**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Desempenho hidráulico de fitas gotejadoras operando sob diferentes
temperaturas da água**

Ana Claudia Sátiro de Araujo

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

**Piracicaba
2019**

Ana Claudia Sátiro de Araujo
Engenheira Agrícola

**Desempenho hidráulico de fitas gotejadoras operando sob diferentes temperaturas da
água**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof.Dr.JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Araujo, Ana Claudia Sátiro de

Desempenho hidráulico de fitas gotejadoras operando sob diferentes temperaturas da água / Ana Claudia Sátiro de Araujo. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2019.

83p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Emissor 2. Fluxo turbulento 3. Gotejamento 4. Temperatura da água I.
Título

Às mulheres da minha vida

À minha filha Maria Clara, fonte inesgotável de amor, força e motivação
À minha mãe Flávia e minha avó Odete, meus exemplos de garra e superação

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço por todas as oportunidades que me fizeram chegar até aqui.

À minha família, por toda a luta e sacrifício para que eu pudesse seguir meu sonho.

Ao meu noivo Rodrigo, por sempre acreditar e me apoiar em todos momentos.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), por me proporcionar os melhores anos da minha vida.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) e ao programa de pós graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade de cursar o mestrado e ampliar os horizontes científicos da minha formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES), por viabilizar a oportunidade de estudo através da concessão da bolsa.

À todos meus professores, por transmitir o conhecimento de forma ampla e fraterna, especialmente ao professor Alberto Colombo por ser minha fonte de admiração, que me direcionou e fez despertar o fascínio pela pesquisa na área de irrigação.

Ao professor José Antônio Frizzzone, pela paciência, atenção e cuidado na orientação durante todo o período do mestrado, por ser um exemplo de humildade edetentor da minha eterna admiração.

Ao professor Antônio Pires de Camargo, por toda ajuda e apoio essenciais para que o projeto pudesse ser realizado.

Aos irmãos de orientação e colegas de curso, pelo apoio e amizade.

Aos meus amigos, que suportaram crises e choro, que me deram suporte e me permitiram viver momentos únicos e maravilhosos.

À todos os funcionários da UFLA e da ESALQ, que são agentes essenciais para a nossa formação profissional.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que de alguma forma fizeram parte da minha trajetatória, principalmente aquelas que duvidaram, fazendo com que meu foco e determinação fossem cada vez maior.

EPÍGRAFE

“Que nada nos defina. Que nada nos sujeite. Que a liberdade seja a nossa própria substância.”

Simone de Beauvoir

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SIGLAS	12
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO.....	15
2.2. EMISSORES UTILIZADOS NA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO	16
2.3. TUBOS EMISSORES	17
2.4. EMISSORES DE LONGO PERCURSO DE FLUXO TURBULENTO (LABIRINTO).....	18
2.5. CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DOS EMISSORES	19
2.6. EQUAÇÃO CARACTERÍSTICA DO EMISSOR.....	20
2.7. COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DE VAZÃO EM FUNÇÃO DA FABRICAÇÃO CVf	21
2.8. FONTE DE VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA EM CAMPO.....	22
2.9. RADIAÇÃO SOLAR.....	22
2.10. CONVECÇÃO INTERNA E EXTERNA	23
2.11. CONDUÇÃO ATRAVÉS DAS PAREDES DO TUBO.....	24
2.12. AQUECIMENTO DO SOLO	24
2.13. INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA	26
2.14. SENSIBILIDADE DE DIFERENTES TIPOS DE EMISSORES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA	27
2.15. MATERIAL DE COMPOSIÇÃO DO TUBO EMISSOR	30
3. MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1. BANCADA DE ENSAIOS	35
3.2. MATERIAL	37
3.3. CURVA VAZÃO-PRESSÃO.....	38
3.4. ENSAIOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS	39
3.5. RESISTENCIA A PRESSÃO HIDROSTÁTICA COM TEMPERATURA ELEVADA.....	40
3.6. DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR	41
3.7. VARIAÇÃO DO DIÂMETRO EXTERNO.....	42
3.8. ANÁLISE DE DADOS.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1. ENSAIOS PRELIMINARES.....	47
4.2. CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DOS EMISSORES	51
4.3. ÍNDICE DE VAZÃO RELATIVA (IQR).....	56
4.4. RESISTÊNCIA A PRESSÃO HIDROSTÁTICA EM TEMPERATURA ELEVADA	63
4.5. DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR	65
4.6. VARIAÇÃO DO DIÂMETRO EXTERNO.....	65
5. CONCLUSÕES.....	69
ANEXOS.....	71
5.1. TABELAS COM OS DADOS DA CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DOS GOTEJADORES NAS DIFERENTES TEMPERATURAS DA ÁGUA.....	71
5.2. EQUAÇÕES EXPERIMENTAIS AJUSTADAS DE IQR EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	76
5.3. EQUAÇÕES EXPERIMENTAIS AJUSTADAS DO DIÂMETRO EM FUNÇÃO DA PRESSÃO APLICADA PARA AS DIFERENTES TEMPERATURAS	77
REFERÊNCIAS.....	79

RESUMO

Desempenho hidráulico de fitas gotejadoras operando sob diferentes temperaturas da água

As variações de temperatura influenciam nas propriedades da água, especialmente na viscosidade. Este pode ser um fator significativo, que afeta a vazão dos emissores e consequentemente a uniformidade de aplicação. A necessidade de estudos que considerem o material das fitas gotejadoras, com diferentes tipos de emissores integrados e diferentes características construtivas, são importantes para entender a sensibilidade desses materiais quando submetidos a temperaturas de água distintas. Este experimento foi conduzido no Laboratório de Ensaio de Material de Irrigação (LEMI) do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Foram avaliados cinco tipos de fitas gotejadoras, com diferentes emissores integrados e espessuras de parede. As curvas vazão-pressão para os diferentes materiais e espessuras de parede, apresentaram a mesma tendência, porém, com valores distintos dos parâmetros K e x para cada temperatura. Os valores de CV_f para todos os materiais nas diferentes temperaturas apresentaram valores em conformidade com o estipulado por norma técnica. Não houve uma tendência específica dos valores de CV_f de IQR em relação à temperatura da água para os materiais avaliados. Para os emissores planos de fluxo turbulento, a vazão tende a diminuir com o incremento da temperatura, porém não significativamente ($p > 0,05$). Para os emissores contínuos de fluxo turbulento, respostas diferentes foram obtidas, sendo que no emissor SilverDrip® a vazão aumentou com o incremento da temperatura ($p < 0,05$), enquanto no emissor Turbo Tape®, a vazão diminuiu e as maiores variações de vazão ocorreram a partir de 60 kPa ($p < 0,05$). Para o emissor moldado, a vazão aumentou ($p < 0,05$) em função da temperatura, porém a maior variação ocorreu nas pressões mais baixas. Para nenhum dos materiais houve diferença significativa ($p > 0,05$) na variação de vazão entre as espessuras de parede, indicando para os emissores estudados, que a espessura de parede não influencia na sensibilidade do emissor às variações de temperatura. Os resultados obtidos indicam que a sensibilidade do emissor em função da temperatura da água está associada ao valor do expoente de fluxo do emissor.

Palavras-chave: Emissor; Fluxo turbulento; Gotejamento; Temperatura da água

ABSTRACT

Hydraulic performance of drip tapes operating in a range of water temperatures

Temperature variations influence the properties of water, especially viscosity. This can be a significant factor, which affects the emitters' discharge and consequently the uniformity of application. Studies analyzing drip tape material, types of integrated emitters and manufacturing characteristics are important to understand the sensitivity of these materials when operated in a range of values of water temperature. This experiment was carried out at the Laboratory of Tests of Irrigation Material (LEMI) of the Department of Engineering of Biosystems of the "Luiz de Queiroz" School of Agriculture - ESALQ / USP. Five types of drip tapes were evaluated, with various integrated emitters and wall thicknesses. The pressure-flow curves presented the same trend for the evaluated material, however, different values of the parameters K and x were found for each temperature. The CV_f for all materials evaluating in a range of temperatures presented values in accordance with technical standards. There was no specific trend of the values of CV_f neither IQR in relation to the water temperature. For the turbulent flow emitters, the discharge tends to decrease with increasing temperature, but not significantly ($p > 0.05$). For the continuous emitters of turbulent flow, different responses were obtained, the emitter SilverDrip® the discharge increased with the increase of the temperature ($p < 0.05$), while for the emitter Turbo Tape®, the discharge decreased and the greater variations of flow occurred from 60 kPa ($p < 0.05$). For the emitter molded, the discharge increased ($p < 0.05$) as a function of temperature, but the greater variation occurred in the lower pressures. For any of the materials, there was a significant difference ($p > 0.05$) in the discharge variation comparing the wall thicknesses, indicating for the emitters studied, the wall thickness does not influence the discharge sensitivity to temperature variations. The results indicate that the sensitivity of the emitter as a function of the water temperature is associated with the exponent of emitter flow.

Keywords: Emitter; Turbulent flow; Drip; Water temperature

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes tipos de emissores utilizados na irrigação localizada (a) microtubo; (b) gotejador on-line; (c) gotejador in-line; (d) gotejador cilíndrico (bóbi) do tipo labirinto de fluxo turbulento; (e) emissor do tipo plano de fluxo turbulento compensador de pressão; (f) microaspersor	17
Figura 2. Esquema da bancada de ensaios.....	37
Figura 3. Emissores utilizados (a) emissor plano de fluxo turbulento Turbo Excel®; (b) emissor plano de fluxo turbulento Streamline™; (c) emissor contínuo de fluxo turbulento Turbo Tape®; (d) emissor contínuo de fluxo turbulento Silverdrip®; (e) emissor moldado de fluxo turbulento Rain Tape®	38
Figura 4. Esquema da vista superior da bancada de ensaio para os testes específicos de caracterização das propriedades térmicas dos materiais.....	40
Figura 5. Esquema de medição da variação de comprimento das fitas gotejadoras devido a dilatação térmica. Representação (a) da posição inicial das amostras sob a linha de referência fixa; (b) da dilatação do material após ser submetido a temperatura da água elevada e posicionamento da linha móvel de referência; (c) medição entre a linha fixa e a linha móvel com o auxílio de um paquímetro.....	42
Figura 6. Esquema de medição do diâmetro das amostras de fitas gotejadoras (a) vista superior da bancada de ensaios; (b) representação em perspectiva de parte da bancada, onde fora acomodado o micrometro a laser	43
Figura 7. Distribuição do iqr em diferentes pressões de ensaio para cada um dos 25 emissores com a bancada na configuração original.....	47
Figura 8. Distribuição do iqr em diferentes pressões de ensaio para cada um dos 25 emissores com a bancada na sua configuração modificada	48
Figura 9. Distribuição do iqr em diferentes pressões de ensaio para cada um dos 25 emissores com a bancada na sua configuração modificada e com a troca dos funis condutores.....	49
Figura 10. Distribuição espacial da temperatura da água na bancada de ensaios	50
Figura 11. Curvas vazão-pressão do emissor plano de fluxo turbulento Streamline™ com espessura de parede de 6 e 8 mil em diferentes temperaturas da água.....	51
Figura 12. Curvas vazão-pressão do emissor plano de fluxo turbulento Turbo Excel® com espessura de parede de 6 e 8 mil em diferentes temperaturas da água.....	52
Figura 13. Curvas vazão-pressão do emissor contínuo de fluxo turbulento Silverdrip® com espessura de parede de 6 e 8 mil em diferentes temperaturas da água.....	54
Figura 14. Curvas vazão-pressão do emissor contínuo de fluxo turbulento Turbo Tape® com espessura de parede de 6 e 8 mil em diferentes temperaturas da água.....	55
Figura 15. Curvas vazão-pressão do emissor moldado Rain Tape® com espessura de parede de 9 mil em diferentes temperaturas da água	56
Figura 16. Índice de vazão relativa (IQR) em função da temperatura da água para o emissor do tipo plano de fluxo turbulento modelo Streamline™, integrado a fitas com diferentes espessuras de parede, sob pressão de operação de 100 kpa	57
Figura 17. Índice de vazão relativa (IQR) em função da temperatura da água para o emissor plano de fluxo turbulento Turbo Excel®, integrado a fitas com diferentes espessuras de parede, sob pressão de operação de 100 kpa	58
Figura 18. Índice de vazão relativa (IQR) em função da temperatura da água para o emissor do tipo contínuo de fluxo turbulento Silverdrip®, integrado a fitas de diferentes espessuras de parede, sob pressão de operação de 100 kpa	58
Figura 19. Índice de vazão relativa (IQR) em função da temperatura da água para o emissor contínuo de fluxo turbulento fabricado pela Turbo Tape®, integrado a fitas com diferentes espessuras de parede, sob pressão de operação de 100 kpa	59
Figura 20. Índice de vazão relativa (IQR) em função da temperatura da água para o emissor do tipo moldado de fluxo turbulento Rain Tape®, sob pressão de operação de 20 kpa	59

Figura 21. IQR (%) em função da temperatura da água entre 20°C e 40°C: comparação entre o ajuste proposto por decroix e malaval e os dados observados deste estudo e de outros autores.	61
Figura 22. IQR (%) em função da temperatura da água a 20°C e 40°C: comparação entre o ajuste proposto por rodríguez-sinobas et al. (1999), os dados observados deste estudo e dados observados por outros autores	62
Figura 23. Distribuição dos dados observados nos ensaios e estimados pelos modelos (a) experimental (decroix & malaval (1985)) e (b) teórico (rodríguez-sinobas (1999)).....	63
Figura 24. Variação do diâmetro da fita gotejadora com o emissor Turbo Excel® integrado, submetida a diferentes pressões de operando com temperaturas da água de 23°C e 50°C	66
Figura 25. Variação do diâmetro da fita gotejadora com o emissor Streamline™ integrado, submetida a diferentes pressões operando com temperaturas da água de 23°C e 50°C.....	66
Figura 26. Variação do diâmetro da fita gotejadora com o emissor Silverdrip® integrado submetida a diferentes pressões operando com temperaturas da água de 23°C e 50°C	67
Figura 27. Variação do diâmetro da fita gotejadora com o emissor Turbo Tape® integrado submetida a diferentes pressões operando com temperaturas da água de 23°C e 50°C	67
Figura 28. Variação do diâmetro da fita gotejadora Rain Tape® submetida a diferentes pressões operando com temperaturas da água de 23°C e 50°C	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades térmicas dos diferentes tipos de polietileno	31
Tabela 2. Características gerais dos materiais utilizados.....	38
Tabela 3. Organização da matriz de testes.....	39
Tabela 4. Variação da vazão e do diâmetro da fita gotejadora após ser submetida a um estresse térmico de 50 °c	64
Tabela 5. Coeficiente de dilatação térmica linear estimados para os diferentes materiais e espessuras de parede ..	65
Tabela 6. Caracterização hidráulica Streamline™ 6 mil	71
Tabela 7. Caracterização hidráulica Streamline™ 8 mil	72
Tabela 8. Caracterização Turbo Excel® 6 mil	72
Tabela 9. Caracterização hidráulica Turbo Excel® 8 mil.....	73
Tabela 10. Caracterização hidráulica Silverdrip® 6 mil	74
Tabela 11. Caracterização hidráulica Silverdrip® 8 mil	74
Tabela 12. Caracterização hidráulica Turbo Tape® 6 mil.....	75
Tabela 13. Caracterização hidráulica Turbo Tape® 8 mil.....	75
Tabela 14. Caracterização hidráulica Rain Tape® 9 mil	76
Tabela 15. Equações ajustadas para o IQR em função da temperatura para os diferentes materiais estudados	76
Tabela 16. Equações ajustadas para o diâmetro das fitas gotejadoras em função da pressão para a temperatura de 23°C	77
Tabela 17. Equações ajustadas para o diâmetro das fitas gotejadoras em função da pressão para a temperatura de 50°C	77

LISTA DE SIGLAS

Cp – Calor Específico
Ct – Condutividade Térmica
CV_f – Coeficiente de Variação de Vazão em Função da Fabricação
IQR – Índice de Vazão Relativa
K – Constante de Proporcionalidade
MIL – Milésimo de Polegada
NPC – No PressureCompessating
PC – PressureCompessating
PE - Polietileno
PEAD – Polietileno de Alta Densidade
PEBD - Polietileno de Baixa Densidade
PEMD - Polietileno de Média Densidade
PEUAPM - Polietileno Ultra de Alto Peso Molecular
PID – Proporcional Integral Derivativo
Rd – Radiação Difusa
Rn – Radiação Líquida
x – Expoente de Fluxo

1. INTRODUÇÃO

A irrigação localizada ganha espaço e importância mundial, por se tratar de um método de irrigação que permite um controle preciso da aplicação de água no solo, garantindo assim o uso mais eficiente dos recursos disponíveis. Um dos principais objetivos do dimensionamento do sistema de irrigação por gotejamento é ter um equilíbrio hidráulico, a fim de garantir vazão uniforme. Os emissores ou gotejadores são elementos centrais desses sistemas e representam um papel importante em relação à aplicação de água de forma uniforme e com alta eficiência (HEZARJARIBI et al., 2008).

Diversos fatores podem afetar a vazão dos emissores e consequentemente a uniformidade de aplicação da lâmina de irrigação, como variações no processo de fabricação, variações de pressão, condições topográficas do terreno onde o sistema está instalado, obstrução do labirinto e possivelmente variações na temperatura da água. A sensibilidade da vazão dos emissores em relação às variações de temperatura da água é apontada como função do tipo de emissor a ser utilizado. De modo geral, emissores do tipo helicoidal e emissores que operam em regime de escoamento laminar apresentam um acréscimo significativo em sua vazão em função do aumento da temperatura da água, sendo que tal efeito é essencialmente devido à diminuição da viscosidade da água. Em contrapartida, emissores do tipo vórtice apresentam tendência de redução da vazão, provavelmente causada pelo aumento da ação do vórtice à medida que a viscosidade diminui (PARCHOMCHUK, 1976; RODRÍGUEZ-SINOBAS; JUANA; LOSADA, 1999; ZUR; TAL, 1981).

