

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

Paulo Gustavo Grellmann

**AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE
CONJUNTOS EMISSORES DE PIVÔ CENTRAL DE IRRIGAÇÃO**

Cachoeira do Sul, RS
2022

Paulo Gustavo Grellmann

**AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE CONJUNTOS
EMISSORES DE PIVÔ CENTRAL DE IRRIGAÇÃO**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Ezequiel Saretta

Cachoeira do Sul, RS
2022

Paulo Gustavo Grellmann

**AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE CONJUNTOS
EMISSORES DE PIVÔ CENTRAL DE IRRIGAÇÃO**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Aprovada em 10 de agosto de 2022.

Ezequiel Saretta, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Luiz Ricardo Sobenko, Dr.

Geancarlo Takanori Katsurayama, Dr. (IFC)

Cachoeira do Sul, RS
2022

RESUMO

AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE CONJUNTOS EMISSORES DE PIVÔ CENTRAL DE IRRIGAÇÃO

AUTOR: Paulo Gustavo Grellmann
ORIENTADOR: Prof. Dr. Ezequiel Saretta

A irrigação agrícola apresenta inúmeras vantagens, principalmente possibilitar ganhos em produtividade. Dentre os sistemas de irrigação existentes, o pivô central tem despertado o interesse crescente dos agricultores, devido aos diferenciais que o mesmo apresenta. Esse sistema consiste, basicamente, numa linha lateral que se move em torno de um ponto fixo, e possui emissores de água dispostos de forma equidistante. Dado movimento circular dessa linha, as vazões devem ser superiores em emissores que se aproximam da extremidade da mesma. Para que os parâmetros de distribuição uniforme da lâmina irrigada sejam atendidos, é usual a instalação de conjuntos emissores com a presença de válvulas reguladoras de pressão e bocais variando os seus diâmetros. A seleção das válvulas e a distribuição dos diâmetros dos bocais são determinados em projeto, portanto não devem ser alterados após instalado o sistema de irrigação. Dentre os motivos que podem prejudicar a uniformidade da lâmina irrigada por pivôs centrais, constam o mau funcionamento dessas válvulas e o desgaste dos bocais, devido ao tempo de uso. Nesse sentido, o presente trabalho objetivou avaliar o funcionamento das válvulas e a conformidade dos bocais de um pivô central. Foram realizados ensaios de válvulas, seguindo parâmetros previstos em norma, e avaliação dos bocais pertencentes ao mesmo conjunto válvula-emissor, através de medições de diâmetros e determinação da vazão em função da pressão. A maior parte das válvulas atendeu a critérios mínimos de qualidade, conforme a norma. Entretanto, aproximadamente metade das peças foram reprovadas em testes de histerese, o que provavelmente afeta seus desempenhos a campo. Nos testes dos bocais, observou-se o atendimento aos critérios de vazão-pressão definidos pelo fabricante, com exceção de uma peça, devido a provável erro de fabricação. Em mapeando da distribuição de bocais no pivô central, foram observadas ocorrências de peças instalados em posições incorretas na linha lateral, dados os seus diâmetros, sendo esse um provável motivo causador de desuniformidade de aplicação de água pelo sistema.

Palavras-chave: Válvula reguladora. Bocais. Vazão.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF EMITTER SETS OF IRRIGATION CENTRAL PIVOT

AUTHOR: Paulo Gustavo Grellmann

ADVISOR: Prof. Dr. Ezequiel Saretta

The agricultural irrigation has numerous advantages, mainly by enabling the increase of yield. Among the existing irrigation systems, the center pivot has reached an increasing interest of farmers, due to its differentials. This system consists, basically, of a lateral line that moves around a fixed point, and has water emitters equally spaced. Due to the circular movement of this line, the flow rates must be higher in the emitters approaching to its end. To meet the parameters of a uniform irrigation, it is usual to equip emitter sets with pressure regulation valves and nozzles of different diameters. The selection of the valves and the distribution of nozzle diameters are determined by the system design, therefore those characteristics must not be changed after the installation of the irrigation system. Among the motives that can prejudice the uniformity of center pivots, it can be included the malfunction and wear of these valves, due to the time of usage. In this sense, the present work aimed to evaluate the functioning of valves and the conformity of nozzles of a center pivot. Valve tests were carried out following standard requirements, and the evaluation of the nozzles belonging to the same valve-emitter set, through diameter measurements and determination of flow rate as a function of pressure. Most of the valves met minimal quality criteria, according to standardization. However, half of the valves were retested in hysteresis tests, which probably affects their operational performance in the field. In the nozzle's tests, the relationships of flow-pressure defined by the manufacturer were observed, with an exception of one unity, due to a probable manufacturing mistake. In nozzle distribution maps in the center pivot, occurrences of parts installed in incorrect positions were observed, according to their diameters, being that a probable cause of a non-uniform irrigation applied by the system.

Keywords: Regulation valve. Nozzles. Flow rate.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Ilustração da disposição e movimentação de um pivô central.....	10
FIGURA 2 – Principais componentes de uma válvula reguladora de pressão.....	13
FIGURA 3 – Distribuição de bocais na linha lateral do pivô central.....	16
FIGURA 4 - Distribuição correta de bocais na linha lateral do pivô central.	16
FIGURA 5 - Esquema de bancada utilizada para realização do ensaios.....	19
FIGURA 6 - Projetor de perfil utilizado para medição de diâmetros dos bocais.....	20
FIGURA7 - Pressões reguladas em função de diferentes velocidades de referência, compressões aplicadas na entrada das válvulas, de 155 kPa para peças de 103 kPa.	21
FIGURA 8 - Pressões reguladas em função de diferentes velocidades de referência, com pressões aplicadas na entrada das válvulas, de 103,5 kPa para peça de 69 kPa.....	22
FIGURA 9 - Gráfico de pressões reguladas em função de diferentes velocidades de referência, com pressões aplicadas na entrada das VRPs, de 390 kPa para as peças de 103 kPa.....	22
FIGURA 10 - Pressões reguladas em função de diferentes velocidades de referência, com pressões aplicadas na entrada das válvulas, de 345 kPa para peça de 69 kPa. .	23
FIGURA 11 - Variação da pressão regulada, devido aumento da velocidade de referência de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ para $1,5 \text{ m s}^{-1}$	24
FIGURA 12 - Variação da pressão regulada, devido aumento da velocidade de referência de 1 m s^{-1} para 2 m s^{-1}	24
FIGURA 13 - Gráfico de pressões reguladas pelas válvulas em função da pressão na entrada.....	25
FIGURA 14 - Relações de vazão em função da pressão dos bocais avaliados.	27
FIGURA 15 - Gráfico da vazão em função da pressão, para o bocal da posição “107” no pivô central.....	28
FIGURA 16 - Aspecto visual dos bocais das posições “03” e “107” e seus jatos durante realização dos ensaios	28

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- Resultados dos testes das VRPs.	26
TABELA 2 – Resultados das medições dos diâmetros dos bocais.	29
TABELA 3 – Coeficientes de descarga, equações características e R^2 dos bocais testados.	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL.....	10
2.2	VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO	12
2.3	UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA E AVALIAÇÃO DE PIVÔS CENTRAIS	14
3	MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1	AVALIAÇÃO DAS VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO	17
3.2	AVALIAÇÃO DOS BOCAIS	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1	VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO	21
4.2	BOCAIS	26
5	CONCLUSÕES	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

A irrigação é uma técnica de aplicação artificial de água aos cultivos, visando suprir, parcial ou totalmente, deficiências hídricas. No Brasil, a irrigação agrícola foi empregada a partir do início do século XX, nos cultivos de arroz no estado do Rio Grande do Sul. A intensificação do uso da irrigação na agricultura brasileira se difundiu de maneira mais expressiva nas demais regiões do país a partir da década de 1970. O principal benefício é o aumento da produtividade, podendo alcançar duas a três vezes, além da possibilidade de maior número de safras por ano (ANA, 2019).

A área total abrangida pela irrigação agrícola no Brasil cresce ao longo dos anos: em 1960 era estimada em 500.000 ha, alcançando aproximadamente 6 milhões de hectares em 2015. Analogamente, a área irrigada por pivôs centrais subiu de aproximadamente 30 mil hectares em 1985 para cerca de 1,5 milhão de hectares em 2017. As projeções indicam que esse sistema continuará em expansão no Brasil (ANA, 2019). Algumas das vantagens dos pivôs centrais, e que tem motivado a adoção desses sistemas, são a capacidade de distribuição uniforme de água, alto grau de automação, adaptação a diferentes características de solo e a irrigação de grandes áreas (ANA, 2019; EVANS, 2001).

A eficiência operacional de um sistema de irrigação por pivô central pode ser relacionada com a uniformidade da aplicação da lâmina irrigada, sendo influenciada por diversos fatores, como por exemplo as condições ambientais, o projeto da máquina e a manutenção após a instalação (BARBOSA, 2016). Sob o ponto de vista da manutenção, dentre outros aspectos, os componentes de um pivô central estão sujeitos ao desgaste ao longo do tempo, principalmente devido ao uso, necessitando reparo ou substituição. Negligências de manutenção ou a substituição inadequada de peças danificadas podem comprometer o funcionamento correto do sistema (SANDRI e CORTEZ, 2009). No que se refere às válvulas reguladoras de pressão, instaladas nesses sistemas, a alocação correta na linha lateral, bem como seu adequado funcionamento, é de grande relevância, pois se esses elementos não operarem conforme projeto do pivô central, a vazão dos conjuntos emissores será incorreta, ocasionando desuniformidade de irrigação.

Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho foi de realizar a avaliação de conjuntos emissores de um pivô central, considerando as hipóteses que: i) as válvulas reguladoras de pressão (VRPs), instaladas no sistema, tenham sofrido desgastes ao longo dos anos, causando prejuízos ao correto funcionamento desses componentes, conforme descrito por estudo de Lima et. al (2003); e ii) que os bocais instalados nos respectivos conjuntos não possuíssem as mesmas

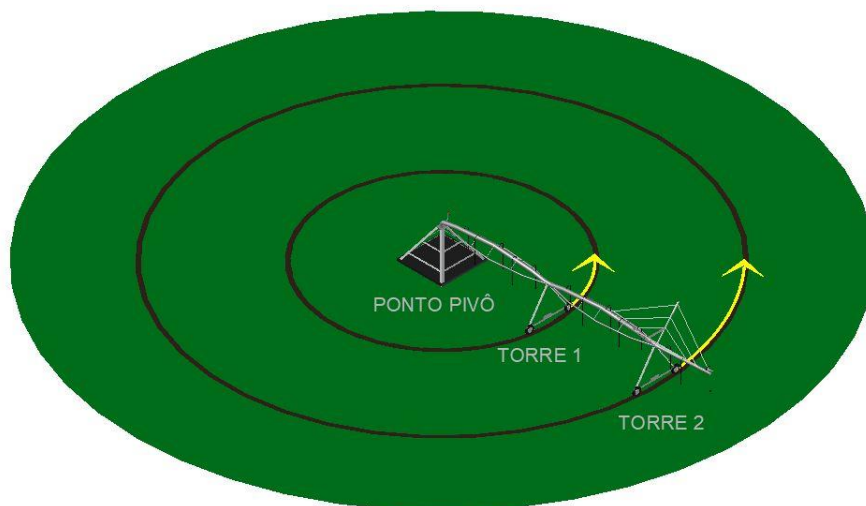
características de quando novos, por possuírem tempo de uso superior a cinco anos (SENNINGER, 2022). Salienta-se que não se possuía objetivo de julgar os fabricantes ou marcas de equipamentos e material de irrigação agrícola, apenas avaliar a operação desses itens de acordo com critérios técnicos definidos por normas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL

O pivô central é um sistema mecanizado, com uma linha lateral que se move em torno de um ponto fixo, denominado ponto pivô (Figura 1). Essa lateral consiste em tubulação de aço, com saídas equidistantes para emissores em sua extensão. A sustentação é feita por estruturas de aço, denominadas torres, que movimentam a linha lateral sobre o terreno pelo acionamento de rodas e motores elétricos.

Figura 1 – Ilustração da disposição e movimentação de um pivô central.



Fonte: Autor.

O ponto pivô tem a função de ancorar toda estrutura, recebendo todos os esforços de peso e do movimento. As torres de sustentação são dispostas com espaçamentos uniformes, identificando-se como primeira torre aquela imediatamente após o ponto pivô; e a última, aquela próxima ao final da linha lateral. Os espaçamentos entre as torres são denominados vãos ou lances e, normalmente, após a última torre se estende um vão em balanço, suspenso por cabos de aço. Os vãos não costumam possuir o mesmo comprimento nos lances inicial, intermediários e em balanço (BARBOSA, 2016; MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009). Na extremidade do vão em balanço, portanto no final da linha lateral, há possibilidade de se instalar um canhão, com objetivo de se aumentar a faixa irrigada pelo sistema, entretanto com menor uniformidade de distribuição de água nessa porção (BARBOSA, 2016).

Como a linha lateral se desloca de forma circular, a velocidade linear aumenta do centro à periferia. Por isso, para aplicar uniformemente a lâmina de irrigação, a taxa de precipitação de água deverá ser crescente ao longo da linha lateral, de maneira proporcional ao acréscimo da distância com o ponto pivô, logo, a vazão dos emissores aumenta.

Para a aplicação da lâmina irrigada, uma bomba, ou conjuntos dessas, deve realizar o recalque da água, com pressão e vazão necessárias para o funcionamento de todo sistema. Contrariamente ao aumento da vazão dos emissores ao longo do raio irrigado, na linha lateral há decréscimo continuado da vazão, que pode ser calculada através da Eq. (1) para qualquer distância (BARBOSA, 2016).

$$Q_r = Q_t - \frac{Q_t^2}{(Q_t - Q_c)} \frac{r^2}{L^2} \quad (1)$$

Onde:

Q_r : vazão na distância “ r ”, no interior da linha lateral ($m^3 s^{-1}$);

Q_t : vazão total do pivô central ($m^3 s^{-1}$);

r : distância, na linha lateral, em relação ao ponto pivô (m);

L : comprimento total da linha lateral (m);

Q_c : vazão do canhão final ($m^3 s^{-1}$).

Assim como ocorre com a vazão ao longo da linha lateral, há também redução da pressão da água, durante o funcionamento do pivô central. Isso se deve às perdas de carga hidráulica, cujo cálculo pode ser realizado somando-se as perdas que ocorrem em cada trecho da linha. Para tal, inicia-se na extremidade à periferia do pivô central em direção ao ponto pivô. Considerando-se cada trecho como os intervalos entre cada emissor de água, a perda de carga pode ser obtida através da Eq. (2), de Hazen-Williams para perda de carga em condutos pressurizados (NETTO; FERNÁNDEZ, 2018).

$$hf = \frac{10,643Q^{1,852}L}{C^{1,852}D^{4,87}} \quad (2)$$

Onde:

hf : perda de carga (m.c.a);

Q : vazão ($m^3 s^{-1}$)

L : comprimento do trecho (m);

- C: coeficiente relativo à rugosidade interna da tubulação;
 D: diâmetro interno da tubulação (m).

A pressão na entrada da linha lateral deve ser suficiente para vencer todas as perdas de carga e o aclave ao longo dessa linha, de forma que o último emissor possua carga hidráulica disponível para seu funcionamento. Por isso, normalmente, conjuntos emissores mais próximos do ponto pivô são submetidos a cargas hidráulicas superiores, se comparados com aqueles na periferia. Com essa variação de pressão, teoricamente a vazão dos emissores tende a diminuir, de acordo com a Eq. (3) (NETTO; FERNÁNDEZ, 2018)).

$$Q=CdA\sqrt{2gh} \quad (3)$$

Onde:

Q: vazão ($m^3 s^{-1}$);

Cd: Coeficiente de descarga, resultante do produto entre os coeficientes de contração e da redução da velocidade da vena de água;

A: área do bocal (m^2);

g: aceleração da gravidade ($m s^{-2}$);

h: carga hidráulica no emissor (m).

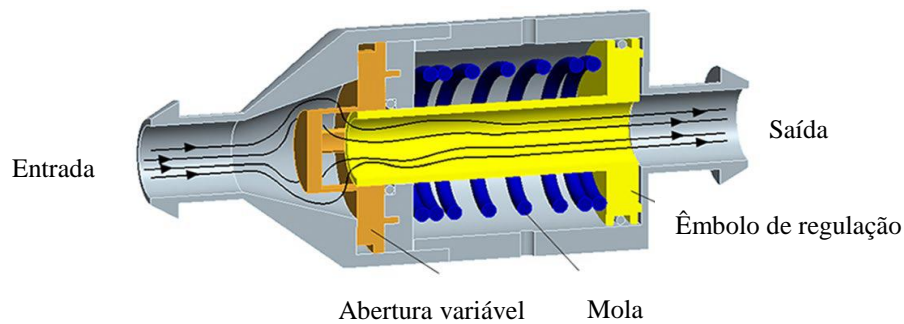
Para contornar o problema teórico de redução de vazão entre bocais, uma estratégia é instalar bocais com diferentes diâmetros, acertando-se a vazão requerida ao longo da linha lateral. Entretanto, infinitos diâmetros seriam necessários, o que inviabiliza a fabricação industrial. Além disso, a declividade do terreno altera a carga hidráulica durante a movimentação do pivô. A solução atual para superar essa variação de pressão é a instalação de válvulas reguladoras de pressão a montante de cada bocal, que uniformizam a carga hidráulica, facilitando o ajuste de vazão somente com ajuste do diâmetro na Eq. (3) (BARBOSA, 2016; LIMA et al., 2003).

2.2 VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO

Válvulas reguladoras de pressão são componentes hidráulicos que regulam a pressão de água em sua saída, em função de um intervalo de vazões e de pressões em sua entrada. As válvulas reguladoras de pressão mais comumente utilizadas são as de molas, representadas pela

Figura 2. São constituídas de conexões para entrada e saída de água e uma carcaça, que envolve um êmbolo, uma mola e algum componente que permita a variação da seção transversal disponível para a passagem da água (LIMA et al., 2003; TALAMINI JUNIOR et al., 2018; ZHANG; LI, 2017).

Figura 2 – Principais componentes de uma válvula reguladora de pressão



Fonte: Adaptado de Zhang e Li (2017).

À medida que a pressão aumenta na entrada da válvula, a mola que envolve o êmbolo sofre uma deformação proporcional, variando a abertura disponível para passagem da água, regulando a pressão na saída, com aumento da perda localizada de carga. Uma válvula ideal deve apresentar pressão de saída constante, independentemente da vazão e pressão exercidas na entrada (TALAMINI JUNIOR et al., 2018; ZHANG; LI, 2017). A perda de carga gerada não utiliza fonte de energia, por isso, a pressão da água na saída jamais será superior à pressão na entrada. Em determinada linha de raciocínio, pode-se considerar que essa perda de carga provocada pelas válvulas é um desperdício de energia e seu uso está na contramão da racionalidade.

