

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DESEMPENHO HIDRÁULICO E RECUPERAÇÃO DE  
GOTEJADORES DO TIPO LABIRINTO COM ONDAS  
ULTRASSÔNICAS**

**MÁRCIO ROBERTO KLEIN**

CAMPINA GRANDE  
JANEIRO DE 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DESEMPENHO HIDRÁULICO E RECUPERAÇÃO DE  
GOTEJADORES DO TIPO LABIRINTO COM ONDAS  
ULTRASSÔNICAS**

Plano de pesquisa submetido a banca examinadora da  
defesa de TESE de doutorado na área de concentração  
de Irrigação e Drenagem, sob a orientação do Prof. Dr.  
Carlos Alberto Vieira de Azevedo e co-orientação do  
Prof. Dr. Delfran Batista dos Santos

**MARCIO ROBERTO KLEIN**

**Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo**

**Co-Orientador: prof. Dr. Delfran Batista dos Santos**

CAMPINA GRANDE  
JANEIRO DE 2017

“A irrigação é como uma dança!!”

Jack Keller

Aos meus pais, Blantina e Celestino (*in memoriam*) à minha irmã Suelena e à minha namorada Simone, que sempre me incentivaram e apoiaram de todas as formas, sendo meus exemplos de força, dedicação, fé, honestidade e amor.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a DEUS, que sempre esteve presente em minha vida e me iluminou em todo o caminho, inclusive nos momentos mais difíceis. Agradeço a minha família, que sempre me apoiou e me incentivou com relação aos estudos, em especial à minha irmã, Suelena Klein, à minha mãe, Blantina Bremm Klein, e ao meu pai, Celestino Miguel Klein (*In Memoriam*), que me ensinou os melhores e mais importantes valores da vida. A minha namorada, Simone Luana Winkelmann pelo apoio, carinho e amor. A Universidade Federal de Campina Grande pela oportunidade da realização do curso. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa sob a Chamada MEC/SETEC/CNPq N<sup>o</sup> 94/2013. Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo, pela orientação, apoio e pelo acolhimento junto à instituição para a realização do curso. Ao Prof. Dr. Delfran Batista dos Santos pela orientação, apoio, incentivo, paciência e acolhimento para a realização do curso. Ao Prof. Dr. José Dantas Neto pela transmissão dos conhecimentos de irrigação pressurizada. Ao Dr. Salomão de Souza Medeiros e demais professores já nomeados pelas correções e sugestões na qualificação do trabalho. Ao Prof. Rafael de Oliveira Batista pelo auxílio e consultoria das partes fundamentais do trabalho. À coordenação de Pós Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade da realização do Curso. Estendendo-se a Coordenadora Prof(a). Dr(a). Vera Lucia Antunes de Lima, e secretários Ao Instituto Nacional do Semiárido (INSA), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano (IF Baiano) e a Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) pelo apoio intelectual e material. Aos meus amigos Maycon Diego Ribeiro, Flavio Daniel Szekut e Claudia Facini dos Reis, pela amizade, ajuda no desenvolvimento do trabalho, cumplicidade. Aos amigos que acompanharam o desenvolvimento da pesquisa e estiveram comigo grande parte do tempo Allan Radax Freitas Campos, Daniel Cavalcanti Feitosa, Floriano Suszek.

A todos aos funcionários do INSA, da UFCG e aqueles que diretamente ou indiretamente auxiliaram para a realização dessa pesquisa. Muito Obrigado.

## Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>IV</b>
<b>1 - ARTIGO 01: QUALIDADE DE EMISSORES DE IRRIGAÇÃO OPERANDO COM ÁGUA DE ABASTECIMENTO E ÁGUA RESIDUÁRIA.....</b>	<b>1</b>
1.1 RESUMO.....	1
1.2 ABSTRACT .....	2
1.3 INTRODUÇÃO .....	3
1.4 MATERIAL E MÉTODOS .....	5
1.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	7
1.6 CONCLUSÃO.....	11
1.7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	12
<b>2 ARTIGO 02: LIMPEZA ULTRASSÔNICA NA RECUPERAÇÃO DE GOTEJADORES DE IRRIGAÇÃO.....</b>	<b>13</b>
2.1 RESUMO.....	13
2.2 ABSTRACT .....	14
2.3 INTRODUÇÃO .....	15
2.4 MATERIAL E MÉTODOS .....	18
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	23
2.6 CONCLUSÕES.....	28
2.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	29
<b>3 ARTIGO 3: DESOBSTRUÇÃO DE GOTEJADORES DE IRRIGAÇÃO COM TRATAMENTOS QUÍMICOS E LIMPEZA ULTRASSÔNICA.....</b>	<b>31</b>
3.1 RESUMO.....	31

<b>3.2 ABSTRACT .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>33</b>
<b>3.4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
3.4.1 Local e Componentes.....	36
3.4.2 Delineamento e Aplicação dos Tratamentos .....	39
3.4.3 Análise Estatística.....	41
3.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	42
<b>3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>3.6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>49</b>
<b>3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>50</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Corte longitudinal da bancada experimental.....</b>	<b>5</b>
<b>Figura 2 - Esquema de obtenção simultânea das vazões.....</b>	<b>6</b>
<b>Figura 3 - Gráfico de Interação entre os tipos de água e tubos gotejadores.....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 4 - Índice de capacidade de processo na ordem das repetições: A Tubo A, B Tubo B e C Tubo C.....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 5 - Máquina de limpeza ultrassônica desenvolvida pelo Sr. Leon Lingnau. (NIEKERK, 2017).....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 6 - Layout esquemático dos componentes da bancada. ....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 7 - Regressão entre Tempo Acumulado de Limpeza Ultrassônica (min) e Vazão Relativa (%) para o Tubo gotejador 01.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 8 - Regressão entre Tempo Acumulado de Limpeza Ultrassônica (min) e Vazão Relativa (%) para o Tubo gotejador 02.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 9 - Imagens de MEV: A- Tubo gotejador E1 obstruído; B Tubo gotejador E1 após limpeza ultrassônica; C Tubo gotejador E2 obstruído; D tubo gotejador E2 após limpeza ultrassônica. ....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 10 - Descamação de contaminantes folheados com a expansão de bolhas de ar. (PEREIRA, 2010). ....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 11 - Máquina de limpeza ultrassônica desenvolvida pelo Sr. Leon Lingnau. Farmer's Weekly (2017).....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 12 - Vistas gerais da bancada de ensaios de tubos gotejadores.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 13 - Distribuição esquemática dos componentes da bancada. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 14 - Layout do delineamento experimental.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 15 - Vazão Relativa (%) para o Tubo gotejador 01 nos tratamentos T1 (ácido fosfórico pH 2) T2 (cloro 50 mg.L<sup>-1</sup>) T3 (limpeza ultrassônica) T4 (limpeza ultrassônica fracionada) nos tempos, novo, obstruído e recuperado.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 16 - Vazão Relativa (%) para o Tubo gotejador 02 nos tratamentos T1 (ácido fosfórico pH 2) T2 (cloro 50 mg.L<sup>-1</sup>) T3 (limpeza ultrassônica) T4 (limpeza ultrassônica fracionada) nos tempos, novo, obstruído e recuperado.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 17 - Imagens de MEV: A- Tubo gotejador E1 obstruído; B Tubo gotejador E1 após limpeza ultrassônica; C Tubo gotejador E2 obstruído; D tubo gotejador E2 após limpeza ultrassônica. ....</b>	<b>48</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - ANOVA - Análise de variância do índice de capacidade de processo (Cp) para diferentes tubos, tipos de água e pressão.....	7
Tabela 2 - Valores médios de Cp para as diferentes águas e teste F de comparação de médias .....	7
Tabela 3 - Valores médios de CP para os tubos testados e teste Tukey de comparação de médias .....	8
Tabela 4 - Valores médios de Cp para as diferentes águas e teste F de comparação de médias para os tubos A, B e C. ....	9
Tabela 5 - Valores médios de Cp para as diferentes tubos gotejadores e teste Tukey de comparação de médias para os tipos de água. ....	9
Tabela 6 - Características dos tubos gotejadores utilizados no experimento .....	18
Tabela 7 - Parâmetros analisados da água utilizada no experimento .....	19
Tabela 8 - Valores de Vazão Relativa (Qr (%)), Coeficiente de Variação (CVq (%)), Uniformidade de Distribuição (UD (%)) e Vazão Média (Qm (L.h-1) para cada tempo acumulado de limpeza ultrassônica .....	23
Tabela 9 - Análise de variância da Vazão Relativa para os fatores Tempo de limpeza ultrassônica e tipo de Tubo gotejador .....	25
Tabela 10 - Valores médios de Vazão Relativa (%) para diferentes tempos acumulados de limpeza ultrassônica (min) e teste Tukey para as médias das 50 repetições .....	26
Tabela 11 - Valores médios de Vazão Relativa (%) para diferentes tipos de tubos gotejadores e teste F para as médias das 125 repetições .....	26
Tabela 12 - Características dos tubos gotejadores utilizados no experimento .....	36
Tabela 13 - Parâmetros analisados da água utilizada no experimento .....	37
Tabela 14 - Valores de Vazão Relativa (Qr (%)), Coeficiente de Variação (CVq (%)), Uniformidade de Distribuição (UD (%)) e Vazão Média (Qm (L.h-1) para cada tempo acumulado de limpeza ultrassônica .....	43
Tabela 15 - Análise de variância da Vazão Relativa para os fatores Fase e tipo de Tubo gotejador.....	46
Tabela 16 - Valores médios de Vazão Relativa (%) para as fases de aplicação e teste F .....	46
Tabela 17 - Análise de variância do incremento de vazão para os fatores Tratamento e tipo de Tubo gotejador .....	46
Tabela 18 - Valores médios de incremento de vazão (%) para diferentes tratamentos de recuperação e teste Tukey de comparação de médias.....	47

# **1 - ARTIGO 01: QUALIDADE DE EMISSORES DE IRRIGAÇÃO OPERANDO COM ÁGUA DE ABASTECIMENTO E ÁGUA RESIDUÁRIA**

## **1.1 RESUMO**

O uso de água residuária na irrigação localizada pode implicar na mudança da qualidade de aplicação dos emissores. O objetivo da realização deste estudo foi verificar se houve diferença na qualidade de operação de emissores labirinto operando com água de abastecimento e operando com efluente de esgoto doméstico tratado. O delineamento foi um esquema fatorial 3 x 2, com 3 modelos de tubos gotejadores denominados A, B e C e 2 tipos de água de abastecimento (Aa) e água residuária (Ar). O estudo foi realizado no Instituto Nacional do Semiárido - INSA –, Campina Grande – PB, Brasil. Cada combinação teve 6 repetições, portanto 36 parcelas experimentais, em cada repetição foram obtidas 25 vazões, com elas, calcularam-se os índices de capacidade de processo (Cp) que foram submetidos à análise de variância e teste de comparação de médias. A análise de variância indicou diferença entre o valor de Cp nos dois fatores. O valor médio de Cp foi de 1,57 e 1,33 para Aa e Ae respectivamente. Os valores médios de Cp foram 1,81, 1,49 e 1,04 para os tubos B, C e A respectivamente. Os emissores tiveram uma redução na qualidade de aplicação com água residuária em relação à água de abastecimento.

**Palavras chave:** índice de capacidade de processo; irrigação localizada; fertirrigação.

# **PAPAER 01: QUALITY OF LABYRINTH DRIPPERS WORKING WITH FRESH WATER AND WASTEWATER**

## **1.2 ABSTRACT**

The use of wastewater in drip irrigation can result in changing the quality of the application of the emitters. The objective of this study was to determine if differences in the quality of operation labyrinth emitters working with fresh water and working with treated sewage effluent. The experimental design was a 3 x 2 factorial, with 3 driplines models called A, B and C and 2 types of water fresh water (Aa) and domestic sewage effluent (Ae). The study was conducted at the National Institute for Semi-Arid - INSA - Campina Grande - PB, Brazil. Each combination had six replicates, each replicate 25 discharges, with them, we calculated the rates of process capability (Cp) were subjected to analysis of variance and mean comparison test were obtained. The analysis of variance indicated a difference between the value of Cp on both factors. The average Cp was 1.57 and 1.33 respectively for Aa and Ae. The average values of Cp were 1.81, 1.49 and 1.04 for the B, C and A driplines respectively. The emitters had a reduction in the quality of wastewater application in relation to the fresh water.

**KEYWORDS:** process capability index; drip irrigation; fertirrigation.

### 1.3 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional aumenta o número de domicílios e consequente acréscimo na demanda de água de abastecimento, do total, cerca de 60 a 80% da água utilizada é descartada como esgoto (Amerasinghe et al., 2013). A demanda média diária para abastecimento urbano de água para 2015 no Brasil, segundo projeção realizada pela ANA (2010) é de 570 m<sup>3</sup>.s-1. Considerando as referências anteriores estaria sendo descartada uma vazão entre 456 a 342 m<sup>3</sup>.s-1.

O uso da água residuária contribui para a diminuição da captação de águas subterrâneas e a redução de descarga de efluentes diretamente nos corpos hídricos (MUYEN et al., 2011 ). A utilização de água de água residuária na agricultura irrigada é ampla em diversos países e tem como vantagem econômica a redução no uso de insumos como água e fertilizante, conforme citam PEREIRA et al., (2011) que observaram um aumento de macro e micronutrientes no solo irrigado com água residuária de esgoto doméstico.

Para a aplicação de águas residuárias na agricultura a irrigação por gotejamento proporciona melhores índices de uniformidade de distribuição além de minimizar a contaminação da parte aérea da planta e dos trabalhadores de campo. Todavia maior problema com o uso da irrigação por gotejamento é o entupimento do emissor (AHMED et al., 2007). A existência de partículas em suspensão na água de irrigação é tida como a maior causa de entupimento (LI et al., 2011). Quando é feita a aplicação efluente de esgoto o risco de entupimento é ainda maior devido aos microrganismos presentes na água.

Em tubos gotejadores do tipo labirinto, existe uma complexa estrutura do canal condutor na qual a alta pressão da água é dissipada e posteriormente flui pelo emissor; portanto, a qualidade da irrigação de um sistema por gotejamento é verificada pelo desempenho hidráulico do emissor (Patil et al., 2013). Pouco se sabe sobre a qualidade de desempenho destes emissores quando aplicam água residuária.

O controle estatístico de qualidade (CEQ) é uma técnica que consiste em analisar o processo, estabelecer padrões, comparar desempenhos, verificar e estudar desvios, buscar e implementar soluções, analisar novamente o processo após as modificações, buscando a melhor performance de máquinas e/ou pessoas (MONTGOMERY, 2009). Uma das ferramentas do CEQ é o índice de capacidade de processo (ICP) que pode ser usado para identificar a qualidade do processo de fertirrigação, além de avaliar se o processo está entre os limites predeterminados de uniformidade (HERMES et al., 2014).

Tendo em vista a falta de informação de características de desempenho de emissores

operando com água residuária a da realização deste estudo teve por objetivo verificar se há diferença na qualidade de emissão de gotejadores do tipo labirinto, novos operando com água de abastecimento e operando com água residuária.

## 1.4 MATERIAL E MÉTODOS

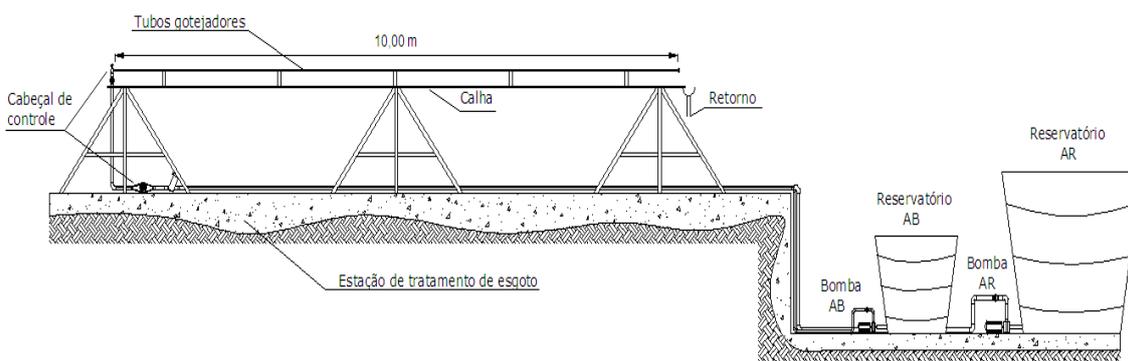
O experimento foi realizado na sede do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), localizado no município de Campina Grande – PB, com coordenadas geográficas 7° 16' 20'' S e 35° 56' 29' O, e uma altitude de 550 m. A Classificação de Koeppen para o clima da região, é tropical com chuvas de outono e períodos de seca no restante do ano, denominado As.

