões decrescentes. A condutância hidráulica mensura a maior ou a menor condição de impedimento que um fluxo de água apresenta para passar através das paredes da cápsula. Para o cálculo da condutância hidráulica, usou-se a equação 1.

$$CH = \frac{\alpha \cdot \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right)}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

Em que:

CH - é a condutância hidráulica ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$);

α - é a área da seção reta transversal do tubo condutor (cm^2);

H_1 e H_2 - são as cargas hidráulicas decrescentes (cm) aplicadas no evento;

$t_2 - t_1$ - intervalo de tempo em segundos, que o nível da água no interior do tubo leva para se deslocar de H_1 para H_2 .

Transudação (q), que pode ser denominada como a medida do volume de líquido ao passar através das paredes da cápsula na medida de um intervalo de tempo considerado, foi obtida através do volume decantado na cuba em função do tempo ($\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$) e do desnível da superfície livre do líquido (cm coluna de água) medidos no permeâmetro de carga variável. A capacidade de transudação das cápsulas (q), quando submetidas a diferentes pressões, foram feitas em condição de cápsula afogada.

4.3 Uso das cápsulas para irrigação

Para avaliar a viabilidade do uso das cápsulas porosas na irrigação, um experimento foi realizado em casa de vegetação, visando comparar diferentes manejos de irrigação. A cultura escolhida foi o rabanete (*Raphanus Sativus*), com semeadura em vasos com capacidade de 4537 cm^3 em solo de textura franco argilo arenosa, contendo 61% de areia, 33% de argila e 6% de silte. A adubação foi realizada via composto orgânico elaborado com esterco de caprino (Tabela 1).

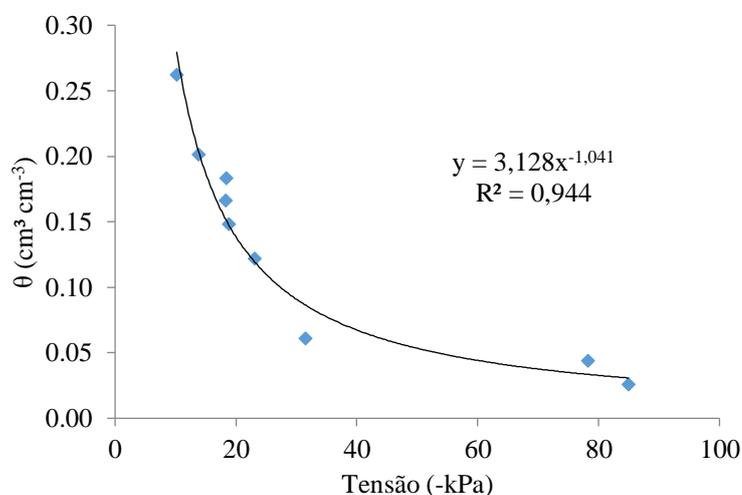
Tabela 1. Atributos químicos do composto para adubação de cobertura

| Atributos químicos | Profundidade (0 - 0,3 m) |
|--|--------------------------|
| Cálcio ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) | 14,00 |
| Magnésio ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) | 9,20 |
| Sódio ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) | 1,14 |
| Potássio (mg/dm^3) | 1690 |
| Hidrogênio + Alumínio ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) | 1,00 |
| Alumínio ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) | 0,00 |
| Soma de bases ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) | 28,20 |
| CTC (t) ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$) | 28,20 |
| CTC (T) ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$) | 28,30 |
| Matéria Orgânica (g kg^{-1}) | 14,30 |
| Fósforo Assimilável (mg kg^{-1}) | 314,70 |
| Ferro (mg/dm^3) | 26,90 |
| Cobre (mg/dm^3) | 0,40 |
| Zinco (mg/dm^3) | 20,4 |
| Manganês (mg/dm^3) | 100,30 |
| pH em água (1:2,5) | 6,90 |

Fonte: Laboratório de solos/água – Funceme (2016).