Essas válvulas possuem limite máximo de pressão na entrada para a regulação da saída, a partir da qual a regulação não é realizada adequadamente (TALAMINI JUNIOR et al., 2018). Considerando-se uma pressão crescente na entrada de uma válvula, a pressão na sua saída crescerá de maneira proporcional, até atingir a pressão de regulação. A relação típica entre as pressões de entrada e saída pode ser expressa por uma função sigmoide, com linha horizontal representando a faixa de regulação (TALAMINI JUNIOR et al., 2018; ZHANG; LI, 2017).

Desvios da pressão regulada são esperados, dentro de valores máximos estabelecidos por normas técnicas, visando atender critérios de qualidade (ABNT ISO 10522, 2022). A pressão na faixa de regulação não deve sofrer variações superiores a 10% para válvulas classificadas na categoria A e de 20% para válvulas de categoria B. Para o teste da pressão regulada em função de diferentes pressões de entrada, a vazão deve ser constante, e sem considerar efeitos de histerese.

Em estudo com válvulas novas, Talamini Jr. et al. (2018) e Lima et al. (2003) enfatizam que, embora não seja considerado em normativa, em testes com vazões constantes, diferentes vazões influenciaram na curva de desempenho das válvulas avaliadas. Efeitos de histerese também influenciaram no desempenho das válvulas avaliadas, a qual se refere às diferenças na pressão regulada em função do acréscimo e decréscimo de pressões. A histerese pode influenciar na qualidade de aplicação de água, como por exemplo na movimentação sobre terrenos declivosos.

Em estudo com válvulas de até 6.000 horas de uso mantiveram desempenho equivalente às válvulas novas, para pressões de entrada de até 826,7 kPa e velocidades de referência de até 2,5 m s⁻¹ (LIMA et al., 2003). Porém, válvulas reguladoras com tempos de uso superiores a 8.500 horas apresentaram desempenho inferior se comparadas com as novas. Em outro estudo, Araújo et al. (2015) concluíram que a qualidade de válvulas com 6.000 h de uso foi inferior às novas. Tais resultados indicam que as VRPs perdem sua eficiência devido ao tempo de uso.

2.3 UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA E AVALIAÇÃO DE PIVÔS CENTRAIS

A avaliação do desempenho de um pivô central de irrigação pode ser determinada, basicamente, pela avaliação da eficiência e da uniformidade de aplicação de água (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009). A norma ISO 11545 (2016) estabelece critérios e orientações acerca da metodologia de realização de ensaio da uniformidade da aplicação de água por sistemas de irrigação do tipo pivô central. O resultado numérico do ensaio é expresso pelo Coeficiente de Uniformidade de Christiansen modificado por Hermann e Hein (1968), conforme as Equações (4) e (5).

$$CU_h = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |V_i - \bar{V}_w| S_i}{\sum_{i=1}^n (V_i S_i)} \right] \quad (4)$$

Onde:

CU_h: coeficiente de uniformidade modificado de Hermann e Hein;

n: número de coletores utilizados na análise;

i: número atribuído para identificar um coletor específico;

V_i: volume do i-ésimo coletor (L);

S_i: distância entre o i-ésimo coletor e o ponto pivô (m);

\bar{V}_w : volume médio ponderado (L), calculado conforme equação (5):

$$\bar{V}_w = \frac{\sum_{i=1}^n V_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (5)$$

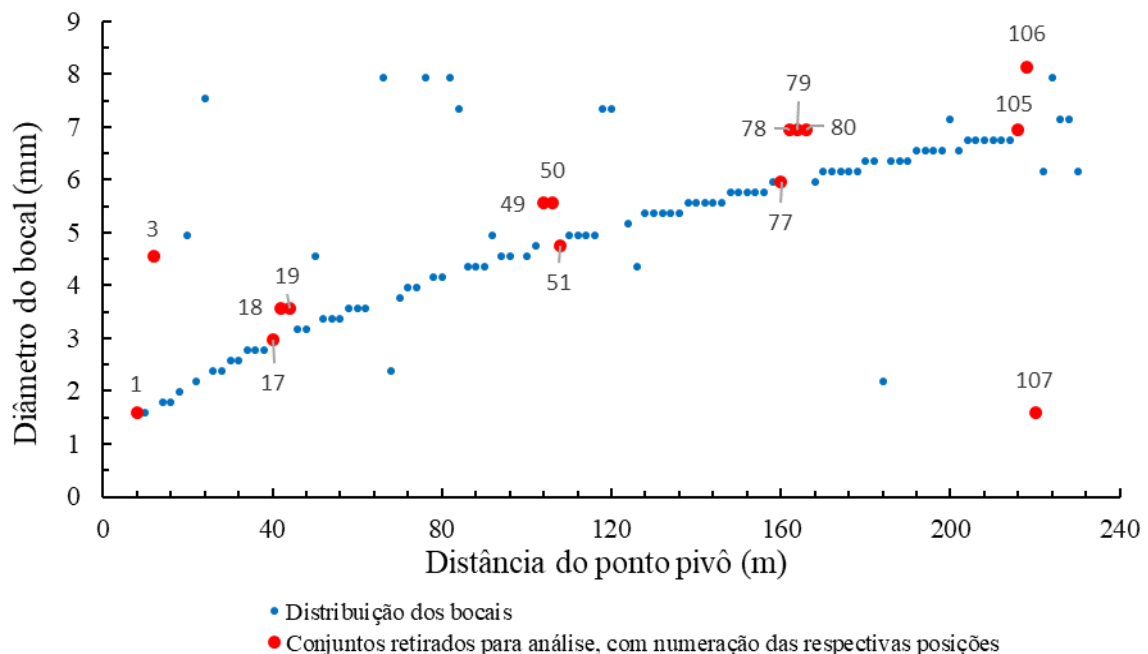
Diversos fatores podem influenciar na uniformidade de aplicação de água por um pivô central. Segundo McLean et al. (2000), aspectos relacionados com incidência de ventos e evaporação podem ser responsáveis pela redução da uniformidade da irrigação. Em estudo de Sandri e Cortez (2009), foi observado que diversos parâmetros afetaram a uniformidade de aplicação de água entre diferentes pivôs centrais, incluindo-se a manutenção inadequada, instalação incorreta de bocais, vazamentos ao longo da linha lateral e relé percentual defeituoso. Rajan et al. (2015) ressaltaram a baixa ocorrência de problemas relacionados a conjuntos emissores de água.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O pivô central utilizado neste trabalho se encontra instalado no município de Cachoeira do Sul – RS, fabricado pela empresa Bauer, área irrigada de aproximadamente 25 ha, distância até a última torre de 215 metros, vão em balanço com 15 metros, conjuntos emissores espaçados em 2 m e canhão final. As válvulas reguladoras de pressão também eram da marca Bauer e possuíam pressão nominal de 103 kPa, com exceção de uma peça, cujo fabricante era Senninger e a pressão de regulação equivalente a 70 kPa . A máquina possuía cerca de sete anos de uso, conforme informado pelo proprietário, e 1.100 h de operação indicado no medidor no quadro.

Primeiramente, realizou-se o mapeamento da distribuição dos bocais ao longo da linha lateral, registrando-se a posição, com números crescentes a partir do ponto pivô. Também se registraram informações de pressão nominal das válvulas reguladoras em cada um desses conjuntos. Posteriormente, 15 conjuntos válvula-emissor foram retirados a esmo da máquina, em cinco localizações do pivô, com objetivo testar os mesmos em laboratório. Na Figura 3 é possível visualizar a distribuição dos diâmetros de bocais no pivô central, e o realce dos conjuntos que foram retirados.

Figura 3 – Distribuição de bocais na linha lateral do pivô central.

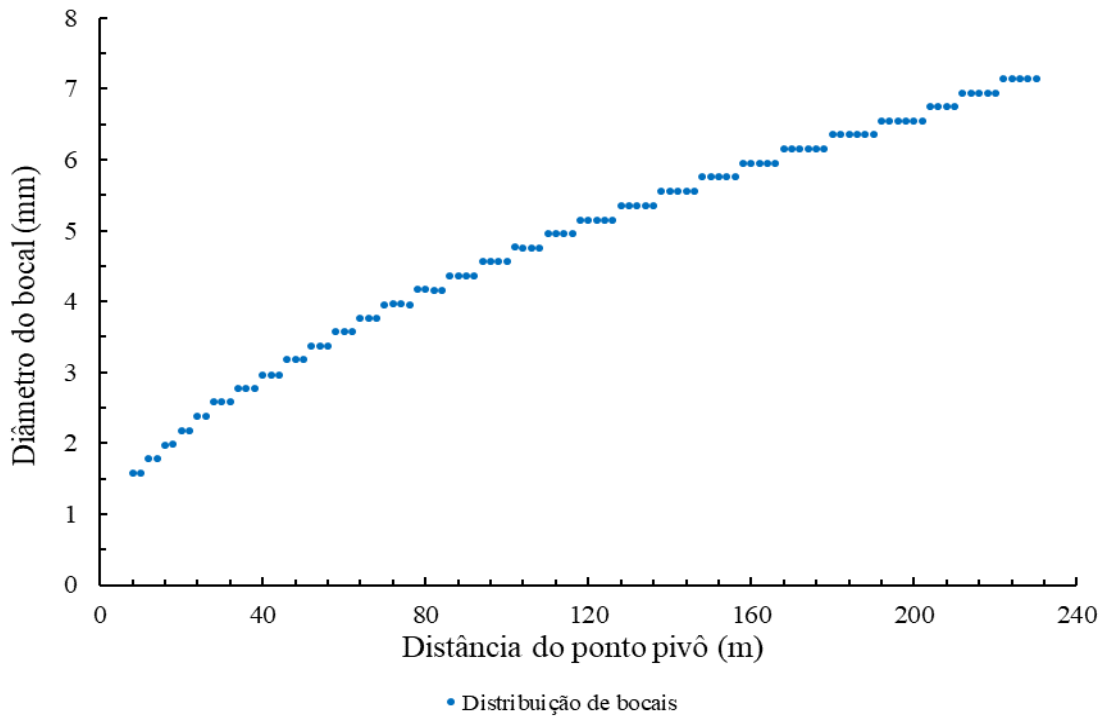


Fonte: Autor.