O delineamento foi um esquema fatorial 3 x 2, com 3 modelos de tubos gotejadores denominados A, B e C e 2 tipos de água de abastecimento (Aa) e efluente de esgoto doméstico (Ae). Dos modelos citados dois são da marca Netafim, Tiram e Streamline e um da marca Naandanjain, Tal drip. Foram selecionados 25 gotejadores de cada linha e determinadas suas vazões, com 6 repetições cada.

A água de abastecimento utilizada foi a fornecida pela prestadora de serviço do estado da Paraíba BR. A água residuária utilizada é produzido na sede do INSA, passa por uma estação de tratamento de esgoto (ETE) operada com tratamento secundário anaeróbico, com vazão de 3.000 L.dia-1. Após o tratamento o efluente é armazenado em um reservatório de 5000 L. Desse reservatório a água residuária de esgoto doméstico foi bombeada para a bancada de testes e então realizados os ensaios.

Os ensaios foram realizados conforme a norma Brasileira ABNT/NBR ISO 926:2006 para ensaios com emissores novos.

Para cada modelo utilizou-se uma linha nova com comprimento de 10 m instalada sob bancada de ensaio, a qual permitia aplicação de água de abastecimento ou água residuária (figura 1).



**Figura 1- Corte longitudinal da bancada experimental.**

A coleta foi feita de maneira simultânea para cada repetição, com auxílio de coletores e placas de isopor. O tempo de coleta foi de 3 minutos. A vazão foi obtida pela relação entre volume e tempo. A figura 2 ilustra o término de uma das coletas.



**Figura 2 - Esquema de obtenção simultânea das vazões.**

Com os dados de vazão obtidos calculou-se os índices de capacidade de processo com a seguinte equação:

$$Cp = (LSE - LIE) \cdot 6\sigma^{-1} \quad (\text{eq. 01})$$

Em que,

Cp – índice de capacidade de processo;

LIE – Limite inferior de especificação

LSE – Limite Superior de especificação; e

$\sigma$  – desvio padrão populacional.

O índice de capacidade de processo é determinado tendo em base que a série de dados utilizados segue uma distribuição normal de frequência. Antes da determinação do desvio padrão populacional de para cada combinação foi realizado teste de normalidade dos dados de vazão. Os testes utilizados foram o de Anderson-Darling, Ryan-Joiner e Kolmogorov-Smirnov.

Os limites superior e inferior de controle foram determinados a partir da premissa de que a ABNT NBR ISO 9261 (2006) determina que o coeficiente de variação de vazão de emissores novos deve ser inferior a 7 %. Dessa forma é permissível uma variação de 7 % de vazão média do ensaio para mais ou para menos. Com base nessa norma foram determinados os limites de especificação utilizados para calcular os índices de capacidade de processo.

$$LSE = qm + 7\% \cdot qm \quad (\text{eq 02})$$

$$LIE = qm - 7\% \cdot qm \quad (\text{eq 03})$$

De posse dos índices, foi feita análise de variância, afim de verificar se a água residuária afeta a emissão dos gotejadores. A variável resposta foi índice de capacidade de processo e fatores foram os modelos de tubo gotejador e o tipo de água aplicada.

## 1.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância indicou com 95 % de confiança, que o tipo de água e o tipo de tubo afetou a qualidade de emissão expressa pelo Cp durante as avaliações com efluente de esgoto doméstico. (tabela 1).

**Tabela 1 - ANOVA - Análise de variância do índice de capacidade de processo (Cp) para diferentes tubos, tipos de água e pressão**

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	P - valor
Água	1	0,492	0,493	1,710	0,331 <sup>ns</sup>
Tubo	5	0,662	0,132	2,070	0,233 <sup>ns</sup>
Pressão	2	3,521	1,760	5,270	0,129 <sup>ns</sup>
Água*Tubo	5	0,145	0,029	0,720	0,624 <sup>ns</sup>
Água*Pressão	2	0,598	0,299	7,440	0,011*
Tubo*Pressão	10	0,753	0,076	1,870	0,169 <sup>ns</sup>
Erro	0	0,403	0,040		
Total	35	6,5716			

Nota: \* indica que p-valor é significativo e “ns” que o p-valor não é significativo ao nível de 5 % de significância.

Apesar da análise de variância indicar diferença de Cp para os tipos de água, o teste F classificou como sendo estatisticamente iguais a um nível de 5 % de significância (Tabela 2).

**Tabela 2 - Valores médios de Cp para as diferentes águas e teste F de comparação de médias**

Água	Média (CP)	Resultado
Aa	1,56	a
Ae	1,33	a

Nota: Letras iguais indicam igualdade a 5 % de significância pelo teste Tukey.

A média de Cp foi de 1,56 (superior a 1,5) e 1,33 (inferior a 1,5) para Aa e Ae respectivamente. O Cp da Ae indicou que o processo está num nível mínimo recomendável para processos em uso ( $C_p > 1,33$ ). O Cp da Aa indicou que o processo de aplicação de água está acima do aceitável para processos novos ( $C_p > 1,5$ ) (Montgomery 2009), como é o caso dos emissores avaliados.

A Tabela 3 é o teste Tukey de comparação de médias do Cp para os diferentes modelos de tubo avaliados.

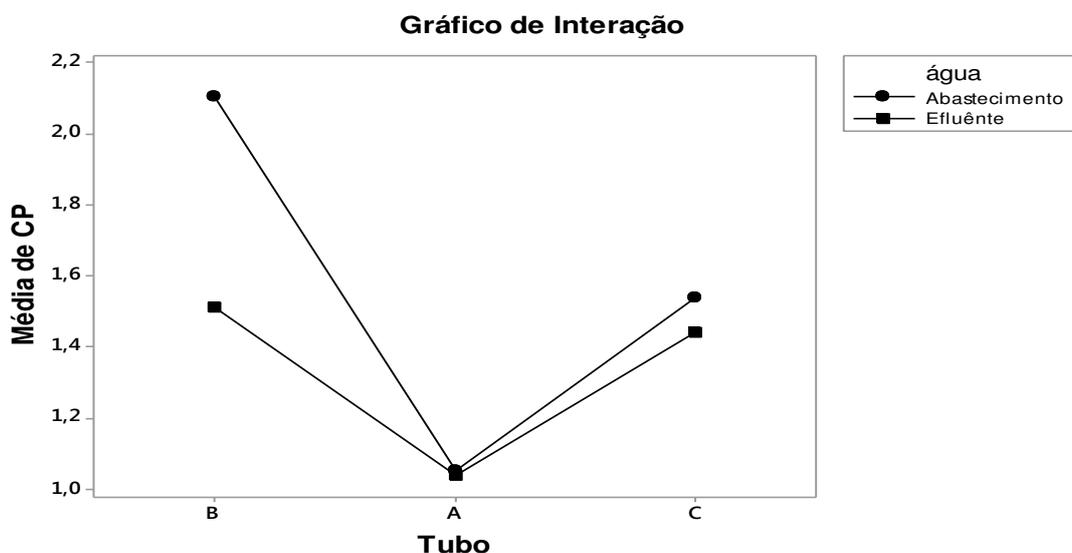
**Tabela 3 - Valores médios de CP para os tubos testados e teste Tukey de comparação de médias**

Tubos	Média (CP)	Resultado
Tubo B	1,80	a
Tubo C	1,49	ab
Tubo A	1,04	c

Nota: Letras iguais indicam igualdade a 5 % de significância pelo teste Tukey.

A média de Cp foi de 1,8 e 1,49 para os tubos B e C respectivamente, sendo este um valor apropriado para o uso em processos novos de acordo com Montgomery (2009). O valor médio de Cp para o tubo A foi de 1,04, o valor acima de 1 indica que o processo está dentro dos limites de especificação porém muito susceptível a falhas.

Ainda considerando a Tabela 1, nota-se que houve interação entre o tipo de água e tipo de tubo, ou seja, a combinação entre as água e tubos influenciaram na qualidade de emissão. A figura 3 é um gráfico que demonstra a interação entre estes dois fatores. É possível notar que houve uma redução significativa na qualidade de emissão do tubo B operando com efluente de esgoto doméstico comparado com água de abastecimento.



**Figura 3 - Gráfico de Interação entre os tipos de água e tubos gotejadores**

Visando determinar qual tubo teve a melhor qualidade de emissão para cada tipo de água, considerando estes fatores, foi realizado um teste F de comparação de médias para cada tipo de tubo, comparando os dois tipos de água (Tabela 4) e um teste Tukey de comparação de médias entre os tubos gotejadores para cada tipo de água utilizada (Tabela 4).

**Tabela 4 - Valores médios de Cp para as diferentes águas e teste F de comparação de médias para os tubos A, B e C.**

<b>Tubo A</b>		
<b>Água</b>	<b>Média (CP)</b>	<b>Resultado</b>
abastecimento	1,05	a
residuária	1,04	a
<b>Tubo B</b>		
<b>Água</b>	<b>Média (CP)</b>	<b>Resultado</b>
abastecimento	2,11	a
residuária	1,51	b
<b>Tubo C</b>		
<b>Água</b>	<b>Média (CP)</b>	<b>Resultado</b>
abastecimento	1,54	a
residuária	1,44	a

Nota: Letras iguais indicam igualdade a 5 % de significância pelo teste Tukey.

O tubo B teve diferença na qualidade de emissão quando operando com efluente de esgoto doméstico apresentando um melhor desempenho quando aplicando água de abastecimento.

Os tubos A e C mantiveram a mesma qualidade de emissão independente de estarem aplicando água de abastecimento ou efluente de esgoto doméstico.

**Tabela 5 - Valores médios de Cp para as diferentes tubos gotejadores e teste Tukey de comparação de médias para os tipos de água.**

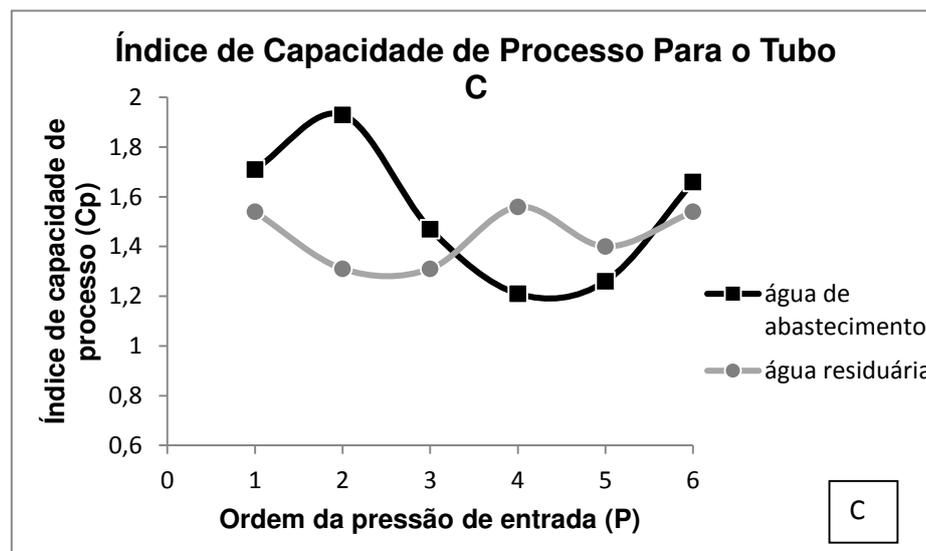
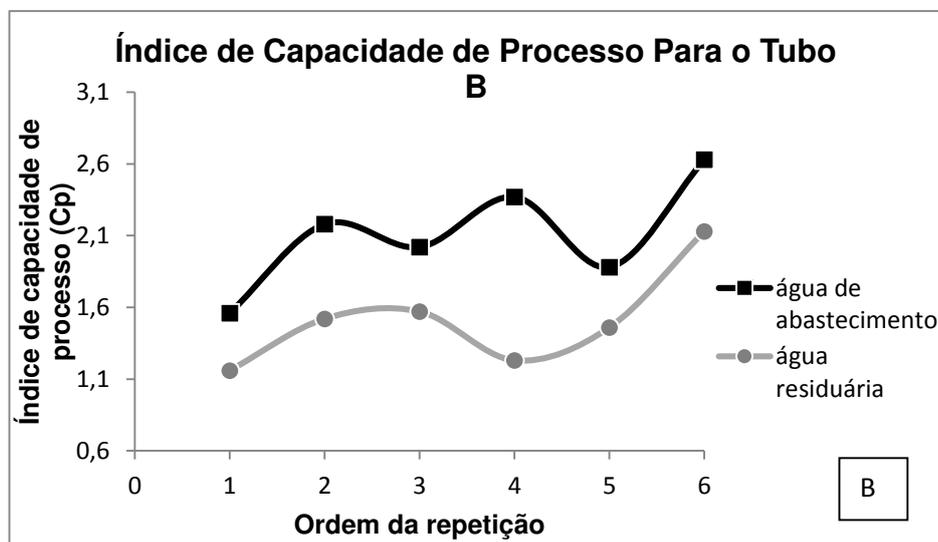
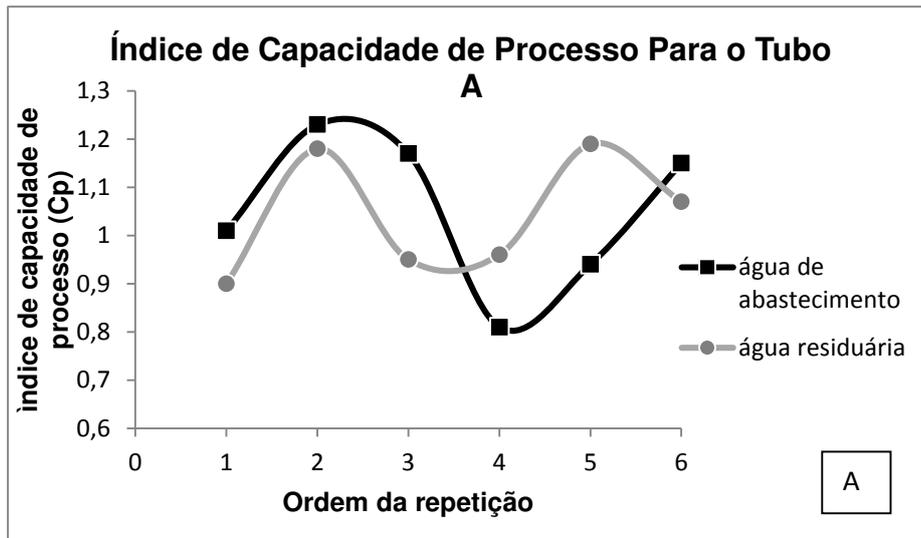
<b>Água de Abastecimento</b>		
<b>Tubos</b>	<b>Média (CP)</b>	<b>Resultado</b>
Tubo B	2,1	a
Tubo C	1,54	b
Tubo A	1,05	c
<b>Efluente de Esgoto Doméstico</b>		
<b>Tubos</b>	<b>Média (CP)</b>	<b>Resultado</b>
Tubo B	1,51	a
Tubo C	1,44	a
Tubo A	1,04	b

Nota: Letras iguais indicam igualdade a 5 % de significância pelo teste Tukey.

Quando os tubos aplicavam água de abastecimento o tubo B obteve o maior índice de capacidade de processo com um valor de 2,1, seguido pelo tubo C (1,54) e A (1,05).

Na aplicação de efluente de esgoto doméstico, os tubos B e C obtiveram as melhores médias de Cp sendo consideradas estatisticamente iguais, com valores de 1,51 e 1,44 respectivamente. O tubo A obteve a pior qualidade de emissão (1,04).