Atualmente, a maior parte dos modelos comerciais de gotejadores opera em regime de escoamento turbulento empregando um labirinto como mecanismo de dissipação de energia e controle de vazão. É comum que emissores cilíndricos (“bobi”) ou planos (“pastilha”) sejam integrados a tubos de polietileno e comercializados como tubos gotejadores ou fitas de gotejamento. Em geral as espessuras de parede desses tubos variam entre 0,15 mm (6MIL) e 0,9 mm (36 MIL), sendo que tubos gotejadores apresentam maior espessura de parede quando comparados às fitas gotejadoras. Os emissores do tipo labirinto compensadores de pressão (regulados) apresentam diferentes respostas a variações de temperatura, dependendo do modelo e fabricante, uma vez que a composição estrutural exerce influência em relação a sensibilidade à temperatura da água (AL-AMOUD; MATTAR; ATEIA, 2014; DOGAN; KIRNAK, 2010; OLIVER; HEWA; PEZZANITI, 2016; RODRÍGUEZ-SINOBAS; JUANA; LOSADA, 1999; SENYIGIT; ILKHAN, 2017).

Tubos gotejadores (parede espessa) equipados com emissores do tipo labirinto e sem mecanismo compensador de pressão apresentam, em geral, uma pequena variação na vazão com o aumento da temperatura da água. Alterações na viscosidade da água devido a variações na temperatura exercem pouca influência na vazão de emissores de fluxo turbulento integrados a tubos gotejadores, sendo que o acréscimo de vazão é da ordem de 1,5% (DELGHANDI et al., 2011; DOGAN; KIRNAK, 2010; RODRÍGUEZ-SINOBAS; JUANA; LOSADA, 1999; SENYIGIT et al., 2012; ZUR; TAL, 1981).

No entanto, Clark et al.(2005), estudando a sensibilidade de fitas gotejadoras (parede fina), com espessura de parede entre 0,2 e 0,38 mm e com emissores do tipo labirinto de fluxo turbulento não compensador, observaram variações de vazão de até 97% para uma variação de temperatura da água de 21 a 50°C, o que indica que a vazão do emissor praticamente dobrou com o incremento da temperatura. Tais constatações indicam que, possivelmente, alterações na temperatura da água exercem influência nas propriedades do material constitutivo de fitas gotejadoras. É também provável que propriedades relacionadas ao polietileno de constituição das fitas e dos gotejadores sejam influenciadas pela temperatura da água.

Uma vez que as fitas gotejadoras têm ampla aplicação na irrigação localizada, comumente utilizadas em culturas de ciclo anual ou sazonal, e que suas especificações variam muito em função do fabricante, há a necessidade de estudos que considerem o material das fitas gotejadoras, avaliando os diferentes tipos de emissores integrados e suas características construtivas em relação à sensibilidade térmica.

Considerando os resultados encontrados em estudos anteriores, esta pesquisa fundamenta-se na hipótese de que a temperatura da água não exerce influência relevante nas alterações de vazão dos emissores de fluxo turbulento, porém, para tubos emissores de parede fina, a vazão é influenciada por variações na temperatura da água e esse efeito é predominantemente ocasionado pelas propriedades do material que constitui o tubo emissor, assim, a sensibilidade da vazão de emissores a variações de temperatura é maior em tubos emissores de parede mais fina.

Os objetivos para testar as hipóteses levantadas se constituem em realizar a caracterização hidráulica de tubos emissores de parede fina operados sob temperaturas da água na faixa de 20 a 50°C, a fim de quantificar a influência da temperatura na vazão de diferentes emissores. Avaliar a influência da espessura de parede de fitas gotejadoras na sensibilidade da vazão de emissores submetidos às variações de temperatura da água e caracterizar propriedades térmicas, de resistência e de deformação de fitas gotejadoras operadas sob temperaturas elevadas da água.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Irrigação por gotejamento

O sistema de irrigação por gotejamento geralmente opera aplicando uma vazão baixa e constante de água no solo e requer baixa pressão. Neste sistema, a água é aplicada diretamente na zona radicular das plantas por meio de emissores colocados sobre ou abaixo da superfície do solo (ALI, 2011). Quando manejado adequadamente, esse sistema oferece muitas vantagens sobre outros sistemas de irrigação, tais como: maior uniformidade de distribuição, melhor eficiência do uso da água, diminuição das perdas por percolação e escoamento superficial (CORDEIRO et al., 2001) e baixa ou nenhuma perda por evaporação (BERNARDO; SOARES; MONTOVANI, 2006).

Na busca pelo uso eficiente dos recursos disponíveis para a produção agrícola, o sistema de irrigação por gotejamento vem ganhando importância mundial dado as suas características, principalmente em áreas onde a disponibilidade de água e energia é limitada e de alto custo. De acordo com dados dos fabricantes de sistemas de irrigação apresentados pela Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos - ABIMAQ (2015), entre 2000 e 2015, a expansão da área irrigada por sistemas de irrigação localizada no Brasil passou de 30.000 ha/ano para 75.000 ha/ano, respectivamente. Tais valores refletem a grande aceitação do produtor irrigante por esse tipo de sistema.

Embora apresente inúmeras vantagens, na literatura são citadas algumas limitações do sistema, dentre as quais, destaca-se: alto custo de investimento inicial; a necessidade de manutenção constante; crescimento radicular superficial (em função do tipo de solo, características do projeto e manejo da irrigação); exigência de mão obra qualificada; e, necessidade de água de boa qualidade (ALI, 2011; FRIZZONE et al., 2012; KELLER; KARMELI, 1974). Outros fatores relacionados ao projeto desses sistemas também são limitantes quanto ao seu uso, influenciando na vazão dos emissores e consequentemente na uniformidade de distribuição de água, como: diferenças de pressão devido a mudanças de elevação ou perdas por atrito em toda a rede de tubulação; variações espaciais e temporais da temperatura da água; resposta do emissor à temperatura e à pressão da água; variação de fabricação (unidade a unidade) nos emissores e reguladores de pressão; número de pontos de aplicação de água por planta; e o grau e extensão de obstrução do emissor (SOLOMON, 1984).

A uniformidade de distribuição de água é um parâmetro importante para garantir eficiência máxima do sistema de irrigação por gotejamento. Uma uniformidade de aplicação insatisfatória é muitas vezes facilmente identificada por diferenças na resposta das culturas e/ou

evidências de excesso ou deficiência da aplicação de água. A parte do campo que recebe mais do que a lâmina média pode sofrer ineficiências devido ao excesso de água e/ou escoamento, enquanto a outra parte que recebe menos do que a lâmina média pode sofrer estresse hídrico. Assim, a irrigação uniforme é importante para garantir bom desempenho na produção; portanto, faz-se essencial a compreensão dos fatores que interferem e comprometem essa uniformidade.

2.2. Emissores utilizados na irrigação por gotejamento

O emissor é um dispositivo usado para dissipar a energia de pressão e descarregar a água a uma taxa constante em diversos pontos ao longo de uma lateral(DASBERG; OR, 1999). Segundo Keller & Karmeli (1974), a dissipação de energia nos emissores se dá por meio de um bocal estreito ou por um caminho de fluxo longo, que diminui a pressão da água e permite a descarga de apenas alguns litros por hora.

Com base nas características de fluxo, os emissores podem ser agrupados em: de longo percurso (microtubos, de fluxo laminar ou turbulento), emissores de curto percurso (microaspersores e outros emissores de orifício) e emissores de orifício-vórtice (EVANS; WU; SMAJSTRALA, 2007). Emissores podem ainda ser classificados em função da disponibilidade de mecanismo regulador de vazão, havendo emissores regulados ou autocompensantes (*pressure-compensating*, PC) e emissores não regulados ou convencionais (*non-pressure-compensating*, NPC).

Em relação ao tipo de conexão ao tubo, podemos definir os emissores como(ABNT NBR ISO 9261, 2006): (a) in-line, quando o emissor é projetado para a instalação entre dois trechos da linha lateral; (b) on-line, quando o emissor é projetado para instalação na parede de uma lateral de irrigação, diretamente ou indiretamente, por meio de um microtubo; (c) tubo emissor, que compreende um tubo contínuo ou microtubo, incluindo tubos colapsáveis (fitas) com perfurações ou outros dispositivos hidráulicos modelados ou integrados no tubo ou no microtubo durante o processo de fabricação e projetados para proporcionar a vazão na forma de gotas ou fluxo contínuo. A Figura 1 ilustra alguns tipos de emissores utilizados em sistemas de irrigação localizada.

Figura 1. Diferentes tipos de emissores utilizados na irrigação localizada (A) esquema de um microtubo conectado a microaspirador; (B) gotejador on-line; (C) gotejador in-line; (D) gotejador cilíndrico (bóbi) do tipo labirinto de fluxo turbulento; (E) emissor do tipo plano de fluxo turbulento compensador de pressão; (F) microaspirador

Dentre os diferentes tipos de gotejadores citados anteriormente, o tubo emissor, ou mais especificamente, tubo com emissores do tipo labirinto (longo percurso de fluxo turbulento) integrados, são os mais utilizados e comercializados atualmente, que segundo LI et al. (2006b) são os emissores de irrigação por gotejamento mais avançados.

2.3. Tubos emissores

As linhas laterais de gotejamento podem ser compostas por fitas gotejadoras ou tubos gotejadores. Essencialmente, a diferença entre eles está relacionada à espessura da parede do duto, sendo que, geralmente, ambos são fabricados de polietileno. Segundo Evans et al.(2007), as fitas gotejadoras têm espessuras de parede variando de 0,1 mm a 0,64 mm e diâmetros internos de 9,5 a 28,6 mm, com emissores do tipo orifício simples ou labirinto não compensadores de pressão, que podem ser modelados na própria fita ou integrados às suas paredes internas.

Diferentemente dos tubos mais rígidos, a estrutura da fita sofre alteração da seção transversal quando a pressão é zero, geralmente por causa da espessura de parede pequena ou por causa da natureza flexível do material do qual o tubo emissor é feito (ABNT NBR ISO 9261, 2006). As pressões de operação da fita podem variar de 20 kPa a 140 kPa, dependendo do fabricante e do material de composição.

Os tubos gotejadores possuem espessuras de parede variando de 0,25 mm a 0,9 mm com diâmetros internos de 9 mm a 35 mm, com emissores compensadores de pressão (PC) ou não compensadores de pressão (NPC), que podem ser instalados no campo a qualquer espaçamento na tubulação para atender aos requisitos de irrigação específicos, ou podem vir integrados ao tubo em espaçamentos uniformes. As pressões de operação variam de 40 a mais de 250 kPa (EVANS; WU; SMAJSTRALA, 2007).

Quanto à durabilidade dos tubos emissores, podemos dividi-los em cinco categorias: (a) fitas descartáveis, com paredes finas para a irrigação superficial (1 ano de vida útil); (b) fitas para irrigação subsuperficial a pequenas profundidades (1 a 5 anos de vida útil); (c) fitas reutilizáveis para irrigação superficial (1 a 5 anos de vida útil); (d) tubos reutilizáveis para a irrigação superficial (vários anos de vida útil) e (e) tubos para a irrigação subsuperficial (vários anos de vida útil) (FRIZZONE et al., 2012).

As fitas gotejadoras têm menor durabilidade em campo, pois devido a sua espessura de parede mais fina, são constituídas de menores quantidades de polietileno, assim apresentam menor custo de aquisição quando comparadas aos tubos gotejadores. Comumente são utilizadas em culturas de ciclo anual ou sazonal, enquanto o tubo é usado com mais frequência em culturas perenes (EVANS; WU; SMAJSTRALA, 2007). Suas especificações variam muito em função do fabricante e seu uso requer planejamento quanto à eliminação, reciclagem ou reutilização após o ciclo da cultura (SHOCK, 2006).

2.4. Emissores de longo percurso de fluxo turbulento (labirinto)

O emissor de longo percurso de fluxo turbulento possui o desempenho mais avançado na irrigação por gotejamento e é comumente integrado às fitas gotejadoras. Para o caso das fitas gotejadoras, esses emissores podem apresentar diferentes formas, podendo ser: (a) planos e integrados diretamente nas paredes do tubo (pastilha); (b) modelados no próprio material da fita (moldados); (c) contínuo e integrado a parede do tubo (cintas) e (d) pequenos orifícios perfurados a laser. Em geral, os emissores têm um pequeno espaçamento uniforme (inferior a 0,6 m), não

são regulados e a vazão individual varia de $0,2 \text{ Lh}^{-1}$ a aproximadamente 6 Lh^{-1} (FRIZZONE et al., 2012).

A sensibilidade da vazão desses emissores em relação à pressão aplicada depende principalmente dos valores do seu expoente de fluxo (x). Emissores NPC com fluxo turbulento apresentam expoente de fluxo próximo a 0,5, ou seja, a vazão do emissor varia com a raiz quadrada da carga de pressão aplicada.

Embora mais sensíveis às variações de pressão do que emissores PC, os emissores de fluxo turbulento são construtivamente mais simples, requerem menos material para sua fabricação e conseqüentemente apresentam menor custo de produção.

Segundo Andrade(2009), os gotejadores planos têm origem em empresas israelenses e apresentam comprimento de 20 a 55 mm, largura de 4 a 15 mm e altura de 2 a 3 mm, são conhecidos popularmente como “chapinha ou pastilha”. No processo de fabricação desses emissores, Patil et al.(2013) cita que sua vida útil está diretamente relacionada com o tipo de material plástico utilizado; onde muitos fabricantes empregam apenas materiais termoplásticos para a sua composição e que a maioria deles é feita de polietileno de alta densidade, material este, que possui grande importância para as propriedades físicas e de moldagem do gotejador. Porém, a teoria e o desenvolvimento de seu projeto têm sido estritamente confidenciais por seus fabricantes (LI et al., 2006).

Para espaçamentos entre gotejadores menores que 0,2 m o custo de produção das fitas gotejadoras com emissores planos integrados torna-se mais elevado; com isso, o uso dos emissores contínuos integrados ou moldados às fitas, conhecidos popularmente como cintas gotejadoras, aparecem como uma alternativa viável à redução do custo final do sistema de gotejamento. Esse tipo de emissor é comumente utilizado no cultivo de hortaliças e demais culturas que exijam espaçamento reduzido entre emissores. De acordo com Andrade (2009), esse tipo de emissor tem sua origem em empresas estadunidenses, é formado ou soldado na parede da fita, provocando um espessamento localizado em todo o comprimento da mangueira, onde posteriormente, na posição desejada do emissor, é feito o furo de saída de água.

2.5. Caracterização hidráulica dos emissores

A caracterização hidráulica do emissor consiste em determinar o coeficiente de variação de vazão em função da fabricação (CV_f) e a curva característica de vazão em função de pressão. Essas são duas informações imprescindíveis para caracterização do produto.

2.6. Equação característica do emissor

Segundo Frizzzone et al.(2012), a hidráulica dos emissores pode ser analisada utilizando a equação da continuidade e a equação da perda de carga proposta por Darcy-Weisbach. Assim, ao rearranjar os termos desta relação para expressar a velocidade da água no percurso de escoamento do emissor e assumindo que a pressão de operação do emissor é toda dissipada em perda de carga, tem-se a equação (1).

$$V_e = \left(\frac{2 g H D_e}{f L_e} \right)^{0,5} \quad (1)$$

em que, V_e : velocidade média de escoamento da água no emissor (ms^{-1}); H : carga de pressão de operação do emissor (m); g : aceleração da gravidade (m s^{-2}); D_e : diâmetro médio da seção de escoamento do emissor (m); L_e : Comprimento do percurso de escoamento (m); f : Fator de atrito (adimensional).

Substituindo V_e na equação da continuidade e expressando a vazão do emissor (Lh^{-1}):

$$q = 3,6 \times 10^6 A_e \left(\frac{2 g H D_e}{f L_e} \right)^{0,5} \quad (2)$$

em que, q : vazão do emissor (Lh^{-1}); A_e : área da seção de escoamento (m^2).

Sendo a equação (3) a expressão do coeficiente de descarga (C_d), cujo valor varia de 0,6 a 1,0 (KELLER; BLIESNER, 1990):

$$C_d = \left(\frac{D_e}{f L_e} \right)^{0,5} \quad (3)$$

a equação (2) pode ser reescrita como:

$$q = 3,6 \times 10^6 A_e C_d 2g^{0,5} H^{0,5} \quad (4)$$

sendo,

$$k = 3,6 \times 10^6 A_e C_d 2g^{0,5} \quad (5)$$

a equação de vazão pode ser representada de acordo com a equação (6):

$$q = k H^{0,5} \quad (6)$$

Segundo Frizzzone et al. (2012), a hidráulica de emissores é variada, e pode resultar em diferentes tipos de fluxos em seu interior, que por sua vez mudam as características de C_d , bem como o expoente da equação (6). No projeto do emissor define-se um expoente de fluxo (x) e usando a equação (4), determina-se a constante de proporcionalidade característica do emissor (k), assim:

$$k = 3,6 \times 10^6 A_e C_d (2g)^x \quad (7)$$

em que, k : é a constante de proporcionalidade que caracteriza cada emissor.

Então, a relação entre a vazão do emissor e carga de pressão de operação, pode ser generalizada pela equação (8) a seguir:

$$q = kH^x \quad (8)$$

em que, k : é a constante de proporcionalidade que caracteriza cada emissor.

