

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

Coeficiente de descarga em emissores de pivô central

Renato Moreira da Silva

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em
Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2011**

Renato Moreira da Silva
Tecnólogo em Irrigação e Drenagem

Coefficiente de descarga em emissores de pivô central

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010

Orientador: Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba
2011

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Silva, Renato Moreira da
Coeficiente de descarga em emissores de pivô central / Renato Moreira da Silva. - -
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010. - - Piracicaba, 2011.
75 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Equipamentos agrícolas 2. Hidráulica aplicada 3. Irrigação por pivô central -
Dimensionamento I. Título

CDD 631.7
S586c

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Sebastião e Valdimar, pilares da minha existência, fonte inesgotável de amor e paz.

As minhas irmãs, Cleide, Katia, Kelly e Ana Paula, pela amizade, pelo apoio, pelos conselhos, pelo amor, pelo respeito e pela fraternidade.

A meus sobrinhos, Pedro Henrique, Noemy, Arthur e Ana Vitória.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelo dom da vida, pela saúde, amor e fé;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ-USP), por meio do Departamento de Engenharia de Biosistemas, pela oportunidade de realizar o curso;

Ao Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho, pela orientação segura, pelos ensinamentos acadêmicos, amizade, confiança, atitude profissional durante a condução do trabalho e pela convivência que muito contribuiu para o meu amadurecimento profissional;

Aos Professores do Curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pela amizade, ensinamentos e pelo exemplo de dedicação à ciência, cheia de sabedoria e humildade;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), instituições financiadoras do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI), instituição da qual disponibilizou a infraestrutura onde foram realizados alguns dos ensaios;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biosistemas que varias vezes me auxiliaram em diversos trabalhos;

Às excelentes secretárias do Departamento de Engenharia de Biosistemas (ESALQ/USP), Davilmar e Sandra, pela competência, paciência e colaboração, e a Bia pela amizade;

A todos os amigos que tenho convivido durante esses anos, em especial: Adriano Diotto (Kubano), Carlos José, Cornélio Zollin, Danieli Zitterell, Everaldo Silva, Fernando Barbosa, Francisco Oliveira (Tikão), Janaína Paulino, Jussálvia Pimentel, Ligia Marinho, Lucas Faria,

Lucas Vellame, Marcelo Abritta, Raphael Dias, Rafael e Maschio, pela amizade construída em forte laço, registrada para sempre em minha vida.

SUMÁRIO

RESUMO	10
ABSTRACT	12
LISTA DE FIGURAS	14
LISTA DE TABELAS	18
1 INTRODUÇÃO	20
2 DESENVOLVIMENTO	22
2.1 Irrigação	22
2.1.1 Irrigação no Brasil	22
2.1.2 Irrigação por pivô central	25
2.2 Bocais	27
2.2.1 Classificação	27
2.2.2 Bocal cilíndrico externo	28
2.2.3 Bocal cilíndrico interno	28
2.2.4 Bocais cônicos	29
2.3 Coeficiente de descarga	29
2.4 Material e Métodos	32
2.4.1 Caracterização do local e do ensaio experimental	32
2.4.2 Descrição dos bocais	32
2.4.2.1 Determinação do diâmetro dos bocais	35
2.4.3 Descrição dos medidores de vazão	35
2.4.3.1 Calibração dos medidores de vazão	38
2.4.4 Descrição dos manômetros	38
2.4.4.1 Calibração dos manômetros	39
2.4.5 Quantificação da variação do diâmetro dos bocais plásticos em função da pressão de operação do emissor	41
2.4.6 Quantificação da concentração de ar da água utilizada nos ensaios	42
2.4.7 Determinação do coeficiente de contração	43
2.4.8 Determinação do coeficiente de descarga	44