A figura 5 mostra a distribuição do Cp para água de abastecimento e água residuária nos diferentes tubos testados.



**Figura 4 - Índice de capacidade de processo na ordem das repetições: A Tubo A, B Tubo B e C Tubo C.**

Os valores de Cp do tubo A estão variando entre 0,81 e 1,23 ( $\Delta = 0,42$ ). Não há

tendências que indicam interação ou diferenças nos valores devido ao tipo de água ( figura 4A). A média dos valores de  $C_p$  no tubo A são de 1,05 e 1,04 para Aa e Ae respectivamente.

No tubo B há um incremento no valor de  $C_p$  para a água de abastecimento em relação a água residuária. A média dos valores de  $C_p$  no tubo B foi de 2,10 e 1,51 para Aa e Ae respectivamente. Os valores de  $C_p$  para este tubo variaram entre 1,16 e 2,63 ( $\Delta = 1,47$ ) (figura 4B).

Os valores de  $C_p$  no tubo C variaram entre 1,21 e 1,93 ( $\Delta = 0,72$ ). Os valores médios de  $C_p$  foram de 1,54 e 1,44 para Aa e Ae respectivamente (figura 4C).

Apesar do Tubo A apresentar os menores valores de  $C_p$  para os limites predeterminados, notou-se que a capacidade de processo não sofreu redução quando passou a operar de Aa (água de abastecimento) para Ae (água residuária).

## **1.6 CONCLUSÃO**

O valor médio de  $C_p$  foi de 1,57 e 1,33 para água de abastecimento (Aa) e água residuária (Ae) respectivamente.

Os valores médios de  $C_p$  foram 1,81, 1,49 e 1,04 para os tubos B, C e A respectivamente.

Houve redução da capacidade de processo de aplicação dos emissores B e C quando passaram a operar de água de abastecimento para água residuária.

Apesar do Tubo A apresentar os menores valores de  $C_p$  para os limites predeterminados, a capacidade de processo não sofreu alteração devido ao tipo de água durante a operação.

## 1.7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, B. A. O.; Yamamoto, T.; Fujiyama, H.; Miyamoto, K. 2007. Assessment of emitter discharge in microirrigation system as affected by polluted water. *Irrigation Drainage System*, v. 21, p. 97-107.

Amerasinghe, P.; Bhardwaj, R.M.; Scott, C.; Jella, K.; Marshall, F. Urban wastewater and agricultural reuse challenges in India. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI), Research Report 147. p.36. 2013.

**ANA, Agência Nacional de águas, Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional. Engecorps/cobrape - Brasília, v. 2, 2010.**

Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT. NBR ISO 9261. 2006 Equipamentos de irrigação agrícola - Emissores e tubos emissores – Especificação e métodos de ensaio. São Paulo 17p.

Bralts, V. F.; Nakayama, F. S.; Bucks, D. A. 1986. Trickle irrigation for crop production. Field performance and evaluation, Amsterdam: Elsevier. p. 216-240.

Hermes, E., Vilas Boas, M. A., Gris J. D., Frigo E. P., Berger J. S., Lins M. A., Frigo J. F. 2014. Irrigation with wastewater from cassava processing with different concentrations of suspended solids. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 12(1):487-490

Montgomery, D. C. 2009. Introdução ao controle estatístico de processo. 4 ed. Rio de Janeiro, LTC, 513 p.

Muyen, Z.; Moore, G. A.; Wrigley, R. J. Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. *Agricultural Water Management*. V. 99, p 33-41, 2011.

Pereira B.F.F.; He Z.L.; Stoffella P.J.; Melfi A.J. 2011. Reclaimed wastewater: effects on citrus nutrition. *Agricultural Water Management*. v 98, n 12, p.1828-1833.

Patil, S. S.; Nimbalkar, P. T.; Joshi, A. Hydraulic Study, Design & Analysis of Different Geometries of Drip Irrigation Emitter Labyrinth. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, v. 2, p. 455 - 462. 2013.

## **2 ARTIGO 02: LIMPEZA ULTRASSÔNICA NA RECUPERAÇÃO DE GOTEJADORES DE IRRIGAÇÃO**

### **2.1 RESUMO**

O entupimento é o principal problema da irrigação por gotejamento. A recuperação dos gotejadores, em geral, é feita por tratamentos químicos, os quais apresentam um bom nível de recuperação, porém tem riscos ambientais indesejáveis. Métodos de recuperação de gotejadores de irrigação sem tratamento químico estão sendo pesquisados em todo o mundo. O mais recente tratamento de desobstrução sem o uso de químicos é o de limpeza com ondas ultrassônicas. Este método consiste na emissão de ondas sonoras com elevada frequência, em meio aquoso onde ficam imersos os gotejadores obstruídos, essas ondas promovem cavitação e expansão de bolhas que desprendem a sujeira das paredes dos emissores. A partir desta premissa, a realização deste estudo teve por objetivo testar e validar o método de limpeza ultrassônica na recuperação de emissores de irrigação no Semiárido Brasileiro (SAB). O experimento foi desenvolvido no Instituto Nacional do Semiárido – INSA, em Campina Grande – PB, onde foi feita a obstrução artificial de gotejadores com aplicação de cal hidratada dissolvida em água residuária em uma bancada de testes e depois a recuperação dos emissores com limpeza ultrassônica. O Delineamento foi um fatorial 2x5 com dois tipos de tubos gotejadores E1 e E2 e 5 tempos de limpeza ultrassônica, T0- tubo obstruído sem limpeza ultrassônica, T1 – 5 minutos de limpeza ultrassônica, T2 – 10 minutos acumulados de limpeza ultrassônica, T3 - 15 minutos acumulados de limpeza ultrassônica e T4-30 minutos acumulados de limpeza ultrassônica. Com os valores de vazão de cada tratamento foram calculados os Coeficientes de Variação de vazão (Cvq (%)), Uniformidade de Distribuição (UD (%)) e Vazão Relativa (Qr (%)). O tratamento recuperou a vazão em até 90,48% e 104,19% para o tubo gotejador 01 e tubo gotejador 02 respectivamente. A limpeza ultrassônica elevou a classificação do tubo gotejador 01, para uniformidade de distribuição, de “inaceitável” para “bom” e de “inaceitável” para “excelente” com tubo gotejador 02. A limpeza ultrassônica propiciou a redução em 70,54% e 94,55% do CVq para o tubo gotejador E1 e E2 respectivamente. O tempo acumulado de 15 minutos de limpeza ultrassônica resultou na maior média de vazão relativa dos tempos testados. O processo de limpeza teve excelente efeito na desobstrução dos gotejadores de irrigação e envolve produtos químicos agressivos aos gotejadores e ao meio ambiente.

**Palavras Chave:** Vazão Relativa; Ultrassom; Irrigação por Gotejamento.

## **PAPER 2: ULTRASONIC SOUND CLEANING TO RECOVERY IRRIGATION DRIPEERS**

### **2.2 ABSTRACT**

Clogging is the main problem of drip irrigation. The recovery of the drippers, in general, is made by chemical treatments, which present a good level of recovery, but it has undesirable environmental risks. Methods of recovery of irrigation drippers of non- have started to be researched around the world. The latest non-chemical clearing treatment is ultrasonic cleaning. This method consists of the emission of sound waves with high frequency, in an aqueous environment where the dripped cloggers are immersed, these waves promote cavitation and expansion of bubbles that remove the dirt from the walls of the emitters. Based on this premise, the objective of this study was to test and validate the ultrasonic cleaning method in the recovery of irrigation emitters in the Brazilian Semi-Arid (SAB). The experiment was carried out at the National Institute of the Semi - Arid - INSA, in Campina Grande - PB, where the artificial obstruction of drippers with the application of hydrated lime dissolved in wastewater was carried out on a test bench and afterwards the recovery of the emitters with ultrasonic cleaning. The Delineation was a factorial 2x5 with two types of dripline E1 and E2 and 5 ultrasonic cleaning times, T0-pipe clogged without ultrasonic cleaning, T1 - 5 minutes of ultrasonic cleaning, T2 - 10 minutes accumulated ultrasonic cleaning, T3 - 15 Accumulated minutes of ultrasonic cleaning and T4-30 accumulated minutes of ultrasonic cleaning. With the values of flow from each treatment were calculated flow variation coefficients (CVQ (%)), Uniformity Distribution (UD (%)) and Flow Relative (Qr (%)) Treatment regained flow up to 90, 48% and 104.19% for the dripping tube 01 and dripping tube 02 respectively. Ultrasonic cleaning increased the classification of drip tube 01, for distribution uniformity, from "unacceptable" to "good" and "unacceptable" to "excellent" with drip tube 02. Ultrasonic cleaning allowed a reduction of 70.54% and 94,55% of the CVq for the drip tube E1 and E2 respectively. The accumulated time of 15 minutes of ultrasonic cleaning resulted in the highest mean relative flow. The cleaning process had an excellent effect on the recovery of irrigation drippers and involves harsh chemicals to drippers and the environment.

**Keywords:** Relative Flow; Ultrasound; Drip Irrigation.

## 2.3 INTRODUÇÃO

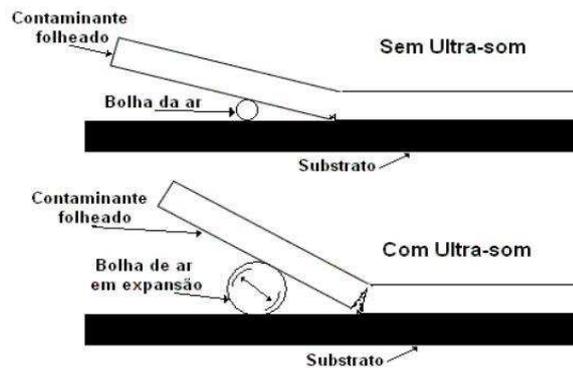
O principal problema da irrigação localizada, em especial o gotejamento é o entupimento. LI *et al.* (2012) aponta que a existência de partículas em suspensão na água de irrigação é a maior causa de entupimento sejam elas de origem orgânica ou precipitados químicos. A concentração e o tamanho das partículas são os fatores que mais interferem na obstrução dos gotejadores de irrigação localizadas (NIU *et al.*, 2013). As partículas encontradas são de diâmetro na ordem de 0,01 a 0,1 mm e as concentrações variam de 0,0 a 1000 mg.L-1.

A recuperação de gotejadores de irrigação obstruídos, de modo geral, é feita por tratamentos químicos, principalmente com soluções ácidas ou super cloradas, tais métodos apresentam um bom nível de recuperação, todavia tem o risco de danificar a estrutura interna dos emissores devido e o uso frequente destes métodos pode trazer prejuízos ambientais como acidificação e salinização do solo.

Alguns pesquisadores buscam alternativas para substituir o tratamento químico na recuperação de gotejadores de irrigação obstruídos, um exemplo é a aplicação bactérias que promovem biodegradação da incrustação obstruente. Costa *et al.* (2016), utilizando um produto comercial de coquetel bacteriológico na desobstrução de gotejadores, obteve uma recuperação satisfatória de dois modelos de gotejadores obstruídos devido a aplicação de água residuária. Sahin *et al.*, (2005) isolou uma bactéria predadora de uma solução com  $\text{CaCO}_3$  e aplicou em tubos gotejadores obstruídos por precipitados de cálcio e obteve 100% de recuperação na vazão.

Um tema muito recente que surgiu como alternativa sustentável na desobstrução de gotejadores é o uso da limpeza ultrassônica. Este método é largamente utilizado na limpeza de peças de indústria e desinfecção de materiais cirúrgicos. Consiste na transdução de ondas de alta frequência, na ordem de 20 a 400 kHz em uma solução aquosa, com detergente enzimático. As ondas sonoras de pequeno comprimento ao se propagarem geram a expansão e contração de bolhas de ar, estes ciclos levam contaminantes folheados a fadiga do contaminante (figura 1) (PEREIRA, 2010).

Esse método de limpeza é capaz de remover impurezas sem comprometer ou danificar a superfície que está sendo limpa, (ENGE, 2015). Quando o objeto a ser limpo possui uma geometria complexa, com cavidades e reentrâncias, muitas vezes a agitação mecânica gerada por borbulhas de ar, hélices ou agitadores, não é suficiente, tornando obrigatório o uso do ultrassom. (PEREIRA, 2010).



**Figura 5 - Descamação de contaminantes folheados com a expansão de bolhas de ar. (PEREIRA, 2010).**

Por enfrentar muitos problemas com obstrução de gotejadores, desde 2003 um agricultor na África do Sul, Sr. Leon Lingnau, vem utilizando uma máquina de limpeza ultrassônica para desobstruir emissores de irrigação esta máquina foi desenvolvida por ele mesmo em sua fazenda (figura 6). Nesta lavadora, as linhas gotejadoras com problemas de obstrução passam pressurizadas por uma cuba prismática em água e onde se propagam as ondas ultrassônicas.



**Figura 6 - Máquina de limpeza ultrassônica desenvolvida pelo Sr. Leon Lingnau. (NIEKERK, 2017).**

Apesar da máquina já ser utilizada com sucesso a vários anos apenas recentemente foram divulgados resultados de uma avaliação que demonstra o potencial de desobstrução da máquina de limpeza desenvolvida pelo agricultor. A avaliação foi realizada no Instituto de

Engenharia Agrícola da África do Sul (ARC-IAE). A avaliação permitiu concluir que a utilização de ondas ultrassônicas na recuperação de gotejadores de irrigação é um tratamento eficiente com viabilidade econômica, resultando no aumento da vida útil dos equipamentos de irrigação Niekerk (2017).

No Brasil, a partir de 2014, paralelamente ao que foi realizado na África do Sul, foram iniciados estudos com desobstrução de tubos gotejadores com ondas ultrassônicas por um grupo de pesquisa. O grupo de pesquisa brasileiro é formado por pesquisadores da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG em parceria com pesquisadores do Instituto Nacional do Semiárido – INSA, Instituto Federal Baiano – IF Baiano e Universidade Federal Rural do Rio Grande no Norte – Ufersa. Assim como na África do Sul os resultados obtidos no Brasil mostraram-se promissores.

Buscando alternativas sustentáveis para a desobstrução de emissores de irrigação na região do Semiárido Brasileiro (SAB), o objetivo da realização deste estudo é validar a recuperação de gotejadores obstruídos por matéria orgânica e precipitados de cálcio com a técnica de limpeza ultrassônica.

## 2.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em bancada de testes, na sede do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), localizado no município de Campina Grande – PB, com coordenadas geográficas latitude 7° 16' 20'' S e longitude 35° 56' 29' O e 550 m de altitude. O clima da região segundo a classificação de Koppen, é tropical com chuvas de outono e períodos de seca no restante do ano, denominado As.

O experimento envolveu a desobstrução de gotejadores do tipo labirinto com diferentes tempos de limpeza ultrassônica. Para acelerar o processo de obstrução foi utilizada uma solução de água residuária com cal hidratada. Em experimento para verificar o susceptibilidade ao entupimento de gotejadores Ribeiro *et al.* (2012), Carvalho *et al.* (2016) aplicaram soluções compostas por até três agentes de obstrução, ferro solúvel (óxido de ferro), carga orgânica (algas e fito plânctons) e sólidos suspensos (adição de solo na água de irrigação). Rocha *et al.* (2016) visando obstruir tubos gotejadores utilizou carbonato, óxido e sulfato de cálcio em doses 10 vezes superiores que as doses de solubilidades em água.

O Delineamento foi um fatorial 2x5 com dois tipos de gotejadores E1 e E2 e 5 tempos de limpeza ultrassônica, T0- correspondente ao tubo obstruído sem limpeza ultrassônica, T1 – 5 minutos de limpeza ultrassônica, T2 – 10 minutos acumulados de limpeza ultrassônica, T3 - 15 minutos acumulados de limpeza ultrassônica e T4-30 minutos acumulados de limpeza ultrassônica.

Os tubos gotejadores testados foram do tipo labirinto, utilizados na região semiárida brasileira (SAB) recomendados para uso com água residuária, denominados de E1, E2. A Tabela 1 apresenta as principais características dos tubos gotejadores utilizados, como: marca, modelo, pressão de serviço, vazão nominal e espaçamento entre gotejadores.