O valor de x caracteriza o regime de fluxo e a relação entre vazão e pressão do emissor. Quanto menor o valor de x , menor é a influência da pressão na vazão do emissor. O valor de x caracteriza o regime de escoamento do emissor: para fluxo completamente turbulento $x = 0,5$; para fluxo parcialmente turbulento $0,5 < x < 0,7$; para o regime instável de fluxo $0,7 < x < 1,0$ e fluxo de laminar $x = 1,0$. O fluxo dos emissores de orifício e bocal é sempre totalmente turbulento ($x = 0,5$). No entanto, os emissores de longo percurso podem ter expoentes que variam de 0,6 a 1,0 (KELLER; KARMELI, 1974).

2.7. Coeficiente de variação de vazão em função da fabricação (CV_f)

Segundo Solomon (1979), é impossível fabricar duas peças exatamente iguais e no caso da irrigação por gotejamento, na qual os emissores possuem dimensões muito pequenas e são projetados para descarregar água a uma vazão muito baixa, essas diferenças de fabricação de emissor para emissor são significativas. Embora as variações no processo de fabricação sejam pequenas em magnitude absoluta, representam uma variação percentual relativamente grande. Portanto, a variação de fabricação e outros fatores como a carga de pressão aplicada e a temperatura da água, são de extrema importância para a caracterização hidráulica do emissor. Essa variação de fabricação pode ser determinada estatisticamente por um coeficiente (CV_f), obtido a partir de uma amostragem de emissores, seguindo as recomendações estabelecidas pela norma ABNT NBR ISO 9261 (2006) e calculada de acordo com a relação a seguir:

$$CV_f = \frac{Sq}{\bar{q}} \quad 9)$$

em que, Sq : é o desvio padrão das determinações de vazão da amostra analisada (Lh^{-1}); $\bar{q}$: é a vazão média dos emissores que compõem a amostra (Lh^{-1}).

A norma ABNT NBR ISO 9261 (2006) qualifica os emissores a partir da vazão média da amostra, que não deve divergir da vazão nominal mais que $\pm 7\%$ e do CV_f , que não deve exceder 7%.

2.8. Fonte de variação da temperatura da água em campo

De acordo com Parchomchuk(1976), as variações de temperatura da água na irrigação por gotejamento podem ocorrer de diversas maneiras, podendo ser durante o período de tempo do dia-noite, de um dia para o outro e com as mudanças sazonais do tempo, e de uma extremidade a outra da linha.

Essas variações de temperatura ocorrem devido à transferência de energia térmica entre o meio e o tubo, a partir da diferença energética entre eles. Durante o período diurno a quantidade de energia presente no meio é proeminente, dado a disponibilidade de energia solar efetiva, gerando assim um gradiente térmico que possibilita a troca de calor do meio para o tubo. Essa transferência de energia por sua vez, resulta no aquecimento do tubo de gotejamento em campo, e que transcorre por meio de três processos distintos: (a) transferência de calor pela radiação solar direta; (b) processo convectivo do aquecimento do ar circundante da linha de irrigação; (c) transferência de calor da superfície do solo ao tubo por intermédio do processo de condução. Durante o período noturno, na ausência de radiação solar direta, o meio deixa de ser o elemento com mais energia; assim, a transferência de calor dá-se a partir do tubo para o ambiente, ocorrendo assim o processo de resfriamento da tubulação, até que esta esteja em equilíbrio com o ambiente.

2.9. Radiação Solar

Segundo Silva & Vieira(2016), a irradiação pode ser classificada em dois componentes: radiação solar líquida (R_n), que representa a parcela de irradiação que de fato atinge a superfície da terra; e radiação solar difusa (R_d), que representa a parcela de irradiação difundida pelas partículas e gases atmosféricos. A energia solar medida por unidade de tempo e de área média é

de aproximadamente 1000 Wm^{-2} (radiação solar líquida), ao nível do solo, em um dia claro, sem cobertura de nuvens.

O balanço de radiação para uma determinada superfície corresponde à soma de toda energia radiante recebida e perdida, que depende de fatores físicos e termodinâmicos associados ao sistema superfície-atmosfera, tais como albedo, emissividade, rugosidade da superfície, capacidade, condutibilidade e difusividade térmica dos meios (CALLEJAS; DURANTE; ROSSETI, 2015).

Os tubos ou fitas de gotejamento podem apresentar características distintas de um fabricante para o outro; portanto, as propriedades térmicas do material também apresentarão diferenças. Essas características térmicas por sua vez, exercem forte influência no processo do balanço da radiação e nas trocas de calor do material exposto ao ambiente.

2.10. Convecção interna e externa

Incropera et al. (2008) descrevem o processo de convecção como sendo a troca de calor latente de um fluido em movimento com uma superfície, onde ocorre, como consequência dessa interação, o desenvolvimento de uma região onde a velocidade do fluido varia entre zero (no contato com a superfície) e um valor infinito associado ao escoamento do fluido. Esta região de contato entre o fluido e a superfície é conhecida como camada limite hidrodinâmica ou de velocidade. Além disso, com a diferença de temperatura entre o fluido e a superfície, existirá também uma camada limite térmica, que pode ser menor, maior ou ter o mesmo tamanho da camada limite de velocidade. De qualquer forma, a transferência de calor ocorrerá devido ao gradiente da maior temperatura para a menor temperatura.

Para o caso de linhas laterais de gotejamento expostas ao ambiente, o processo de convecção entre o ar e o tubo pode ser denominado como livre ou natural, por meio do qual o escoamento é induzido unicamente por forças de empuxo que se originam a partir das diferenças de densidade causadas por variações de temperatura do ar. Este processo acontece quando o ar entra em contato com a superfície do tubo, caso a superfície do tubo esteja aquecida, o ar ganha temperatura, ocorrendo então uma redução na sua densidade, tornando-o assim mais leve do que o ar adjacente; com isso, as forças de empuxo induzem um movimento vertical no qual o ar quente ascende e é substituído pelo influxo de ar ambiente mais frio. O processo inverso acontece quando o ar circundante ao tubo tem temperatura superior à temperatura da sua parede externa.

O processo de transferência de calor por convecção em tubos de gotejamento acontece de duas formas, quais sejam, na parte interna do tubo (convecção entre a parede interna do tubo com o fluido água) e na parte externa do tubo (convecção entre o ar ambiente e a parede externa do tubo).

2.11. Condução através das paredes do tubo

Conforme descrito por Incropera et al.(2008), a transferência de calor por condução ocorre no nível das atividades atômicas e moleculares de um material sólido ou de um fluido estacionário, onde as temperaturas mais altas estão relacionadas à maior energia molecular, resultando no movimento de translação aleatório, assim como movimentos internos de rotação e vibração dessas moléculas. Na presença de um gradiente de temperatura há, então, o choque entre as moléculas mais energéticas com as menos energéticas, ocorrendo assim a transferência de calor na direção da diminuição da temperatura.

Outra forma de transferência de calor por condução nas linhas laterais de irrigação via gotejamento pode ocorrer devido ao contato direto do tubo com o solo, uma vez que o solo também é alvo dos processos físicos do ambiente em relação à transferência de energia.

2.12. Aquecimento do solo

Segundo Diniz et al.(2014), uma fração da energia incidente é absorvida pela superfície do solo ocasionando consequentemente a elevação de temperatura no período diurno, sendo a superfície a região com valores de temperatura mais elevados quando comparados com outras regiões do perfil. Os fatores que influenciam no aquecimento do solo podem ser divididos como fatores externos e fatores intrínsecos, sendo que os fatores externos são compreendidos pelos elementos meteorológicos como: irradiação solar global, temperatura do ar, nebulosidade, precipitação e vento. Já os fatores intrínsecos variam de solo para solo, e estão relacionados ao tipo de solo, relevo e tipo de cobertura do terreno. De forma geral, quando uma mesma quantidade de energia está disponível para solos distintos o processo de aquecimento e resfriamento pode ser bastante variável em virtude das propriedades térmicas específicas do solo (DINIZ et al., 2013).

Em um estudo de Kerridge al.(2013) foi relatada a diferença entre a temperatura do solo sombreado por videiras e não sombreado (solo nu), em uma região considerada como semiárida

em New South Wales, Austrália, onde se procedeu à coleta de dados em vários dias durante o verão, entre os anos de 2009 e 2010. Em geral, a temperatura da superfície do solo durante toda a estação variou de 4,6°C a 65,5°C para o solo sombreado e 6,8°C a 75,6°C no solo não sombreado; esses valores retratam a grande variabilidade térmica temporal encontrada, bem como a variabilidade térmica devido a cobertura do solo.

Ramana Rao et al.(2005) analisaram a variação de temperatura anual e diária do solo na cidade de Salvador-BA, onde a temperatura média mensal, nos horários de 12, 18 e 24 UTC (Coordinated Universal Time), na profundidade de 0,02 m (profundidade mais próxima da superfície do solo)atingiu um valor de 30,4°C nos meses de janeiro e dezembro. Para a variação diária da temperatura do solo, foi analisado um dia de pleno verão com céu claro e há dez dias sem precipitação, onde solo atingiu a temperatura máxima de 39,8°C e mínima de 30,3°C.

Diniz et al. (2014) encontraram temperaturas de maior magnitude em torno das 15 horas no mês de dezembro, com valores na ordem de 40°C, na profundidade de 0,05m. Em contrapartida, durante o mês de julho, foram observadas nas primeiras horas da manhã temperaturas por volta dos 22°C.

Com o objetivo de monitorar o regime térmico diário do solo em duas cidades no estado da Paraíba,Diniz et al. (2013) observaram que os valores máximos de temperaturas do solo ocorrem em torno das 16 horas e que a amplitude térmica diária para todo o período de análise (janeiro a junho de 2013) não ultrapassa os 22°C (referente a região mais próxima à superfície), dado a proximidade da região de estudo ao equador geográfico, onde a variabilidade anual das condições térmicas do solo não é tão acentuada como nas regiões com médias e altas latitudes.

No município de Jerônimo Monteiro-ES, a amplitude máxima de temperatura do solo registrada no período de maio a junho de 2010 para a profundidade de 0,02m foi de 7,8°C(BELAN et al., 2013). Gasparim et al.(2005), estudando os efeitos da cobertura em um latossolo vermelho distroférrico no município de Cascavel-PR, encontrou valores de temperatura máxima e mínima de aproximadamente 40°C e 22°C respectivamente, e média de temperatura de 28,9°C, na camada de 0,02m de profundidade, durante um dia no mês de março de 2002.

Com os dados apresentados por esses autores, pode-se afirmar que a temperatura do solo sofre grande variação diária e sazonal, e é específica para cada região do Brasil e do mundo. No caso do Brasil, essas variações regionais são comuns, dado sua a característica continental, composta por diversos biomas, com características climatológicas distintas. Consequentemente, a transferência de calor pelo contato da superfície do solo com os tubos ou fitas de gotejamento pode variar de acordo com as condições locais, mas sempre devendo ser considerada como parte responsável pela variação da temperatura da água na linha de irrigação.

2.13. Influência da variação da temperatura da água

As variações de temperatura influenciam nas propriedades da água, especialmente na viscosidade. Este pode ser um fator significativo que afeta a vazão dos emissores. A geometria da passagem do fluxo também pode ser afetada devido à dilatação do material plástico. Como consequência, são esperadas alterações na perda de carga e na vazão do emissor (RODRÍGUEZ-SINOBAS; JUANA; LOSADA, 1999).

O efeito da temperatura na vazão dos emissores tem importância fundamental para a caracterização do emissor e consequentemente para o dimensionamento de projetos de gotejamento. A teoria clássica dos tipos de regimes de fluxo foi estudada por Reynolds, classificando os diferentes tipos de regimes de fluxo, que são definidos em função de um número adimensional de que leva seu nome (Re), que pode ser estimado pela equação (10).

$$Re = \frac{V_e D_e}{\nu} \quad (10)$$

em que, V_e : é a velocidade média do fluxo no emissor (ms^{-1}); D_e : diâmetro médio da seção de escoamento do emissor (m); ν : é o coeficiente de viscosidade cinemática da água (m^2s^{-1}), que varia de acordo com a temperatura da água (T), e pode ser calculado de acordo com Rodríguez-Sinobas et al. (1999), por uma relação potencial simples (equação (11)).

$$\nu = 0,000006177T^{-0,603} \quad (11)$$

Os regimes de fluxo, segundo Karmeli (1977), são definidos como uma função de Re, em que:

Regime laminar, quando $Re \leq 2000$;

Zona crítica, quando $2000 < Re \leq 4000$;

Regime turbulento quando $Re > 4000$.

Quando o regime é laminar, o fator de atrito (f) é inversamente proporcional ao Re, ou seja, f diminui como aumento do número de Reynolds. A rugosidade relativa do tubo não influencia Re ou o fator de atrito na faixa de fluxo laminar. No entanto, Re é sensível às mudanças de temperatura devido a mudanças na viscosidade da água que causam diferenças significativas no fluxo ao longo das linhas laterais. Em um regime correspondente a zona crítica, tanto o fator de atrito como a descarga, são instáveis. Com isso, o intervalo de Re e o f são imprevisíveis, podendo variar sensivelmente dado uma pequena obstrução e mudanças na

rugosidade da parede devido à sedimentação e/ou depósito de minerais nas paredes do canal de fluxo. No regime turbulento, o fator de atrito pode ser influenciado pela rugosidade relativa e pelo número de Reynolds (KARMELI, 1977).

Entretanto, embora este seja um conceito bem difundido e aplicado na hidráulica como um conceito clássico, há indícios que esta abordagem não explica satisfatoriamente o fenômeno do fluxo de água dentro do labirinto do emissor. Estudando a dinâmica do fluxo de água em emissores com diferentes geometrias de labirintos, Li et al. (2006) encontraram valores do número de Reynolds na faixa de 105 a 930, o que indicaria que o regime de fluxo nos emissores é essencialmente laminar, porém para os sete emissores estudados o expoente x (que caracteriza o regime de fluxo do emissor) apresentou valores próximos a 0,5, o que indica que o fluxo dentro do labirinto é turbulento, indicando, portanto que este tipo de emissor é pouco influenciado pela viscosidade da água.

Assim, embora as classificações de escoamento sejam indiscutíveis para os estudos de escoamento em canalizações, ainda são necessárias pesquisas sobre a hidrodinâmica de cada tipo de emissor, facilitando assim o entendimento sobre os fenômenos que ocorrem no seu interior, como por exemplo, a obstrução e sensibilidade a temperatura da água, principalmente em emissores do tipo labirinto, que são os mais empregados hoje na irrigação localizada.

2.14. Sensibilidade de diferentes tipos de emissores à temperatura da água

Diversos experimentos já foram realizados a fim de estimar a sensibilidade dos diferentes tipos de emissores às variações de temperatura da água. Os resultados mostram que emissores do tipo helicoidal têm significativa sensibilidade às variações de temperatura, apresentando uma variação da vazão de até 53% quando a temperatura da água variou de 20 a 60°C (PARCHOMCHUK, 1976). Rodríguez-Sinobas et al. (1999) encontraram uma variação de vazão na ordem de 0,7%/°C quando a temperatura da água variou de 20 a 40°C para este mesmo tipo de emissor.

Os emissores do tipo orifício teoricamente são independentes das mudanças na temperatura e viscosidade da água; porém, o fluxo é ligeiramente dependente da viscosidade em função do tamanho do orifício. Parchomchuk (1976) mostra em seu estudo que, para um orifício de 1,5 mm, a vazão sofreu um acréscimo de 1% quando a temperatura variou de 7 a 38°C, enquanto para o orifício de 12,7 mm o aumento da vazão foi de 4% para a mesma variação térmica.

Emissores do tipo vórtice apresentam uma relação entre vazão e temperatura da água diferente quando comparado aos demais tipos de emissores; em geral, a vazão decresce com o aumento da temperatura (PARCHOMCHUK, 1976; RODRÍGUEZ-SINOBAS; JUANA; LOSADA, 1999; ZUR; TAL, 1981). Hamadi (1984), na época de seu trabalho, quando predominava o uso desses tipos de emissores, cita que as mudanças de temperatura da água eram consideradas um dos principais fatores causadores de variações na vazão dos emissores.

Com a grande influência das variações térmicas da água nos emissores utilizados na irrigação via gotejamento, o desenvolvimento tecnológico se fez necessário para o ajuste das características construtivas dos emissores, a fim de conferir ao sistema um melhor desempenho. Andrade (2009) relata em seu trabalho que na década de 1970 foram lançados os primeiros tubos gotejadores com o emissor cilíndrico integrado, que já continham o modelo de labirinto de fluxo turbulento. No início dos anos 80, a preocupação com o custo de material plástico se intensificou devido ao aumento do preço do petróleo, direcionando a indústria a buscar produtos mais econômicos com desempenho igual ou superior. Este processo favoreceu a criação de tubos emissores de parede fina e emissores planos, dando origem às fitas gotejadoras. Diante do desenvolvimento e aceitação desses modelos de tubo emissores, os estudos sobre a sua sensibilidade a variações térmicas da água continuaram a ser realizados.

Rodríguez-Sinobas et al. (1999) estudaram o efeito da temperatura como uma fonte de variação da vazão para dois tipos de emissores PC; também foi considerado neste estudo a alternância de temperatura entre os ciclos de operação (aquecimento e resfriamento da água). Os resultados mostram que, para um dos emissores do estudo, a vazão apresentou um decréscimo a cada sequência de testes, apresentando 6,2% de variação máxima na vazão, enquanto o outro emissor não mostrou uma tendência específica. De forma geral, concluiu-se que para emissores PC a variação de temperatura não é significativa, estando os resultados diretamente relacionados com a frequência de testes, durante os quais o elastômero poderia ter sofrido fadiga e mudanças na sua estrutura dado a mudança de pressão e temperatura em curto espaço de tempo. Dogan & Kirnak (2010), ao ensaiar sete emissores PC, encontram resultados semelhantes: onde três tipos de emissores apresentaram uma redução na vazão com o aumento da temperatura da água em relação à temperatura de referência de 20°C, enquanto os demais apresentaram acréscimo na vazão. Al-Amoud et al. (2014) observaram em seu estudo que para os dois emissores PC ensaiados, um apresentou decréscimo na vazão na ordem de 0,2 a 2,3%, enquanto no outro houve um acréscimo de 2,0 a 2,6%; todavia o efeito da temperatura foi insignificante ao nível de 5% de probabilidade.