2.4.9 Avaliação da uniformidade de aplicação de água em sistemas dimensionados com os coeficientes de descarga médios para cada pressão e específicos para cada diâmetro de bocal ...	45
2.4.9.1 Distribuição da lâmina ao longo da linha lateral do sistema	45
2.4.9.2 Coeficiente de uniformidade de aplicação.....	46
2.5 Resultados e Discussão.....	47
2.5.1 Avaliação da variação do diâmetro dos bocais em função da pressão de funcionamento do emissor.....	47
2.5.2 Quantificação da concentração de ar dissolvido na água do reservatório de irrigação	47
2.5.3 Coeficiente de contração	48
2.5.4 Coeficiente de descarga.....	49
2.5.5 Relação entre as vazões observadas experimentalmente e calculadas utilizando valores médios do C_d de cada pressão de operação	53
2.5.6 Avaliação da uniformidade de aplicação de água em dimensionamento com coeficientes de descarga médio de cada pressão e específico para cada diâmetro de bocal	54
2.5.6.1 Distribuição da lâmina ao longo da linha lateral do sistema	54
2.5.6.2 Coeficiente de uniformidade de distribuição.....	61
3 CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS	66
ANEXOS	70

RESUMO

Coefficientes de descarga de emissores para pivô central

A crescente busca por tecnologias com melhor desempenho energético faz com que a engenharia da irrigação desenvolva emissores que apresentem coeficientes de descarga mais elevados. O presente trabalho teve como objetivo determinar os coeficientes de descarga dos emissores comerciais (*Senninger, Nelson e Fabrimar*), utilizados em sistema de irrigação pivô central, visando desenvolver equações de regressão para cálculo do C_d , de acordo com o diâmetro do bocal e a pressão de serviço dos emissores, assim como comparar o dimensionamento hidráulico destes sistemas de irrigação com base no C_d médio e no C_d específico de cada diâmetro de bocal. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ, Universidade de São Paulo, seguindo o padrão de pressão utilizado na comercialização destes emissores (PSI). Foram avaliados 45 bocais *Senninger*, 42 bocais *Nelson* e 36 bocais *Fabrimar*, de diferentes diâmetros nominais, compreendidos entre 1/16" e 13/32" (1,59 e 10,32 mm), com três repetições, totalizando 369 bocais ensaiados. As pressões de operação variaram entre a faixa de 6 a 30 PSI (41,37 a 206,84 kPa), com intervalos de leituras a cada 2 PSI (13,79 kPa), totalizando 13 pressões analisadas por bocal. Foram ajustadas as curvas do coeficiente de descarga em função do diâmetro do bocal, para quatro pressões de operação 10, 15, 20, e 30 PSI (68,95, 103,42, 137,90 e 206,84 kPa). Utilizaram-se dois manômetros de precisão (analógico e digital) previamente calibrados em um manômetro de peso morto. As vazões foram obtidas utilizando-se três medidores eletromagnético-indutivos calibrados em recipiente volumétrico. O diâmetro dos bocais foi mensurado por meio de uma ampliação em projetor de perfil. Os resultados evidenciam que o coeficiente de descarga varia em função do diâmetro do bocal, da pressão de operação e do ângulo de convergência (fator construtivo). Nos ensaios conduzidos, obtiveram-se valores de C_d compreendidos na faixa de 0,88 a 0,98 para a faixa de emissores analisados. O coeficiente de uniformidade de distribuição não se diferenciou entre os sistemas hidráulicos dimensionados com C_d médio e específico para cada diâmetro de bocal.

Palavras-chave: Irrigação; Dimensionamento hidráulico, Emissores, Pivô central

ABSTRACT

Discharge coefficient for center pivot emitters

The necessity for more energy efficient technologies makes the engineering of irrigation develop emitters with higher discharge coefficients. This study aimed to determine the discharge coefficients of commercial emitters (Senninger, Nelson and Fabrimar) used in center pivot irrigation system, in order to develop regression equations to calculate the C_d , of according to the diameter of the nozzle and pressure service of the emitters, and compare the hydraulic design of this irrigation system based on the average C_d and C_d specific nozzles for each nozzle diameter. The tests were carried out at the Irrigation Department of Biosystems Engineering, ESALQ, University of Sao Paulo, following the standards of the American unit system. It was evaluated a set of 45 Senninger nozzles, 42 Nelson nozzles and 36 Fabrimar nozzles, of different nominal diameters, ranging from 1/16" to 13/32" (1.59 and 10.32 mm) with three replications, totalizing 369 nozzles tested. The operation pressures ranged from 6 to 30 psi (41,37 a 206,84 kPa), at intervals of 2 psi (13,79 kPa), totalizing 13 pressures for nozzle. Curves were drawn for the discharge coefficient as a function of nozzle size for four operating pressures 10, 15, 20, e 30 psi (68,95, 103,42, 137,90 e 206,84 kPa) and for each manufacturer. It was used two precision pressure gauges (analogue and digital) calibrated agaisnt a dead weight gauge. Flow rates were obtained using three inductive electromagnetic gauges calibrated with volumetric readings. Nozzle diameters were measured using a profile projector model Starrett HB 400. The results evidence that the discharge coefficient varies with the diameter of the nozzle, the operation pressure and the convergence angle (constructive factor). The trials resulted C_{ds} included in the range from 0.88 to 0.98, range for the analyzed issuers. The CUC was not different between the hydraulic systems with C_d designs considering medium and specific C_d for each nozzle.