A partir do mapeamento do pivô (Figura 3), indicou-se ao proprietário a reorganização dos bocais conforme a Figura 4, para correta aplicação da água. Essa etapa somente foi

informada ao proprietário como forma de retorno da informação, a quem cabe a futura intervenção caso julgar necessária.

Figura 4 - Distribuição indicada dos bocais na linha lateral do pivô central.



Fonte: Autor.

3.1 AVALIAÇÃO DAS VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO

A norma ABNT ISO 10522 (2022) estabelece parâmetros para realização de ensaios para a avaliação da curva de regulação de pressão de válvulas, seu funcionamento a vazão constante sob diferentes pressões e testes de histerese. Para a curva de regulação, a norma define que sejam realizados ensaios em cinco velocidades de referência, variando-se de 0 até 2 m s^{-1} , com incrementos de $0,5 \text{ m s}^{-1}$. Devem ser aplicadas três pressões na entrada das válvulas, correspondentes a 1,5 vezes a pressão de regulação, o meio da faixa de regulação e 0,8 vezes a pressão nominal máxima suportada pela peça, que não foi utilizada. As válvulas retiradas do pivô para os testes com as respectivas pressões estão identificadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Válvulas reguladoras de pressão coletadas a campo, suas pressões de regulação e valores de pressões para parâmetros de realização de ensaios.

Posição do conjunto	Pressão de regulação (kPa)	Pressão nominal (kPa)	Metade da faixa de regulação (kPa)	1,5 vezes a pressão de regulação (kPa)
1	103 (15 psi)	785	444	155
3				
17				
18				
19				
49				
50				
51				
77				
78				
79				
80				
105				
106				
107	69 (10 psi)	620	345	104

Fonte: Autor.

Para atender os critérios normativos, a curva de regulação ensaiada não deve divergir em mais de 5% daquela estabelecida pelo fabricante. E, ao aumentar a velocidade de referência da água de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ para $1,5 \text{ m s}^{-1}$, e de 1 m s^{-1} para 2 m s^{-1} , a pressão regulada não pode variar mais de 10% e 20% da pressão de regulação, para enquadramento nas classificações A e B, respectivamente.

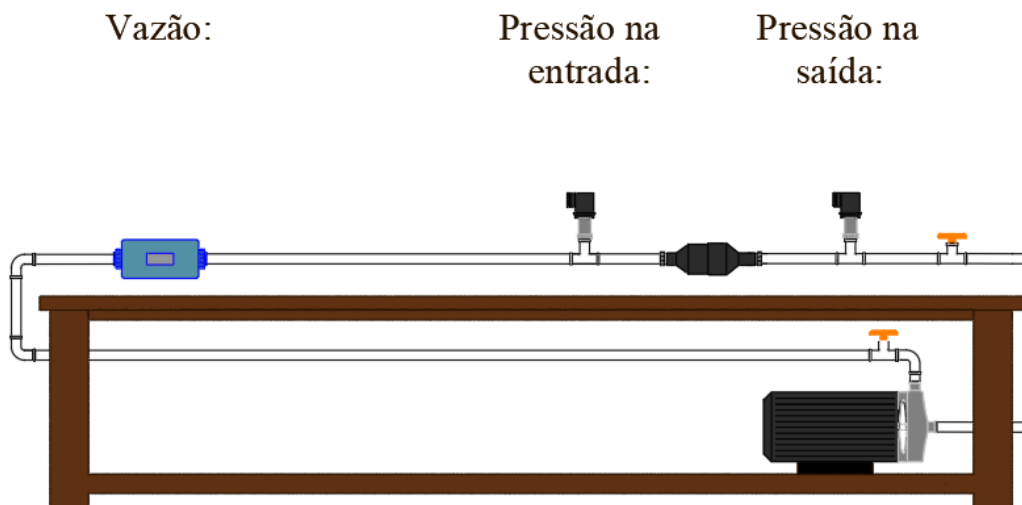
Para o ensaio em vazão constante, a norma requer velocidade de fluxo constante de 1 m s^{-1} , variando-se as pressões, partindo-se de zero até atingir a pressão nominal máxima suportada pela válvula, com incrementos de 50 kPa. Posteriormente, variam-se as pressões no sentido decrescente. Ao longo de toda a faixa de regulação, as pressões reguladas durante o ensaio não podem apresentar desvios da pressão de regulação superiores a 10%, para a categoria A, e 20% para as categoria B. No que se refere à histerese, a diferença entre as pressões reguladas durante o aumento e a redução de pressões no ensaio não pode ultrapassar 10% da pressão de regulação nominal mais 2% da pressão avaliada.

Conforme o Quadro 1, observa-se que uma das válvulas é diferente das demais, sendo a única cuja pressão de regulação (68,6 kPa) foi diferente de todas as outras instaladas (103 kPa) no pivô central. Embora metade da faixa de regulação, para as válvulas com pressão de

regulação nominal de 103 kPa, seja equivalente a 444 kPa, a pressão adotada para realização dos testes foi de 390 kPa, devido às limitações técnicas nos ensaios realizados.

Os testes foram realizados em bancada de ensaios (Figura 5) dotada de motobomba, medidor de vazão eletromagnético, manômetros a montante e jusante da válvula reguladora de pressão e válvulas de controle de fluxo para controlar a passagem de água. A velocidade de rotação do rotor da bomba foi controlada por inversor de frequência.

Figura 5 - Esquema de bancada utilizada para realização do ensaios.



Fonte: Autor.

3.2 AVALIAÇÃO DOS BOCAIS

Os bocais de cada conjunto emissor coletado a campo foram testados de forma a se determinar a vazão em função da pressão aplicada, de acordo com intervalos declarados pelo fabricante dos bocais. Foram testadas nove pressões diferentes, utilizando-se um manômetro, localizado imediatamente a montante de cada bocal, e um medidor de vazão, presente na tubulação. As pressões foram ajustadas por meio de um inversor de frequência, ligado à motobomba da bancada.

Realizou-se a medição do diâmetro de cada um dos bocais com um projetor de perfil (Figura 6), para verificação do valor atual e comparação com o valor de quando novo, informado pelo fabricante. Realizaram-se três repetições por bocal, calculando-se a média aritmética e o coeficiente de variação (CV).

Figura 6 - Projetor de perfil utilizado para medição de diâmetros dos bocais



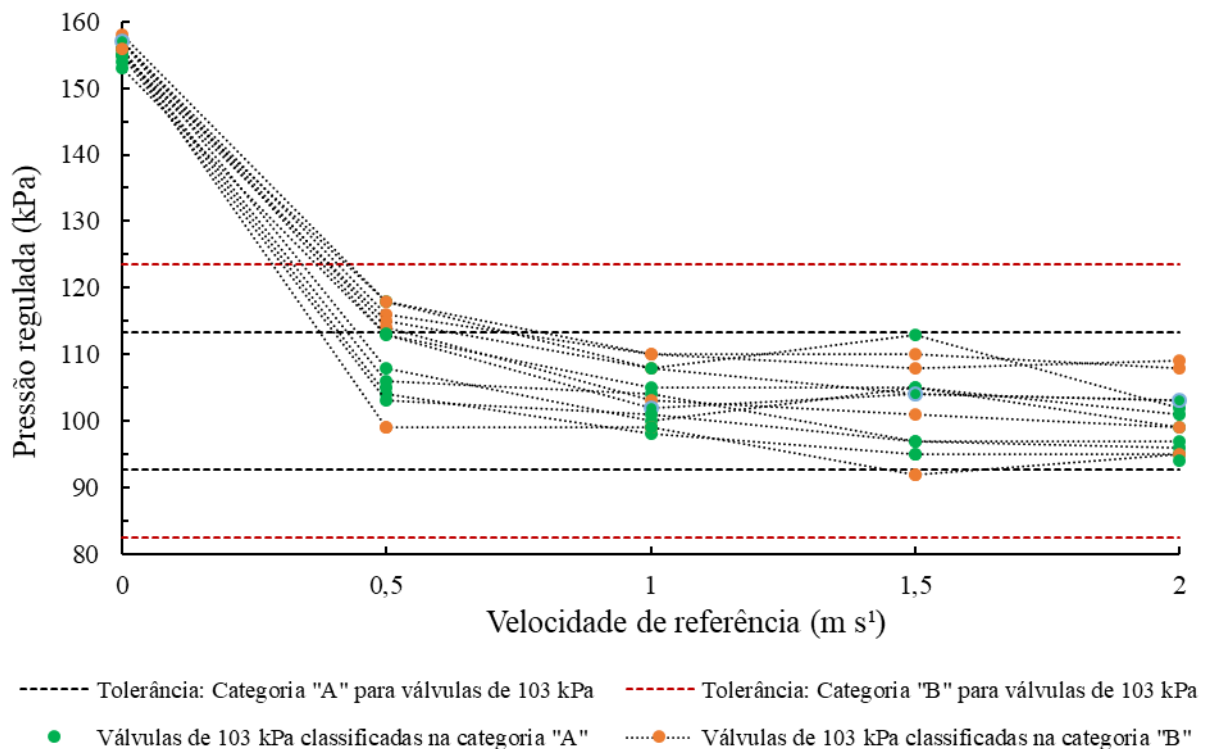
Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO

Nos testes a pressões constantes, variando-se a velocidade de referência somente, as pressões reguladas, a partir da velocidade de referência de $0,5 \text{ m s}^{-1}$, mantiveram-se com proximidade da pressão de regulação nominal (Figuras 6, 7, 8 e 9). Para vazão nula, as pressões reguladas foram consideravelmente superiores. Entretanto, esse efeito é esperado, conforme a norma ABNT ISO 10522 (2022), e também foi observado por Talamini Jr et. al (2018) em testes com válvulas novas. Pela lei de Pascal, a pressão se transmite em todos os sentidos com mesma intensidade (AZEVEDO NETTO e FERNÁNDEZ y FERNÁNDEZ, 2015); logo, se não há vazão, as pressões de entrada e saída tendem a ser a mesma, com pequenas diferenças observadas devido à calibração dos manômetros.