Oliver et al. (2016) considerou que para esses estudos anteriores os emissores compensados foram avaliados em curtas exposições térmicas de temperatura, e que a resposta para este tipo de emissor deveria ser quantificada em um longo período de exposição e oscilação térmica da água. Também considerou que durante o experimento não só a temperatura da água, mas também a temperatura ambiente deveria ser controlada. Os resultados encontrados para os três tipos de emissores PC ensaiados mostraram que houve um decréscimo da vazão relativa no decorrer dos testes, e que a relação entre temperatura e vazão não é representada de forma linear, em contrariedade com outros autores (DOGAN; KIRNAK, 2010; SENYIGIT; ILKHAN, 2017; ZUR; TAL, 1981).

Senyigit et al. (2017), estudando seis emissores PC, de diferentes fabricantes e com diferentes espaçamentos, encontraram resultados que mostram que quatro emissores apresentaram um acréscimo da vazão em relação ao aumento da temperatura da água, enquanto um manteve vazão constante e o outro apresentou uma redução de vazão.

Os diferentes comportamentos de emissores PC em função da temperatura da água nos diversos estudos realizados são apontados como função das características específicas do emissor estudado (RODRÍGUEZ-SINOBAS; JUANA; LOSADA, 1999; SENYIGIT; ILKHAN, 2017), como por exemplo, tamanho do elastômero, geometria do labirinto, e as demais variáveis de fabricação do emissor.

Já os emissores do tipo labirinto NPC apresentam certo comportamento padrão; em geral, sua vazão é pouco influenciada pelo aumento da temperatura da água, possivelmente por apresentar regime de fluxo turbulento e, portanto, ser pouco afetado pelas mudanças nas propriedades da água.

Estudando diferentes tipos de emissores, Zur & Tal (1981) apresentaram ajustes lineares de equações para a estimativa da vazão em função da temperatura da água, em pressões diferentes (1, 2 e 3 kPa). Utilizando valores de temperatura de 23°C e 50°, para o emissor com vazão nominal de 4 Lh⁻¹, para cada uma das três pressões, houve em média um incremento de 4,54% na vazão do gotejador. Rodríguez-Sinobas et al. (1999) encontraram variação menor que 1,5% na vazão de emissores do mesmo tipo, para uma variação térmica da água de 20°C a 40°C.

Al-Amoud et al. (2014) realizaram um estudo avaliando o desempenho hidráulico de emissores do tipo labirinto com diferentes configurações estruturais, submetidos a diferentes temperaturas da água (15°C a 45°C) e pressões de operação. Para os emissores NPC, os efeitos da temperatura da água na vazão do emissor não foram significativos para o nível de probabilidade de 5%.

Senyigit et al. (2012), avaliando um emissor de fluxo turbulento NPC observou que a vazão do emissor tende a aumentar com o incremento da temperatura da água (20°C a 40°C); porém, sob pressões operacionais entre 90 e 120 kPa não houve diferença estatisticamente significativa (1%) na variação de vazão. Em um estudo mais recente, Senyigit & Ilkhan (2017) encontraram um acréscimo na vazão de emissores NPC de aproximadamente 5%, devido ao aumento da temperatura da água (de 20 a 50°C).

Em contrariedade com os estudos citados anteriormente, Clark et al.(2005), estudando a sensibilidade de fitas gotejadoras (parede fina), com espessura de parede entre 0,2 e 0,38 mm e com emissores do tipo labirinto moldado, observaram variações significativas de vazão, com valores de até 97% para uma variação de temperatura da água de 21°C a 50 °C, o que indica que a vazão do emissor praticamente dobrou com o incremento da temperatura. Em conformidade com esses resultados, porém em uma amplitude reduzida, Dogan & Kirnak (2010), estudando sete tipos de emissores do tipo labirinto NPC, encontraram valores significativos ($p>0,05$) na variação de vazão, que apresentou variações de até 20,9%, quando a temperatura da água variou de 20° a 50°C.

Esses estudos indicam que a elevação na temperatura da água para esse tipo de emissor pode não influenciar majoritariamente em sua descarga, no que tange às propriedades do fluido; porém pode ser significativa, em determinados casos, em alterações nas propriedades do material constitutivo das fitas gotejadoras e/ou dos emissores, mesmo que estes apresentem um comportamento essencialmente turbulento.

2.15. Material de composição do tubo emissor

Os tubos mais utilizados na microirrigação são de plástico, tanto de policloreto de vinil (PVC) quanto de polietileno (PE) (FRIZZONE et al., 2012), sendo que, comumente, os tubos emissores são fabricados em PE.

Segundo Bolsoni (2001), o polietileno é um polímero termoplástico da família das poliolefinas, que foi produzido pela primeira vez nos laboratórios da Imperial Chemical Industries Ltda. (ICI), na Inglaterra, em um experimento acidental, onde o etileno foi submetido a uma pressão de 140 MPa e temperatura de 170°C, dando origem a um material de alta viscosidade e cor esbranquiçada.

De acordo com o Plastic Pipe Institute (2008),o material de uma tubulação de polietileno consiste em um polímero, que na prática comercial é chamado de resina, na qual foram adicionadas pequenas quantidades de corantes, estabilizadores, antioxidantes e outros

ingredientes que melhoram as propriedades do material e que o protegem durante o processo de fabricação, armazenamento e serviço. Um dos aditivos mais comuns incorporados as resinas de polietileno é o negro de fumo, que tem como função atuar como filtro de luz, reduzindo o processo de fotoxidação, e que confere a cor preta aos tubos emissores utilizados na irrigação.

Dentre os principais polímeros disponíveis para a composição de tubos de PE, estão: o Polietileno de baixa densidade (PEBD), o Polietileno de alta densidade (PEAD), o Polietileno de baixa densidade linear (PEBDL), o Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) e o Polietileno de ultra baixa densidade (PEUBD) (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003). Para cada tipo de polietileno, em função da sua densidade, existem diferenças em suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Em geral, a tensão de escoamento, o módulo de elasticidade e a temperatura de fusão aumentam com a densidade, enquanto o alongamento e a tenacidade diminuem (MERAH et al., 2006).

No que diz respeito às propriedades térmicas, é importante destacar alguns parâmetros relacionados com o tipo do polietileno, como: (a) a condutividade térmica (C_t), que é a quantidade de calor conduzido por unidade de tempo por um volume unitário, para verificar a capacidade que o material tem em trocar calor com o meio (BARBOSA et al. (2017)); (b) o coeficiente de dilatação linear (α), que compreende a uma constante de proporcionalidade intrínseca do material, que caracteriza o comportamento na variação de suas dimensões (em um único sentido) quando submetido a uma variação térmica; (c) calor específico (C_p), que corresponde a quantidade de energia necessária para que o material sofra uma variação de temperatura de 1°C . Na Tabela 1 são apresentados alguns valores médios desses parâmetros encontrados na literatura para os diferentes tipos de polietileno (ALMANZA; RODRÍGUEZ-PÉREZ; DE SAJA, 2004; BRASKEM, 2014; COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003; DANIELETTTO, 2014; EL-TONSY et al., 2016; LUYT; MOLEFI; KRUMP, 2006; TAVMAN et al., 2011; ZHOU et al., 2009).

Tabela 1. Propriedades térmicas dos diferentes tipos de polietileno

Propriedades Térmicas	Tipo de Polietileno				
	PEBD	PEAD	PEBDL	PEUAPM	PEMD
C_t ($\text{cal s}^{-1} \text{cm}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$)	$8,0 \times 10^{-4}$	$9,0 \times 10^{-4}$	$7,4 \times 10^{-4}$	$9,5 \times 10^{-4}$	$11,5 \times 10^{-4}$
α ($\text{m m}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$)	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-4}$
C_p ($\text{cal g}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$)	0,60	0,43	0,26	0,48	-

Como se pode observar nos dados da Tabela 1, os valores para os diferentes tipos de polietileno apresentam diferenças entre si, ou seja, com a diferenciação do tipo do material em função da sua densidade, também há uma diferenciação em suas propriedades térmicas e consequentemente diferentes respostas dos materiais quando submetidos a variações de temperatura.

Nos últimos anos, têm-se verificado acentuada desaceleração na produção de novos polímeros pelas indústrias petroquímicas e um aumento no interesse pela pesquisa e desenvolvimento de novos materiais originados da mistura de dois ou mais polímeros (RICHART, 2013), tornando possível a combinação de várias propriedades para o material de interesse, geralmente de forma mais econômica (LUNA et al., 2017). Segundo Hage & Pessan (2001), a mistura física de dois ou mais polímeros ou copolímeros, que não produzam elevado grau de reações químicas entre eles, é chamada de blenda polimérica, que por sua vez, deve ter concentração acima de 2% em massa do segundo componente.

Para os tubos emissores, o uso de blendas já acontece há alguns anos com objetivo de aperfeiçoamento tecnológico desses materiais. Schimidt (2014), trabalhando com fitas gotejadoras fabricadas pela empresa Petroisa, relata que os materiais utilizados em seu estudo são feitos de proporções de diferentes classes de polietileno, o que permite a fabricação de uma gama de fitas com diferentes características de durabilidade, espaçamento e espessura. Zhu et al. (2018) também relata em seu estudo que as fitas de gotejamento comerciais na China são comumente feitas de uma mistura de PEBD, PEAD, PEBDL e uma pequena quantidade de negro de fumo, adicionado como um inibidor ultravioleta.

Marinho et al. (1999), afirmam, que a fita gotejadora Santape®, comercializada no Brasil, tem como matéria prima virgem, o PEBDL. No catálogo de produtos da Amanco (2017), também é informado que os tubos fabricados pela marca são compostos por resina virgem de polietileno de baixa densidade linear.

Andrade (2005), trabalhando com dois materiais visualmente semelhantes, relata que os mesmos são fabricados com uma mistura de polietileno de baixa densidade linear, alta densidade e mais aditivos.

Uma novidade tecnológica no mercado de resinas poliméricas é a resina verde, que segundo a Braskem (2018) é obtida a partir da cana de açúcar, sendo 100% reciclável, contribuindo para a redução da emissão de gases causadores do efeito estufa; porém, mantendo todas as características físicas do PE convencional. Tubos gotejadores estão sendo produzidos por este tipo de resina, e atualmente são considerados com potencial diferencial no mercado, uma

vez que se apresentam alinhados com a tendência mundial na busca por soluções sustentáveis ecologicamente.

Por se tratar de um assunto sensível ao desenvolvimento tecnológico das empresas fabricantes, as informações detalhadas sobre a composição de tubos emissores disponíveis no mercado são restritas e/ou sigilosas. De acordo com a tecnologia empregada pelo fabricante em relação à blenda polimérica e/ou adição de outros componentes para a otimização do material, cada fita ou tubo gotejador poderá apresentar características singulares; assim, as propriedades mecânicas e térmicas do material também apresentarão diferenças.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Bancada de ensaios

O experimento foi conduzido no Laboratório de Ensaio de Material de Irrigação (LEMI) do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP.

A bancada de ensaios (Figura 2) era composta por um conjunto motobomba marca Grundfos, modelo CM1-5, com potência nominal de 1 cv, vazão nominal $2,02\text{m}^3\text{h}^{-1}$ e altura manométrica nominal igual a 43,6m, rotação nominal de 3500 rpm e diâmetro de rotor igual a 90 mm, que foi responsável pela circulação da água na bancada. O motor deste conjunto contava com um inversor de frequência da marca WEG®, modelo CFW08, com a finalidade de permitir a variação de velocidade do motor de acordo com a pressão requerida no sistema em um dado momento, evitando assim o controle manual da pressão por meio de válvulas ou registros.

A bancada, em sua configuração básica, continha um sistema automatizado para a condução dos ensaios, em que o usuário inseria os dados de ensaio por intermédio da interface gráfica de um software e acionava a rotina de ensaio. A partir disso, o software gerenciava rotinas executadas por um módulo microcontrolado responsável pelo monitoramento do processo e controle dos atuadores. O sistema possuía recursos que permitiam: o controle e monitoramento contínuo da pressão de ensaio utilizando controle Proporcional, Integral, Derivativo (PID); determinação automatizada da vazão individual de 25 emissores instalados na bancada utilizando transdutor de pressão que determina as variações de nível no interior dos tubos coletores; monitoramento da temperatura da água e do ar; geração de relatórios de ensaio. Todas as variações intervenientes nos ensaios podiam ser visualizadas continuamente na interface gráfica do software.

Esta estrutura contava com uma linha de derivação que permitia a instalação de 25 seguimentos de tubos emissores em paralelo. Para o direcionamento da gota de cada emissor ao tubo coletor, foram utilizados funis de material acrílico, fabricados sob medida. Os tubos coletores eram de corpo cilíndrico, com diâmetro da seção circular de aproximadamente 20 cm e altura de aproximadamente 1 m.

A coleta dos dados de vazão dos emissores foi realizada a partir de um sistema de medição automatizado baseado na diferença de nível final e inicial de água nos tubos coletores. Para isso, utilizou-se um transmissor de pressão da marca ZÜRICH®, modelo Z.10.420 classe A5, com faixa de leitura de 0 a 100 mbar e válvulas solenoides da marca Ascoval®, que foram

responsáveis pelo fechamento e abertura automático do sistema de drenagem dos referidos tubos coletores.

A pressão durante cada ensaio foi monitorada com a utilização de um transmissor de pressão da marca ZURICH®, modelo Z.10.420 classe A4, com faixa de leitura de 0 a 5 bar.

Foi utilizado um reservatório para o suprimento de água necessário para o bombeamento, com capacidade de 300L e isolamento térmico constituído de placas duplas de isopor (na parede interior e exterior do reservatório), com espessura de aproximadamente 40 mm. Para evitar o encharcamento das placas no interior do reservatório, bem como o desprendimento de partículas de isopor, toda a superfície das mesmas recebeu tratamento com resina acrílica.

O sistema de aquecimento da água e controle de temperatura (configuração adicional da bancada) era composto por uma resistência elétrica trifásica com potência de 9000 W, um termostato digital modelo TIC-17RGT com sensor de temperatura integrado, que permite a configuração da temperatura alvo (setpoint) desejada, bem como os limites permissíveis para a variação da temperatura no reservatório, limites esses que determinam o acionamento ou desligamento da resistência elétrica; sua faixa de controle varia entre -50°C a 105°C, com resolução de 0,1% (entre -10°C e 100°C) e de 1% no restante da faixa.

O sistema de resfriamento da água no reservatório não possuía nenhuma ação automatizada, sendo a temperatura “alvo” atingida e mantida apenas com a adição manual de gelo filtrado comum e placas de IceFoam®, material congelante reutilizável atóxico, fabricadas pela empresa Polar Técnica®, que são geralmente utilizadas para o transporte de gelo e outros produtos de cadeia fria. A temperatura do tanque foi monitorada, aproximadamente, a cada 10 minutos com o auxílio um termômetro digital modelo DuGold DG10P, indicado para sistemas de refrigeração, com faixa de temperatura de -50°C a 70°C e precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$; também foi utilizado um termômetro de mercúrio da marca Incoterm®, com faixa de medição de -10°C a 110°C, com resolução de 1°C.

Outra configuração adicional foi necessária para monitorar a distribuição espacial da temperatura na bancada. Foram utilizados sensores a prova d'água modelo DS18B20, com faixa de medição entre -55°C a 125°C e com resolução de 0,5% (entre -10°C e 85°C) na entrada de cada um dos 25 emissores. Os dados instantâneos de temperatura eram coletados a cada 5 minutos utilizando um microcontrolador Arduino®, modelo Mega 2560 com módulos auxiliares para registro de data e hora de leitura (RTC DS3231) e armazenamento em cartão SD. Com esse sistema foi possível mapear a distribuição térmica de cada saída da linha de derivação da bancada,

garantindo assim a minimização do erro na estimativa da vazão dos tubos coletores em função da real temperatura da água em cada ponto.

Figura 2. Esquema da bancada de ensaios

3.2. Material

Foram avaliadas fitas gotejadoras com espessura de parede de 6, 8 e 9 (0,150; 0,200 e 0,225 mm, respectivamente) MIL (milésimo de polegada) com 3 tipos diferentes de emissores (Figura 3): emissor plano ou pastilha (A e B), emissor integrado e soldado (C e D) e emissor moldado ou em relevo (E). As especificações para cada material são mostradas na Tabela 2.