Keywords: Irrigation; Hydraulic design; Emitters; Center pivot

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da área irrigada no Brasil.....	23
Figura 2 – Evolução da área irrigada no Brasil nos dois últimos levantamentos do censo agropecuário.....	23
Figura 3 – Área (1000 ha) e porcentagem de área irrigada no Brasil para os diferentes métodos de irrigação	24
Figura 4 – Sistema pivô central instalado em área com relevo acidentado	26
Figura 5 – Bocal cilíndrico externo.....	28
Figura 6 – Bocal cilíndrico interno	28
Figura 7 – Formato das bordas de entrada dos bocais convergentes	29
Figura 8 – Esquema do reservatório	31
Figura 9 – Esquema ilustrativo dos equipamentos utilizados no ensaio.....	32
Figura 10 – Emissores: (a) Senninger, (b) Fabrimar e (c) Nelson	33
Figura 11 – Relação número do bocal e diâmetro real do fabricante Senninger	33
Figura 12 – Relação número do bocal e diâmetro real do fabricante Nelson	34
Figura 13 – Relação número do bocal e diâmetro real do fabricante Fabrimar.....	34
Figura 14 – Bocais: (a) Nelson, (b) Senninger e (c) Fabrimar; (1) menor diâmetro, (2) diâmetro médio e (3) maior diâmetro.....	34
Figura 15 – a) projetor de perfil óptico e b) imagem aproximada do perfil do diâmetro do bocal na tela do projetor	35
Figura 16 – Medidor de vazão eletromagnético indutivo	36
Figura 17 – Manômetros: a) analógico e b) digital.....	39
Figura 18 – Calibração dos manômetros utilizando peso morto, a) digital e b) analógico.....	39
Figura 19 – Dados e equação de regressão dos valores médios de calibração do manômetro digital	40
Figura 20 – Dados e equação de regressão dos valores médios de calibração do manômetro analógico.....	40
Figura 21 – Esquema ilustrativo dos equipamentos utilizado no ensaio	41
Figura 22 – Pesagem dos picnômetros com água, utilizando balança analítica	42
Figura 23 – Diâmetro do jato d’água	44
Figura 24 – Visualização do perfil de conexão do bocal com o corpo do emissor.....	48

Figura 25 – Ângulo de convergência em que o bocal de ambos os fabricantes apresenta melhor rendimento hidráulico. Bocais: (A) Senninger, (B) Nelson e (C) Fabrimar	50
Figura 26 – Curvas dos coeficientes de descarga dos bocais Senninger em função do diâmetro do bocal operando com pressões de 10, 15, 20 e 30 PSI.....	51
Figura 27 – Curvas dos coeficientes de descarga dos bocais Nelson em função do diâmetro do bocal operando com pressões de 10, 15, 20 e 30 PSI.....	51
Figura 28 – Curvas dos coeficientes de descarga dos bocais Fabrimar em função do diâmetro do bocal operando com pressões de 10, 15, 20 e 30 PSI.....	51
Figura 29 – Variação das vazões determinadas experimentalmente com relação à calculada utilizando C_d médio de cada pressão	53
Figura 30 – Variação das vazões determinadas experimentalmente com relação à calculada utilizando C_d médio de cada pressão	53
Figura 31 – Variação das vazões determinadas experimentalmente com relação à calculada utilizando C_d médio de cada pressão	54
Figura 32 – Perfil de distribuição para os bocais Senninger operando	55
Figura 33 – Perfil de distribuição para os bocais Fabrimar.....	55
Figura 34 – Perfil de distribuição para os bocais Nelson	56
Figura 35 – Perfil de distribuição das vazões na linha do sistema dimensionados com bocais Senninger.....	56
Figura 36 – Perfil de distribuição das vazões na linha do sistema dimensionados com bocais Fabrimar	57
Figura 37 – Perfil de distribuição das vazões na linha do sistema dimensionados com bocais Nelson.....	57
Figura 38 – Coeficiente de variação da lâmina aplicada calculadas utilizando C_d médio e específico para os bocais Senninger.....	58
Figura 39 – Coeficiente de variação da lâmina aplicada calculadas utilizando C_d médio e específico para os bocais Fabrimar.....	59
Figura 40 – Coeficiente de variação da lâmina aplicada calculadas utilizando C_d médio e específico para os bocais Nelson.....	59
Figura 41 – Erro na lâmina aplicada, dimensionada com C_d médio; (A) Senninger, (B) Nelson e (C) Fabrimar; (1) 10 PSI, (2) 15 PSI e (3) 20 PSI.....	60