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com dez repetições. Os tratamentos foram constituídos de três manejos da irrigação: manejo da irrigação via clima (MIC), manejo da irrigação via solo (MIS) e manejo da irrigação com uso de cápsulas porosas (MICP), totalizando assim 30 unidades experimentais. Cada unidade experimental era representada por um vaso com duas plantas, separadas num espaçamento de 0,10 m.

O MIC foi realizado com base em dados obtidos pelo tanque classe A e coeficiente de cultivo, conforme (ALLEN et al., 1998). O MIS foi realizado com base em dados de tensão de água no solo (kPa) medidos, de maneira diária, através de tensiômetros de punção, obtendo-se a umidade do solo pela curva característica (Figura 1) e cálculo da lâmina de irrigação, conforme Mantovani et al. (2009).

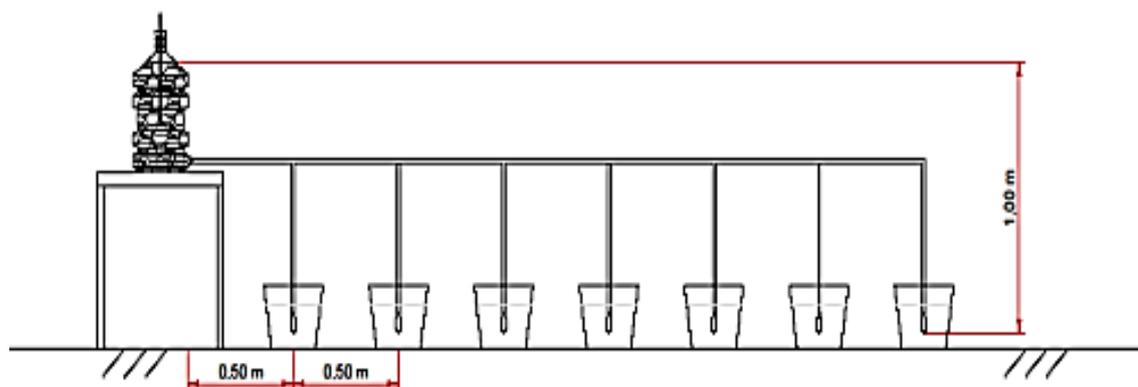
Figura 1. Curva característica do solo utilizado

Para o MICP, foi elaborado um sistema de irrigação localizada em que as cápsulas porosas são os emissores. Os dados de PB, C e q, anteriormente explicados neste trabalho, nortearam a disposição espacial e o cálculo do sistema, ou seja, quanto maiores os valores de PB, C e q das cápsulas, mais distantes da fonte alimentadora de água estas ficaram. Para melhor entender o funcionamento do sistema, foi utilizado um garrafão translúcido de 20 L, devidamente aferido quanto ao volume e à altura da coluna de água, munido de um registro de saída

conectando-se a uma tubulação de plástico de 2,00 m de comprimento e 1,2 cm de diâmetro interno, a tubulação principal está conectada à tubulação de distribuição que por sua vez se conecta ao sistema emissor ao qual as cápsulas estão fixadas (Figura 2).

As cápsulas porosas como emissores estão conectadas a uma tubulação plástica translúcida de diâmetro interno de 1,2 cm, a qual é ligada a uma tubulação de alimentação de mesmo diâmetro. No interior da cápsula foi colocada uma bucha de parafuso nº 8, que funciona como filtro e como difusor.

Figura 2. Sistema de irrigação por cápsulas porosas



O sistema funcionou sob pressão constante, ou seja, a coluna de água que proporciona o fluxo de água que passa através das paredes das cápsulas é constante e, para tanto, foi utilizado o princípio físico do “Frasco de Mariote” para alimentar o sistema.

Aos 30 dias após a semeadura (DAS) foram medidas as variáveis de produção: massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa fresca das raízes (MFR), através de balança de precisão de 0,01 g, e comprimento das plantas (cm) através de régua graduada em cm.