Figura 3. Emissores utilizados (A) emissor plano de fluxo turbulento TurboExcel®; (B) emissor plano de fluxo turbulento Streamline™; (C) Emissor contínuo de fluxo turbulento TurboTape®; (D) emissor contínuo de fluxo turbulento SilverDrip®; (E) emissor moldado de fluxo turbulento RainTape®

Tabela 2. Características gerais dos materiais utilizados

Fabricante	Modelo	Amostra	Vazão nominal q (L h ⁻¹)	Pressão de serviço P (kPa)	Espessura de parede (mm)	Espessura de parede (MIL*)
NaanDanJain®	Turbo Excel®	A1	2,00	70	0,150	6
		A2	2,00	90	0,200	8
Netafim™	Streamline™	B1	1,60	100	0,150	6
		B2	1,60	100	0,200	8
Golden Tree®	SilverDrip®	C1	1,70	70	0,150	6
		C2	1,44	100	0,200	8
NaanDanJain®	Turbo Tape®	D1	1,13	70	0,150	6
		D2	1,13	100	0,200	8
Rain Bird®	RainTape®	E1	1,00	55	0,225	9

*Milésimo de polegada

3.3. Curva vazão-pressão

Em cada ensaio, foram utilizados 25 seguimentos de fitas gotejadoras com aproximadamente 50 cm de comprimento cada, escolhidos de forma totalmente aleatória, submetidos a pressões no intervalo de 20 kPa a 100 kPa, com incrementos de 20 kPa. Para cada seguimento, apenas um único emissor foi utilizado para a medição de vazão em cada pressão aplicada, permitindo assim a determinação das curvas vazão pressão.

As curvas vazão pressão foram determinadas em cada uma das quatro temperaturas alvo: 20, 30, 40 e 50°C. Adicionalmente, também foi determinada a curva vazão pressão na temperatura de 23°C $\pm$ 3°C, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR ISO 9261 (2006), que serviu de base para os cálculos do índice de vazão relativa (IQR), sendo esta, portanto, a curva de referência dos testes. A matriz de testes é organizada na Tabela 3.

Tabela 3. Organização da matriz de testes

Amostra (A1 ... E1)					
Temperatura T (°C)	Pressão (kPa)				
	20	40	60	80	100
Vazão (Lh⁻¹)					
T de referência	q TrefP1	q TrefP2	q TrefP3	q TrefP4	q TrefP5
20	q T1P1	q T1P2	q T1P3	q T1P4	q T1P5
30	q T2P1	q T2P2	q T2P3	q T2P4	q T2P5
40	q T3P1	q T3P2	q T3P3	q T3P4	q T3P5
50	q T4P1	q T4P2	q T4P3	q T3P4	q T4P5

3.4. Ensaios para a caracterização das propriedades térmicas dos materiais

Com o objetivo de caracterizar cada material e observar seu comportamento quando submetido a diferentes condições de temperatura e diferentes esforços, foram realizados alguns testes baseados na norma ASAE S553 (2003). Algumas adaptações nas recomendações da norma foram realizadas com o intuito de adequar os testes ao tipo de análise desejada, visando dar destaque somente ao efeito da variação da temperatura e não a efeitos combinados de diferentes fatores.

A bancada de ensaio para esses testes específicos foi adaptada de forma a atender uma diferente disposição (Figura 4). O reservatório, o sistema de aquecimento e o controle da pressão de ensaio foram os mesmos descritos no item 5.1, a linha de derivação foi modificada e contou com três saídas equidistantes que permitiam a instalação de três linhas gotejadoras paralelamente. No início de cada linha de gotejamento foram instalados sensores a prova d'água modelo DS18B20. O monitoramento da temperatura foi realizado por meio da interface do software disponível pela plataforma Arduino®.

Figura 4. Esquema da vista superior da bancada de ensaio para os testes específicos de caracterização das propriedades térmicas dos materiais

3.5. Resistência à pressão hidrostática com temperatura elevada

Para este teste foram utilizadas três amostras de fitas gotejadoras com 1m de comprimento cada. Primeiramente as amostras foram submetidas à pressão de serviço indicada pelos seus respectivos fabricantes durante o período de 1 h a uma temperatura constante de $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$; após esse tempo de condicionamento, foram coletados os dados de vazão de cada emissor e medido o diâmetro externo de cada amostra com o auxílio de um micrômetro de varredura a laser, da marca Mitutoyo, modelo LSM 503 S, com capacidade de medição de 3 a 30 mm e resolução de 0,2 a 100 μm .

Na sequência, foi mantida a pressão de serviço, porém a temperatura da água foi elevada para $50^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ (temperatura máxima dos testes), na qual o sistema se manteve operante durante o período de 1 h; ao final, o diâmetro externo das fitas também foi medido. Após o sistema ser submetido a essa condição, as amostras foram novamente submetidas à pressão de serviço e temperatura $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 1h, seguida novamente da medição da vazão dos emissores e dos diâmetros externos das amostras.

A partir dos dados de vazão coletados anteriormente e posteriormente à aplicação da máxima temperatura, foi possível estimar a variação de vazão devido a condição de estresse térmico no qual o material foi submetido. Também foi possível observar se o diâmetro das fitas gotejadoras ao final do teste sofreu variação significativa devido ao efeito da alta temperatura.

Diferentemente do recomendado no item 8.6 da norma ASAE S553 (2003), a pressão serviço foi mantida igual em todas as etapas, pois este teste específico teve como objetivo avaliar

possíveis deformações plásticas no material, exclusivamente, pelo efeito da temperatura e não pelo efeito combinado de elevada temperatura e pressão.

3.6. Dilatação térmica linear

No sentido longitudinal da estrutura da bancada, paralelamente às três amostras, foi adicionada uma fita métrica com resolução de 1 mm, que teve como função principal a medição de possíveis variações no comprimento do material, bem como o auxílio no correto posicionamento das mesmas. Todas as amostras contavam com uma braçadeira de plástico ao final, que fechavam o final de linha e marcavam o comprimento de 1 m.

Primeiramente, as amostras foram condicionadas a sua pressão nominal de serviço durante o período de 1 h, a uma temperatura constante de $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Nesta etapa as amostras foram dispostas de tal forma que, cada braçadeira de cada linha de gotejamento, estivesse alinhada na mesma posição em relação a uma referência fixa (cabo de aço) que marcava seu comprimento inicial ($L_0 = 1 \text{ m}$) a partir da linha de derivação.

Sequencialmente, as amostras continuaram submetidas à sua pressão nominal de serviço, porém, operando com a temperatura da água constante à $50^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, durante o período de 1 h. Ao final do tempo de condicionamento, a deformação das amostras foi demarcada com o auxílio de um mecanismo móvel, que permitia alinhar a posição final das braçadeiras de plástico e auxiliava na medição da variação do comprimento da amostra (ΔL) em relação a sua posição inicial. Para isso, foi utilizado um paquímetro digital da marca Mitutoyo®, modelo CD-6”, com faixa de medição de 0 a 150 mm e resolução de 0,01 mm. O esquema de medição, bem como as ferramentas utilizadas, pode ser observado na Figura 5.

1. Linha fixa, marca 1 m de comprimento da amostra
2. Linha móvel, é posicionada após a dilatação
3. Medição entre a linha fixa e a linha móvel com paquímetro

Figura 5. Esquema de medição da variação de comprimento das fitas gotejadoras devido a dilatação térmica. Representação (A) da posição inicial das amostras sob a linha de referência fixa; (B) da dilatação do material após ser submetido a temperatura da água elevada e posicionamento da linha móvel de referência; (C) medição entre a linha fixa e a linha móvel com o auxílio de um paquímetro

Com os dados coletados, foi possível o cálculo do coeficiente de dilatação linear (α) para cada material estudado (Equação 12).

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} \quad (12)$$

em que, α : é o coeficiente de dilatação do material ($^{\circ}\text{C}^{-1}$); ΔL : diferença entre o comprimento inicial e final da amostra (m); ΔT : diferença entre temperatura inicial e final ($^{\circ}\text{C}$).

3.7. Variação do diâmetro externo

Neste ensaio foi monitorada a variação do diâmetro de uma amostra de cada material, submetidas a dez pressões de operação diferentes, no intervalo de 20 a 100 kPa, com incrementos de 10 kPa. A amostra, com aproximadamente 30 cm de comprimento, teve todos os seus

emissores obstruídos com o auxílio de adesivo termoplástico e fita adesiva de contato, garantindo assim que não houvesse escoamento de água durante o teste. Inicialmente a amostra foi condicionada a pressão mínima de ensaio (20 kPa) durante o período de 10 minutos a uma temperatura constante de $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, na qual se procedeu à medição do diâmetro externo com o uso de um micrômetro de varredura à laser, da marca Mitutoyo, modelo LSM 503 S, com capacidade de medição de 3 a 30 mm e resolução de 0,2 a 100 μm , que foi alinhado e fixado na bancada (Figura 6) de forma a monitorar o diâmetro no ponto médio do comprimento de cada amostra; o erro de leitura devido ao posicionamento é de $\pm 1\mu\text{m}$.

Sequencialmente, foram incrementados 10 kPa seguindo o mesmo procedimento citado anteriormente, até que se obtivesse os dez pontos diferentes de pressão, até o máximo de 100 kPa. Da mesma forma, também foi realizado o mesmo procedimento para a amostra submetida a temperatura máxima estudada ($50^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$).

Com esses dados foi possível estabelecer a curva experimental de deformação do diâmetro das fitas gotejadoras em função da temperatura e pressão aplicada.

Figura 6. Esquema de medição do diâmetro das amostras de fitas gotejadoras. (A) vista superior da bancada de ensaios; (B) representação em perspectiva de parte da bancada, onde fora acomodado o micrometro a laser

3.8. Análise de dados

Para a estimativa dos índices de vazão relativa dos emissores para cada temperatura e pressão, foi utilizada a relação entre a vazão na temperatura alvo e a vazão na temperatura de

referência dos testes (Equação 13), conforme recomendado no item 3.13 da norma ASAE S553 (2003). A temperatura de referência para cada condição de pressão e espessura de parede foi $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, considerada a temperatura de ensaio recomendada pela norma ABNTNBR ISO 9261 (2006).

$$\text{IQR} = \frac{q_i}{q_{\text{ref}}} \quad (13)$$

em que, **IQR**: Índice de vazão relativa; q_i : vazão no emissor na temperatura i (Lh^{-1}); q_{ref} : vazão de referência adotada nos ensaios, $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ (Lh^{-1}).

Para a comparação estatística entre as médias de vazão, utilizou-se o teste t-Student a um nível de significância de 5%. Para este teste há a limitação da comparação entre duas médias; portanto, foram comparadas as médias, do emissor operando na temperatura de referência e do emissor operando na temperatura alvo. As hipóteses formuladas para a aplicação do teste foram:

$$H_0: \bar{q}_{\text{ref}} = \bar{q}_i$$

$$H_a: \bar{q}_{\text{ref}} \neq \bar{q}_i.$$

Para a comparação entre as diferentes espessuras de parede também se utilizou o teste- t student; as hipóteses formuladas foram:

$$H_0: \left(\frac{\bar{q}_i}{\bar{q}_{\text{ref}}} \right)_{6 \text{ MIL}} = \left(\frac{\bar{q}_i}{\bar{q}_{\text{ref}}} \right)_{8 \text{ MIL}}$$

$$H_a: \left(\frac{\bar{q}_i}{\bar{q}_{\text{ref}}} \right)_{6 \text{ MIL}} \neq \left(\frac{\bar{q}_i}{\bar{q}_{\text{ref}}} \right)_{8 \text{ MIL}}$$

Ferramentas estatísticas foram utilizadas com objetivo de avaliar a qualidade do ajuste dos dados observados em relação aos modelos de estimativa de IQR propostos por outros autores (DECROIX; MALAVAL, 1985; RODRÍGUEZ-SINOBAS; JUANA; LOSADA, 1999); dentre essas ferramentas, o Root Mean Square Deviation (RMSE) (equação 14), o erro médio absoluto (EMA) (equação 15) e o coeficiente de correlação de Pearson (R) (equação 16).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{\text{obs}_i} - q_{\text{est}_i})^2}{N}} \quad (14)$$

$$\text{EMA} = \frac{\sum_{i=1}^n |q_{\text{obs}_i} - q_{\text{est}_i}|}{N} \quad (15)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (q_{obs_i} - \bar{q}_{obs})(q_{est_i} - \bar{q}_{est})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (q_{obs_i} - \bar{q}_{obs})^2)(\sum_{i=1}^n (q_{est_i} - \bar{q}_{est})^2)}} \quad (16)$$

em que, q_{obs_i} : é a vazão observada i (Lh^{-1}); q_{est_i} : é a vazão estimada i (Lh^{-1}); N : número de observações

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Ensaios preliminares

Inicialmente foram realizados testes para o reconhecimento da necessidade de ajustes na bancada de ensaios para esse tipo específico de experimento. Algumas adaptações e melhorias foram realizadas a fim de facilitar a coleta de dados. Algumas amostras de materiais utilizados em experimentos anteriores, disponíveis no laboratório, foram utilizadas nestes testes, uma vez que até o momento, o material específico do estudo não havia sido entregue pelos fabricantes.

Foram feitas as curvas vazão pressão em duas temperaturas distintas: na temperatura de referência $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e na temperatura máxima de ensaio igual a 50°C . Foram avaliados diferentes tipos de materiais com a bancada em sua configuração original (sem adaptações). Na temperatura elevada foi observada variabilidade significativa de temperatura dentro da própria bancada, bem como dificuldade de direcionamento da gota do emissor no seu respectivo coletor. Na Figura 7 é mostrada a distribuição dos dados do IQR em cada um dos 25 coletores; pode-se observar uma grande dispersão dos dados, principalmente nos coletores das extremidades (coletor número 1- extremidade à direita e coletor número 25 extremidade à esquerda), onde a temperatura da água nos extremos chegou a variar 12°C em relação a temperatura da água na entrada das linhas de gotejamento (centro). Outro fator observado neste primeiro teste foi a quantidade significativa de tempo necessário para a estabilização e equilíbrio da temperatura da água nos tubos (cerca de 1 h e 30 min).

Figura 7. Distribuição do IQR em diferentes pressões de ensaio para cada um dos 25 emissores com a bancada na configuração original

A fim de diminuir essa variabilidade de temperatura dentro da bancada, a montagem das amostras na mesma foi modificada. Anteriormente as amostras contavam com um fluxo contínuo da vazão entre uma tubulação de entrada, a amostra e uma tubulação de saída, sendo a circulação de água na bancada dada por um longo percurso que, por sua vez, permitia maior área para dissipação de energia térmica para o meio. Após a adaptação, cada amostra teve a sua tubulação de entrada de água mantida e tiveram as suas saídas fechadas com o auxílio de um conector final de linha. Essa simples adaptação propiciou menor variabilidade térmica na banca (cerca de 5°C entre as extremidades e a temperatura de entrada) e modificou significativamente o tempo de estabilização e equilíbrio da temperatura da água nos tubos, reduzida para aproximadamente 20 min. A Figura 8 mostra uma ligeira melhora na dispersão dos dados do IQR em cada um dos 25 coletores após esta adaptação.

Figura 8. Distribuição do IQR em diferentes pressões de ensaio para cada um dos 25 emissores com a bancada na sua configuração modificada

Contudo, ainda se observou demasiada dispersão dos dados devido ao direcionamento da gota do emissor no seu respectivo tubo coletor, principalmente na temperatura mais elevada. Assim, providenciou-se a inserção de funis condutores da bancada, que propiciaram menor dispersão dos dados (Figura 9).

Figura 9. Distribuição do IQR em diferentes pressões de ensaio para cada um dos 25 emissores com a bancada na sua configuração modificada e com a troca dos funis condutores

Na Figura 10 é ilustrada a distribuição da temperatura na bancada de ensaios. Para as temperaturas da água a 20°C, 30°C e 40°C a variação dentro da bancada permaneceu no limite de $\pm 1^\circ\text{C}$, enquanto para a temperatura de referência (23°C) este limite foi de $\pm 1,5^\circ\text{C}$ (menor do que o limite estipulado pela norma).

Para 50°C, o limite de temperatura apresentou um valor superior quando comparado às demais temperaturas alvo, com valor de $\pm 2,5^\circ\text{C}$. Observa-se que há uma tendência de temperaturas maiores que o valor alvo no centro da bancada e menores que o alvo nas extremidades. Isso se deve a grande dissipação de energia térmica, uma vez que para uma temperatura elevada, o gradiente térmico entre a temperatura da água e o ambiente é grande, dificultando o equilíbrio térmico entre a água e o ambiente.

Para todas as temperaturas utilizadas, buscou-se manter a temperatura do ambiente proporcional a da água. Para as temperaturas mais baixas (20°C e 23°C), isso foi realizado com o auxílio de um equipamento de ar condicionado; para as temperaturas de 30°C e 40°C, o próprio aquecimento do reservatório e o isolamento do laboratório de testes proporcionaram um bom equilíbrio térmico; porém, para a temperatura de 50°C não foi possível maior controle, uma vez que a alta temperatura tornava o espaço de trabalho muito quente, havendo a necessidade de ventilação e uso do ar condicionado durante o ensaio.

Figura 10. Distribuição espacial da temperatura da água na bancada de ensaios

4.2. Caracterização hidráulica dos emissores

Com os pares de valores de pressão e de vazão obtidos experimentalmente, foi possível a obtenção das curvas vazão-pressão e o ajuste das equações características de cada emissor estudado, para cada uma das cinco temperaturas alvo, utilizando o software Excel® para o ajuste das equações.

Na Figura 11 estão representadas as curvas vazão-pressão em diferentes temperaturas para o emissor do tipo plano de fluxo turbulento Streamline™, cujas fitas possuem espessura de parede igual a 6 e 8 MIL. Visualmente, todas as cinco curvas vazão-pressão, para cada espessura de parede, estão relativamente próximas entre si, indicando que, independentemente da temperatura água, a vazão do emissor apresenta a mesma tendência.

Mesmo apresentando tendência semelhante, cada temperatura da água proporcionou diferentes valores para a constante de proporcionalidade (K) e para o expoente de fluxo (x) das equações características para esse emissor, bem como diferentes valores do CV_f , como se observa nas Tabelas 6 e 7 (vide Anexos).