Figura 42 – Conjunto de bocais Senninger 76
Figura 43 – Conjunto de bocais Nelson 76
Figura 44 – Conjunto de bocais Fabrimar 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diâmetro medido dos bocais Senninger Super Spray	36
Tabela 2 – Diâmetro medido dos bocais Nelson Spray 3TN	36
Tabela 3 – Diâmetro medido dos bocais Fabrimar Spray Asfix	37
Tabela 4 – Características dos medidores de vazão	37
Tabela 5 – Erro dos manômetros digital e analógico aferidos ao peso morto	40
Tabela 6 – Dados técnicos das placas defletoras de emissores pivô central.....	46
Tabela 7 – Concentração de ar dissolvido na água do laboratório de irrigação.....	47
Tabela 8 – Diâmetro do jato d'água.....	49
Tabela 9 – Diâmetro medido dos bocais Senninger Super Spray	49
Tabela 10 – Equações dos coeficientes de descarga dos bocais Senninger em função do diâmetro do bocal (mm)	52
Tabela 11 – Equações dos coeficientes de descarga dos bocais Nelson em função do diâmetro do bocal (mm).....	52
Tabela 12 – Equações dos coeficientes de descarga dos bocais Fabrimar em função do diâmetro do bocal (mm)	52
Tabela 13 – Respectivos erros ocasionados na lâmina aplicada em 21 horas, ao utilizar C_d médio, para os bocais Senninger.....	61
Tabela 14 – Respectivos erros ocasionados na lâmina aplicada em 21 horas, ao utilizar C_d médio, para os bocais Nelson.....	61
Tabela 15 – Respectivos erros ocasionados na lâmina aplicada em 21 horas, ao utilizar C_d médio, para os bocais Fabrimar	61
Tabela 16 – Coeficiente de uniformidade de Christiansen para C_d médio e específico de cada diâmetro de bocal.....	62
Tabela 17 – Diâmetros internos e coeficiente de variação dos bocais Senninger. Repetição (R). Diâmetro (D).....	72
Tabela 18 – Diâmetros internos e coeficiente de variação dos bocais Nelson. Repetição (R). Diâmetro (D).....	73
Tabela 19 – Diâmetros internos e coeficiente de variação dos bocais Fabrimar. Repetição (R). Diâmetro (D).....	74

1 INTRODUÇÃO

Com a modernização do setor agrícola, torna-se cada vez mais acirrada a concorrência entre fabricantes de equipamentos em busca de mercados consumidores. Neste contexto, alternativas que proporcionem aumentar a eficiência do processo de produção, reduzir custos, obtendo níveis de qualidade aceitáveis, podem ser consideradas decisivas para a viabilização econômica de determinadas culturas.