4.4 Análise estatística dos resultados

Os dados de PB e C foram submetidos à estatística descritiva, determinando a média e o desvio padrão dos

valores obtidos, a fim de comprovar a variabilidade das cápsulas estudadas. Os dados de transudação foram submetidos a análise de regressão, para ajuste de modelos da relação de q em função da pressão exercida na cápsula.

Os dados do experimento foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e, posteriormente, conferindo sua normalidade, foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e quando significativos foram submetidos ao teste de Tukey a 5% de significância.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estrutura investigada através de nanomicroscopia

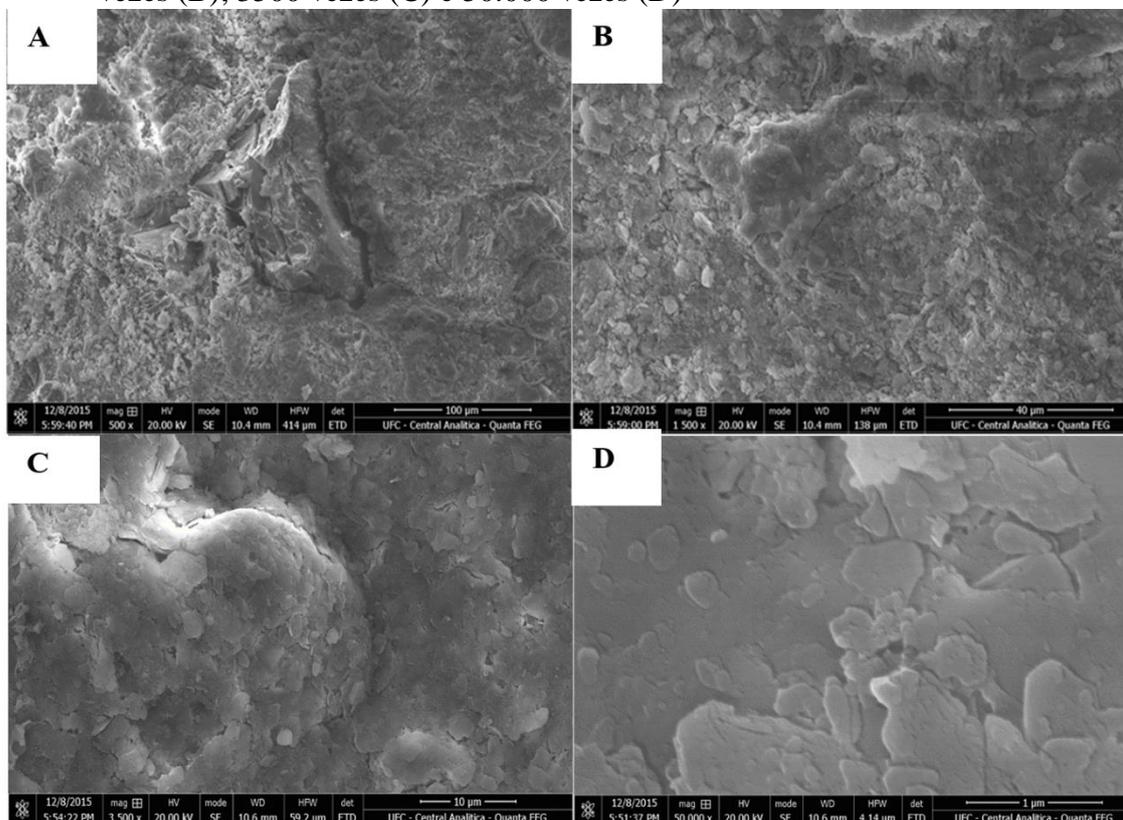
Da análise microscópica efetuada, observa-se nas fotos (Figura 3) que as paredes das cápsulas têm inúmeras condições de passagem de líquido, o que determina sua maior ou menor condutância. Fissuras, microgaléria, arrumação de partícula, agregados e grãos são fatores que estabelecem o padrão da porosidade das cápsulas (LIBARDI, 2013; MORAES et al., 2006; SOCCOL et al., 2005).