O teste t-Student para comparação de duas médias foi aplicado para as vazões, em cada pressão e temperatura, em relação à temperatura de referência ($23 \pm 3^\circ\text{C}$), indicando que não houve diferença significativa entre elas a um nível de significância de 5%, para ambas as

espessuras de parede. Em relação à vazão nominal declarada pelo fabricante ($1,6 \text{ Lh}^{-1}$ sob pressão de 100 kPa), a variação da vazão foi de $5,45\%$ e $1,53\%$ para as fitas de 6 e 8 MIL respectivamente.

Para todas as temperaturas estudadas os valores médios dos CV_f estão entre $2,70\%$ e $3,34\%$ para a espessura de parede de 6 MIL e $2,22\%$ e $2,27\%$ para a fita de 8 MIL de espessura.

Na Figura 12 são apresentadas as curvas vazão-pressão para o emissor plano com fluxo turbulento TurboExcel®, para as duas espessuras de parede. Semelhante ao emissor plano fabricado pela Streamline™, as curvas vazão-pressão estão bem próximas entre si, apresentando a mesma tendência. Foram ajustados valores para a constante de proporcionalidade (K) e para o expoente de fluxo (x) das equações características para esse emissor, nas diferentes temperaturas da água (Tabelas 8 e 9, nos Anexos). De acordo com o teste de comparação das médias das vazões entre as curvas e entre as espessuras de parede, a variação de vazão não foi significativa ($p > 0,05$).

Este emissor possui vazão nominal declarada pelo fabricante de $2,0 \text{ Lh}^{-1}$ quando submetido a pressão de 100 kPa . A diferença entre a vazão observada e a vazão nominal foi de $1,11\%$ e $3,03\%$ para as fitas de 6 e 8 MIL. Os valores médios do CV_f permaneceram abaixo de 2% .

Figura 12. Curvas vazão-pressão do emissor plano de fluxo turbulento TurboExcel® com espessura de parede de 6 e 8 MIL em diferentes temperaturas da água

Para os emissores planos de fluxo turbulento (Streamline™ e TurboExcel®), os resultados mostram pequena diferença nos valores da vazão média em função da temperatura da água e, também, entre os valores de vazão para o mesmo emissor integrado a tubos com espessuras de parede distintas. Porém, essas variações não se mostraram estatisticamente

significativas e, possivelmente, por este motivo, a maioria dos fabricantes desse tipo de material apresenta somente uma equação característica (ou dados de vazão e pressão) em temperatura padrão ($23\pm 3^{\circ}\text{C}$), para tubos com diferentes espessuras, equipados com o mesmo emissor.

Na Figura 13 são representadas as curvas vazão-pressão em diferentes temperaturas do emissor contínuo de fluxo turbulento, denominado SilverDrip®, integrados a diferentes espessuras de parede. Para este tipo de emissor, os resultados encontrados divergem consideravelmente dos apresentados anteriormente. É possível observar que, com o aumento da pressão aplicada, as curvas nas diferentes temperaturas se tornam cada vez mais distantes entre si, indicando que há um efeito considerável associado ao incremento de temperatura e da pressão de operação na vazão dos emissores. A média das vazões, a partir de 40 kPa, nas diferentes temperaturas foram estatisticamente significativas ($p < 0,05$) para as fitas de 6 e 8 MIL. Porém, entre as espessuras de parede não houve variação significativa ($p > 0,05$), embora os valores de vazão sejam muito diferentes.

A fita gotejadora com parede de 6 MIL, na curva de referência dos testes ($23\pm 3^{\circ}\text{C}$), apresentou uma vazão 20,54% maior do que a vazão correspondente a fita de 8 MIL (submetidas a 100 kPa), mesmo sendo equipadas com o mesmo modelo de emissor, resultado este significativo ($p < 0,05$). Porém, essa grande variação de vazão entre as espessuras de parede também é informada pelo fabricante, com um valor de aproximadamente 18,05%.

A variação entre a vazão estimada e a vazão nominal para esses emissores foi de 4,04% e 1,95%, para as fitas de 6 e 8 MIL respectivamente. Os valores médios do CV_f (Tabela 10, Anexo) mantiveram-se abaixo de 3% em todas as temperaturas estudadas, para a fita gotejadoras com 6 MIL de espessura de parede, enquanto para a fita de 8 MIL (Tabela 11, Anexo) estimou-se um valor máximo de 3,5%.

Figura 13. Curvas vazão-pressão do emissor contínuo de fluxo turbulento SilverDrip® com espessura de parede de 6 e 8 MIL em diferentes temperaturas da água

A fita gotejadora TurboTape®, com emissor contínuo de fluxo turbulento, apresenta um comportamento divergente ao observado para o emissor contínuo SilverDrip®. Como mostrado na Figura 14, no intervalo de pressão entre 20 e 40 kPa, todas as curvas vazão-pressão encontram-se praticamente sobrepostas, indicando assim que, independente da temperatura da água, a relação vazão-pressão do emissor se mantém, o que se confirma pelo teste de médias, cuja variação de vazão em função da temperatura para esse intervalo de pressão é não significativa a um nível de 5%. A partir de 40 kPa as curvas para ambas as espessuras de parede vão se distanciando, tornando o efeito combinado de temperatura da água e pressão mais evidente, principalmente para a fita com espessura de parede de 6 MIL. A partir de 60 kPa até 100 kPa a diferença entre as médias das vazões nas diferentes temperaturas é significativa ($p < 0,05$), tanto para a fita de 6 MIL, quanto para a de 8 MIL. Porém, a variação de vazão não é significativa entre as duas espessuras de espessuras de parede, evidenciando que a espessura da parede não afeta a sensibilidade do emissor às variações de temperatura.

Os valores médios do CV_f para as duas fitas apresentaram valores inferiores a 3% tanto para a fita com espessura de parede de 6 MIL (Tabela 12, Anexo), quanto para a fita de 8 MIL (Tabela 13, Anexo).

Figura 14. Curvas vazão-pressão do emissor contínuo de fluxo turbulento TurboTape® com espessura de parede de 6 e 8 MIL em diferentes temperaturas da água

Na Figura 15 estão representadas as curvas vazão-pressão para o emissor moldado modelo RainTape®. Este material já teve seu auge do uso há alguns anos atrás aqui no Brasil; hoje, a comercialização e a disponibilidade desse produto é praticamente ausente no mercado brasileiro. No mercado internacional ainda são utilizadas e comercializadas, estando, portanto, disponíveis para a compra; porém, para o caso brasileiro, a importação dessas fitas gotejadoras se revelou onerosa e exigia certa demanda de tempo de entrega, o que não tornou possível sua aquisição. Sendo assim, não houve experimentação com espessuras de parede variadas; o material utilizado já estava disponível em estoque.

Além da sua composição física ser diferente dos demais materiais, essa fita gotejadora apresentou também uma tendência diferente de comportamento quando submetida ao incremento térmico da água. As curvas vazão pressão de $23 \pm 3^\circ\text{C}$ e 20°C são praticamente sobrepostas, assim como as curvas de 30°C e 40°C , indicando que praticamente não há variação de vazão entre essas temperaturas. Porém, há uma variação significativa ($p < 0,05$) entre a curva de referência e a curva de maior temperatura; entretanto, diferente dos demais emissores, as maiores variações ocorrem nas pressões mais baixas, ou seja, com o incremento da pressão a variação de vazão devido a temperatura vai se tornando cada vez menor.

Os valores médios do CV_f variaram entre 1,65% e 2,31% para as diferentes temperaturas da água (Tabela 14, Anexo).

Figura 15. Curvas vazão-pressão do emissor moldado RainTape® com espessura de parede de 9 MIL em diferentes temperaturas da água

Cada tipo de emissor apresentou diferentes tendências em função da variação de temperatura da água; porém, alguns parâmetros estimados possuem a mesma classificação segundo normas e trabalhos disponíveis na literatura. Para todos os emissores e espessuras de parede das fitas, os CV_f foram menores que 7%, o que segundo as normas ABNT NBR ISO 9261 (2006) e ASABEEP405 (2014) são classificados como excelentes quanto a sua uniformidade. Em conformidade com outros estudos (AL-AMOUD; MATTAR; ATEIA, 2014; CLARK; LAMM; ROGERS, 2005; DOGAN; KIRNAK, 2010; RODRÍGUEZ-SINOBAS; JUANA; LOSADA, 1999; SENYIGIT; ILKHAN, 2017), não houve uma tendência específica dos dados de CV_f em relação às variações na temperatura da água.

A variação da vazão observada em relação à vazão nominal para todos os materiais não ultrapassou o máximo estipulado de 7%, em conformidade com este requisito da norma ABNT NBR ISO 9261 (2006).

4.3. Índice de vazão relativa (IQR)

O IQR refere-se à razão entre a vazão em determinada temperatura (q_i) e a vazão em uma temperatura de referência (q_{ref}). Portanto, quanto mais próximo de 1 o valor do IQR, menor é a variação da vazão em função da temperatura. Valores acima de 1 mostram que a variação devido à temperatura é ascendente, ou seja, quanto maior o incremento térmico maior será a vazão do emissor. Valores de IQR menores que 1 indicam que a vazão de um determinado emissor sofre um decréscimo quando a temperatura da água aumenta.

Na Figura 16 são apresentados os valores de IQR para o emissor plano de fluxo turbulento Streamline™, com duas espessuras de parede. Os IQR encontrados apresentam, em geral, valores menores do que 1, indicando que a vazão do emissor sofre um decréscimo com o acréscimo da temperatura da água. A maior variação de vazão encontrada, para ambas as espessuras de parede, corresponde à maior temperatura de teste (50°C), com valores de IQR de 0,959 para a fita com 6 MIL de espessura de parede, e de 0,960 para a fita de 8 MIL.

Figura 16. Índice de vazão relativa (IQR) em função da temperatura da água para o emissor do tipo plano de fluxo turbulento modelo Streamline™, integrado a fitas com diferentes espessuras de parede, sob pressão de operação de 100 kPa

O IQR em função da temperatura para o emissor plano de fluxo turbulento TurboExcel®, também apresentou forte tendência linear. Na Figura 17 observa-se que os valores de IQR são, em sua maioria, menores do que 1, indicando que a vazão deste emissor tende a diminuir com o aumento da temperatura. Os valores estimados de IQR que apresentaram maior variação de vazão, foram 0,970 e 0,962 para as fitas com espessura de parede de 6 e 8 MIL respectivamente, na temperatura de 50°C.

Figura 17. Índice de vazão relativa (IQR) em função da temperatura da água para o emissor plano de fluxo turbulento TurboExcel®, integrado a fitas com diferentes espessuras de parede, sob pressão de operação de 100 kPa

Com tendência ascendente de IQR em função da temperatura (Figura 18), o emissor contínuo de fluxo turbulento SilverDrip® apresentou valores iguais a 1,123 e 1,099 para as fitas com espessura de parede de 6 e 8 MIL, respectivamente. Esta tendência revela aumento da vazão do emissor quando submetido à maiores temperaturas da água.

Diferentemente dos emissores planos, uma função potencial (Tabela 15) indicou um melhor ajuste para esse tipo de material.

Figura 18. Índice de vazão relativa (IQR) em função da temperatura da água para o emissor do tipo contínuo de fluxo turbulento SilverDrip®, integrado a fitas de diferentes espessuras de parede, sob pressão de operação de 100 kPa

Para o emissor TurboTape® observou-se redução do IQR em função do aumento de temperatura, com a maior parte dos valores observados inferiores a 1. Na temperatura de 50°C os valores de IQR foram 0,944 para a fita de 6 MIL e de 0,956 para a de 8 MIL, enquanto para a temperatura de 20°C os valor ficou próximo de 1, mostrando que praticamente não há variação de vazão entre as temperatura de 20 e 23°C.

Figura 19. Índice de vazão relativa (IQR) em função da temperatura da água para o emissor contínuo de fluxo turbulento fabricado pela TurboTape®, integrado a fitas com diferentes espessuras de parede, sob pressão de operação de 100 kPa

O emissor moldado RainTape® (Figura 20) apresentou tendência crescente do IQR em função da temperatura, seguindo um modelo exponencial para o intervalo de temperatura analisado (Tabela 15). A maior variação devido à temperatura ocorreu a 50°C, assim como nos demais casos; porém, na menor pressão aplicada (20 kPa), com valor de IQR igual a 1,121.

Figura 20. Índice de vazão relativa (IQR) em função da temperatura da água para o emissor do tipo moldado de fluxo turbulento RainTape®, sob pressão de operação de 20 kPa

Essa tendência pode estar associada às características físicas dessa fita gotejadora, que é composta por uma parede dupla (*twin-wall*), a qual é formada por uma câmara de passagem do fluxo de água. Dentro desta câmara, a sua parede inferior (lisa) e a parede superior (que contém o labirinto), se mantêm menos comprimidas nas pressões mais baixas. Dessa forma, a seção de passagem da água é maior e o contato entre as paredes é menor, tornando o fluxo menos turbulento e mais passível à mudança de viscosidade da água devido a temperatura, o que resulta em menor perda carga e maior vazão. Por outro lado, quando a pressão no interior do tubo

aumenta, a câmara de passagem do fluxo tende a se comprimir e diminuir sua seção transversal, aumentando assim a turbulência da água no labirinto, reduzindo o efeito da temperatura da água na variação de vazão do emissor.

De forma geral, os valores de IQR possuem uma forte tendência linear para os emissores planos de fluxo turbulento, em conformidade com outros estudos já relatados (AL-AMOUD; MATTAR; ATEIA, 2014; DOGAN; KIRNAK, 2010; PARCHOMCHUK, 1976; SENYIGIT; ILKHAN, 2017; ZUR; TAL, 1981); porém, para os emissores contínuos de fluxo turbulento, o melhor ajuste do IQR em função da temperatura da água se deu por um modelo potencial; já para o emissor moldado o melhor ajuste foi exponencial. Clark et al. (2005) reportam que as relações lineares entre IQR e a temperatura encontradas em estudos anteriores, retratam o comportamento relacionado a emissores mais rígidos, nos quais o efeito da elasticidade do material é irrelevante. Para emissores contínuos e/ou moldados, especialmente para os acoplados a fitas de parede menos espessa, a menor rigidez e conseqüente maior elasticidade do material tende a contribuir para uma relação quadrática entre a variação de vazão e a temperatura da água.

Como pode ser observado, os valores de IQR, para os diferentes materiais, apresentam diferentes tendências. Para alguns emissores a tendência de variação da vazão em função da temperatura é ascendente, já em outros tipos de emissores essa relação é decrescente. Essas diferentes tendências, segundo estudos já relatados na literatura (DECROIX; MALAVAL, 1985; RODRÍGUEZ-SINOBAS; JUANA; LOSADA, 1999), estão relacionados ao valor do expoente de fluxo do emissor, em que para $x < 0,5$, há redução da vazão com aumento da temperatura; para $x = 0,5$ não há variação da vazão devido à temperatura da água; e para $x > 0,5$, há um aumento da vazão em resposta ao aumento da temperatura. Os dados obtidos neste trabalho apresentam essa mesma tendência relatada por esses autores.

Decroix & Malaval (1985) propuseram uma equação linear experimental (Equação 17) relacionando o expoente de fluxo do emissor com a variação da vazão, para temperaturas de 20°C (temperatura de referência) e 40°C (temperatura máxima), para diferentes tipos de emissores:

$$\text{IQR}(\%) = 57,35 T - 28,24 \quad (17)$$

Na Figura 21 é observa-se a distribuição de dados de diferentes autores (RODRÍGUEZ-SINOBAS; JUANA; LOSADA, 1999; SENYIGIT; ILKHAN, 2017; ZUR; TAL, 1981) e os dados observados neste estudo, em relação ao ajuste proposto por Decroix & Malaval (1985). A correlação entre os dados observados e o ajuste não são compatíveis, o que seria previsto, uma

vez que se trata de um ajuste de natureza experimental, com diferentes materiais e metodologias, porém a tendência dos dados se mostra semelhante.

Figura 21. IQR (%) em função da temperatura da água entre 20°C e 40°C: comparação entre o ajuste proposto por Decroix e Malaval e os dados observados deste estudo e de outros autores.

Rodríguez-Sinobas et al. (1999) também propuseram um ajuste do IQR em função do expoente de fluxo do emissor; porém, usando uma abordagem teórica utilizando uma análise de similaridade (Equação 18):

$$q = \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{-0,603 (1-2x)} K p^x \quad (18)$$

no intervalo de 20°C a 40°, para: $p_{\text{mín}} \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{-1,206} < p < p_{\text{máx}} \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{-1,206}$

em que, T: é a temperatura máxima (°C); T_{ref} : é a temperatura de referência (°C); x: é o expoente de fluxo do emissor; $p_{\text{mín}}$: é a pressão mínima de operação do emissor (kPa); $p_{\text{máx}}$: é pressão máxima de operação do emissor (kPa). Essa abordagem teórica considera como única fonte de variação da vazão o efeito da viscosidade da água.

Considerando que $T = T_{\text{ref}}$, a equação (18) toma a forma da equação (8). Dividindo a equação (18) pela equação (8), mantendo constante a pressão e os parâmetros K e x, pode-se escrever IQR como:

$$\text{IQR} = \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{-0,603 (1-2x)} \quad (19)$$

Na Figura 22 observa-se a distribuição de dados dos diferentes autores (RODRÍGUEZ-SINOBAS; JUANA; LOSADA, 1999; SENYIGIT; ILKHAN, 2017; ZUR; TAL, 1981) e os dados observados neste estudo, em relação ao ajuste proposto por Rodríguez-Sinobas et al. (1999).