**Tabela 6 - Características dos tubos gotejadores utilizados no experimento**

Denominação	Marca	Modelo	Diâmetro Nominal (mm)	Pressão de Serviço (bar)	Vazão Nominal (L.h <sup>-1</sup> )	Espaçamento (m)
E1	Netafim	Stremline™ 16080	17	0,85	1,6	0,3
E2	NaanDanJain	Taldrip	17	1,00	1,7	0,2

A água residuária utilizada foi produzida na sede administrativa do INSA. Todo esgoto da estação de pesquisa é captado e conduzido para uma estação de tratamento de esgoto (ETE) com tratamento secundário anaeróbico dimensionada para uma vazão de até 3.000 L.dia<sup>-1</sup>. Após o tratamento, o efluente é armazenado em reservatórios de 5000 L e

utilizado em experimentos de irrigação de palma e espécies florestais. Uma fração deste efluente foi transferida para um reservatório de 1000L e neste volume foi dissolvida cal hidratada, (90% de hidróxido de cálcio) na concentração de 1,0 g L<sup>-1</sup>.

A Tabela 7 indica as características físico-químicas da solução utilizada no experimento.

**Tabela 7 - Parâmetros analisados da água utilizada no experimento**

<b>Parâmetros analisados</b>	<b>Água com cálcio</b>
Condutividade Elétrica ( mmho/cm a 25°C)	2860
pH	9
Turbidez (uT)	5,2
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L)	100
Dureza em Cálcio (mg/L)	79,5
Dureza em Magnésio (mg/L)	30
Dureza Total (mg/L)	323,8
Sódio (mg/L)	521,8
Potássio (mg/L)	8,2
alumínio (mg/L)	0
Ferro Total (mg/L)	0,08
Alcalinidade em Hidróxidos (mg/L)	0
Alcalinidade em Carbonatos (mg/L)	210
Alcalinidade em Bicarbonatos (mg/L)	85
Alcalinidade Total (mg/L)	295
Sulfato (mg/L)	67,1
Fósforo Total (mg/L)	0
Cloreto (mg/L)	777,5
Nitrato (mg/L)	0,75
Nitrito (mg/L)	0,19
Amônia (mg/L)	6,46
Sílica (mg/L)	5
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	1,81
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C) (mg/L)	1726,2

A bancada experimental tem 11,00 m de comprimento, 2,00 m de largura e 1,50 m de altura com comprimento de linhas de 10 m. Sua estrutura é composta por cavaletes de suporte, calhas de zinco e arcos de sustentação dos tubos gotejadores. O sistema de irrigação tem tubulação de PVC, conectores e os tubos gotejadores. A pressurização das linhas foi feita com uma bomba KSB® modelo C 2000N, com vazão máxima de 10 m<sup>3</sup>. h<sup>-1</sup> e altura manométrica máxima de 24 mca. O volume e a vazão foram medidos com hidrômetro da marca LAO®, modelo UJB1, vazão nominal de 1,5 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. A leitura de pressão foi feita com manômetros de glicerina do tipo tubo de Bourdon da marca GE com resolução de 0,10 Kg cm<sup>-2</sup>. Os ajustes de pressão foram feitos com registros do tipo gaveta de 1” e controlador de pressão de ação direta da marca BERMAD®, modelo 0075 PRVy, a pressão foi mantida em 1 bar Para filtragem utilizou-se filtros de disco de 200 mesh, marca IRRITEC® modelo FLD,

a limpeza do filtro foi feita diariamente.

Na bancada além deste estudo foram realizados vários experimentos simultaneamente, a figura 7 ilustra uma imagem geral logo após a montagem da bancada de experimentos.

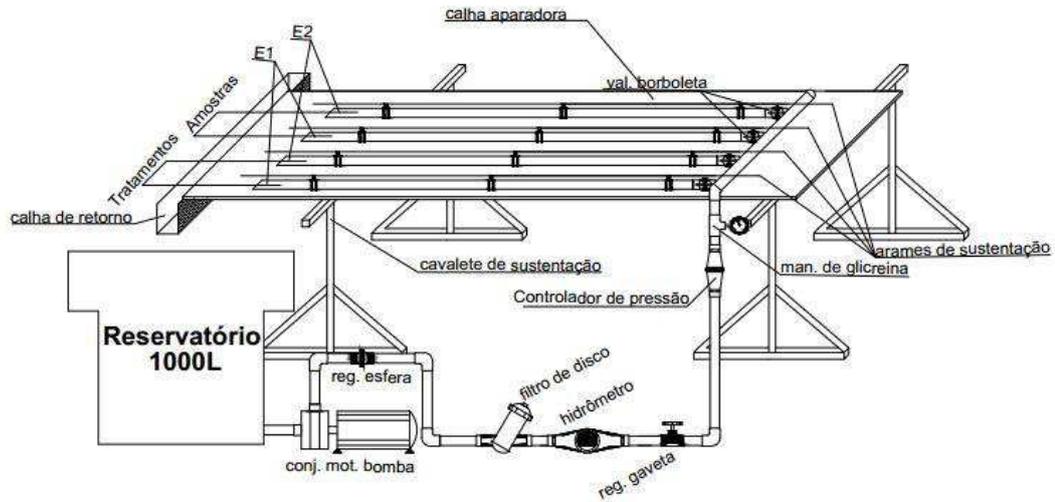


**Figura 7 - Vistas gerais da implantação da bancada de ensaios de tubos gotejadores.**

Na fase de obstrução dos gotejadores, o sistema operou durante 20 horas diárias entre os dias 01 de dezembro de 2014 a 30 de janeiro de 2015, totalizando 1200 h de operação.

Foram utilizadas 2 linhas laterais de cada modelo de tubo gotejador. Uma linha de cada modelo foi utilizada para obtenção de amostras para Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e outra linha de cada modelo para avaliação. Foram avaliados 25 gotejadores por linha lateral quando novos, após as 1200 h de aplicação da solução com carga orgânica e precipitados e cálcio e após a aplicação dos tratamentos de limpeza ultrassônica totalizando 6 avaliações por linha lateral.

Na figura 8 está o esquema de montagem deste experimento.



**Figura 8 - Layout esquemático dos componentes da bancada.**

A limpeza ultrassônica foi realizada com lavadora ultrassônica da marca “Marca Médica”, com cuba de capacidade de 30 L e frequência de operação de 40 kHz. A limpeza foi feita colocando-se a linha obstruída dentro da cuba com solução de água destilada e 150 mL de detergente enzimático, conforme recomendação do fabricante, e então ligada a lavadora no tempo correspondente a cada tratamento. Após a limpeza ultrassônica as linhas eram recolocadas na banca e pressurizadas com o final aberto por 5 minutos e posteriormente feita a avaliação.

Em cada avaliação foram feitas coletas em triplicata. A coleta do volume foi feita de maneira simultânea para cada repetição com auxílio de coletores e placas de isopor. O tempo de coleta foi de 4 minutos. A vazão foi obtida pela relação entre volume e tempo.

Com os valores de vazão foi calculado para cada tubo o Coeficiente de Variação de Vazão – CVq % (equação 01), a Uniformidade de distribuição UD % (equação 02) e Vazão Média-  $Q_m$  ( $L.h^{-1}$ ).

$$Cvq = Sd \cdot q_m^{-1} \quad \text{eq. (01)}$$

Em que:

$Sd$ : desvio padrão de todas as medições realizadas;

$q_m$ : vazão média de todas as medições realizadas ( $L.h^{-1}$ );

$$UD (\%) = 100 \cdot q_{25} \cdot q_m^{-1} \quad \text{eq.(02)}$$

Em que:

$q_{25}$  - vazão média das 25 % menores vazões ( $L.h^{-1}$ );

$q_m$  - vazão média de todas as medições realizadas (L.h<sup>-1</sup>);

Também com os valores de vazão foram calculados para cada emissor os valores de Vazão Relativa % (equação 03).

$$Qr (\%) = 100. q_a. q_i^{-1} \quad \text{eq.(03)}$$

Em que:

$q_a$  - vazão atual do gotejador (L.h<sup>-1</sup>);

$q_i$  - vazão no início do experimento, antes da obstrução (L.h<sup>-1</sup>);

Com o valores de Qr (%) procedeu-se com variância (ANOVA) para os fatores tipo de gotejador e de tempo de limpeza ultrassônica e teste Tukey a 5% de significância.

A análise de microscopia eletrônica de varredura MEV foi feita com um equipamento da marca Shimadzu Corporation® - Superscan SSX-550. Foi cortada uma amostra de cada modelo de emissor antes da limpeza ultrassônica e uma amostra de cada modelo de emissor após a limpeza ultrassônica, posteriormente as amostras passaram por um processo de metalização e foram analisadas no equipamento que gerou imagens em alta resolução, essas imagens possibilitam análise visual da rugosidade e quantidade de material aderido nos gotejadores.

## 2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 8, mostra os dados de Qr (%), CVq (%), UD (%) e Q (L.h<sup>-1</sup>), para os tempos em que os dois tipos de tubos gotejadores foram submetidos à limpeza ultrassônica.

A vazão média dos gotejadores avaliados para o tubo gotejador 01 antes da limpeza ultrassônica foi de 0,9 L.h<sup>-1</sup> e passou para 1,36 L.h<sup>-1</sup> após 10 minutos acumulados de limpeza ultrassônica, para o tubo gotejador 02 a vazão aumentou de 1,02 L.h<sup>-1</sup> para o valor máximo de 1,57 L.h<sup>-1</sup> com o tempo de 15 minutos acumulados de limpeza ultrassônica (Tabela 3).

**Tabela 8 - Valores de Vazão Relativa (Qr (%)), Coeficiente de Variação (CVq (%)), Uniformidade de Distribuição (UD (%)) e Vazão Média (Qm (L.h-1)) para cada tempo acumulado de limpeza ultrassônica**

Tubo gotejador E1				
Tempo acumulado (min)	Qr (%)	CVq (%)	UD (%)	Qm (L.h <sup>-1</sup> )
0	59,93	76,80	0,00	0,90
5	68,93	63,32	0,00	1,04
10	90,48	22,62	77,38	1,36
15	89,64	24,84	74,58	1,35
30	88,61	24,29	75,64	1,33

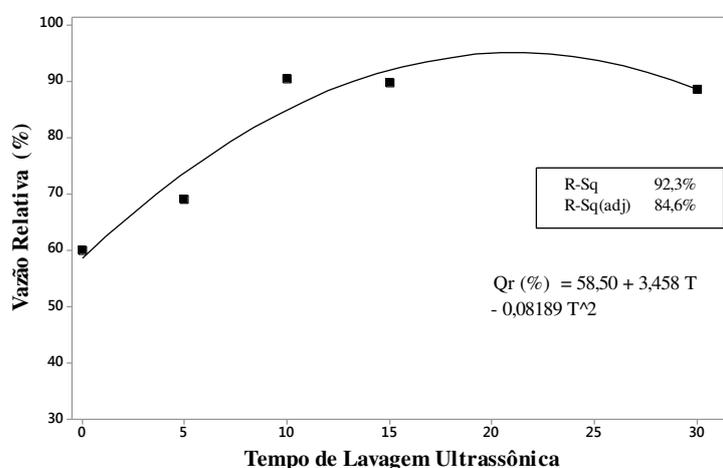
Tubo gotejador E2				
Tempo acumulado (min)	Qr (%)	CVq	UD (%)	Qm (L.h <sup>-1</sup> )
0	67,46	70,64	0,00	1,02
5	96,16	30,28	69,56	1,45
10	103,01	4,21	95,50	1,55
15	104,19	3,85	95,83	1,57
30	101,25	4,33	95,18	1,52

A limpeza ultrassônica recuperou a vazão em até 90,48% e 104,19% em relação à vazão do tubo novo para o tubo gotejador 01 e tubo gotejador 02 respectivamente. A limpeza ultrassônica elevou a Uniformidade de Distribuição de 0 % até 77,38% e 95,83% para o tubo gotejador 01 e tubo gotejador 02 respectivamente, dessa forma a uniformidade passou de “inaceitável” para “bom” (tubo gotejador 01) e de “inaceitável” para “excelente” (tubo gotejador 02) de acordo com a classificação da ASABE (2001).

No Instituto de Engenharia Agrícola da África do Sul (ARC-IAE), recentemente, foram realizados testes com limpeza ultrassônica em uma máquina desenvolvida por um agricultor local. Os testes foram feitos em tubos gotejadores obstruídos em condição de campo, os pesquisadores conseguiram redução de até 73% do CVq inicial de 10,57% para 2,85%, Niekerk (2017). Neste estudo o coeficiente de variação sofreu uma redução de 76,80 % para até 22,62 % (70,54% de redução), no tubo gotejador 01. Para o tubo gotejador 02 o

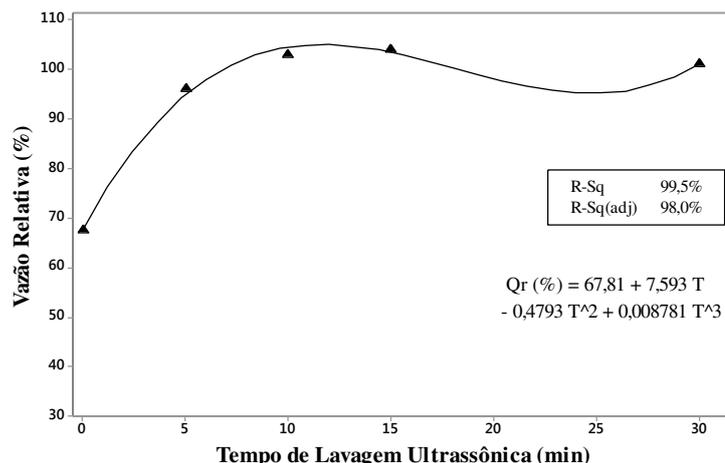
CVq reduziu de 70,64% até 3,85% (94,55% de redução), com de tempo acumulado de 15 minutos de limpeza ultrassônica, dessa forma a classificação do tubo gotejador analisando o CVq passou de “Inaceitável” para “Excelente” segundo ASABE (2008), estado de acordo com o exigido pela ABNT/NBR ISO 926:2006 em que  $CVq < 7\%$ .

A representação gráfica da figura 9 é da vazão relativa média do tubo gotejador 01 sendo o tempo acumulado de limpeza ultrassônica a variável independente. O modelo que representou melhor a relação foi o quadrático com R ajustado de 84,6% e coeficiente de determinação  $R^2$  de 92,3 %, na mesma figura está a equação da relação entre o tempo e vazão relativa.



**Figura 9- Regressão entre Tempo Acumulado de Limpeza Ultrassônica (min) e Vazão Relativa (%) para o Tubo gotejador 01.**

A figura 10 representa a relação da vazão relativa média do Tubo gotejador 02 com tempo acumulado de limpeza ultrassônica como variável independente.



**Figura 10 - Regressão entre Tempo Acumulado de Limpeza Ultrassônica (min) e Vazão Relativa (%) para o Tubo gotejador 02.**

O modelo que apresentou melhor ajuste na regressão da figura 6 foi o modelo cúbico com R ajustado de 98% e coeficiente de determinação  $R^2$  de 99,5%, no box da figura está a equação que descreve a relação. Nota-se que o ajuste da equação ao modelo foi melhor para o tubo gotejador 02 quando comparado com o tubo gotejador 01. Costa *et al.* (2016) encontraram coeficientes de determinação  $R^2$  de 99 e 100%, para dois gotejadores do tipo labirinto investigando a relação entre tempo de ação de um produto biológico de desobstrução e redução de vazão relativa.

Sahin *et al.* (2005) elevou a vazão relativa média de tubos gotejadores obstruídos por  $\text{CaCO}_3$  de 0 % até 100%, após 48 horas de ação de bactérias biodegradantes.

A Tabela 9 é a análise de variância das vazões relativas para os fatores de tempo de limpeza ultrassônica e tubo gotejador. A análise de variância indicou haver diferenças significativas entre os tempos de limpeza e os tubos gotejadores, mas não houve interação ente os fatores.