A visão da amostra da cápsula aumentada 500 vezes (Figura 3A) permite observar que, ao redor dos agregados, ocorrem fendas que dão origem à concentração de volumes de água sem condição de circulação. Na visão do aumento em 1500 vezes (Figura 3B), observam-se fissuras que facilitam o movimento da água nas paredes da cápsula. Na visão microscópica aumentada 3500 vezes (Figuras 3C), os pontos mais claros são os agregados de menor densidade,

enquanto que os mais escuros são os de maior densidade. A figura microscópica aumentada 50.000 vezes (Figura 3D) apresenta a disposição “lamelar” das camadas que compõem as paredes das cápsulas.

As aberturas observadas na Figura 3 mostram a variabilidade das cápsulas, demonstrando assim que as mesmas não devem ser consideradas homogêneas quanto ao seu uso. Moraes et al. (2006), em estudos sobre avaliação de cápsulas de cerâmica, observaram variabilidade em diversos parâmetros, entre estes a condutância hidráulica com desvios de $12,15 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, além de uma heterogeneidade entre as cápsulas pela origem de fabricação, sendo tal fato ocasionado principalmente pela matéria prima utilizada para construção das cápsulas nas regiões estudadas.

Figura 3. Análise microscópica das cápsulas porosas com aumento de 500 vezes (A); 1500 vezes (B); 3500 vezes (C) e 50.000 vezes (D)



5.2 Análise dos parâmetros obtidos na cápsula

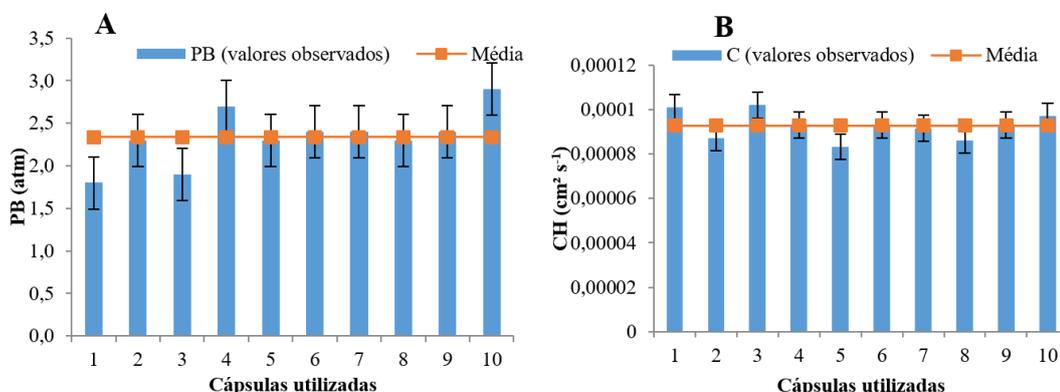
A primeira providência a ser tomada em relação à escolha das cápsulas para um determinado uso é submeter as cápsulas a pressão de borbulhamento (Figura 4A), observando sua resistência mecânica e medindo o valor específico dessa pressão. Através da pressão de borbulhamento é possível testar a resistência mecânica da peça, desobstruir os microporos, dar continuidade às microgalerias, bem como verificar se elas não apresentam rachaduras que comprometam as medidas nelas operadas.

A condutância hidráulica (Figura 4B) da cápsula porosa, parâmetro importante para definir sua aplicação e uso, explicita a maior ou menor dificuldade de deixar passar, através de suas paredes, um

fluxo de líquido, quando exercida sobre este líquido diferentes pressões.