Figura 7 - Pressões reguladas em função de diferentes velocidades de referência, com pressões aplicadas na entrada das válvulas, de 155 kPa para peças de 103 kPa.



Fonte: Autor.

Figura 8 - Pressões reguladas em função de diferentes velocidades de referência, com pressões aplicadas na entrada das válvulas, de 103,5 kPa para peça de 69 kPa.

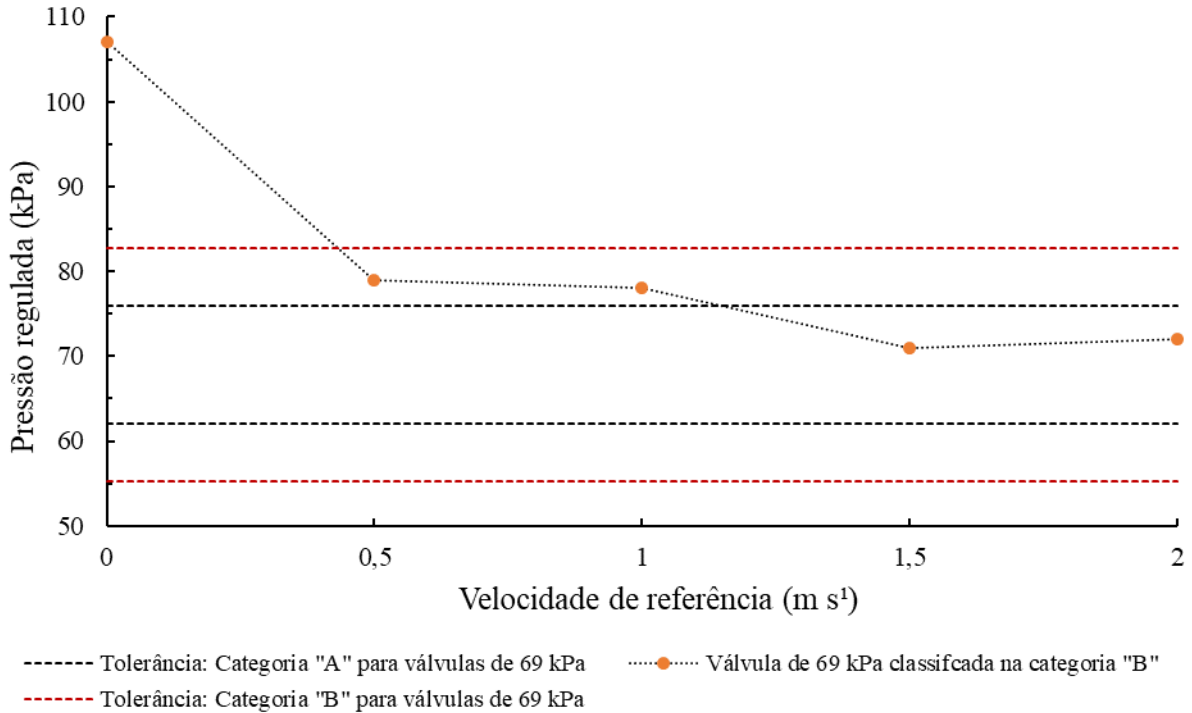


Figura 9 - Gráfico de pressões reguladas em função de diferentes velocidades de referência, com pressões aplicadas na entrada das VRPs, de 390 kPa para as peças de 103 kPa.

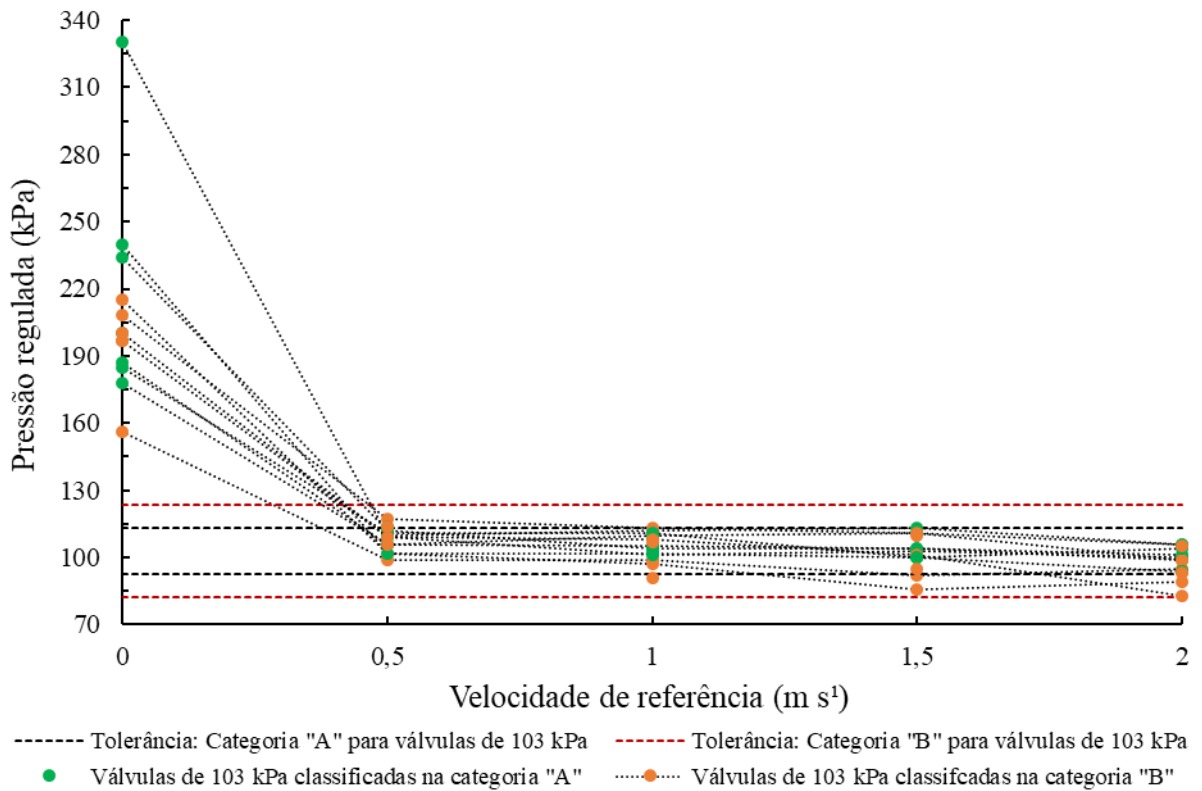
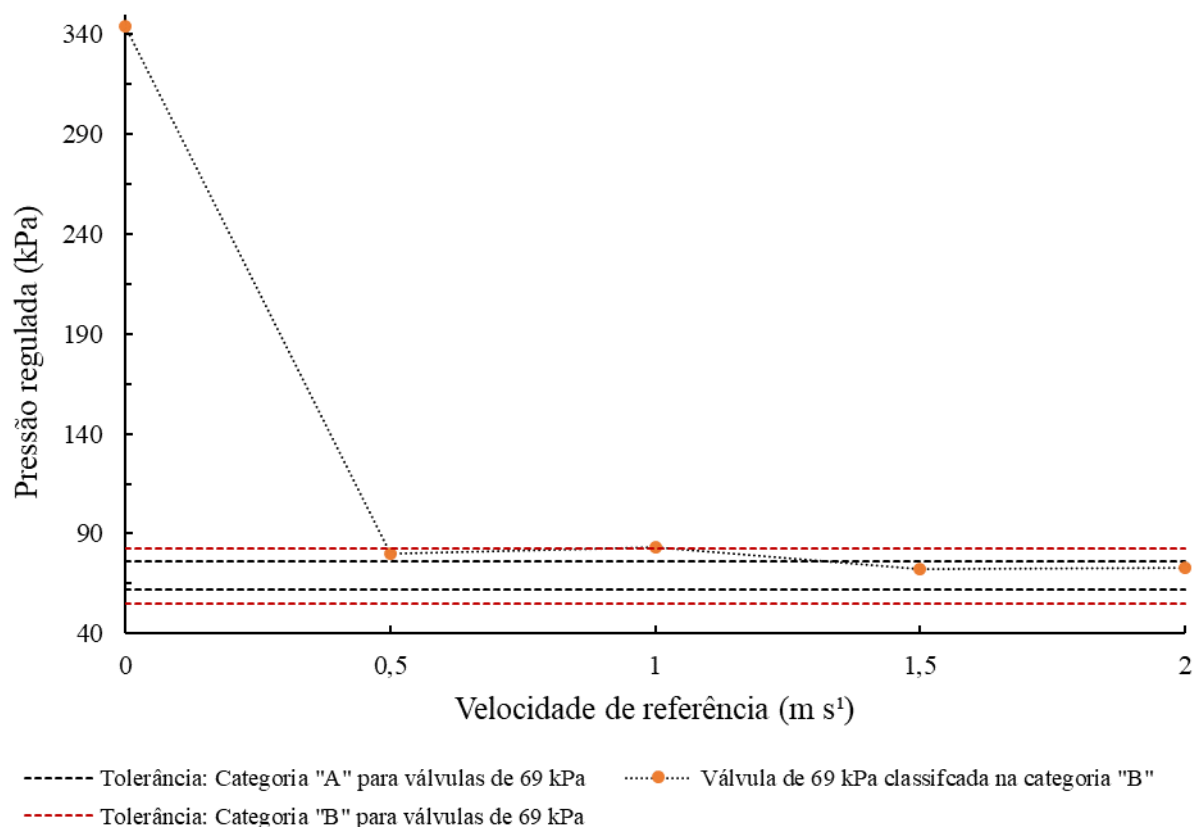