**Tabela 9 - Análise de variância da Vazão Relativa para os fatores Tempo de limpeza ultrassônica e tipo de Tubo gotejador**

Fator	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	P-valor
Tempo	4	40956	10239,1	11,93	0,000 *
Tubo gotejador	1	13865	13865	16,16	0,000*
Tempo*Tubo gotejador	4	2713	678,2	0,79	0,532 <sup>ns</sup>
Resíduo	240	205953	858,1		
Total	249	263487	-		

Nota: \* indica que p-valor é significativo e “ns” que o p-valor não é significativo ao nível de 5 % de significância.

A Tabela 10 apresenta o teste Tukey dos tempos acumulados de limpeza ultrassônica

para os dados de Vazão Relativa.

O teste Tukey indicou que há diferença entre as médias de vazão relativa entre os tempo de limpeza ultrassônica e o tempo zero (antes da limpeza), portanto o tratamento da limpeza ultrassônica foi eficaz na desobstrução dos tubos desde a primeira lavagem.

**Tabela 10 - Valores médios de Vazão Relativa (%) para diferentes tempos acumulados de limpeza ultrassônica (min) e teste Tukey para as médias das 50 repetições**

Tempo	N	Qr (média) (%)
T3	50,00	96,92 a
T2	50,00	96,75 a
T4	50,00	94,93 a
T1	50,00	82,55 a
T0	50,00	63,7 b

Nota: Letras iguais indicam igualdade a 5 % de significância pelo teste Tukey.

Os tempos de limpeza ultrassônica tiveram estatisticamente o mesmo desempenho em aumentar a vazão relativa dos emissores obstruídos, sendo o tempo de 15 minutos acumulados o que resultou na maior média de vazão relativa (96,97%).

O teste F (Tabela 11) indica que houve diferença na Vazão Relativa com o tratamento da limpeza ultrassônica entre os dois tipos de gotejadores sendo que o E2 mostrou-se mais susceptível a desobstrução, com média de 94,41% de Vazão Relativa.

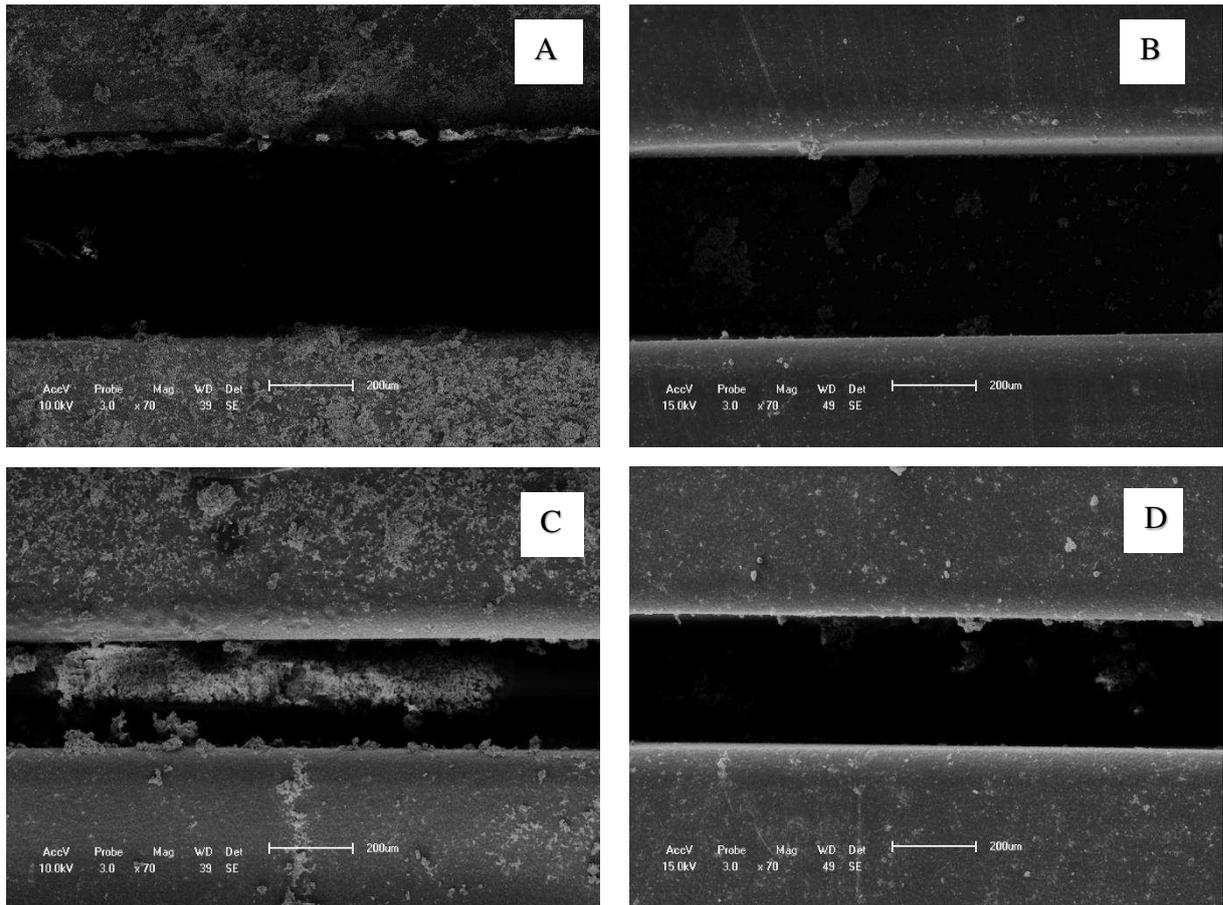
**Tabela 11 - Valores médios de Vazão Relativa (%) para diferentes tipos de tubos gotejadores e teste F para as médias das 125 repetições**

Tempo (min)	N	Qr (média) (%)
E2	125,00	94,41 a
E1	125,00	79,52 b

Nota: Letras iguais indicam igualdade a 5 % de significância pelo teste F.

Segundo Pereira (2010) a limpeza ultrassônica promove limpeza satisfatória em estruturas complexas como, entranhas, furos, cavidades, fendas etc. De acordo Farmer's Weekly (2016), a limpeza ultrassônica promoveu resultados de recuperação de gotejadores superiores a todos os outros tipos de tratamentos já testados.

A figura 11 foi obtida pelo processo de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com ampliação de 70 vezes.



**Figura 11 - Imagens de MEV: A- Tubo gotejador E1 obstruído; B Tubo gotejador E1 após limpeza ultrassônica; C Tubo gotejador E2 obstruído; D tubo gotejador E2 após limpeza ultrassônica.**

Na figura estão as imagens das amostras dos Tubos gotejadores E1 e E2 após a obstrução promovida por 1200 horas de aplicação de água com cálcio e alta carga orgânica (Figura 11 A e 11 C), e após a limpeza ultrassônica (Figura 11 B e 11 C).

Eroglu *et al.* (2012), utilizaram imagens de microscopia eletrônica de varredura para identificar o efeito da obstrução de gotejadores devido a aplicação de água com  $\text{CaCO}_3$  e água com  $\text{CaCO}_3$  e bactérias com ação de desobstrução biológica

As imagens da figura 11 mostram que limpeza ultrassônica promoveu a remoção quase total da incrustação dos precipitados de cálcio.

## 2.6 CONCLUSÕES

A limpeza ultrassônica elevou a classificação do tubo gotejador 01, para uniformidade de distribuição, de “inaceitável” para “bom” e de “inaceitável” para “excelente” para o tubo gotejador 02.

A limpeza ultrassônica propiciou a redução em até 70,54% e 94,55% do CVq para o tubo gotejador E1 e E2 respectivamente.

O tempo de 15 minutos de limpeza ultrassônica foi suficiente para promover o máximo incremento de vazão.

O tubo gotejador E2 mostrou-se mais susceptível à desobstrução através do método da limpeza ultrassônica do que o tubo gotejador E1.

O processo de limpeza ultrassônica não envolve produtos químicos agressivos ao meio ambiente e tem excelente potencial desobstrução em gotejadores de irrigação, foi capaz de remover quase que totalmente a incrustação dos gotejadores.

## 2.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT. NBR ISO 9261. 2006 Equipamentos de irrigação agrícola - Tubo gotejadores e tubos tubo gotejadores – Especificação e métodos de ensaio. São Paulo 17p.
- ASAE. American Society of Agricultural Engineers. Standard engineering practices data: EP 458. Field evaluation of microirrigation systems. St. Joseph, Mich. ASAE Standards. p. 792-797, 2001.
- ASAE. American Society of Agricultural and Biological Engineers – ASABE. Design and installation of micro irrigation systems. St. Joseph, 6 p. 2008.
- Carvalho, L. C. C.; Coelho, R. D.; Teixeira, M. B.; Cunha, F. N.; Silva, N. F.; Soares, A. L.; Vidal, V. M.; Morais, W. A. Entupimento de emissores autocompensantes com aplicação de sulfato e óxido de ferro. Científica. Jaboticabal, v.44, n.3, p.385-402, 2016
- Costa, D. O.; Batista, R. O.; Vale, H. S. M.; Sousa, A. B.; Dombroski, S. A. D.; Alves, S. M. C. Biological treatment of drippers clogged by the use of treated domestic wastewater. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, v.20, p.595–599, 2016.
- ENGE SOLUTIONS ULTRASONIC. Tecnologia de Limpeza por Ultrassom. Disponível em < <http://www.engesolutions.com.br/files/Folder%20Ultrassom%20Industrial.pdf>> acesso em maio de 2015.
- Eroglu S.; Şahin, Ü.; Tunc, T.; Şahin, F. Bacterial application increased the flow rate of CaCO<sub>3</sub>-clogged emitters of drip irrigation system. Journal of Environmental Management, v.98, p.37-42, 2012.
- Farmer’s Weekly. Farmig for Tomorrow: Ultrasonic sound used in drip irrigation line cleaning. 26 p 25 novembro 2016, disponível em < <http://www.arc.agric.za/Agricultural%20Sector%20News/Ultrasonic%20sound%20used%20in%20drip%20irrigation%20line%20cleaning.pdf>> acesso em dezembro de 2016.
- LI, Y. K.; LIU, Y. Z.; LI, G. B.; XU, T. W.; LIU, H. S.; REN, S. M.; YAN, D. Z.; YANG, P. L. Surface topographic characteristics of suspended particulates in reclaimed wastewater and effects on clogging in labyrinth drip irrigation emitters. *Irrigation Science*, v 30 p. 43-56, 2012.
- Niekerk A. S. V. Evaluation Report On A Dripper Line Cleaning Machine. Disponível em <<http://greendrum.co.za/wp-content/uploads/2015/03/Evaluation.pdf>> Acesso em janeiro de 2017.

- NIU, W., LIU, L., CHEN, X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. *Irrig Sci* v.31, p.545–555, 2013.
- Pereira A.H.A. Limpeza ultrassônica: overview e estado da arte. Relatório Técnico RT-ATCP-02, ATCP Engenharia Física, São Carlos, SP – Brasil, 2010.
- Ribeiro, P. A. A; Teixeira, M. B.; Coelho, R. D; Franco, E. M.; Silva N. F.; Carvalho, L. C. C.; Alves, M. E. B. A. Gotejadores submetidos a condições críticas de qualidade da água. *Irriga*. Botucatu, Edição Especial, p. 368 - 379, 2012.
- Rocha, F. J.; Coelho, R. D.; Teixeira, M. B.; Soares, F. A. L.; Junior, J. L. C. S.; Cunha, F. N.; Silva. N. F. Uso de carbonato, óxido e sulfato de cálcio em alta concentração em tubos gotejadores. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*. Fortaleza- CE, v.10, nº.4, p. 787 - 798, 2016.
- Şahin, Ü.; Anapali, Ö.; Dönmez, M. F.; Şahin, F. Biological treatment of clogged emitters in a drip irrigation system. *Journal of Environmental Management*, v.76, p.338-341,2005.

### 3 ARTIGO 3: DESOBSTRUÇÃO DE GOTEJADORES DE IRRIGAÇÃO COM TRATAMENTOS QUÍMICOS E LIMPEZA ULTRASSÔNICA

#### 3.1 RESUMO

O entupimento é o principal problema da irrigação por gotejamento e sua recuperação, de modo geral, é feita por tratamentos químicos, com soluções ácidas e cloradas. Os tratamentos químicos tem risco de contaminação, pois o resíduo da aplicação é depositado no solo. Alguns pesquisadores buscam alternativas sustentáveis na recuperação de gotejadores de irrigação. O tratamento de desobstrução de gotejadores mais recente é a limpeza ultrassônica, este método já é bastante usado na indústria em limpeza de peças e na medicina, na limpeza e desinfecção de materiais médicos. Sendo assim, a realização deste estudo teve por objetivo comparar a recuperação de gotejadores de irrigação com a limpeza ultrassônica e os tratamentos químicos convencionais. O experimento foi desenvolvido no Instituto Nacional do Semiárido – INSA, em Campina Grande – PB, onde foi feita a obstrução artificial de gotejadores com aplicação de cal hidratada dissolvida em água residuária em uma bancada de testes e depois a recuperação dos emissores. O delineamento foi inteiramente casualizado em esquema de parcelas subdivididas tendo, nas parcelas, os tratamentos aplicados T1 (aplicação de ácido fosfórico pH 2), T2 (aplicação de cloro livre  $50 \text{ mg.L}^{-1}$ ), T3 (limpeza ultrassônica com 15 minutos), T4 (limpeza ultrassônica fracionada em 3 limpezas) nas subparcelas os tipos de gotejador, E1 (stramline Netafim) e E2 (taldrip NaanDanJain), também em subparcelas, a fases AA (Antes da aplicação do tratamento) e DA (Após aplicação do tratamento). Com os valores de vazão calculou-se os Coeficientes de Variação de vazão ( $\text{Cv}_q$  (%)), Uniformidade de Distribuição (UD (%)) para classificação e também a Vazão Relativa ( $\text{Q}_r$  (%)) e Incremento de vazão ( $\text{I}_q$  ((%)) para análise de variância e teste de F e Tukey de comparação de médias. O T4 para o tubo gotejador E2, reduziu o  $\text{CV}_q$ , de 69,21% para 3,77% (94,55% de redução). Após as recuperações dos tubos obstruídos a classificação da UD mudou para “Ruim” e “Regular” nos tratamentos T3 e T4 respectivamente no tubo E1 que eram “inaceitáveis”, para o E2 a classificação foi “Bom” e “Excelente” nos tratamentos T3 e T4 respectivamente antes “inaceitáveis”. O método de recuperação com limpeza ultrassônica é uma solução sustentável com alto poder recuperação de gotejadores de irrigação necessitando de mais pesquisas para determinar um padrão de uso econômico e eficiente.

**Palavras chave:** recuperação, ultrassom, irrigação por gotejamento;

## **PAPER 3: UNBLOCKING IRRIGATION DRIPPERS WITH CHEMICALS TREATMENT AND ULTRASONIC SOUND CLEANING**

### **3.2 ABSTRACT**

Clogging is the main problem of drip irrigation and its recovery, in general by chemical treatments, with acidic and chlorinated solutions. The chemical treatments have a risk of contamination, as the residue of the application is deposited in the soil. Some researchers are looking for sustainable alternatives in the recovery of irrigation drippers. The most recent drip unblocking treatment is ultrasonic cleaning, this method is already widely used in the industry in cleaning parts and in medicine, cleaning and disinfecting medical supplies. By the way, the purpose of this study was to compare the recovery of irrigation drippers with ultrasonic cleaning and conventional chemical treatments. The experiment was carried out at the National Institute of the Semi - Arid - INSA, Campina Grande - PB, where the artificial obstruction of drippers with the application of hydrated lime dissolved in wastewater was carried out on a test bench and afterwards the recovery of the emitters. The design was completely randomized in a sub-divided plots scheme with treatments applied T1 (phosphoric acid application pH 2), T2 (application of free chlorine 50 mg.L-1), T3 (ultrasonic cleaning with 15 minutes) , T4 (fractional ultrasonic cleaning in 3 wipes) in the subplots the dripper types, E1 (stramline Netafim) and E2 (taldrip NaanDanJain), also in subplots, to phases AA (Before application of treatment) and DA (After application of treatment ). With the flow values we calculated the flow variation coefficients (CVQ (%)), Uniformity Distribution (UD (%)) for classification and also the Relative Flow (Qr (%)) and flow Increase Iq (( %)) For analysis of variance and Tukey test of comparison of means. The T4 for the drip tube E2, reduced the CVq, from 69.21% to 3.77% (94.55% reduction). After the recoveries of the obstructed tubes the classification of the UD changed to "Bad" and "Regular" in the T3 and T4 treatments respectively in the E1 tube that were "unacceptable", for E2 the classification was "Good" and "Excellent" in T3 treatments And T4 respectively before "unacceptable". The recovery method with ultrasonic cleaning is a sustainable solution with high power recovery in irrigation drippers, but requiring more research to determine a pattern of economical and efficient use.