A PB média obtida nas cápsulas avaliadas foi de 2,34 atm (Figura 4A), enquanto a CH foi de $9,27 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Figura 4B). A variabilidade mostrada na Figura 4 demonstra a necessidade da escolha de critérios para sua utilização como emissores, já que cápsulas com menores valores de CH podem dificultar a passagem de água e conseqüentemente não disponibilizar a quantidade necessária de água para as plantas. Contudo, cápsulas porosas com elevados valores de CH podem causar problemas de saturação no solo. Silva et al. (2005) demonstram que o uso de cápsulas porosas para irrigação pode ser benéfico na produção de cultivo de meloeiro, contudo, esses autores afirmam que a porosidade drenável é um fator determinante para o uso de sistemas irrigação localizados.

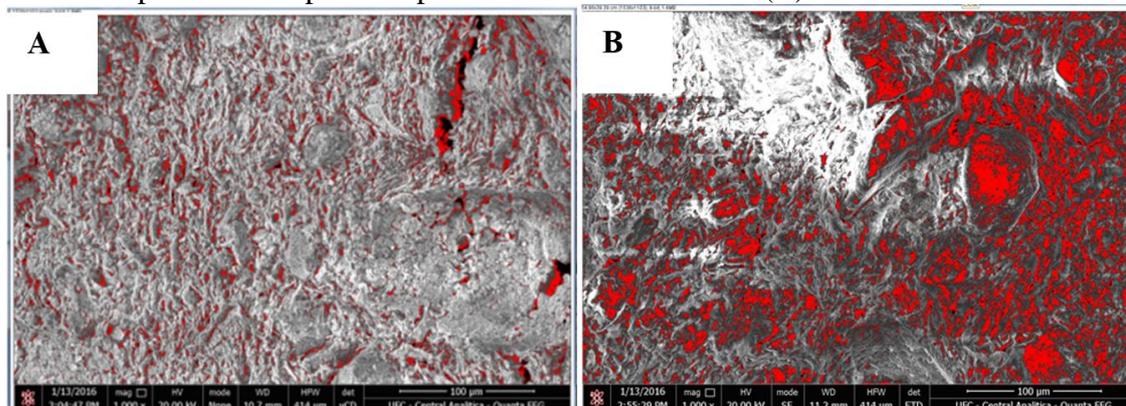
Figura 4. Valores de pressão de borbulhamento (PB) e condutância hidráulica (CH) observadas nas cápsulas estudadas



A Figura 5 mostra os detalhes das paredes das cápsulas porosas antes (Figura 5A) e após (Figura 5B) o teste de borbulhamento. As áreas em vermelho caracterizam as passagens contínuas através das paredes. Após o teste de borbulhamento, as cápsulas aumentaram suas aberturas de passagem contínua, uma vez que as passagens foram desobstruídas e novas passagens foram criadas por força do fluxo de ar comprimido, a uma pressão

pneumática da ordem de 2,5 atm, que transpassou as paredes das cápsulas. Tal efeito é de vital importância para que as cápsulas possam ser utilizadas de diferentes formas, para uso como sensores de umidade do solo, no caso tensiômetros (TAVARES et al., 2018), como extratores de solução do solo (SILVA et al., 2018) e como emissores para irrigação, que é a proposta deste trabalho.

Figura 5. Fotografia ampliada em 1000 vezes de cápsulas porosas em condições normais (A) e após serem expostas a pressão de borbulhamento (B).