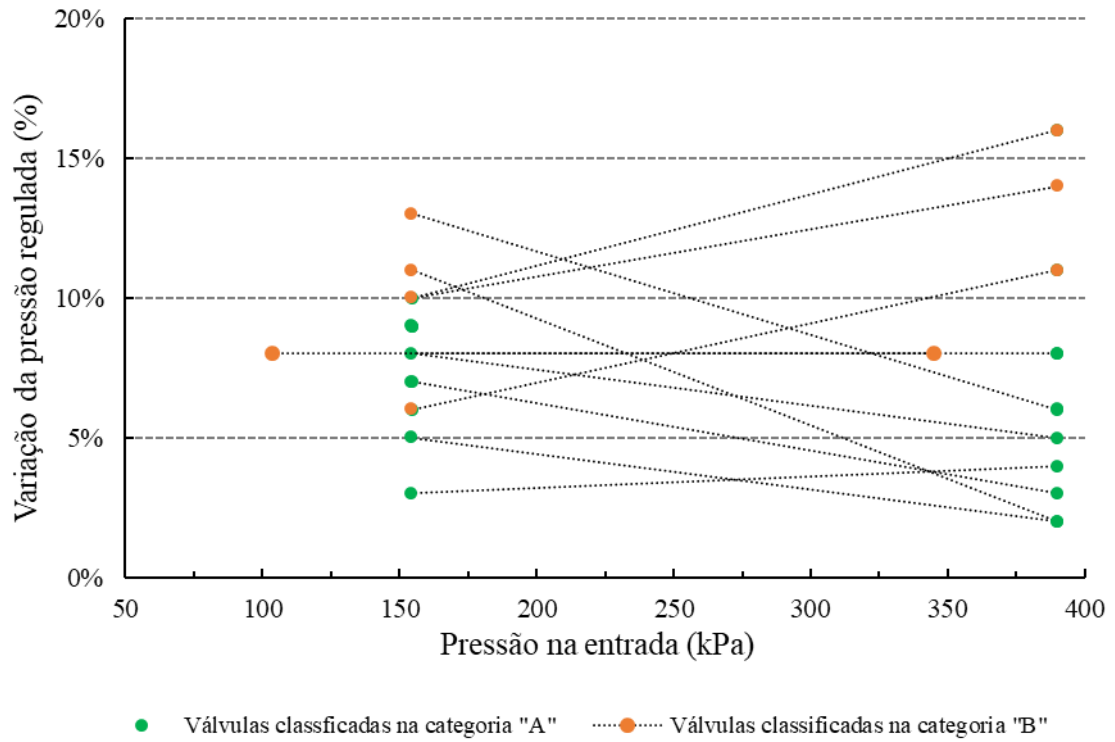
Figura 10 - Pressões reguladas em função de diferentes velocidades de referência, com pressões aplicadas na entrada das válvulas, de 345 kPa para peça de 69 kPa.



Fonte: Autor.

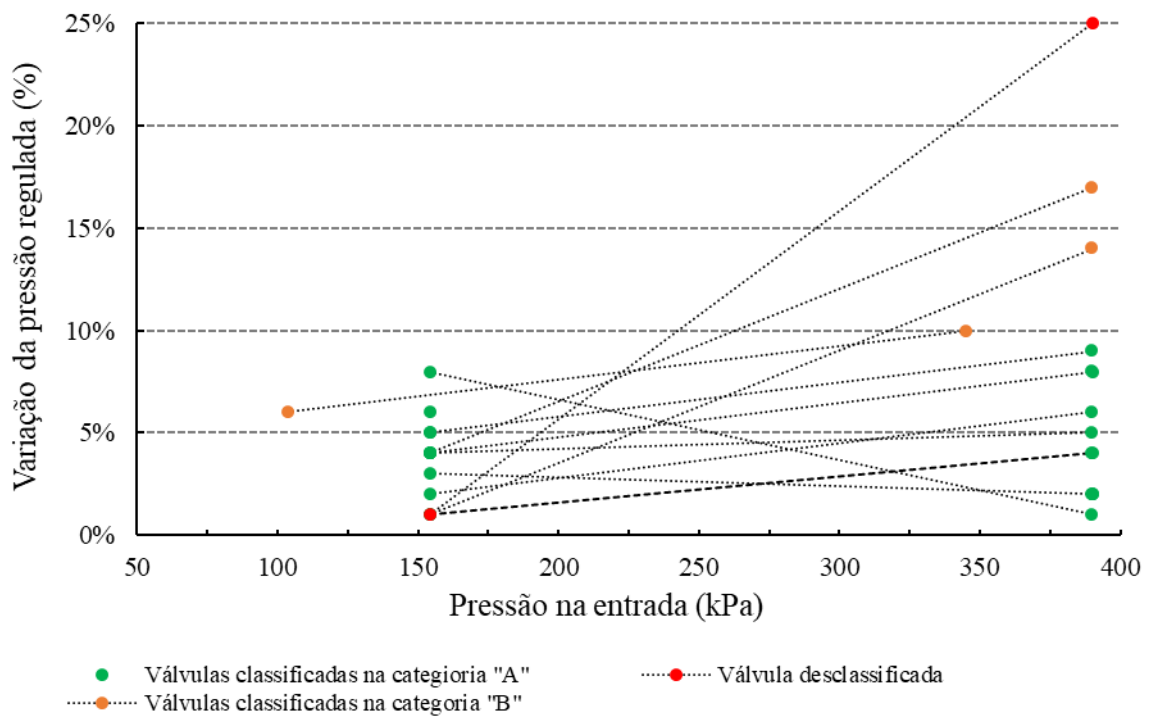
Nas pressões maiores (Figura 9 e Figura 10), aplicadas na entrada das VRPs, é possível observar que as pressões reguladas apresentaram maior tendência de se desviarem da pressão de regulação declarada pelo fabricante. No teste conduzido nas pressões mais elevadas, a VRP de 68,95 kPa (10 psi) se destacou pelo fato da alta pressão regulada na saída, em vazão nula. Todavia, nenhuma válvula apresentou desvio superior a 20% da pressão de regulação nominal, nas velocidades de referência iguais ou superiores a 0,5 m s⁻¹. Conforme foi observado por Lima et. al (2003), válvulas usadas também tenderam a apresentar maiores desvios de regulação em pressões elevadas, aplicadas na entrada dessas VRPs. Nas Figuras 11 e 12, encontram-se os gráficos com a dispersão, representando cada VRP testada, da variação da pressão regulada em função do aumento da velocidade de referência da água.

Figura 11 - Variação da pressão regulada, devido aumento da velocidade de referência de 0,5 m s⁻¹ para 1,5 m s⁻¹.



Fonte: Autor.

Figura 12 - Variação da pressão regulada, devido aumento da velocidade de referência de 1 m s⁻¹ para 2 m s⁻¹.

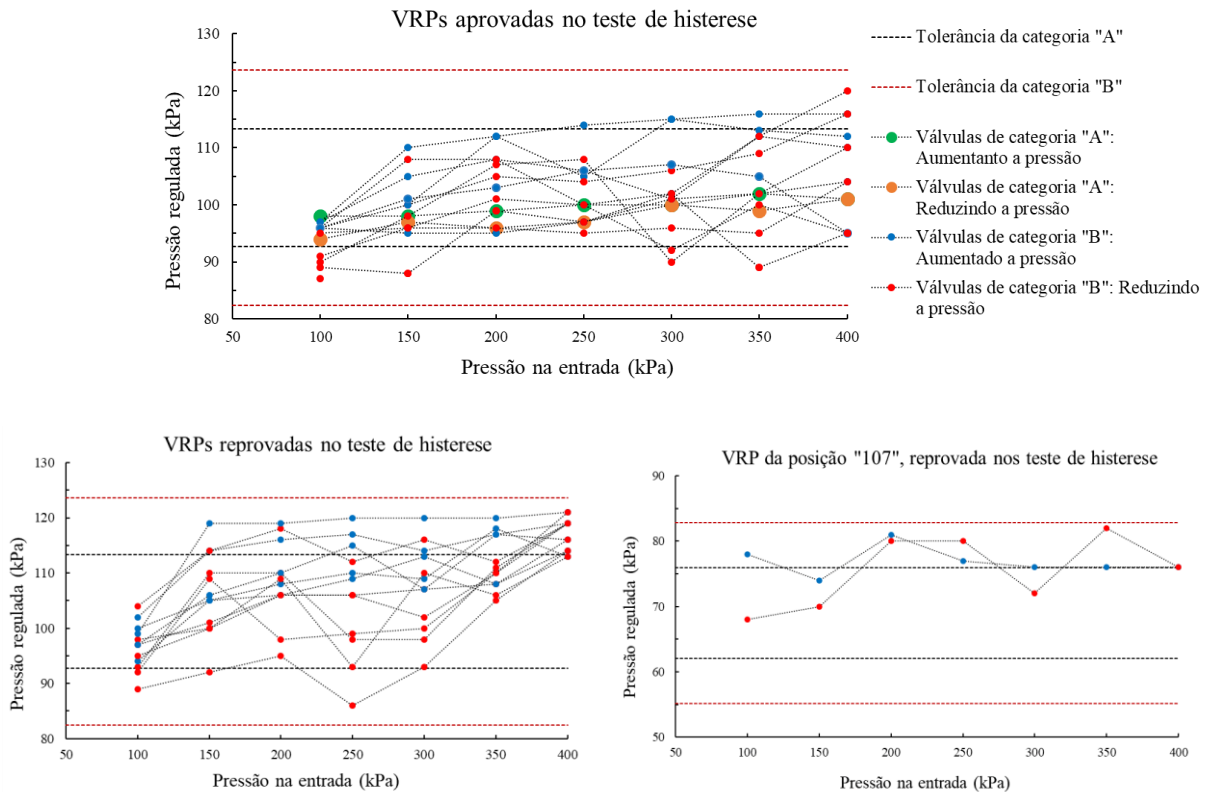


Fonte: Autor.