**Keywords:** recovery, ultrasound, drip irrigation;

### 3.3 INTRODUÇÃO

O entupimento é o principal problema da irrigação por gotejamento. LI *et al.* (2012) atribuí às partículas em suspensão na água de irrigação como a maior causa de entupimento elas podem ser de origem biológica, física ou química. A concentração e o tamanho das partículas são os fatores que mais interferem na obstrução dos gotejadores de irrigação localizadas (NIU *et al.*, 2013).

A recuperação de gotejadores de irrigação obstruídos, de modo geral, é feita por tratamentos químicos, principalmente com soluções ácidas e cloradas. Existem tratamentos químicos de choque e de prevenção para desobstrução de gotejadores de irrigação, de acordo com o Teixeira *et al.* (2008), os tratamentos mais recomendados são ácido fosfórico a pH 2 e cloro livre com 50 mg.L<sup>-1</sup> com pH entre 5 e 6.

Nos tratamentos de prevenção a aplicação é feita com uma frequência maior e concentrações menores que as do tratamento de choque. Katz *et al.* (2014) relata que em Israel, a recomendação ante entupimento da principal empresa de irrigação por gotejamento, Netafim, consiste na aplicação semanal de ácido para obstruções devido precipitados químicos e aplicação semanal de cloro para entupimento devido a fator biológico.

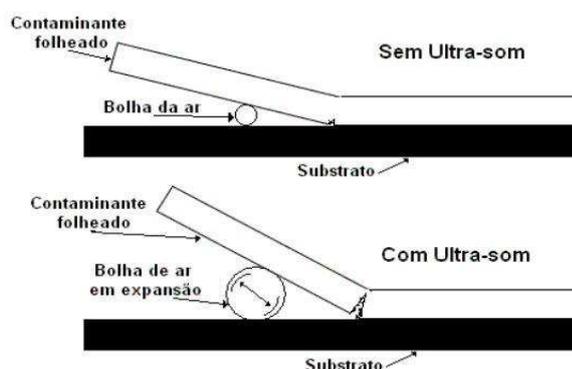
Apesar da eficácia dos tratamentos químicos, principalmente no que tange ao tratamento preventivo, os tratamentos químicos tem risco potencial de acidificação e salinização do solo, além de agredir os equipamentos de irrigação.

Alguns pesquisadores buscam alternativas para substituir o tratamento químico na recuperação de gotejadores de irrigação, um exemplo é a aplicação bactérias que promovem biodegradação da incrustação obstruente. Costa *et al.* (2016), utilizando um produto comercial de coquetel bacteriológico na desobstrução de gotejadores, obteve uma recuperação satisfatória de dois modelos de gotejadores obstruídos devido a aplicação de água residuária. Sahin *et al.*, (2005) isolou uma bactéria predadora de uma solução com CaCO<sub>3</sub> e aplicou em tubos gotejadores obstruídos por precipitados de cálcio e obteve 100% de recuperação na vazão.

Um tema recente no tratamento de desobstrução de gotejadores é o uso da limpeza ultrassônica. Este método é bastante utilizado na limpeza de peças de indústria e desinfecção de matérias cirúrgicos. Consiste na transdução de ondas de alta frequência, na ordem de 20 a 400 kHz em uma solução aquosa, com detergente enzimático. As ondas sonoras de pequeno comprimento ao se propagarem geram a expansão e contração de bolhas de ar, estes ciclos levam contaminantes folheados a fadiga do contaminante (figura 12) (PEREIRA,

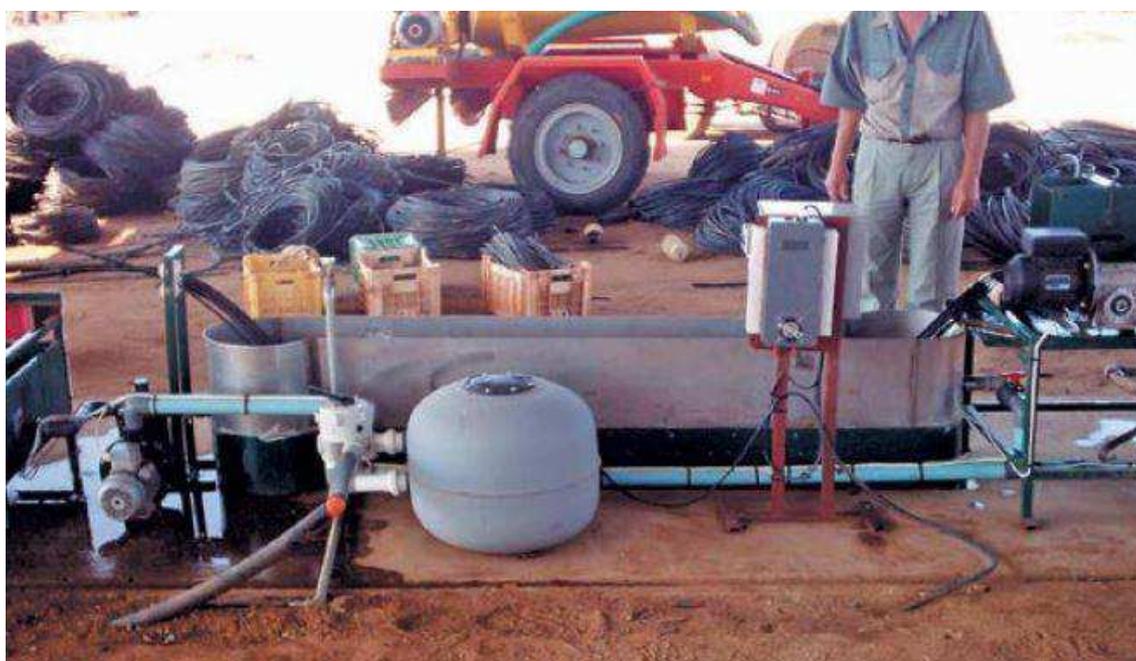
2010).

Esse método de limpeza é capaz de remover impurezas sem comprometer ou danificar a superfície que está sendo limpa, (ENGE, 2015). Quando o objeto a ser limpo possui uma geometria complexa, com cavidades e reentrâncias, muitas vezes a agitação mecânica gerada por borbulhas de ar, hélices ou agitadores, não é suficiente, tornando obrigatório o uso do ultrassom. (PEREIRA, 2010).



**Figura 12 - Descamação de contaminantes folheados com a expansão de bolhas de ar. (PEREIRA, 2010).**

O agricultor, Sr. Leon Lingnau da África do Sul, vem utilizando, desde 2003 uma máquina de limpeza ultrassônica para recuperar gotejadores de irrigação, esta máquina foi desenvolvida por ele mesmo em sua fazenda (figura 13).



**Figura 13 - Máquina de limpeza ultrassônica desenvolvida pelo Sr. Leon Lingnau. Farmer's Weekly (2017).**

Nesta lavadora, as linhas gotejadoras com problemas de obstrução passam,

pressurizadas, por uma cuba prismática com água onde as ondas ultrassônicas se propagam.

A pouco tempo foram divulgados resultados de uma avaliação que demonstra o potencial de desobstrução da máquina de limpeza desenvolvida pelo Sr. Lingnau. A avaliação foi realizada no Instituto de Engenharia Agrícola da África do Sul (ARC-IAE). A avaliação permitiu concluir que a utilização de ondas ultrassônicas na recuperação de gotejadores de irrigação é um tratamento eficiente com viabilidade econômica, resultando no aumento da vida útil dos equipamentos de irrigação Niekerk (2012).

No Brasil, a partir de 2014, sem conhecimento que foi realizado na África do Sul, foram iniciados estudos com desobstrução de tubos gotejadores com ondas ultrassônicas por um grupo de pesquisa. O grupo de pesquisa brasileiro é formado por pesquisadores da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG em parceria com pesquisadores do Instituto Nacional do Semiárido – INSA, Instituto Federal Baiano – IF Baiano e Universidade Federal Rural do Rio Grande no Norte – Ufersa. Assim como na África do Sul os resultados obtidos no Brasil mostraram-se promissores, dentre os estudos um deles refere-se à esta proposta. Buscando alternativas sustentáveis para a desobstrução de emissores de irrigação na região do Semiárido Brasileiro (SAB), o objetivo da realização deste estudo é comparar a recuperação de gotejadores obstruídos por matéria orgânica e precipitados de cálcio com tratamentos químicos convencionais e tratamentos de limpeza ultrassônica.

### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.4.1 Local e Componentes

O estudo foi realizado em bancada de testes, na sede do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), localizado no município de Campina Grande – PB, com coordenadas geográficas latitude 7° 16' 20'' S e longitude 35° 56' 29' O e 550 m de altitude. O clima da região segundo a classificação de Koppen, é tropical com chuvas de outono e períodos de seca no restante do ano, denominado As.

O experimento envolveu a desobstrução de gotejadores do tipo labirinto tratamentos químicos convencionais conforme citado por Teixeira *et al.* (2008) e com limpeza ultrassônica. Para acelerar o processo de obstrução foi utilizada uma solução de água residuária com cal hidratada. Em experimento para verificar o susceptibilidade ao entupimento de gotejadores Ribeiro *et al.* (2012), Carvalho *et al.* (2016) aplicaram soluções compostas por até três agentes de obstrução, ferro solúvel (óxido de ferro), carga orgânica (algas e fito plânctons) e sólidos suspensos (adição de solo na água de irrigação). Rocha *et al.* (2016) visando obstruir tubos gotejadores utilizou carbonato, óxido e sulfato de cálcio em doses 10 vezes superiores que as doses de solubilidades em água.

Os tubos gotejadores testados foram do tipo labirinto, utilizados na região semiárida brasileira (SAB) recomendados para uso com água residuária. A Tabela 12 apresenta as principais características dos tubos gotejadores utilizados, como: marca, modelo, pressão de serviço, vazão nominal, espaçamento entre gotejadores e respectiva denominação E1 e E2.

**Tabela 12 - Características dos tubos gotejadores utilizados no experimento**

Denominação	Marca	Modelo	Diâmetro Nominal (mm)	Pressão de Serviço (bar)	Vazão Nominal (L.h <sup>-1</sup> )	Espaçamento (m)
E1	Netafim	Stremline™ 16080	17	0,85	1,6	0,3
E2	NaanDanJain	Taldrip	17	1,00	1,7	0,2

A água residuária utilizada foi obtida na sede administrativa do INSA. Todo esgoto da estação de pesquisa é captado e conduzido para uma estação de tratamento de esgoto (ETE) com tratamento secundário anaeróbico dimensionada para uma vazão de até 3.000 L.dia<sup>-1</sup>. Após o tratamento, o efluente é armazenado em reservatórios de 5000 L e utilizado em experimentos de irrigação de palma e espécies florestais. Uma fração deste efluente foi transferida para um reservatório de 1000L e neste volume foi dissolvida cal hidratada, (90%

de hidróxido de cálcio) na concentração de 1,0 g L<sup>-1</sup>.

A Tabela 13 indica as características físico-químicas da solução utilizada para causar a obstrução nos tubos.

**Tabela 13 - Parâmetros analisados da água utilizada no experimento**

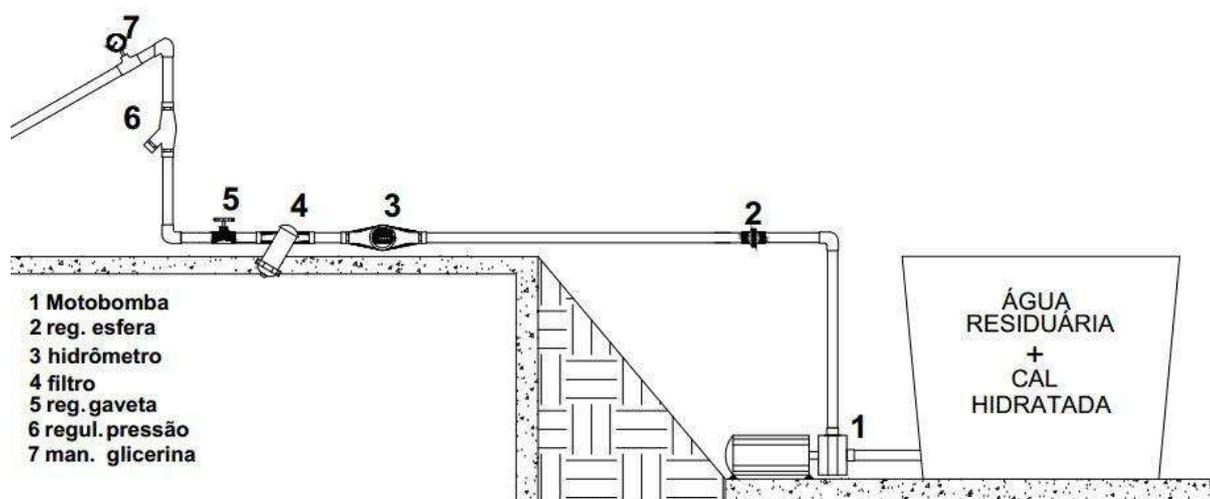
Parâmetros analisados	Água com cálcio
Condutividade Elétrica ( mmho/cm a 25°C)	2860
pH	9
Turbidez (uT)	5,2
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L)	100
Dureza em Cálcio (mg/L)	79,5
Dureza em Magnésio (mg/L)	30
Dureza Total (mg/L)	323,8
Sódio (mg/L)	521,8
Potássio (mg/L)	8,2
alumínio (mg/L)	0
Ferro Total (mg/L)	0,08
Alcalinidade em Hidróxidos (mg/L)	0
Alcalinidade em Carbonatos (mg/L)	210
Alcalinidade em Bicarbonatos (mg/L)	85
Alcalinidade Total (mg/L)	295
Sulfato (mg/L)	67,1
Fósforo Total (mg/L)	0
Cloreto (mg/L)	777,5
Nitrato (mg/L)	0,75
Nitrito (mg/L)	0,19
Amônia (mg/L)	6,46
Sílica (mg/L)	5
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	1,81
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C) (mg/L)	1726,2

A bancada experimental tem 11,00 m de comprimento, 2,00 m de largura e 1,50 m de altura com comprimento de linhas de 10 m. Sua estrutura é composta por cavaletes de suporte, calhas de zinco e arcos de sustentação dos tubos gotejadores. Na figura 3 está a vista geral da bancada de experimentos.



**Figura 14 - Vistas gerais da bancada de ensaios de tubos gotejadores.**

O sistema de irrigação tem tubulação de PVC, conectores e os tubos gotejadores. A pressurização das linhas foi feita com uma bomba KSB® modelo C 2000N, com vazão máxima de  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  e altura manométrica máxima de 24 mca. O volume e a vazão foram medidos com hidrômetro da marca LAO®, modelo UJB1, vazão nominal de  $1,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . A leitura de pressão foi feita com manômetros de glicerina do tipo tubo de Bourdon da marca GE com resolução de  $0,1 \text{ Kg cm}^{-2}$ . Os ajustes de pressão foram feitos com registros de gaveta e controlador de pressão de ação direta da marca BERMAD®, modelo 0075 PRVy, a pressão foi mantida em 1 bar. Na filtragem utilizou-se filtros de disco de 200 mesh, marca IRRITEC® modelo FLD, a limpeza do filtro foi feita diariamente. A figura a baixo mostra a distribuição esquemática dos componentes da bancada.