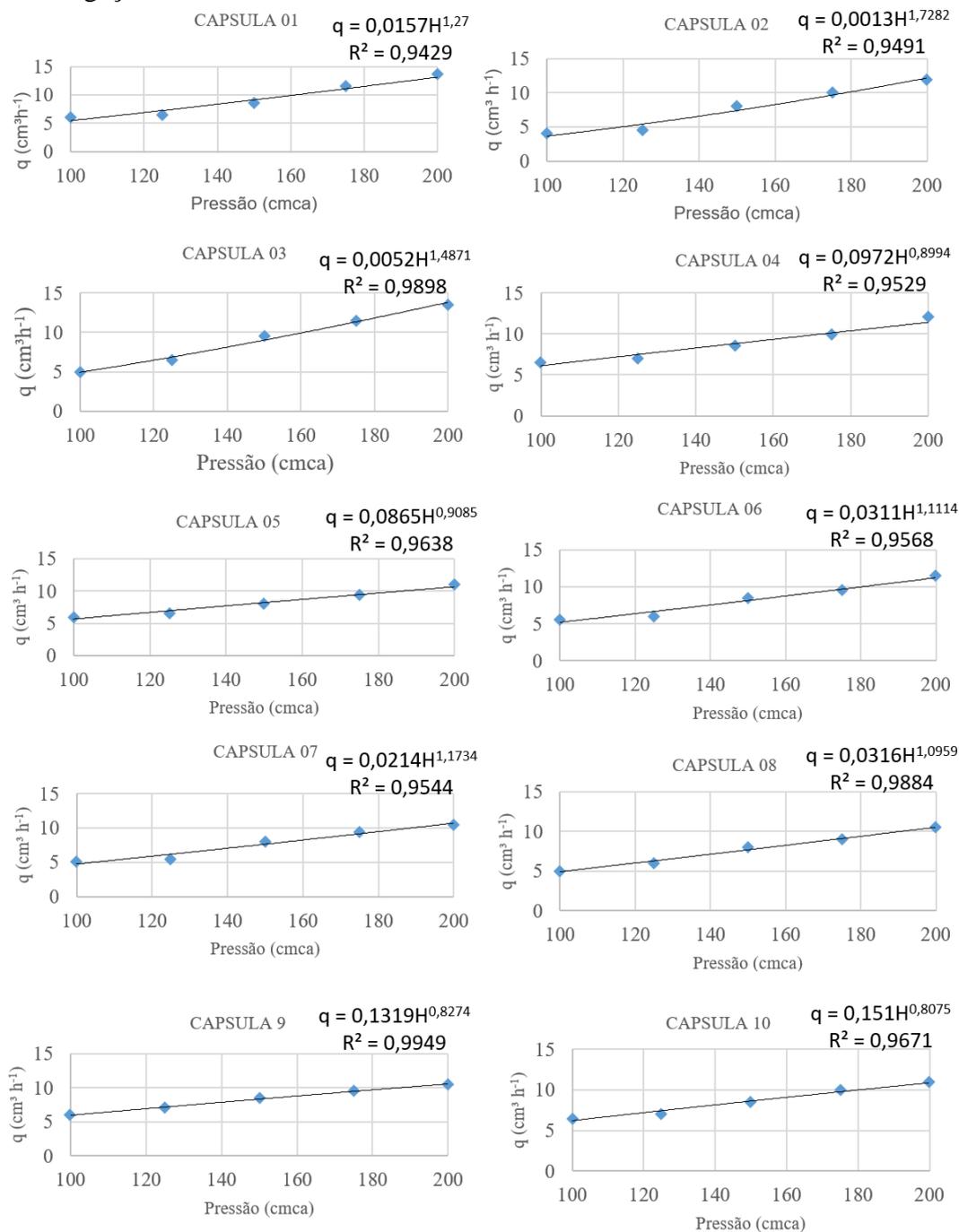
Obs: Manchas vermelhas representam as microgalerias da cápsula porosa

5.3 Transudação

As variáveis pressão e vazão são monotonicamente crescentes, ou seja, quando a variável pressão aumenta, aumenta também o volume transudado. Para utilizar pressão constante no sistema, alimentando os diversos emissores com a mesma pressão, devem-se observar as perdas de carga ao longo do sistema de distribuição e, ainda, a capacidade de condutância de cada cápsula deve ser considerada para sua posição no sistema, ou seja, cápsulas de menor CH devem estar localizadas no início do sistema e as de maiores CH no final do sistema.