As recentes tecnologias advindas da irrigação exercem papel fundamental para o aumento da produtividade agrícola, sendo um dos principais instrumentos para a modernização da agricultura brasileira, permitindo incremento de produtividade, garantindo maior qualidade e rentabilidade do produto, proporcionando a redução do custo unitário de produção, utilização do solo durante todo o ano, de forma a ofertar alimentos com regularidade ao longo do ano. De acordo com Coelho (2007), cerca de 3,4 milhões de hectares são irrigados no Brasil, sendo que 2,2 milhões desse total são irrigados por sistemas pressurizados, com destaque para o sistema pivô central. Conforme os dados apresentados por Christofidis (2006), a área irrigada por pivô central no país representa mais que a metade da área total irrigada por aspersão. Com aproximadamente 60 anos de existência, desde que foi patenteado em 1952, muitas incorporações tecnológicas foram inseridas ao sistema pivô central. Para Folegatti et al. (1998), as principais inovações no equipamento têm ocorrido principalmente no sistema de propulsão, alinhamento e nos dispositivos de distribuição de água. Novas tecnologias foram incorporadas, como o sistema de propulsão elétrica, vãos de grande comprimento, tubulação aérea de maior diâmetro e articulações flexíveis entre torres. Com o aumento dos custos da energia, foram introduzidos os emissores fixos de baixa pressão e posteriormente o sistema LEPA.

O dimensionamento da linha lateral do sistema de irrigação pivô central é uma das etapas mais complexas e importantes do projeto. A configuração ou escolha dos bocais dos emissores constitui uma das principais etapas deste processo, dadas as características particulares de aplicação de água deste sistema. Como no anel externo do pivô a velocidade de deslocamento das torres aumenta mantendo constante a velocidade angular, o tempo de aplicação diminui nesta área, e para que seja mantida a mesma lâmina aplicada ao longo de toda a área, deve-se aumentar a taxa de aplicação neste anel. Desta forma, é necessário aumentar o diâmetro dos bocais ao longo do equipamento no campo, que por sua vez irá mudar o coeficiente de descarga (C_d).

Devido à existência de perdas de carga localizada (energia hidráulica) durante a passagem da água pelo orifício, sua velocidade real na seção de saída do bocal é ligeiramente menor que a velocidade teórica, assim como a seção contraída do jato de água é menor do que a seção do bocal. Consequentemente, ocorre a redução da vazão real, que é o produto da área da seção pela velocidade real, corrigindo-se a seção do bocal. O objetivo deste trabalho foi determinar os coeficientes de descarga dos emissores comerciais (*Senninger, Nelson e Fabrimar*), utilizados em sistema de irrigação pivô central, visando desenvolver equações de regressão para cálculo do C_d , de acordo com o diâmetro do bocal e a pressão de serviço dos emissores, assim como comparar o dimensionamento hidráulico destes sistemas de irrigação com base no C_d médio e no C_d específico de cada diâmetro de bocal.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Irrigação

Estima-se que a área irrigada no planeta ocupe cerca de 17% de toda terra cultivada e responda pela produção de mais de 40% de todo alimento consumido, ou seja, a área irrigada mundialmente equivale a quase 2,5 vezes a produção de alimentos das áreas de sequeiro. Esses dados dão uma idéia da importância da prática da irrigação no contexto alimentar. Aproximadamente 80% dos produtos necessários para satisfazer às necessidades da população mundial, nos próximos 25 anos, serão providos pelos cultivos irrigados (FAO, 2007).

Segundo especialistas, o Brasil possui um potencial de expansão para agricultura irrigada de cerca de 30 milhões de hectares, ou seja, um adicional de 25,5 milhões de hectares considerando a área irrigada atual de aproximadamente 4,5 milhões. Contudo, esse aumento se torna uma questão estratégica, uma vez que implicará uma maior demanda pelos recursos hídricos e possíveis conflitos pelo uso da água.

A agricultura irrigada é a atividade humana que demanda a maior quantidade de água. Em termos mundiais, estima-se que esse uso responda por cerca de 70% do uso da água e até 95% em vários países em desenvolvimento, causando conflitos em relação aos demais usos da água (FAO, 2007). As parcelas de água destinadas à irrigação no Brasil têm um merecido destaque, estimado em 69% das vazões efetivamente consumidas, (GEO BRASIL, 2007).

Existe uma tendência natural de aumento do uso da água, seja pelo aumento populacional, culminando numa maior necessidade por alimentos, seja pela disponibilidade de terras com aptidão para o uso na agricultura irrigada. Porém, não existe previsão de aumento da oferta de água doce; ao contrário, os desmatamentos e o uso inadequado do solo têm mantido um elevado escoamento superficial com baixa reposição dos mananciais e fontes hídricas.