A variação das pressões durante o aumento da velocidade de referência de 0,5 para 1,5 m s⁻¹ foi maior, se comparado o segundo intervalo de velocidades testado. Ou seja, de maneira geral, as pressões reguladas se mantiveram mais estáveis variando-se as velocidades de referência de 1 para 2 m s⁻¹. Resultados semelhantes foram encontrados por Talamini Jr. et. al (2018), em ensaio de válvulas novas. Com exceção do resultado obtido por uma das válvulas, alusiva a posição “105” no pivô central, que se destacou por apresentar uma variação, na pressão regulada, equivalente a 25 %, sendo desclassificada no respectivo teste.

Nos testes com velocidade de referência constante, somente uma VRP se manteve dentro da faixa de tolerância da categoria “A” (Figura 13). As demais se enquadraram na categoria “B”, mesmo que em algum caso apresentasse desvio superior a 10%. No caso da histerese, somente oito válvulas foram aprovadas, considerados os parâmetros normativos. Salienta-se que as reprovações nos testes de histerese não ocorreram por grandes desvios dos critérios de classificação.

Figura 13 - Gráfico de pressões reguladas pelas válvulas em função da pressão na entrada



Fonte: Autor.

Um possível motivo para que a maior parte das válvulas tenham se enquadrado na categoria B é o tempo de uso dessas peças. No ensaio com velocidades de referência variáveis, apesar da desclassificação de uma das peças, a maioria se enquadrou na categoria “A”. De

forma geral, conforme a ABNT NBR 10522 (2022), nos dois testes, as VRPs ainda desempenharam sua função, mesmo não se enquadrando em categorias de melhor regulagem. Entretanto, a quantidade de válvulas desclassificadas nos testes de histerese pode representar prejuízos significativos ao desempenho a campo. Na Tabela 1 é apresentado o resumo das classificações de cada uma das VRPs avaliadas.

Tabela 1- Resultados dos testes das VRPs.

Posição do conjunto no pivô central	Teste com vazão constante (categoria)	Teste com pressões constantes (categoria)	Teste de histerese (conformidade)
1	B	B	Conforme
3	A	B	Conforme
17	B	B	Conforme
18	B	B	Conforme
19	B	A	Não conforme
49	B	B	Não conforme
50	B	A	Conforme
51	B	A	Não conforme
77	B	A	Não conforme
78	B	A	Conforme
79	B	A	Conforme
80	B	A	Não conforme
105	B	Desclassificada	Não conforme
106	B	A	Conforme
107	B	B	Não conforme

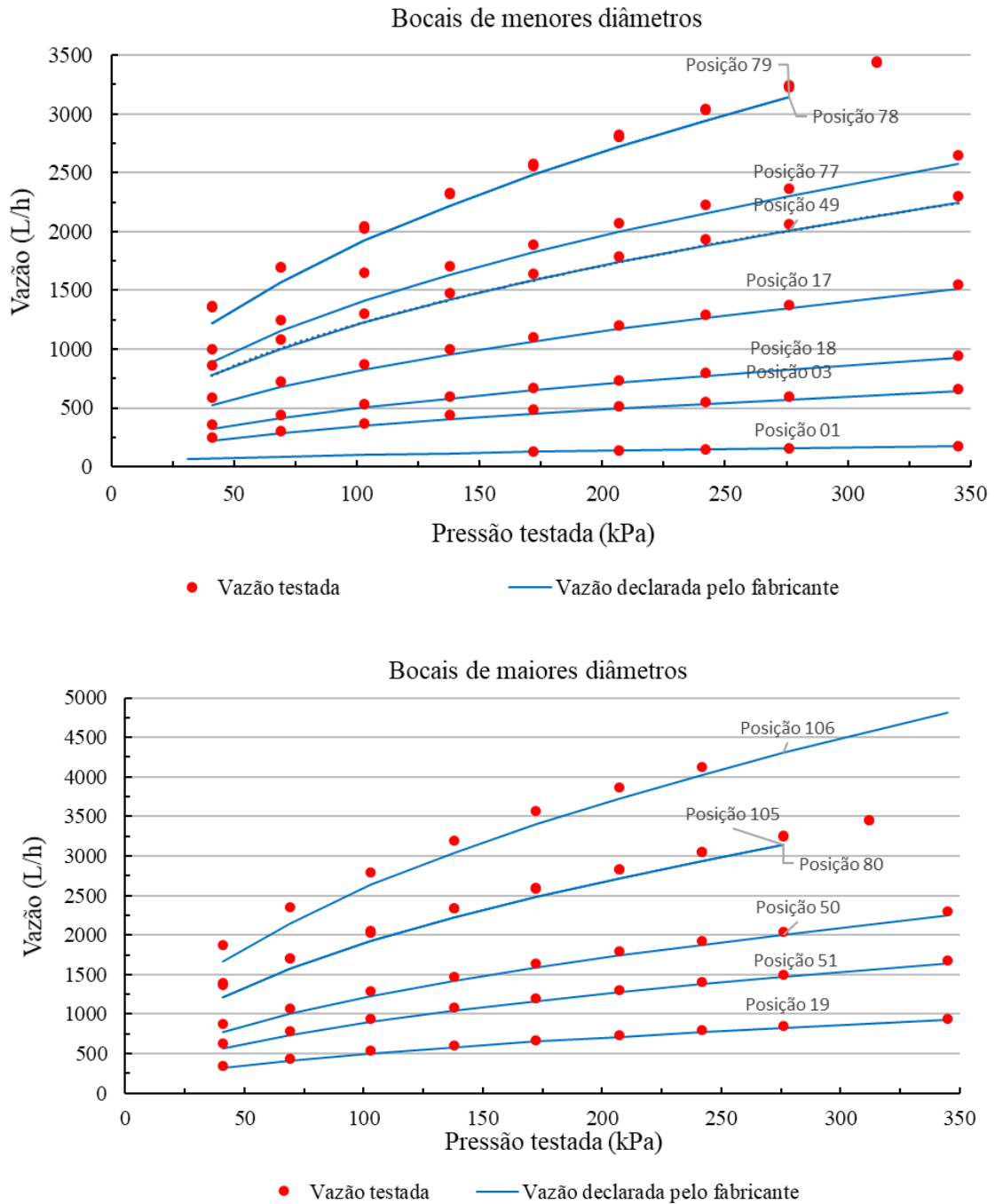
A: desvio máximo de 10% da pressão de regulação conforme ABNT NBR 10522 (2022) ; B: desvio máximo de 20% da pressão de regulação.

Fonte: Autor.

4.2 BOCAIS

Nos testes de vazão em função da pressão, todos os bocais, com exceção do bocal localizado na posição “107” no pivô central, apresentaram conformidade com as informações declaradas pelo fabricante. Na Figura 14 encontram-se as relações entre as vazões e pressões, declaradas pelo fabricante, com as medições realizadas no presente trabalho. Algumas curvas coincidem, devido a bocais diferentes, porém com diâmetros idênticos.

Figura 14 - Relações de vazão em função da pressão dos bocais avaliados.

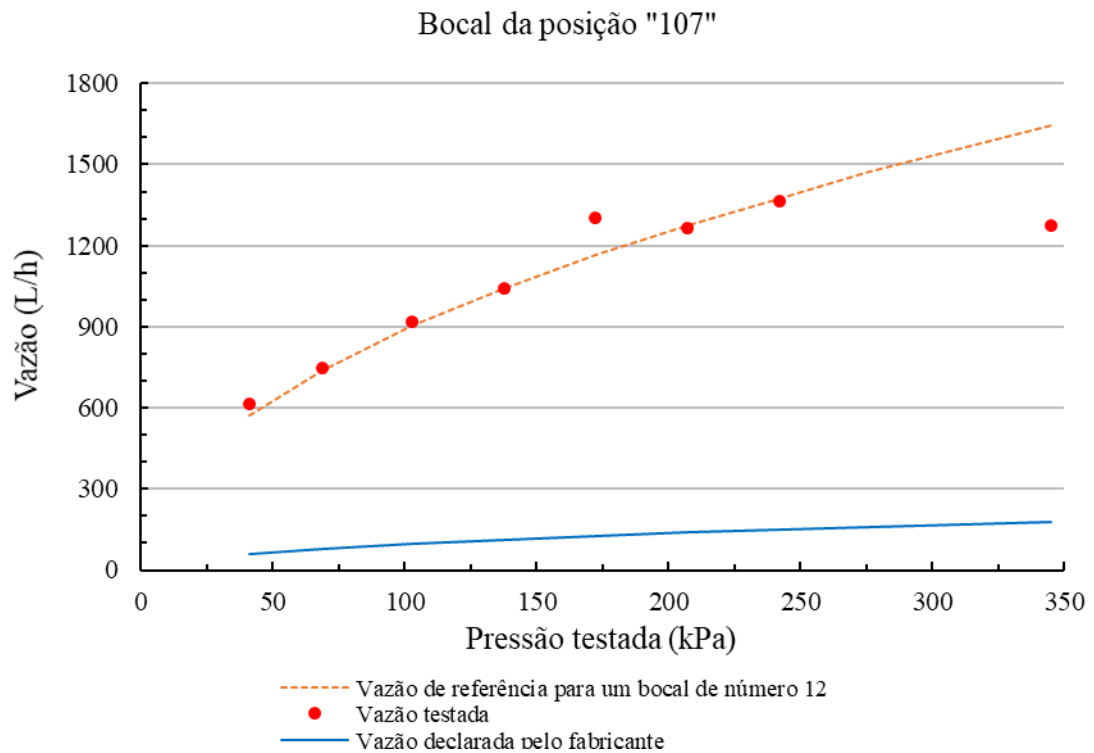


Fonte: Autor.