Figura 22. IQR (%) em função da temperatura da água a 20°C e 40°C: comparação entre o ajuste proposto por Rodríguez-Sinobas et al. (1999), os dados observados deste estudo e dados observados por outros autores

Em relação à proposta de Decroix e Malaval (1985), o modelo teórico apresenta melhor ajuste aos dados observados, que é confirmado pelos valores de RMSE e do coeficiente de correlação de Pearson. Essa resposta infere que as variações para os emissores utilizados neste estudo ocorrem, principalmente, devido ao efeito da viscosidade da água. O efeito do material de composição na sensibilidade da vazão dos emissores, diferentemente do resultado encontrado por Clark et al. (2005), não apresenta grande influência.

A relação entre os valores estimados por ambos os modelos e observados estão apresentados na Figura 23.

Figura 23. Distribuição dos dados observados nos ensaios e estimados pelos modelos (A) Decroix & Malaval (1985) e (B) Rodrigues-Sinobas (1999)

Alguns estudos (DOGAN; KIRNAK, 2010; SENYIGIT; ILKHAN, 2017), definem como resposta padrão para os emissores de fluxo turbulento o aumento da vazão com o incremento da temperatura da água; no entanto, essa resposta estaria associada apenas aos emissores que apresentam expoente de fluxo maior do que 0,5. Os emissores comerciais possuem uma gama de valores de expoentes de fluxo, alguns com expoentes menores do que 0,5 e alguns com expoentes maiores, mas, dentro de certa faixa, todos são considerados de fluxo turbulento, resultando diferentes respostas de vazão pelo aumento da temperatura para cada emissor. Neste trabalho, observou-se que o aumento da vazão em função da temperatura da água não é uma resposta padrão, mas, depende do valor do expoente de fluxo do emissor.

4.4. Resistência a pressão hidrostática em temperatura elevada

Na Tabela 4 são apresentados os valores de variação da vazão (q_{var}) bem como a variação do diâmetro (D_{var}) para as diferentes espessuras de parede dos materiais estudados. Para todos os materiais testados as variações de diâmetro foram pequenas, sugerindo que o material não sofre deformações plásticas quando submetido a uma temperatura de até 50°C. O tubo sofreu uma dilatação térmica quando submetido a uma temperatura elevada, porém, retornou ao seu estado original ao ser novamente submetido à temperatura de referência. Segundo o Plastic Pipe Institute (2008), a faixa de temperatura de operação típica para tubos de polietileno pressurizados é de -17,77°C a 60°C, podendo esta faixa de temperatura ser mais ampla ou mais restrita de acordo com as condições em que o material é submetido.

A variação de vazão para os emissores planos de fluxo turbulento, para as diferentes espessuras de parede e para os diferentes fabricantes, apresentou valores menores que 0,5%, indicando que o estresse térmico praticamente não interfere em suas dimensões, a ponto de não haver variação significativa da vazão. Porém, de acordo com o teste aplicado, não é possível afirmar se longos períodos de estresse térmico, bem como oscilações térmicas constantes podem acarretar distúrbios na vazão dos emissores.

Tabela 4. Variação da vazão e do diâmetro das fitas gotejadoras após serem submetidas a um estresse térmico de 50 °C

Material	Q _{var} %	D _{var} %
Streamline™		
6 MIL	0,408	1,326
8 MIL	0,382	1,479
TurboExcel®		
6 MIL	0,273	0,642
8 MIL	0,316	1,252
SilverDrip®		
6 MIL	1,573	1,294
8 MIL	1,194	1,370
Turbo Tape®		
6 MIL	1,768	1,243
8 MIL	1,233	1,175
RainTape®		
9 MIL	1,276	1,289

Os emissores contínuos também apresentaram uma pequena variação da vazão após submetido a alta temperatura, com valores inferiores a 1,5%. A diferença de variação entre os emissores planos e os emissores contínuos pode estar associada ao seu tamanho e à sua composição plástica. Os emissores planos são pequenos e mais rígidos e, segundo Patil (2013), são em geral fabricados com PEAD, material este que é menos susceptível à temperatura quando comparado aos demais tipos de polietileno. Já os emissores contínuos são mais dúcteis e flexíveis e possuem uma área de exposição relativamente grande, uma vez que se estendem por todo o comprimento da fita. Não se sabe ao certo de qual material ou mistura de material é composto, supostamente, constitui-se de tipos de polietilenos ligeiramente mais sensíveis às variações de temperatura.

4.5. Dilatação térmica linear

Os valores estimados dos coeficientes de dilatação térmica linear foram bem próximos para todos os materiais, em torno $0,0002 \text{ m m}^{-1}\text{C}^{-1}$, que é considerado um valor médio para os diferentes tipos de polietileno. Com os valores obtidos não é possível estabelecer uma diferença significativa entre os materiais, presumindo-se que todos podem ser constituídos por um tipo semelhante de resina ou blenda polimérica.

Os valores de α para as fitas com espessura de parede de 6 MIL são ligeiramente superiores quando comparados aos das fitas de 8 MIL, sugerindo que a espessura de parede exerce influência, mesmo que pequena, na dilatação do material. No entanto, a partir da metodologia utilizada, não é possível afirmar com segurança se há diferença significativa entre os coeficientes de dilatação térmica linear nas diferentes espessuras de parede.

Tabela 5. Coeficiente de dilatação térmica linear estimados para os diferentes materiais e espessuras de parede

Material	α ($\text{m m}^{-1}\text{C}^{-1}$)
Streamline™	
6 MIL	0,00026
8 MIL	0,00018
TurboExcel®	
6 MIL	0,00023
8 MIL	0,00019
SilverDrip®	
6 MIL	0,00027
8 MIL	0,00026
TurboTape®	
6 MIL	0,00024
8 MIL	0,00021
RainTape®	
9 MIL	0,00029

4.6. Variação do diâmetro externo

Nas Figuras 24 e 25 são apresentadas as curvas de variação do diâmetro em função da pressão, nas temperaturas de 23°C e 50°C , das fitas gotejadoras com emissor plano integrado, com diferentes espessuras de parede.

Figura 24. Variação do diâmetro da fita gotejadora com o emissor TurboExcel® integrado, submetida a diferentes pressões de operando com temperaturas da água de 23°C e 50°C

Figura 25. Variação do diâmetro da fita gotejadora com o emissor Streamline™ integrado, submetida a diferentes pressões operando com temperaturas da água de 23°C e 50°C

Tanto para a fita Streamline™, quanto para a fita TurboExcel®, para as duas espessuras de parede, a deformação do diâmetro seguiu uma tendência linear nas pressões aplicadas, ou seja, a variação do diâmetro se mostrou diretamente proporcional à variação de pressão em ambas as temperaturas.

Para a fita Streamline™, com espessura de parede de 6 MIL, na temperatura mais alta, a variação do diâmetro foi de 2,59% para uma variação de pressão de 20 a 100 kPa. Na temperatura mais baixa a variação do diâmetro foi 1,39% na mesma variação de pressão. Para a fita com espessura de parede de 8 MIL, as variações foram de 2,37% e 1,51%, nas temperaturas de 50°C e 23°C respectivamente, no mesmo intervalo de variação de pressão

Para as fitas com o emissor TurboExcel®, a variação foi de 2,13% à 50°C e 1,38% à 23°C para a fita de 6 MIL, enquanto para a fita de parede mais espessa (8 MIL), esses valores foram de 2,48% e 1,58%, respectivamente. Para ambos os materiais, a porcentagem de variação apresentou valores bem semelhantes.

As fitas constituídas por emissores contínuos (Figuras 26 e 27), para as duas espessuras de parede, apresentaram uma tendência de variação do diâmetro diferente para as duas temperaturas. Para a temperatura de referência, o diâmetro seguiu uma relação potencial (Tabela 16) com a pressão aplicada; já para a temperatura mais elevada a tendência foi linear (Tabela 17, Anexo).

Figura 26. Variação do diâmetro da fita gotejadora com o emissor SilverDrip® integrado submetida a diferentes pressões operando com temperaturas da água de 23°C e 50°C

Figura 27. Variação do diâmetro da fita gotejadora com o emissor TurboTape® integrado submetida a diferentes pressões operando com temperaturas da água de 23°C e 50°C

Para a temperatura mais alta (50°C), a variação do diâmetro foi de 2,42% para uma variação de pressão de 20 a 100 kPa. Para a temperatura de referência (23°C) essa variação foi de 1,31%, para a fita SilverDrip® 6 MIL. Para a fita de 8 MIL, a variação foi menor quando comparada a fita de parede menos espessa, com variações de 1,79% e 1,16%, nas temperaturas de 50°C e 23°C respectivamente, na mesma variação de pressão.

Para as fitas TurboTape®, essa variação foi de 2,11% (23°C) e de 3,67% (50°C) para a espessura de parede 6 MIL, enquanto para a parede de 8 MIL, esses valores foram de 3,20% a 50°C e 1,95% em 23°C.

A fita gotejadora RainTape® seguiu uma tendência de variação do diâmetro similar a encontrada para as demais fitas com emissores contínuos integrados, porém com uma variação substancialmente maior, sendo as variações de 7,77% para a temperatura de 50°C e de 6,17% para temperatura de 23°C, na variação de pressão de 20 a 100 kPa.

Figura 28. Variação do diâmetro da fita gotejadora RainTape® submetida a diferentes pressões operando com temperaturas da água de 23°C e 50°C

5. CONCLUSÕES

As curvas vazão-pressão para os diferentes materiais e espessuras de parede, apresentaram diferentes valores para a constante de proporcionalidade (K) e para o expoente de fluxo (x) das equações características dos emissores em função da temperatura da água. Para os emissores planos, as curvas nas diferentes temperaturas permaneceram próximas, indicando que a resposta da vazão do emissor em diferentes pressões sofre pouca variação por efeitos da temperatura da água. Os emissores contínuos apresentaram maiores variações entre as curvas nas pressões elevadas. De forma contrária, o emissor Rain Tape® apresentou maior variação de vazão devido ao efeito da temperatura na menor pressão aplicada (20 kPa).

Os resultados obtidos indicam que a sensibilidade do emissor em função da temperatura da água está associada ao valor do expoente de fluxo do emissor. Não houve correlação entre a temperatura da água e os valores de CV_f .

Para nenhum dos materiais houve diferença significativa ($p > 0,05$) na variação de vazão dos emissores nas diferentes espessuras de parede, indicando que a espessura de parede não influencia a vazão do emissor em razão de variações de temperatura.

Os valores de IQR para os diferentes materiais, apresentaram diferentes tendências. Para os emissores planos de fluxo turbulento, o valor de IQR em função da temperatura apresentou uma tendência decrescente e fortemente linear. Para os emissores contínuos de fluxo turbulento, o melhor ajuste do IQR em função da temperatura da água se deu por um modelo potencial; porém, para o modelo SilverDrip® a tendência foi ascendente, enquanto para o emissor Turbo Tape®, foi decrescente. O IQR para o emissor moldado foi crescente e obteve-se ajuste exponencial em função da temperatura.

O diâmetro externo de todas as fitas gotejadoras apresentou deformação proporcional à pressão aplicada, quando submetidas à temperatura de 50°C. Entretanto, para a temperatura de 23°C somente as fitas com emissores planos integrados seguiram esse mesmo padrão. As fitas com emissores contínuos e moldado apresentaram uma tendência potencial para a deformação do diâmetro em função da pressão aplicada.

ANEXOS

5.1. Tabelas com os dados da caracterização hidráulica dos gotejadores nas diferentes temperaturas da água

Tabela 6. Caracterização hidráulica Streamline™ 6 MIL

Streamline™ 6 MIL (0,150 mm)						
Temperatura °C	Pressão kPa	Vazão Lh ⁻¹	K	x	CV _f	R ²
20±1°C	20	0,7482			0,0263	
	40	1,0073			0,0247	
	60	1,2090	0,1978	0,4424	0,0294	0,9860
	80	1,3812			0,0266	
	100	1,5162			0,0278	
23±1,5°C	20	0,7410			0,0343	
	40	0,9837			0,0267	
	60	1,1783	0,1883	0,4505	0,0238	0,9844
	80	1,3526			0,0260	
	100	1,5127			0,0300	
30±1°C	20	0,7462			0,0349	
	40	0,9828			0,0330	
	60	1,1777	0,1981	0,4372	0,0337	0,9782
	80	1,3486			0,0329	
	100	1,4892			0,0324	
40±1°C	20	0,7405			0,0321	
	40	0,9634			0,0325	
	60	1,1567	0,1963	0,4353	0,0318	0,9793
	80	1,3222			0,0306	
	100	1,4685			0,0304	
50±2,5°C	20	0,7378			0,0288	
	40	0,9488			0,0316	
	60	1,1421	0,1776	0,4569	0,0295	0,9800
	80	1,3176			0,0310	
	100	1,4502			0,0294	

Tabela 7. Caracterização hidráulica Streamline™ 8 MIL

Streamline™ 8 MIL (0,200 mm)						
Temperatura °C	Pressão kPa	Vazão Lh ⁻¹	K	x	CV _f	R ²
20±1°C	20	0,7482	0,1840	0,4657	0,0288	0,9918
	40	1,0366			0,0247	
	60	1,2452			0,0226	
	80	1,4070			0,0192	
	100	1,5692			0,0172	
23±1,5°C	20	0,7436	0,1836	0,4667	0,0226	0,9915
	40	1,0271			0,0219	
	60	1,2402			0,0212	
	80	1,4197			0,0223	
	100	1,5754			0,0230	
30±1°C	20	0,7284	0,1779	0,4714	0,0161	0,9912
	40	1,0162			0,0222	
	60	1,2255			0,0277	
	80	1,4033			0,0332	
	100	1,5602			0,0360	
40±1°C	20	0,7536	0,1935	0,4488	0,0166	0,9900
	40	1,0074			0,0214	
	60	1,2128			0,0268	
	80	1,3876			0,0312	
	100	1,5334			0,0374	
50±2,5°C	20	0,7364	0,1962	0,4427	0,0283	0,9872
	40	0,9903			0,0243	
	60	1,1924			0,0242	
	80	1,3653			0,0241	
	100	1,5195			0,0243	

Tabela 8. Caracterização TurboExcel® 6 MIL

TurboExcel® 6 MIL (0,150 mm)						
Temperatura °C	Pressão kPa	Vazão Lh ⁻¹	K	x	CV _f	R ²
20±1°C	20	0,9398	0,2311	0,4696	0,0171	0,9915
	40	1,3164			0,0139	
	60	1,5893			0,0173	
	80	1,8174			0,0179	
	100	2,0223			0,0172	
23±1,5°C	20	0,9394	0,2275	0,4744	0,0156	0,9957
	40	1,3149			0,0140	
	60	1,5855			0,0152	
	80	1,8184			0,0151	
	100	2,0227			0,0177	
30±1°C	20	0,9394	0,214	0,4862	0,0142	0,9956
	40	1,3029			0,0158	
	60	1,5752			0,0163	
	80	1,8013			0,0159	
	100	2,0014			0,0157	
40±1°C	20	0,9381	0,2326	0,465	0,0186	0,9960
	40	1,2936			0,0173	
	60	1,5639			0,0139	
	80	1,7888			0,0128	
	100	1,9838			0,0163	
50±2,5°C	20	0,9318	0,2306	0,4625	0,0188	0,9955
	40	1,2846			0,0182	
	60	1,5482			0,0157	
	80	1,7679			0,0161	
	100	1,9627			0,0146	

Tabela 9. Caracterização hidráulica TurboExcel® 8 MIL

TurboExcel® 8 MIL (0,200 mm)						
Temperatura °C	Pressão kPa	Vazão Lh ⁻¹	K	x	CV _f	R ²
20±1°C	20	0,9602			0,0125	
	40	1,3411			0,0131	
	60	1,6267	0,2357	0,4709	0,0111	0,9977
	80	1,8584			0,0108	
	100	2,0613			0,0114	
23±1,5°C	20	0,9624			0,0112	
	40	1,3421			0,0112	
	60	1,6211	0,2349	0,4717	0,0105	0,9979
	80	1,8581			0,0114	
	100	2,0608			0,0112	
30±1°C	20	0,9447			0,0149	
	40	1,3212			0,0107	
	60	1,5964	0,2297	0,4731	0,0110	0,9975
	80	1,8226			0,0110	
	100	2,0321			0,0130	
40±1°C	20	0,9503			0,0112	
	40	1,3145			0,0105	
	60	1,5834	0,2379	0,4631	0,0102	0,9980
	80	1,8072			0,0095	
	100	2,0033			0,0090	
50±2,5°C	20	0,9455			0,0123	
	40	1,3030			0,0116	
	60	1,5599	0,2412	0,4571	0,0105	0,9976
	80	1,7830			0,0099	
	100	1,9774			0,0098	

Tabela 10. Caracterização hidráulica SilverDrip® 6 MIL

SilverDrip® 6 MIL (0,150 mm)						
Temperatura °C	Pressão kPa	Vazão Lh ⁻¹	K	x	CV _f	R ²
20±1°C	20	0,6872	0,121	0,5712	0,0277	0,9903
	40	0,9881			0,0239	
	60	1,2380			0,0257	
	80	1,4727			0,0264	
	100	1,6964			0,0260	
23±1,5°C	20	0,7045	0,1188	0,5862	0,0231	0,9923
	40	1,0243			0,0275	
	60	1,3094			0,0236	
	80	1,5441			0,0253	
	100	1,7689			0,0244	
30±1°C	20	0,7112	0,1201	0,5919	0,0279	0,9893
	40	1,0559			0,0232	
	60	1,3654			0,0308	
	80	1,6054			0,0374	
	100	1,8475			0,0262	
40±1°C	20	0,7372	0,1249	0,5915	0,0251	0,9923
	40	1,1070			0,0236	
	60	1,4064			0,0228	
	80	1,6805			0,0269	
	100	1,8990			0,0265	
50±2,5°C	20	0,7843	0,1345	0,5854	0,0216	0,9930
	40	1,1632			0,0242	
	60	1,4827			0,0212	
	80	1,7531			0,0225	
	100	1,9869			0,0268	