2.1.1 Irrigação no Brasil

De acordo com o censo agropecuário (2009), citado por Zollin (2010), desde 1960 até 1995/96 (Figura 1), a área irrigada no país aumentou de 0,45 milhões de hectares para 3,1

milhões de hectares em 1995/96, sendo cerca de 90% dessas áreas irrigadas desenvolvidas pela iniciativa privada, e os restantes 10% por projetos públicos. Ainda na Figura 1 é possível notar que a região Sul foi a que sempre apresentou a maior área irrigada, até o ano de 1996, seguida pela região Sudeste, Nordeste, Centro-oeste e Norte.

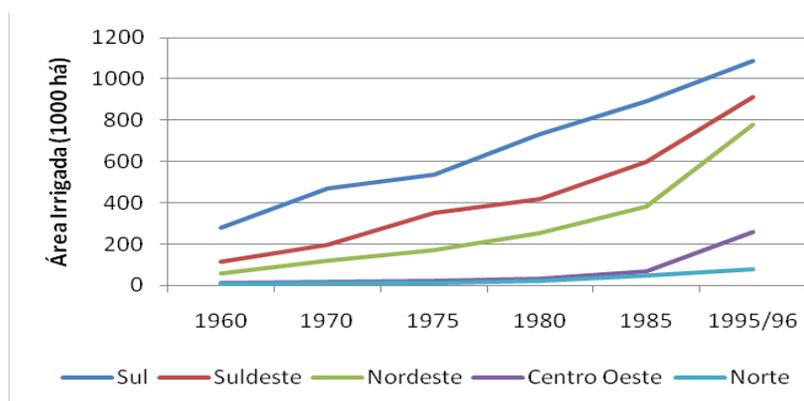


Figura 1 – Evolução da área irrigada no Brasil. Fonte: Zollin (2010)

Analisando os dados obtidos pelo censo agropecuário de 1995/96 e comparando com os de 2006, Zollin (2010), observou-se que a área irrigada no país aumentou de 3.121.644 para 4.453.925 ha, o que representou um aumento de 1,3 milhões de hectares, ou seja, 42% em aproximadamente 10 anos, o que resulta em um ritmo médio de 150 mil hectares por ano (Figura 2).

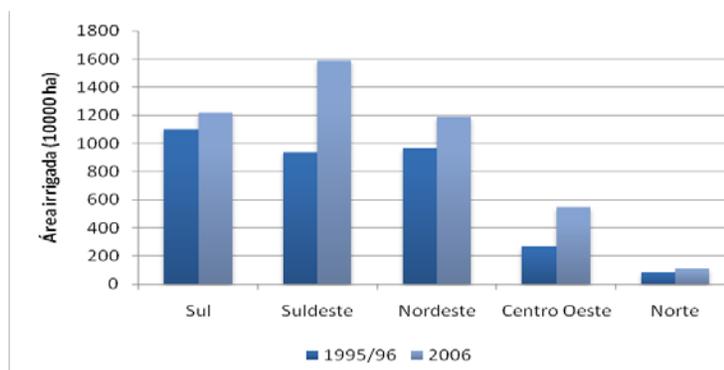


Figura 2 – Evolução da área irrigada no Brasil nos dois últimos levantamentos do censo agropecuário. Fonte: Zollin (2010)

Atualmente o Brasil assume o 16º lugar entre os países com maior área irrigada no mundo, detendo pouco mais de 1% da área total irrigada, que é cerca de 277 milhões de hectares

(AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA, 2009). É um dos países com menor relação “área irrigada/área irrigável”, além de exibir baixíssima taxa de hectares irrigados/habitante (0,018 ha/hab.) – a menor da América do Sul.

Observa-se, nesta última década, que houve uma inversão entre as regiões Sudeste e Sul, pois até o censo de 1995/96 a região Sul com 1.195.440 ha, era a que possuía a maior área irrigada (35,1%), contra 890.974 ha (29,8%) da região Sudeste, que apresentava a segunda maior área; isso se deve, possivelmente, ao fato de a região Sudeste possuir uma relação entre a área potencial irrigável e a área efetivamente irrigada menor do que a da região Sul. A região Sudeste possui 5,9 milhões de hectares potenciais para o desenvolvimento da irrigação, enquanto que a região Sul possui cerca de 4,5 milhões (SECRETARIA EXTRAORDINÁRIA DA IRRIGAÇÃO E USOS MÚLTIPLOS DA ÁGUA, RS. - SEIUMA, 2010).