Conforme se pode observar (Figura 6), as equações geradas pela relação transudação e pressão ($q = k \cdot H^x$) apresentam, além de variabilidade elevada de valores entre cápsulas, valores do expoente “x” maiores que 0,5. Isso evidencia que esses emissores devem ser utilizados em regimes de baixa pressão, diferentemente dos emissores convencionais da irrigação localizada, que trabalham em regime turbulento, em sua maioria, com valores de expoente abaixo de 0,5 (FRIZZONE et al., 1998; PRADO; NUNES e TINOS, 2014).

Figura 6. Relação vazão x pressão contínua nas cápsulas porosas utilizadas para o sistema de irrigação



5.4 Análise do experimento com a cultura do rabanete

A Tabela 2 apresenta a análise de variância (Teste F) para os diferentes

manejos de irrigação utilizados. Observa-se que apenas a massa fresca da raiz (MFPA) apresentou diferença significativa ($p < 0,05$) em relação aos tratamentos estudados.

Tabela 2. Análise de variância para os parâmetros de produção e crescimento da cultura do rabanete

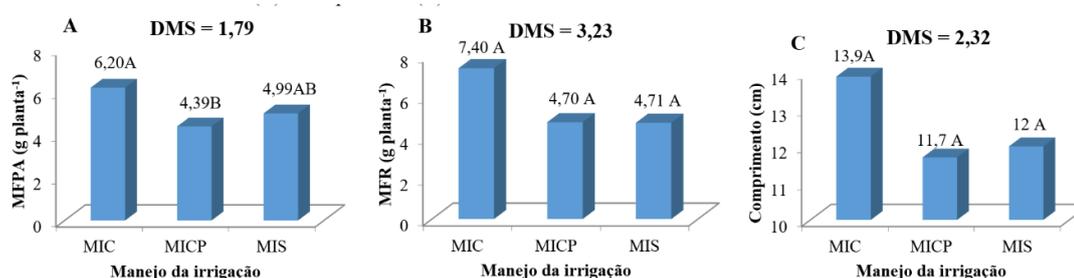
| Fonte de variação | Quadrado médio | | | |
|-------------------|----------------|-------|---------------------|---------------------|
| | G. L. | MFPA | MFR | Comp |
| Tratamentos | 2 | 8,63* | 24,00 ^{ns} | 14,23 ^{ns} |
| Resíduo | 27 | 2,61 | 8,45 | 4,40 |
| C.V.(%) | | 30,70 | 51,94 | 16,75 |

*significativo a 5% de probabilidade ($p < 0,05$); MFPA – massa fresca da parte aérea, MFR – massa fresca da raiz, Comp – comprimento das plantas

Nas variáveis estudadas, para o tratamento MIC, foram observados os maiores valores nos parâmetros estudados (Figura 7). Contudo, apenas para a variável MFPA (Figura 7A), observou-se diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), onde o MIC ($6,20 \text{ g planta}^{-1}$) apresentou valor médio superior ao MICP ($4,39 \text{ g planta}^{-1}$). Possivelmente, o excesso de umidade provocado pelo uso de cápsulas porosas, pode ter afetado essa variável. Segundo Silva et al. (2005), em estudos com o uso de cápsulas porosas para irrigação, a porosidade livre de água deve estar acima de 20% para desenvolvimento ideal da cultura do meloeiro, atribuindo assim a redução na produtividade do meloeiro ao excesso de água, fato este que pode ser considerado para cultura do

rabanete, conforme Almeida et al. (2018) em estudos sobre o excesso de água na cultura do rabanete, que observaram redução na massa fresca da parte aérea devido à umidade elevada no solo.

Contudo, evidencia-se que a variável-resposta para avaliação comercial (Figura 7B), no caso a MFR, não apresentou diferença entre os tratamentos, portanto, embora os volumes de água administrados nos três tratamentos tenham sido equivalentes, vale salientar que o sistema MICP foi o que menos perdeu água por evaporação, tendo em vista que sua operação se deu abaixo da superfície do solo, fato que o credencia como uma opção interessante para o cultivo em termos de economia de água, principalmente na prática da agricultura em menor escala.