**Figura 15 - Distribuição esquemática dos componentes da bancada.**

Na fase de obstrução dos gotejadores, o sistema operou durante 20 horas diárias entre os dias 01 de dezembro de 2014 a 30 de janeiro de 2015, totalizando 1200 h de operação.

### 3.4.2 Delineamento e Aplicação dos Tratamentos

O experimento foi montado no delineamento inteiramente casualizado em esquema de parcelas subdivididas tendo, nas parcelas, os tratamentos aplicados:

- T1 – aplicação de ácido fosfórico pH 2;
- T2 - aplicação de cloro livre 50 mg.L<sup>-1</sup>;
- T3 – limpeza ultrassônica com 15 minutos;
- T4 – limpeza ultrassônica fracionada com 15 minutos, dividida em 3 limpezas consecutivas de 5 minutos.

Nas subparcelas os tipos de gotejador:

- E1 – tubo gotejador E1 (stramline Netafim);
- E2 – tubo gotejador E2 (taldrip NaanDanJain);

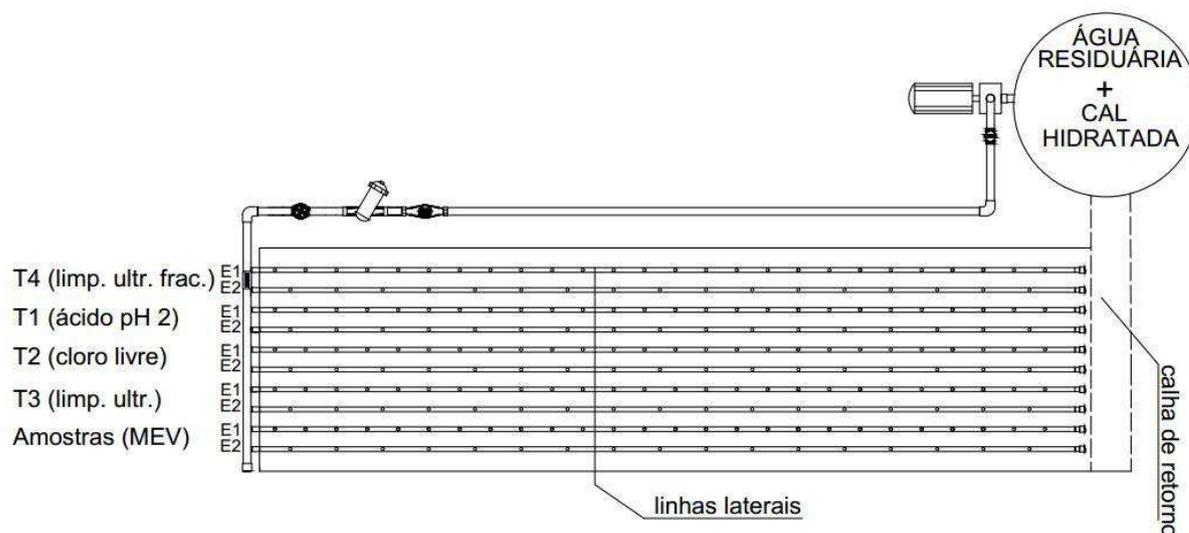
Também em subparcelas, a fases:

- AA (Antes da aplicação do tratamento)
- DA (Após aplicação do tratamento)

Além das linhas usadas na aplicação e avaliação dos tratamentos, uma linha de cada modelo foi utilizada para obtenção de amostras para Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Foram avaliados 25 gotejadores por linha lateral quando novos, após as 1200 h de aplicação da solução com carga orgânica e precipitados e cálcio e após a aplicação dos

tratamentos de limpeza ultrassônica totalizando 3 avaliações por linha lateral.

Na figura 16 está o esquema de montagem deste experimento.



**Figura 16 - Layout do delineamento experimental.**

Em cada avaliação foram feitas coletas em triplicata. A coleta do volume foi feita de maneira simultânea para cada repetição com auxílio de coletores e placas de isopor. O tempo de coleta foi de 4 minutos. A vazão foi obtida pela relação entre volume e tempo.

A solução de cloro livre foi feita com água de abastecimento e cloro orgânico 95% na concentração de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$  cloro livre, a solução foi mantida em uma faixa de pH de 5 a 6, para tanto foi adicionado ácido fosfórico na solução.

O tratamento de ácido fosfórico foi aplicado com uma solução de água de abastecimento e ácido fosfórico industrial com 85% de concentração resultando em pH 2. Antes de preparar a solução foi feita uma curva de titulação.

As soluções dos tratamentos químicos foram preparadas em reservatório de 80 L de capacidade e aplicadas em cada linha individualmente com motobomba de 1 CV. A aplicação dos tratamentos químicos foram feitas em 2 etapas, a primeira, com duração de 10 min e a segunda com duração de 1 h. A aplicação de 10 minutos foi necessária para evitar que ocorresse desprendimento de partículas capazes de causar entupimento imediato, após aplicação dos 10 min foi feita a abertura e limpeza dos finais de linha e só então feita a segunda aplicação e após esta, o sistema permaneceu em repouso por 12 horas. Após as 12 horas foi novamente feita a abertura dos finais de linha e limpeza, e então feita as avaliações.

A limpeza ultrassônica foram realizadas com lavadora ultrassônica da marca “Marca Médica”, com cuba de capacidade de 30 L e frequência de operação de 40 kHz. As linhas

obstruídas foram colocadas individualmente dentro da cuba com solução de água destilada e 150 mL de detergente enzimático, conforme recomendação do fabricante, e então ligada a lavadora no tempo correspondente a cada tratamento. Após a limpeza ultrassônica as linhas eram recolocadas na banca e pressurizadas com o final aberto por 5 minutos e posteriormente feita a avaliação.

### 3.4.3 Análise Estatística

Com os valores de vazão foi calculado para cada tubo o Coeficiente de Variação de Vazão – CVq % (equação 01), a Uniformidade de distribuição UD % (equação 02) e Vazão Média- Qm (L.h<sup>-1</sup>):

$$Cvq = Sd \cdot q_m^{-1} \quad \text{eq. (01)}$$

Em que:

*Sd*: desvio padrão de todas as medições realizadas;

*q<sub>m</sub>*: vazão média de todas as medições realizadas (L.h<sup>-1</sup>);

$$UD (\%) = 100 \cdot q_{25} \cdot q_m^{-1} \quad \text{eq.(02)}$$

Em que:

*q<sub>25</sub>* - vazão média das 25 % menores vazões (L.h<sup>-1</sup>);

*q<sub>m</sub>* - vazão média de todas as medições realizadas (L.h<sup>-1</sup>);

Também com os valores de vazão foram calculados para cada emissor os valores de Vazão Relativa % (equação 03) e o Incremento de Vazão (%) (equação 04).

$$Qr (\%) = 100 \cdot q_a \cdot q_i^{-1} \quad \text{eq.(03)}$$

Em que:

*q<sub>a</sub>* - vazão atual do gotejador (L.h<sup>-1</sup>);

*q<sub>i</sub>* - vazão no início do experimento, antes da obstrução (L.h<sup>-1</sup>);

$$Iq (\%) = 100 \cdot \left( \frac{q_f - q_o}{q_o} \right) \quad \text{eq.(04)}$$

Em que:

*q<sub>o</sub>* - vazão do gotejador após obstrução (L.h<sup>-1</sup>);

*q<sub>f</sub>* - vazão final do gotejador, após tratamento de recuperação (L.h<sup>-1</sup>);

Com o valores de Qr (%) procedeu-se com variância (ANOVA) e teste F para

verificar se houve efeito dos tratamentos na desobstrução, os fatores analisados foram, fase, (tubo obstruído e tubo recuperado) e tipo de gotejador (E1 e E2).

Tendo em vista a ação de recuperação dos tratamentos, tornou-se a fazer análise de variância (ANOVA) e também teste Tukey, porém com os valores de incremento de vazão, para os fatores de tratamento e tipo de gotejador.

#### **3.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

A análise de microscopia eletrônica de varredura MEV foi feita com um equipamento da marca Shimadzu Corporation® - Superscan SSX-550. Foi cortada uma amostra de cada modelo de emissor antes da limpeza ultrassônica e uma amostra de cada modelo de emissor após a limpeza ultrassônica, posteriormente as amostras passaram por um processo de metalização e foram analisadas no equipamento que gerou imagens em alta resolução, essas imagens possibilitam análise visual da rugosidade e quantidade de material aderido nos gotejadores.

### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 14 estão os dados de CVq (%), UD (%) e Q (L.h<sup>-1</sup>) para o tubo gotejador novo, obstruído e recuperado com seu respectivo tratamento. A classificação do Cvq para os tubos novos, em todos os tratamentos, foi “excelente” de acordo com ASABE (1996) (CVq < 5%), estando em conformidade com o prescrito pela ABNT/NBR ISO 926:2006 em que CVq < 7%. A classificação desses mesmos tubos, considerando o critério do CVq passou para “inaceitável” após as 1200 horas aplicando solução com carga orgânica e precipitados químicos de cálcio. Na condição de recuperados o único tratamento que trouxe a mesma classificação de quando novo para o CVq foi o T4 (limpeza ultrassônica fracionada) no tubo gotejador E2, a redução foi de 69,21% para 3,77% (94,55% de redução) seguido pelo mesmo tratamento com o tubo gotejador E1 com redução de 75,25% para 24,34% (67,68%). O segundo tratamento que mais reduziu os valores do CVq foi o T3 (limpeza ultrassônica) com redução de 50,77% para 20,83% (58,97%) e 62,59 para 37,4 (40,24%) para os tubos E2 e E1 respectivamente.

**Tabela 14 - Valores de Vazão Relativa (Qr (%)), Coeficiente de Variação (CVq (%)), Uniformidade de Distribuição (UD (%)) e Vazão Média (Qm (L.h-1)) para cada tempo acumulado de limpeza ultrassônica**

Tubo Gotejador E1									
Tratamento	CVq (%)			UD (%)			Q média (L.h-1)		
	Novo	Obstruído	Recuperado	Novo	Obstruído	Recuperado	Novo	Obstruído	Recuperado
T1	2,41	57,44	53,02	97,22	0,00	7,70	1,39	1,01	1,07
T2	2,00	88,89	88,78	97,19	0,00	0,00	1,43	0,76	0,79
T3	1,60	62,59	37,40	97,81	0,00	53,12	1,43	0,98	1,27
T4	1,79	75,25	24,34	97,48	0,00	74,58	1,40	0,90	1,35

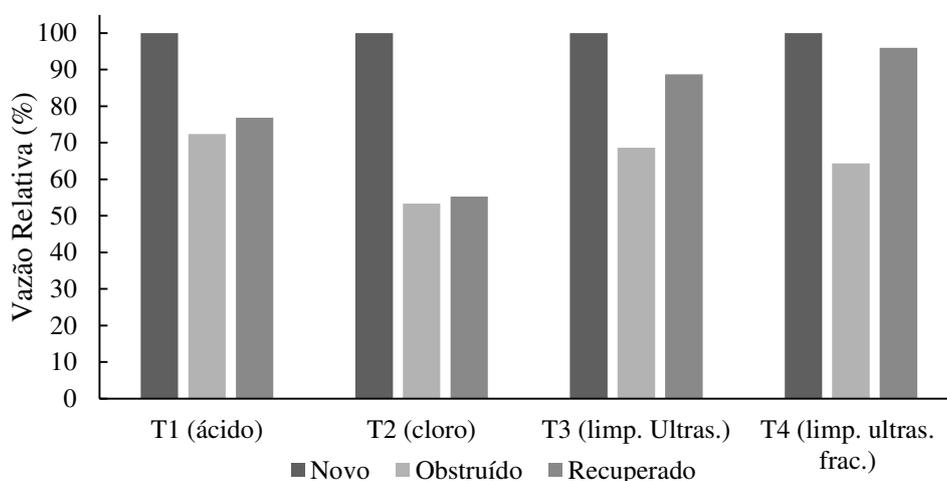
Tubo Gotejador E2									
Tratamento	CVq (%)			UD (%)			Q média (L.h-1)		
	Novo	Obstruído	Recuperado	Novo	Obstruído	Recuperado	Novo	Obstruído	Recuperado
T1	1,97	102,30	62,60	97,82	0,00	0,00	1,49	0,70	1,04
T2	1,84	83,30	75,37	98,00	0,00	0,00	1,47	0,88	1,00
T3	1,76	50,77	20,83	98,69	15,83	81,91	1,52	1,14	1,48
T4	1,84	69,21	3,77	97,52	0,00	95,83	1,50	1,02	1,57

No Instituto de Engenharia Agrícola da África do Sul (ARC-IAE), foram realizadas recuperações de tubos gotejadores obstruídos em condições de campo com limpeza ultrassônica. A limpeza foi feita em uma máquina desenvolvida por um agricultor local feita especialmente para recuperação de gotejadores de irrigação. Nesta avaliação, os pesquisadores conseguiram redução de até 73% do CVq inicial de 10,57% para 2,85%, para

tanto foram feitas três limpezas consecutivas Niekerk (2012).

A classificação da uniformidade de distribuição (UD) para os tubos gotejadores novos E1 e E2 foi “excelente”, todos os valores acima de 90% conforme ASABE (2001), os valores estiveram entre 97,22% e 98,69%. Após a obstrução a classificação de todos os tubos pela UD foi “inaceitável”. Dos oito tubos avaliados após a obstrução artificial, sete tiveram o valor de UD igual a 0%, nesse caso, indica que pelo menos 25% dos gotejadores de cada tubo estavam totalmente obstruídos. Após as recuperações dos tubos obstruídos a classificação da UD mudou para “Ruim” e “Regular” nos tratamentos T3 (limpeza ultrassônica) e T4 (limpeza ultrassônica fracionada) respectivamente no tubo E1. Para o tubo E2 a classificação da UD passou para “Bom” e “Excelente” nos tratamentos T3 e T4 respectivamente. Nos tratamentos químicos a classificação da UD manteve-se inaceitável para os dois tipos de tubo. Teixeira et al. (2010), através da aplicação de 50 mg.L<sup>-1</sup> de cloro livre em um tubo gotejador autocompensante, mudaram a classificação da UD de “regular” para “excelente”.

Na figura 17 estão as vazões relativas do tubo gotejador E1 para todos os tratamentos e etapas de aplicação.

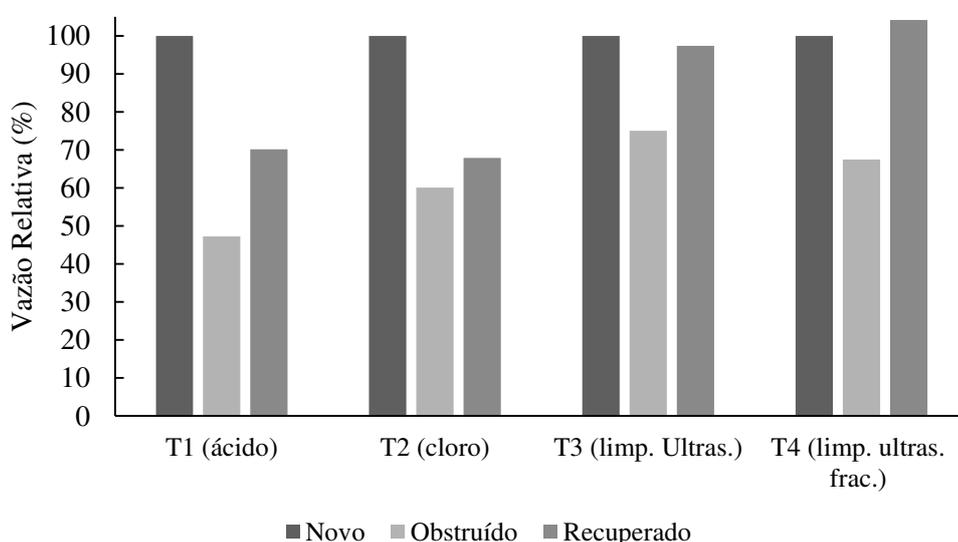


**Figura 17 - Vazão Relativa (%) para o Tubo gotejador 01 nos tratamentos T1 (ácido fosfórico pH 2) T2 (cloro 50 mg.L<sup>-1</sup>) T3 (limpeza ultrassônica) T4 (limpeza ultrassônica fracionada) nos tempos, novo, obstruído e recuperado.**

Os valores de incremento vazão médio, (aumento de vazão do emissor obstruído para emissor recuperado) para o tubo gotejador E1 foram de 0,06, 0,03, 0,29 e 0,44 L.h<sup>-1</sup> para os tratamentos T1, T2, T3 e T4 respectivamente. Para o tubo gotejador E2 os valores de incremento de vazão foram 0,34, 0,11, 0,34 e 0,55 L.h<sup>-1</sup> para os tratamentos T1, T2, T3 e T4 respectivamente.