Atualmente, a região Sudeste encontra-se com 1,58 milhões de hectares irrigados, representando 35,6% da área total do país e a região Sul apresenta uma área de 1,22 milhões de hectares (27,5%), ocupando o segundo lugar em área irrigada. Relacionando as áreas potenciais e as áreas efetivamente utilizadas para a irrigação, nas regiões Sudeste e Sul, observa-se que ambas apresentam valores relativamente próximos, respectivamente 26,7 e 27,1%. Com 22,1% de toda área irrigada do país, a região Nordeste assume o terceiro lugar, seguida das regiões Centro-Oeste e Norte.

Analisando os sistemas de irrigação utilizados, pode-se observar que o método por aspersão é empregado na maior parte das áreas irrigadas, com 2.382.960 ha, sendo que deste total 19% é representado pelo sistema pivô central, em seguida esta os métodos por inundação (30%), e localizada (8%) (Figura 3).

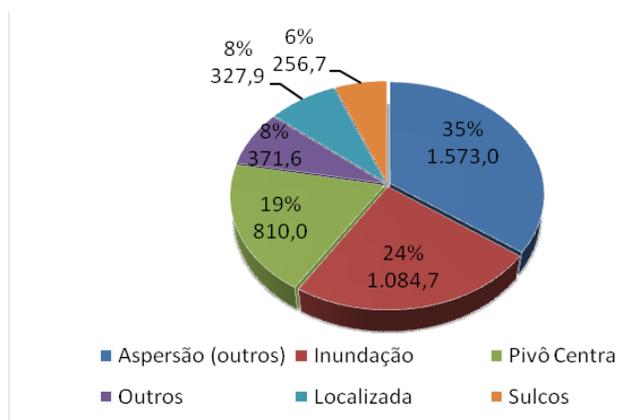


Figura 3 – Área (1000 ha) e porcentagem de área irrigada no Brasil para os diferentes métodos de irrigação. Fonte: Zollin (2010)

2.1.2 Irrigação por pivô central

O pivô central foi construído pela primeira vez em 1948. Em 1949, seu inventor, Frank L. Zybach, submeteu o invento para ser analisado, o qual foi finalmente patentado em 1952, no Colorado (EUA). Inicialmente eram máquinas simples acionadas por mecanismos de pistões movidos hidráulicamente. O inventor produziu unidades até 1954, quando vendeu os direitos de fabricação para uma empresa americana, localizada no estado de Nebraska. A partir de 1968, outras empresas iniciaram a fabricação de pivôs e atualmente várias disputam o mercado mundial. O pivô central popularizou-se em todo o mundo, sendo o sistema de irrigação de maior aceitação em larga escala (PAIR et al., 1983).

No Brasil o primeiro pivô central lançado foi o Valmatic, em 1979, pela associação das empresas Asbrasil e Valmont (EUA). O sistema foi difundido no Brasil na década de 1970, e desde então tem proporcionado um significativo avanço na agricultura irrigada no país (SOUZA, 2006). Na região central do Brasil, esse sistema vem sendo o mais utilizado nos últimos anos pelas grandes empresas agrícolas; essa preferência deve-se ao alto nível de automação, tornando-o bastante versátil na irrigação em formato circular, podendo operar em área total ou parcial, conforme o manejo da cultura ou da área (BARRETO et al., 2004). Com tais características, o sistema adequou-se muito bem à realidade da agricultura brasileira, e rapidamente conquistou a grande preferência do agricultor irrigante, sendo atualmente um sistema de irrigação bastante comercializado

Dentre os métodos de irrigação, o de aspersão por pivô central tem se expandido de forma mais significativa pelas seguintes razões: boa uniformidade de distribuição de água, quando bem planejado; fácil controle da lâmina d'água aplicada; grande versatilidade para as diversas condições de topografia (Figura 4) e tipos de solo; menor dispêndio de mão-de-obra e maior divulgação por parte de fabricantes e vendedores (BERNARDO, 2008).