Ao se avaliar o bocal referente à posição “107” (Figura 15), no pivô central, constatou-se que a curva da vazão em função da pressão não apresentava correspondência com as informações declaradas pelo fabricante. O bocal em questão possuía cor azul e numeração “04”, o que, conforme catálogo do fabricante, se refere a um bocal com diâmetro de 1,59 mm. Entretanto, ao se comparar a curva obtida nos ensaios, observou-se semelhança com a curva equivalente ao bocal de coloração vermelha, e numeração “12”, de diâmetro nominal

equivalente a 4,76 mm. Além disso, para pressões maiores, o bocal testado apresentou valores irregulares para vazões, deslocando do que seria uma linha potencial característica dos emissores (AZEVEDO NETTO e FERNÁNDEZ y FERNÁNDEZ, 2015). Na Figura 16 é possível comparar o jato de água na saída desse bocal com o bocal da posição “03”, na linha lateral do pivô central, que possui numeração “04” e coloração azul-clara, conforme o fabricante.

Figura 15 - Gráfico da vazão em função da pressão, para o bocal da posição “107” no pivô central.



Fonte: Autor.

Figura 16 - Aspecto visual dos bocais das posições “03” e “107” e seus jatos durante realização dos ensaios.



Fonte: Autor.

A hipótese que explica as características desse bocal da Figura 15 é que tenha ocorrido um erro durante o processo de fabricação, com uso incorreto de molde de extrusão. Dessa forma, o bocal em questão apresenta dois problemas dentro do sistema de irrigação onde se encontra instalado: i) a posição de instalação inadequada no final da linha lateral, considerando que esse bocal não tivesse problemas de fabricação; ii) o erro de fabricação, ocasionando problemas na aplicação excessiva de água, caso estivesse no lugar correto.

Nas medições dos diâmetros dos bocais, realizados no projetor de perfil, com exceção do bocal referente a posição “107”, os resultados foram compatíveis com o que é declarado pelo fabricante (Tabela 2). A variação entre as repetições foi baixa de acordo com o CV, inclusive para o bocal da posição “107”, indicando que não houve problemas no processo de medição. Na Tabela 3 é possível observar o coeficiente de descarga calculado para cada bocal, a equação característica das curvas potenciais e o R^2 .

Tabela 2 – Resultados das medições dos diâmetros dos bocais.

Posição do bocal no pivô central	Diâmetro declarado pelo fabricante(mm)	Diâmetro médio(mm)	CV (%)
1	1,59	1,60	0,42
3	4,56	4,58	0,31
17	2,98	3,00	0,27
18	3,57	3,59	0,17
19	3,57	3,59	0,18
49	5,56	5,58	0,13
50	5,56	5,57	0,31
51	4,76	4,77	0,10
77	5,95	5,99	0,08
78	6,95	6,98	0,17
79	6,95	6,97	0,04
80	6,95	6,98	0,19
105	6,95	6,97	0,04
106	8,14	8,15	0,14
107	1,59	4,73	0,45

Fonte: Autor.

Tabela 3 – Coeficientes de descarga, equações características e R² dos bocais testados.

Posição do bocal no pivô central	Coeficiente de descarga	Eq. da curva vazão X pressão	R ²
1	1,02	$y = 99,159x^{0,459}$	0,9926
3	1,05	$y = 370,25x^{0,4612}$	0,9968
17	1,06	$y = 865,34x^{0,4581}$	0,9992
18	1,05	$y = 526,91x^{0,4612}$	0,9981
19	1,06	$y = 526,44x^{0,4677}$	0,9997
49	1,06	$y = 1288,9x^{0,4572}$	0,9994
50	1,05	$y = 1284x^{0,4572}$	0,9989
51	1,05	$y = 941,32x^{0,4555}$	0,9992
77	1,17	$y = 1506,8x^{0,4483}$	0,9909
78	1,06	$y = 2024x^{0,4566}$	0,9992
79	1,06	$y = 2024x^{0,4566}$	0,9992
80	1,21	$y = 2041,1x^{0,4508}$	0,9983
105	1,06	$y = 2041,1x^{0,4508}$	0,9983
106	1,06	$y = 2778,1x^{0,4488}$	0,9997
107	6,29	$y = 909,46x^{0,4013}$	0,9132

Fonte: Autor.

De acordo com o fabricante, os bocais possuem vida útil de cinco anos (SENNINGER, 2022). A partir disso, devido ao processo de uso, é possível haver divergência tanto em diâmetro quanto em vazão. Mesmo assim, após cerca de sete anos de instalação do pivô, ambas as características dos bocais podem ser consideradas ainda representativas do material (Tabela 2).

Evidencia-se a importância de se seguir uma plano de manutenções preditivas e preventivas nesses sistemas de irrigação, seguindo-se rigorosamente as características de projeto. Adicionalmente, é válido, quando possível, certificar-se de que os componentes desses sistemas de irrigação de fato possuam as características declaradas pelos respectivos fabricantes.

5 CONCLUSÕES

Referente às válvulas reguladoras de pressão, a quantidade de peças desclassificadas nos testes de histerese e enquadradas na categoria B de regulação pela norma ISO NBR 10522(2022) indicam algum desgaste pela utilização, se comparadas com peças novas, que em teoria se enquadrariam em todos requisitos da norma. Houve peças não conformes de acordo com requisito normativo e que podem ser substituídas no plano de manutenção do pivô.

Quanto aos bocais, com exceção de uma das peças, todos apresentaram características satisfatórias, mesmo com período de uso superior à vida útil declarada pelo fabricante.

Para um dos bocais não houve correspondência do número e cor estampados na peça em relação a diâmetro e vazão medidos, decorrente de provável defeito no processo de fabricação.

Conforme o levantamento a campo, diversos bocais se encontraram instalados em posições contraditórias, devido à reposição incorreta, sem obedecer ao mapeamento de bocais do projeto do sistema.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil (1985 - 2017)**. 2. ed. Brasília, DF.: ANA, 2019. v. 1. 47 p.
- ARAÚJO, A. C. S. et al. Avaliação do desgaste de válvulas reguladoras de pressão utilizadas em pivô central de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 9, n. 4, p. 211–217, 2015.
- AZEVEDO NETTO, J. M. de; FERNÁNDEZ y FERNÁNDEZ, M. **Manual de Hidráulica**. 9 ed. São Paulo: Blucher, 2015. 632 p.
- BARBOSA, B. D. S. **Características hidráulicas e energéticas de um pivô central**. 2016. 157 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2016.
- EVANS, R. G. **Center pivot irrigation**. v. 1, n. 1. USDA: Sydney, MT.
- HERMANN, D. F.; HEIN, P. R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system. **Trans ASAE**, v. 11, n. 6, p. 11–15, 1968.
- ISO 10522. **ABNT NBR ISO 10522: Equipamentos de irrigação agrícola -Válvulas reguladoras de pressão de ação direta**. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2022. 17 p.
- ISO 11545. **ABNT ISO 11545: Equipamentos de irrigação pivô central e linear móvel, equipadas com sprayers ou aspersores-Determinação da uniformidade de distribuição de água**. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2016. 17 p.
- ISO 15155. **ABNT ISO/TR 15155-1: Equipamentos de irrigação agrícola-Instalações de ensaio para equipamentos de irrigação agrícola. Parte 1: Generalidades**. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2020. 24 p.
- LIMA, S. C. R. V. et al. Curvas de desempenho de válvulas reguladoras de pressão novas e com diferentes tempos de utilização. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 201–209, 2003.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: Princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2009. 355 p.
- MCLEAN, R. K.; RAJAN, R. S.; KLASSEN, G. Spray evaporation losses from sprinkler irrigation systems. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 42, n. 1, p. 1–8, 2000.
- RAJAN, N. et al. Emitter uniformity and application efficiency for Center-Pivot irrigation systems. **Irrigation and drainage**, n. 64, p. 353–361, 2015.
- SANDRI, D.; CORTEZ, D. DE A. Parâmetros de desempenho de dezesseis equipamentos de irrigação por pivô central. **Ciência agrotécnica**, v. 33, n. 1, p. 271-278, 2009.

SENNINGER. **Mechanical move catalog**. Clermont, FL, Estados Unidos da América, [s. d.]. Disponível em: https://www.senninger.com/sites/senninger.hunterindustries.com/files/mechanical-move-products-catalog_9.pdf. Acesso em: 01 de agosto de 2022.

TALAMINI Jr., M. V. et al. Operational Characterization of Pressure Regulating Valves. **The Scientific World Journal**, v. 2018, p. 1–9, 2018.

ZHANG, C.; LI, G. Optimization of a direct-acting pressure regulator for irrigation systems based on CFD simulation and response surface methodology. **Irrigation Science**, v. 35, n. 5, p. 383–395, 2017.