Os tratamentos de limpeza ultrassônica T3 e limpeza ultrassônica fracionada T4 foram os que mais elevaram a vazão relativa de 68,63% para 88,75% e 64,35% para 96,00% respectivamente. Sahin *et al.* (2005) elevou a vazão relativa média de tubos gotejadores obstruídos por CaCO<sub>3</sub> de 0 % até 100%, após 48 horas de ação de bactérias biodegradantes.

Na figura abaixo estão os valores percentuais das vazões relativas do tubo gotejador E2 para todos os tratamentos e fases de aplicação. No tubo gotejador E2 assim como no E1 os maiores valores de vazão relativa foram para os tratamentos T3 e T4 de 97,34% e 104,2% respectivamente, porém o tratamento com ácido fosfórico T1 elevou 22,91 pontos percentuais do tubo obstruído para o recuperado para na mesma comparação o tratamento T3 elevou em 22,35 pontos percentuais.



**Figura 18 - Vazão Relativa (%) para o Tubo gotejador 02 nos tratamentos T1 (ácido fosfórico pH 2) T2 (cloro 50 mg.L<sup>-1</sup>) T3 (limpeza ultrassônica) T4 (limpeza ultrassônica fracionada) nos tempos, novo, obstruído e recuperado.**

Katz et al. (2014), encontrou diferença na mudança de vazão relativa de um tubo gotejador do tipo labirinto aplicando água residuária com diferentes frequências de tratamentos preventivos com cloração.

Na Tabela 15 está a análise de variância da vazão relativa para os fatores de fase (obstruído e recuperado) e tipo de tubo gotejador (E1 e E2). A análise de variância indicou haver diferenças médias na vazão relativa para as fases. Não houve diferença nos níveis de vazão relativa para o tipo de tubo gotejador.

**Tabela 15 - Análise de variância da Vazão Relativa para os fatores Fase e tipo de Tubo gotejador**

Fator	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	P-valor
Fase	1	30505	30504,7	15,99	0,000 **
Tubo Gotejador	1	48	48,0	0,03	0,874ns
Fase*Tubo Gotejador	1	861	861,1	0,45	0,502ns
Resíduo	396	755475	1907,8	-	-
Total	399	786888	-	-	-

Nota: \* indica que p-valor é significativo e “ns” que o p-valor não é significativo ao nível de 5 % de significância.

O teste F de comparação de médias para as fases dos tratamentos indicou que a média da Vazão Relativa é superior à média na condição de obstrução, ou seja, a aplicação dos tratamentos teve efeito de desobstrução dos emissores de irrigação. (Tabela 16).

**Tabela 16 - Valores médios de Vazão Relativa (%) para as fases de aplicação e teste F**

Fase	N	Qr (média) (%)
AA (Antes da aplicação do tratamento)	200,00	81,03 a
DA (Após aplicação do tratamento)	200,00	63,56 b

Nota: Letras iguais indicam igualdade a 5 % de significância pelo teste F.

A análise de variância (Tabela 17), refere-se aos fatores de tratamento e tipo de tubo gotejador para valores de incremento percentual de vazão obtidos entre a fase de obstrução e recuperação. De acordo com a análise houve diferença significativa entre os tratamentos de recuperação independentemente do tipo de tubo de tubo gotejador.

**Tabela 17 - Análise de variância do incremento de vazão para os fatores Tratamento e tipo de Tubo gotejador**

Fator	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	P-valor
Tratamento	3	22168	7389,5	6,02	0,001 *
Tubo Gotejador	1	1543	1543,5	1,26	0,264ns
Tratamento*Tubo Gotejador	3	951	316,9	0,26	0,855ns
Resíduo	192	235695	1227,6	-	-
Total	199	260358	-	-	-

Nota: \* indica que p-valor é significativo e “ns” que o p-valor não é significativo ao nível de 5 % de significância.

O teste Tukey da Tabela 18 indicou que os tratamentos T4, T3 e T1, apresentaram estatisticamente, os mesmos níveis de incremento de vazão. Da mesma forma os tratamentos T3, T1 e T2, estatisticamente obtiveram o mesmo resultado. O tratamento T4 (limpeza ultrassônica fracionada) apresentou a maior média de incremento percentual de vazão 34,47% e diferiu estatisticamente do T2 (cloro livre) que apresentou 4,87% de incremento de vazão. A segunda maior média de incremento de vazão foi a do tratamento T3 (limpeza ultrassônica) com 20,94% de incremento de vazão seguida do T1 (ácido fosfórico).

Eroglu *et al.* (2012), aplicou teste Tukey para verificar a diferença de incremento de

vazão na aplicação de dois tipos de tratamento biológico e controle, de modo que um dos tratamentos proporcionou o maior incremento de vazão (cerca de 22%).

**Tabela 18 - Valores médios de incremento de vazão (%) para diferentes tratamentos de recuperação e teste Tukey de comparação de médias**

Tratamento	N	Incremento de Vazão (%)
T4	50,00	34,47 a
T3	50,00	20,94 ab
T1	50,00	17,73 ab
T2	50,00	4,87 b

Nota: Letras iguais indicam igualdade a 5 % de significância pelo teste Tukey.

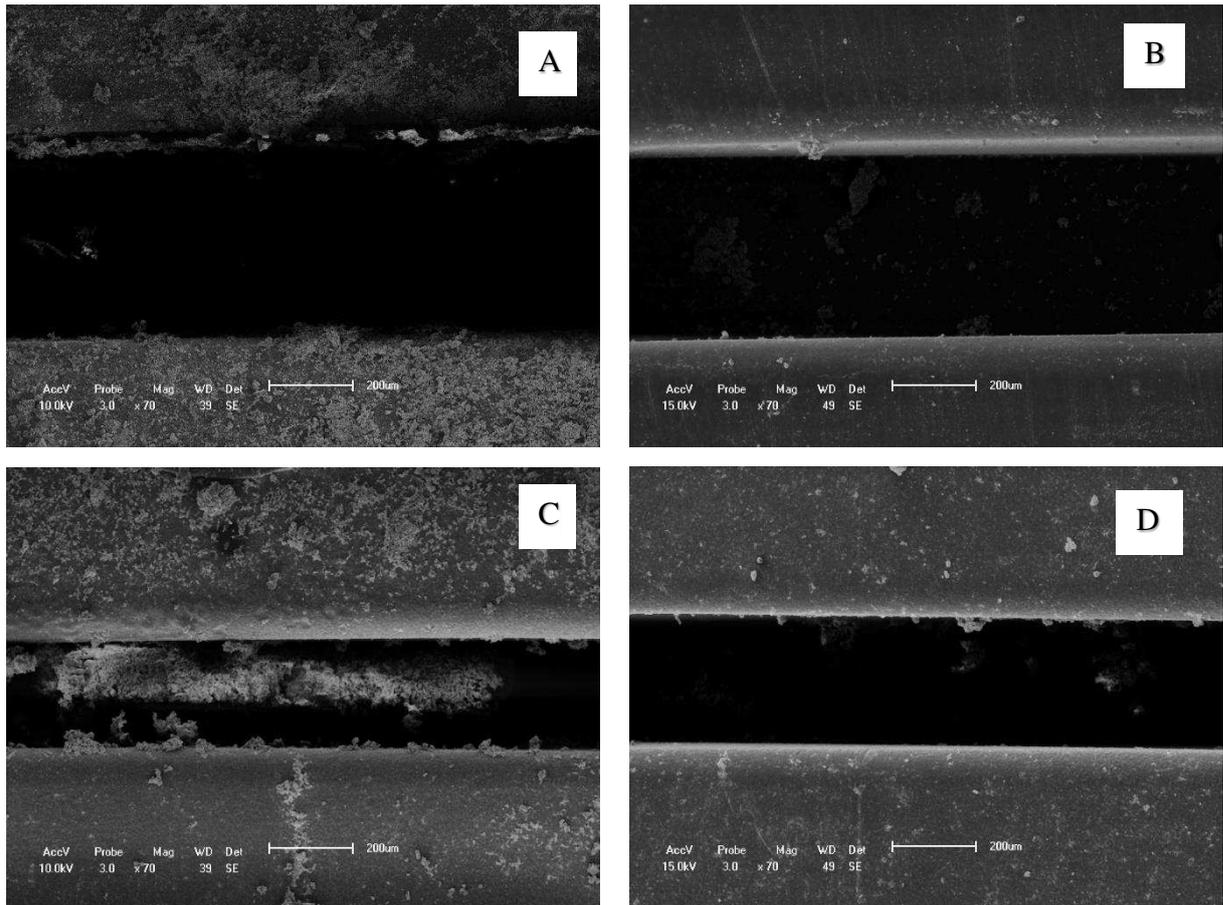
Os tubo gotejadores submetidos aos tratamentos T4 e T3 tiveram o mesmo tempo de contato de limpeza ultrassônica porém o T4 passou pelo processo três vezes e resultou em recuperações superiores o que condiz com o observado por Niekerk (2017), em avaliações com de recuperação tubos gotejadores com limpeza ultrassônica.

De acordo Farmer's Weekly (2016), há outros tratamentos já testados capazes de promover resultados superiores à limpeza ultrassônica na recuperação de emissores de irrigação obstruídos.

Niekerk (2012) sugere que a limpeza ultrassônica deva ser realizada periodicamente em sistemas de irrigação por gotejamento que operam com água de má qualidade de modo a prolongar a vida útil dos tubos gotejadores

A limpeza ultrassônica promoveu resultados excelentes e superiores aos métodos químicos de recuperação de gotejadores de irrigação.

Na figura estão as imagens das amostras dos tubos gotejadores E1 e E2 após a obstrução promovida por 1200 horas de aplicação de água com cálcio e alta carga orgânica (Figura 19 A e 19 C), e após a limpeza ultrassônica (Figura 19 B e 19 C), com ampliação de 70 vezes.



**Figura 19 - Imagens de MEV: A- Tubo gotejador E1 obstruído; B Tubo gotejador E1 após limpeza ultrassônica; C Tubo gotejador E2 obstruído; D tubo gotejador E2 após limpeza ultrassônica.**

Eroglu *et al.* (2012), utilizaram imagens de microscopia eletrônica de varredura para identificar o efeito da obstrução de gotejadores devido a aplicação de água com  $\text{CaCO}_3$  e água com  $\text{CaCO}_3$  e bactérias com ação de desobstrução biológica.

As imagens da figura 19 mostram que a limpeza ultrassônica promoveu a remoção quase total da incrustação dos precipitados de cálcio.

### **3.6 CONCLUSÕES**

Os tratamentos de limpeza ultrassônica proporcionaram os melhores resultados de recuperação dos gotejadores obstruídos do que os tratamentos químicos convencionais.

A limpeza ultrassônica fracionada, para o tubo gotejador E2, recuperou a mesma classificação dos tubos quando novos.

No processo de desobstrução de gotejadores de irrigação, a limpeza ultrassônica fracionada é mais recomendada que a limpeza ultrassônica contínua.

O método de recuperação com limpeza ultrassônica é uma solução sustentável com alto poder de recuperação de gotejadores de irrigação necessitando de mais pesquisas para determinar um padrão de uso econômico e eficiente.

### 3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT. NBR ISO 9261. 2006 Equipamentos de irrigação agrícola - Tubo gotejadores e tubos tubo gotejadores – Especificação e métodos de ensaio. São Paulo 17p.
- ASAE. American Society of Agricultural Engineers. Standard engineering practices data: EP 458. Field evaluation of microirrigation systems. St. Joseph, Mich. ASAE Standards. p. 792-797, 2001.
- ASAE. American Society of Agricultural and Biological Engineers – ASABE. Design and installation of micro irrigation systems. St. Joseph, 6 p. 2008.
- Carvalho, L. C. C.; Coelho, R. D.; Teixeira, M. B.; Cunha, F. N.; Silva, N. F.; Soares, A. L.; Vidal, V. M.; Morais, W. A. Entupimento de emissores autocompensantes com aplicação de sulfato e óxido de ferro. Científica. Jaboticabal, v.44, n.3, p.385-402, 2016
- Costa, D. O.; Batista, R. O.; Vale, H. S. M.; Sousa, A. B.; Dombroski, S. A. D.; Alves, S. M. C. Biological treatment of drippers clogged by the use of treated domestic wastewater. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, v.20, p.595–599, 2016.
- ENGE SOLUTIONS ULTRASONIC. Tecnologia de Limpeza por Ultrassom. Disponível em < <http://www.engesolutions.com.br/files/Folder%20Ultrassom%20Industrial.pdf>> acesso em maio de 2015.
- Eroglu S.; Şahin, Ü.; Tunc, T.; Şahin, F. Bacterial application increased the flow rate of CaCO<sub>3</sub>-clogged emitters of drip irrigation system. Journal of Environmental Management, v.98, p.37-42, 2012.
- Farmer's Weekly. Farmig for Tomorrow: Ultrasonic sound used in drip irrigation line cleaning. 26 p 25 novembro 2016, disponível em < <http://www.arc.agric.za/Agricultural%20Sector%20News/Ultrasonic%20sound%20used%20in%20drip%20irrigation%20line%20cleaning.pdf>> acesso em janeiro de 2017.
- Katz, S.; Dosoretz C.; Chen, Y.; Tarchitzky J. Fouling formation and chemical control in drip irrigation systems using treated wastewater. Irrig Sci. Berlin, v. 32, p. 459-469.
- LI, Y. K.; LIU, Y. Z.; LI, G. B.; XU, T. W.; LIU, H. S.; REN, S. M.; YAN, D. Z.; YANG, P. L. Surface topographic characteristics of suspended particulates in reclaimed wastewater and effects on clogging in labyrinth drip irrigation emitters. *Irrigation Science*, v 30 p. 43-56, 2012.

- Niekerk A. S. V. Evaluation Report On A Dripper Line Cleaning Machine 2012. Disponível em <<http://greendrum.co.za/wp-content/uploads/2015/03/Evaluation.pdf> > Acesso em dezembro de 2012.
- NIU, W., LIU, L., CHEN, X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. *Irrig Sci* v.31, p.545–555, 2013.
- Pereira A.H.A. Limpeza ultrassônica: overview e estado da arte. Relatório Técnico RT-ATCP-02, ATCP Engenharia Física, São Carlos, SP – Brasil, 2010.
- Ribeiro, P. A. A.; Teixeira, M. B.; Coelho, R. D; Franco, E. M.; Silva N. F.; Carvalho, L. C. C.; Alves, M. E. B. A. Gotejadores submetidos a condições críticas de qualidade da água. *Irriga*. Botucatu, Edição Especial, p. 368 - 379, 2012.
- Rocha, F. J.; Coelho, R. D.; Teixeira, M. B.; Soares, F. A. L.; Junior, J. L. C. S.; Cunha, F. N.; Silva. N. F. Uso de carbonato, óxido e sulfato de cálcio em alta concentração em tubos gotejadores. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*. Fortaleza- CE, v.10, nº.4, p. 787 - 798, 2016.
- Şahin, Ü.; Anapali, Ö.; Dönmez, M. F.; Şahin, F. Biological treatment of clogged emitters in a drip irrigation system. *Journal of Environmental Management*, v.76, p.338-341, 2005.
- Teixeira, M. B.; Melo, F. R.; Coelho, R. D.; Neto, R. O.; Aguiar Ribeiro P. A. Tratamento para desentupimento de gotejadores convencionais. *Irriga*, Botucatu, v. 13, p. 235-248, 2008.