Tabela 11. Caracterização hidráulica SilverDrip® 8 MIL

SilverDrip® 8 MIL (0,200 mm)						
Temperatura °C	Pressão kPa	Vazão Lh ⁻¹	K	x	CV _f	R ²
20±1°C	20	0,5896	0,1093	0,5580	0,0280	0,9901
	40	0,8341			0,0261	
	60	1,0550			0,0293	
	80	1,2546			0,0298	
	100	1,4313			0,0194	
23±1,5°C	20	0,5985	0,1050	0,5711	0,0288	0,9887
	40	0,8494			0,0299	
	60	1,0831			0,0292	
	80	1,2782			0,0277	
	100	1,4681			0,0283	
30±1°C	20	0,6077	0,1048	0,5779	0,0158	0,9888
	40	0,8712			0,0257	
	60	1,1092			0,0309	
	80	1,3161			0,0384	
	100	1,5093			0,0451	
40±1°C	20	0,6152	0,1034	0,5918	0,0206	0,9902
	40	0,9209			0,0322	
	60	1,1733			0,0362	
	80	1,3872			0,0464	
	100	1,5874			0,0525	
50±2,5°C	20	0,6203	0,1037	0,5995	0,0304	0,9916
	40	0,9773			0,0236	
	60	1,2186			0,0212	
	80	1,4331			0,0268	
	100	1,6619			0,0239	

Tabela 12. Caracterização hidráulica TurboTape® 6 MIL

TurboTape® 6 MIL (0,150 mm)						
Temperatura °C	Pressão kPa	Vazão Lh ⁻¹	K	x	CV _f	R ²
20±1°C	20	0,5257	0,1334	0,4543	0,0300	0,9861
	40	0,7125			0,0261	
	60	0,8533			0,0285	
	80	0,9725			0,0277	
	100	1,0847			0,0265	
23±1,5°C	20	0,5155	0,1315	0,4571	0,0295	0,9872
	40	0,7097			0,0285	
	60	0,8583			0,0257	
	80	0,9786			0,0259	
	100	1,0758			0,0269	
30±1°C	20	0,5118	0,1371	0,4455	0,0251	0,9877
	40	0,7140			0,0245	
	60	0,8594			0,0247	
	80	0,9684			0,0248	
	100	1,0587			0,0238	
40±1°C	20	0,5126	0,1477	0,4223	0,0228	0,9857
	40	0,7083			0,0277	
	60	0,8447			0,0248	
	80	0,9426			0,0233	
	100	1,0279			0,0260	
50±2,5°C	20	0,5112	0,1429	0,4227	0,0233	0,9874
	40	0,6979			0,0224	
	60	0,8289			0,0271	
	80	0,9335			0,0227	
	100	1,0211			0,0260	

Tabela 13. Caracterização hidráulica TurboTape® 8 MIL

TurboTape® 8 MIL (0,200 mm)						
Temperatura °C	Pressão kPa	Vazão Lh ⁻¹	K	x	CV _f	R ²
20±1°C	20	0,5070	0,1218	0,4827	0,0253	0,9895
	40	0,7280			0,0237	
	60	0,8866			0,0290	
	80	1,0220			0,0213	
	100	1,1279			0,0235	
23±1,5°C	20	0,5020	0,1178	0,4912	0,0284	0,9887
	40	0,7290			0,0287	
	60	0,8896			0,0270	
	80	1,0152			0,0181	
	100	1,1239			0,0275	
30±1°C	20	0,5092	0,1243	0,4762	0,0136	0,9879
	40	0,7285			0,0216	
	60	0,8765			0,0290	
	80	1,0055			0,0203	
	100	1,0984			0,0267	
40±1°C	20	0,5137	0,1313	0,4597	0,0118	0,9853
	40	0,7281			0,0181	
	60	0,8782			0,0214	
	80	0,9941			0,0246	
	100	1,0901			0,0261	
50±2,5°C	20	0,5080	0,1312	0,4581	0,0264	0,9843
	40	0,7206			0,0266	
	60	0,8675			0,0264	
	80	0,9839			0,0276	
	100	1,0808			0,0328	

Tabela 14. Caracterização hidráulica RainTape® 9 MIL

Rain Tape® 9 MIL (0,225 mm)						
Temperatura °C	Pressão kPa	Vazão Lh ⁻¹	K	x	CV _f	R ²
20±1°C	20	0,5152			0,0206	
	40	0,7302			0,0220	
	60	0,8816	0,1308	0,4631	0,0202	0,9897
	80	1,0028			0,0263	
	100	1,0948			0,0205	
23±1,5°C	20	0,5155			0,0295	
	40	0,7348			0,0221	
	60	0,8904	0,1299	0,4671	0,0221	0,9902
	80	1,0080			0,0206	
	100	1,1085			0,0214	
30±1°C	20	0,5320			0,0251	
	40	0,7728			0,0205	
	60	0,9273	0,1354	0,4672	0,0201	0,9905
	80	1,0512			0,0205	
	100	1,1533			0,0174	
40±1°C	20	0,5518			0,0228	
	40	0,7827			0,0206	
	60	0,9355	0,1459	0,4516	0,0185	0,9919
	80	1,0567			0,0178	
	100	1,1556			0,0157	
50±2,5°C	20	0,5779			0,0170	
	40	0,8034			0,0161	
	60	0,9539	0,1661	0,4238	0,0164	0,9922
	80	1,0642			0,0162	
	100	1,1608			0,0168	

5.2. Equações experimentais ajustadas de IQR em função da temperatura

Tabela 15. Equações ajustadas para o IQR em função da temperatura para os diferentes materiais estudados

Material	Equação	Coefficiente de determinação (R ²)
Streamline™ 6 MIL	$IQR = -0,0014 T + 1,0297$	0,9918
Streamline™ 8 MIL	$IQR = -0,0013 T + 1,0238$	0,9676
TurboExcel® 6 MIL	$IQR = -0,0010 T + 1,0190$	0,9988
TurboExcel® 8 MIL	$IQR = -0,0013 T + 1,0250$	0,9979
SilverDrip® 6 MIL	$IQR = 0,575 T^{0,172}$	0,9979
SilverDrip® 8 MIL	$IQR = 0,652 T^{0,134}$	0,9959
TurboTape® 6 MIL	$IQR = 1,243 T^{0,007}$	0,9761
TurboTape® 8 MIL	$IQR = 1,178 T^{0,05}$	0,9822
RainTape® 9 MIL	$IQR = 0,923 e^{0,0038T}$	0,9931

5.3. Equações experimentais ajustadas do diâmetro em função da pressão aplicada para as diferentes temperaturas

Tabela 16. Equações ajustadas para o diâmetro das fitas gotejadoras em função da pressão para a temperatura de $23 \pm 1,5$ °C

Material	Equação	Coefficiente de determinação (R ²)
Streamline™ 6 MIL	$D = 0,0027P + 15,955$	0,9968
Streamline™ 8 MIL	$D = 0,0030 P + 16,430$	0,9919
TurboExcel® 6 MIL	$D = 0,0026 P + 16,039$	0,9884
TurboExcel® 8 MIL	$D = 0,0031 P + 16,031$	0,9945
SilverDrip® 6 MIL	$D = 16,016 P^{0,007}$	0,9860
SilverDrip® 8 MIL	$D = 15,688 P^{0,007}$	0,9962
TurboTape® 6 MIL	$D = 15,429 P^{0,013}$	0,9968
TurboTape® 8 MIL	$D = 15,542 P^{0,011}$	0,9777
RainTape® 9 MIL	$D = 14,506 P^{0,636}$	0,9981

Tabela 17. Equações ajustadas para o diâmetro das fitas gotejadoras em função da pressão para a temperatura de $50 \pm 2,5$ °C

Material	Equação	Coefficiente de determinação (R ²)
Streamline™ 6 MIL	$D = 0,0051 P + 15,968$	0,9985
Streamline™ 8 MIL	$D = 0,0049 P + 16,528$	0,9993
TurboExcel® 6 MIL	$D = 0,0043 P + 16,157$	0,9951
TurboExcel® 8 MIL	$D = 0,0049 P + 16,164$	0,9919
SilverDrip® 6 MIL	$D = 0,0050 P + 16,416$	0,9988
SilverDrip® 8 MIL	$D = 0,0034 P + 16,085$	0,9936
TurboTape® 6 MIL	$D = 0,0073 P + 15,969$	0,9950
TurboTape® 8 MIL	$D = 0,0062 P + 16,062$	0,9963
RainTape® 9 MIL	$D = 0,0157 P + 16,311$	0,9919

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 9261: Agricultural irrigation equipment. Emitters and emitting pipe. Specification and test methods. São Paulo, 2006.
- AL-AMOUD, A. I.; MATTAR, M. A.; ATEIA, M. I. Impact of water temperature and structural parameters on the hydraulic labyrinth-channel emitter performance. *Spanish Journal of Agricultural Research*, v. 12, n. 3, p. 580–593, 2014.
- ALI, M. H. *Practices of Irrigation & On-farm Water Management: Volume 2*. Springer ed. New York, 2011.
- ALMANZA, O.; RODRÍGUEZ-PÉREZ, M. A.; DE SAJA, J. A. Measurement of the thermal diffusivity and specific heat capacity of polyethylene foams using the transient plane source technique. *Polymer International*, v. 53, n. 12, p. 2038–2044, 2004.
- ANDRADE, L. A. DE. Estudo da uniformidade de emissão de água utilizando diferentes espaçamentos entre gotejadores na linha lateral. Tese de doutorado. Universidade Paulista “Julio Mesquita”, 2009.
- ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers. *Design and Installation of Microirrigation Systems*. St Joseph, 2014.
- BARBOSA, L. A. et al. Polietileno de baixa densidade-PEBD: mercado, produção, principais propriedades e aplicações. *Espacios*, v. 38, n. 17, p. 10, 2017.
- BELAN, L. L.; Xavier, T. M. T.; Torres, H.; Toledo, J. V.; Pezzopane, J. E. Dinâmica entre temperaturas do ar e do solo sob duas condições de cobertura. *Revista Acadêmica de Ciências Agrárias e Ambientais*, v.11, Supl.1, p. 147-154, 2013.
- BOLSONI, E. Estudo da reprocessabilidade do polietileno de baixa densidade. Dissertação de mestrado. Universidade estadual de Campinas, 2001.
- BRASKEM. Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM) UTEC3041. Folha de dados. n. 6, p. 1-2, 2014.

CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.; ROSSETI, K. DE A. C. Pavimentação Asfáltica: Contribuição no Aquecimento de Áreas Urbanas. *Engineering and Science*. v. 1, n. 3, p. 64-72, 2015.

CLARK, G. A.; LAMM, F. R.; ROGERS, D. H. Sensitivity of thin-walled drip tape emitter discharge to water temperature. *American society of agricultural engineers*., v. 21, n. 5, p. 855–864, 2005.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. DE. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 13, n. 1, p. 01-13, 2003.

DANIELETTTO, J. R. B. Manual de tubulações de polietileno e polipropileno. 3ªed.São Paulo, 2014.

DASBERG, S.; OR, D. Drip Irrigation. Berlim: Springer-Verlag, 1999.

DECROIX, M.; MALAVAL, A. Laboratory evaluation of trickle irrigation equipment. Third International Drip/Trickle Irrigation Congress - Vol 1. Anais...St. Joseph: American Society of Agriculture Engineers, 1985

DELGHANDI, M. et al. Study on effects of temperature changes on emitters outflow of drip irrigation. *Research on Crops*, v. 12, n. 2, p. 600–606, 2011.

DINIZ, J. M. T. et al. Características térmicas do solo observadas em cidades distintas do Estado da Paraíba Soil thermal characteristics observed in different cities in the state of Paraíba. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 8, n. 3, p. 117–126, 2013.

DINIZ, J. M. T.; ALBUQUERQUE, E. M.; RAFAEL, R. A. Estudo acerca da variabilidade térmica do solo. v. 10, p. 1–7, 2014.

DOGAN, E.; KIRNAK, H. Water temperature and system pressure effect on drip lateral properties. *Irrigation Science*, v. 28, n. 5, p. 407–419, 2010.

EL-TONSY, M. M. et al. Dependence of physical properties of linear low-density polyethylene on the silicon dioxide filler size. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, v. 29, n. 6, p. 754–767, 2016.

EVANS, R. G.; WU, I. P.; SMAJSTRALA, A. G. Design and operation of farm irrigation systems. In: HOFFMAN, G. J.; EVANS, R. G.; JENSEB, M. E.; MARTIN, D. L. Design and operation of farm irrigation systems. St. Joseph: ASABE, p. 632-683, 2007.

FRIZZONE, J. et al. Microirrigação: gotejamento e microaspersão. Maringá: Eduem, 2012.

GASPARIM, E. et al. Temperatura no perfil do solo utilizando duas densidades de cobertura e solo nu. *Acta Scientiarum. Agronomy Maringá*, v. 27, n. 1, p. 107–115, 2005.

HEZARJARIBI, A. et al. Hydraulics Performances of Various Trickle Irrigation Emitters. v. 7, n. 3, p. 265–271, 2008.

INCROPERA, F.; DEWITT, D. P.; BERGAMAN, T. L.; LAVINE, A. S. Fundamentos de transferencia de calor e massa. 6ª ed. Rio de Janeiro, 2008.

KARMELI, D. Classification and flow regime analysis of drippers. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 22, n. 2, p. 165–173, 1977.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle Irrigation Design Parameters. *Transactions of the ASAE*, v. 17, n. 4, p. 0678–0684, 1974.

LI, Y. K. et al. Hydraulic characterizations of tortuous flow in path drip irrigation emitter. *Journal of Hydrodynamics*, v. 18, n. 4, p. 449–457, 2006.

LUNA, C. B. B.; SILVA, D. F.; ARAUJO, E. M.; MELO, T. J. A.; OLIVEIRA, A. D. Comportamento reológico, mecânico, termomecânico e morfológico de blendas de poliestireno/resíduos de calçados com diferentes granulometrias. *Tecnologia de Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 14, n. 3, p. 219–226, 2017.

LUYT, A. S.; MOLEFI, J. A.; KRUMP, H. Thermal, mechanical and electrical properties of copper powder filled low-density and linear low-density polyethylene composites. *Polymer Degradation and Stability*, v. 91, n. 7, p. 1629–1636, 1 jul. 2006.

MARINHO, A. B. et al. Avaliação das características hidráulicas do tupo perfurado Santape. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 3, n. 3, p. 316–321, 1999.

MERAH, N. et al. Effect of temperature on tensile properties of HDPE pipe material. *Plastics, Rubber and Composites*, v. 35, n. 5, p. 226–230, 2006.

OLIVER, M. M. H.; HEWA, G. A.; PEZZANITI, D. Thermal variation and pressure compensated emitters. *Agricultural Water Management*, v. 176, p. 29–39, out. 2016.

PARCHOMCHUK, P. Temperature Effects on Emitter Discharge Rates. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.9, n.4, p. 690–692, 1976.

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 (IJEAT)*, v. 2, n. 5, p. 455–462, 2013.

PLASTIC PIPE INSTITUTE. Handbook of polyethylene pipe. 2^aed. 2008.

RAMANA RAO, T. V; DA SILVA, B. B.; MOREIRA, A. A. Características térmicas do solo em Salvador, BA. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, n. 4, p. 554–559, 2005.

RICHART, F. S. Influência do processamento na preparação de compósito PEAD/PEBDL/Argila organofílica para utilização em equipamentos para o setor elétrico. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. 2013.

RODRÍGUEZ-SINOBAS, L.; JUANA, L.; LOSADA, A. Effects of temperature changes of emitter discharge. n. April, p. 64–73, 1999.

SCHIMIDT, A. P. R. A. Efeito da espessura da parede no desempenho hidráulico de mangueiras gotejadoras. Dissertação de Mestrado. Universidade Paulista “Julio Mesquita”, 2014.

SENYIGIT, U.; CRUZ, R. L.; RODRÍGUEZ-SINOBAS, L. SOUZA, W. J. Changes on emitter discharge under different water temperature and pressure *. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, v. 10, n. 1, p. 718–720, 2012.

SENYIGIT, U.; ILKHAN, M. S. The Effects of Water Temperature on Discharge and Uniformity Parameters of Emitters with Different Discharges, Types and Distances. *Journal of Agricultural Sciences*, v. 23, n. 1, p. 223–233, 2017.

SHOCK, C. Drip Irrigation : An Introduction. October, n. October, p. 1–8, 2006.

SILVA, R. L. DA; VIEIRA, M. M. Modelos sazonais para radiação solar incidente na área rural de Dourados-MS. *Revista Agrarian*, v. 8, n.32, p 162-171, 2016.

SOLOMON, K. Manufacturing Variation of Trickle Emitters. Transactions of the ASAE, v. 22, n. 5, p. 1034–1038, 1979.

SOLOMON, K. H. Global uniformity of trickle irrigation systems. Transactions of the ASABE, v. 28, n. 4, p. 1151–1158, 1984.

TAVMAN, I. et al. Measurement of heat capacity and thermal conductivity of HDPE / expanded graphite nanocomposites by differential scanning calorimetry. Archives of Materials Science and Engineering, v. 50, n. 1, p. 56–60, 2011.

ZHOU, W. et al. Thermal, Dielectric, and Mechanical Properties of SiC Particles Filled Linear Low-Density Polyethylene Composites. Journal of Applied Polymer Science, v. 112, p. 1695–1703, 2009.

ZHU, D.; WU, S.; GUO, B. On the use of low-density polyethylene as disposable drip tape for field irrigation. Plastic, Rubber and Composites, v. 47, n. 3, p. 133–137, 2018.

ZUR, B.; TAL, S. Emitter discharge sensitivity to pressure and temperature. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1981.