Figura 7. Teste de Tukey ($p < 0,05$) para as variáveis-resposta massa fresca da parte aérea (A), massa fresca da raiz (B) e comprimento (C)

6 CONCLUSÕES

Recomendam-se, para o uso de cápsulas porosas como emissores para irrigação localizada, baixos valores de condutância hidráulica ($1,50 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$)

e alta pressão de borbulhamento (2,5 atm), constituindo em critério determinante para que o sistema funcione com adequada uniformidade.

O uso de sistemas de irrigação por cápsulas porosas apresenta-se como uma

alternativa viável para o cultivo de rabanete em pequenas áreas, porquanto necessita de pequenas cargas hidráulicas para o seu

funcionamento, as quais podem ser viabilizadas por meio de pequenos reservatórios estrategicamente instalados.

7 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO, irrigation and drainage paper, 56).

ALMEIDA, A. C. S.; ALMEIDA, C. D. G. C.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A. Pressure compensating microsprinklers using microtube as a flow controller. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.36, n.1, p.36-45, 2016.

ALMEIDA, A. V. R.; ARAGÃO, M. F.; SOUSA, H. G.; BEZERRA, F. M. S.; SILVA, A. O. Influência de níveis freáticos nos parâmetros produtivos e fisiológicos da cultura do rabanete. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 12, n. 5, p. 2907-2922, 2018.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9 Ed. Viçosa: Editora UFV, 2019. 545p.

FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. 1. ed. Maringá: Eduem - Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2012. 356p.

FRIZZONE, J. A.; VIEIRA, A. T.; PAZ, V. P. S.; BOTREL, T. A. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 278-283, 1998.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EdUSP, 2013. 335 p.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3 ed. Viçosa: UFV, 2009. 355 p.

MORAES, N. B.; MEDEIROS, J. F.; LEVIEN, S. L. A.; OLIVEIRA, A. M. S. Avaliação de cápsulas de cerâmica e instrumentos de medida de tensão usados em tensiômetros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 58-63, 2006.

PRADO, G.; NUNES, L. H.; TINOS, A. C. Avaliação técnica de dois tipos de emissores empregados na irrigação localizada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 8, n.1, p. 12-25, 2014.

RAWLINS, S. L. Uniform irrigation with a low head bubbler system. **Agriculture and Management**, Amsterdam, v.1, n.1, p.167-78, 1977.

SILVA, A. O.; BASSOI, L. H.; SILVA, D. J. Nitrate and potassium concentration in fertigated soil cultivated with wine vines. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, p. 305-316, 2016.

SILVA, A. O.; BASSOI, L. H.; SILVA, D. J. Nitrate and potassium movement in a sandy loam soil cultivated with fertigated grapevine (*Vitis vinifera* /L.) in the Brazilian semiarid. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 40, p. 1-14, 2018.

SILVA, T. J. A.; MACHADO, C. C.; BONFIM-SILVA, E. M.; COELHO, R. D. Influência do manejo da irrigação do meloeiro rendilhado cultivado em ambiente protegido. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n.3, p. 722-731, 2005.

SOCCOL, O. J.; CARARO, D. C.; SILVA, Ê. F. F.; ULLMANN, M. N. Condutância hidráulica e tempo de resposta da tensiômetros usados em fertirrigação. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 4, n.1, p. 3-10, 2005.

TAVARES, A. C. S.; DUARTE, S. N.; DIAS, N. S.; MIRANDA, J. H.; ARRAES, F. D. D.; SOUSA NETO, O. N.; FERNANDES, C. S. Efeito da inundação do solo nos índices fisiológicos da cana-de-áçúcar. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 41, n.1, p. 229-235, 2018.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: Métodos, Sistemas e Aplicações**. Campinas: Unicamp/FEAGRI, 2017, 203p.