Figura 4 – Sistema pivô central instalado em área com relevo acidentado

Os emissores inicialmente utilizados em pivô central foram os aspersores de impacto com ângulos de inclinação de 23° , acoplados sobre a tubulação do pivô. Este aspersor apresentava, ao longo da linha, tamanhos variáveis ou o mesmo tamanho, variando o diâmetro dos bocais.

Para substituir os tradicionais aspersores de impacto, aplicando a mesma lâmina de água, com uniformidade comparável e menor utilização de energia, foram desenvolvidos os emissores de baixa pressão. A redução de pressão de operação pela utilização de emissores de baixa pressão é a maneira mais fácil de reduzir o consumo de energia dos sistemas pivô central (GILLEY et al., 1977).

Atualmente o sistema pivô central passou a ser projetado ou redimensionado para trabalhar em pressão reduzida, sendo que os reguladores de 10 e 15 PSI são normalmente os mais utilizados. De acordo com os fabricantes, a tendência é reduzir ainda mais as pressões dos emissores.

A economia de energia pela utilização de emissores de baixa pressão é proporcional à razão da pressão no centro do pivô pela altura manométrica total do sistema, e em pivôs de grande porte, que necessitam de adutoras, esta economia é pouco significativa. Neste caso, no entanto, a economia de energia é melhor representada pela razão entre a pressão necessária no final da lateral e a altura manométrica total (PESSOA, 1994).

Os sistemas de aplicação citados anteriormente (aspersão) se caracterizam por aplicar água em toda a área irrigada. Visando a uma maior eficiência de aplicação, o sistema *Low Energy Precision Application* (LEPA) foi desenvolvido, gerando o aparecimento de emissores que procuram distribuir a água de maneira localizada, em sulcos ou próximo às raízes das plantas. O primeiro propósito do LEPA é a aplicação eficiente de água para as culturas com um uso eficiente de energia (YAZAR et al., 2002). Os emissores LEPA realizam a aplicação de água com

elevada eficiência, trabalhando com uma pressão de serviço baixa, conseqüentemente promovendo uma maior economia de água e energia, quando comparados com aspersores e difusores (NEW et al., 1990).

Vários autores afirmam que a eficiência de aplicação de água de sistemas de pivô central equipado com emissores LEPA geralmente excede os 95% nos Estados Unidos. (LYLE et al., 1983; SCHENEIDER et al., 1995).

O pivô central é um dos sistemas de irrigação mais automatizados que existem no mercado. Essa automação pode variar desde simples acessórios a componentes que permitem colocá-lo em funcionamento a distancia, por meio de ondas de rádio ou telefone celular. Existem também pivôs que são totalmente controlados por estações computadorizadas capazes de coletar dados (umidade do solo, evapotranspiração e pluviometria, por exemplo), analisá-los e avaliar o momento ideal e a exata quantidade de água que deverá ser aplicada para suprir a demanda da cultura (VILELA, 1999).

2.2 Bocais

2.2.1 Classificação

Bocais ou tubos adicionais são peças tubulares adaptadas aos orifícios, que servem para dirigir o jato d'água e regular a vazão. O seu comprimento deve estar compreendido entre 1,5 e 3,0 vezes o seu diâmetro. De um modo geral, e para comprimentos maiores, consideram-se comprimentos de 1,5 a 3,0 vezes o diâmetro como bocais; de 3,0 a 500 vezes, como tubos muito curtos; de 500 a 4000 vezes, como tubulações curtas; e acima de 4000 como tubulações longas (AZEVEDO NETTO, 1998).

De acordo com as normas da *International Organization for Standardization* (A.S.M.E.) pela *International Standards Association* (I.S.A), o perfil de entrada dos bocais é projetado de forma a guiar a veia fluida até atingir a seção mais estrangulada do elemento de controle (bocal), seguindo uma curva elíptica quando projetado, fazendo com que o plano onde a veia é mais contraída seja exatamente o mesmo plano do diâmetro (DELMÉE, 1995).

2.2.2 Bocal cilíndrico externo

Uma abertura feita na parede lateral ou no fundo de um recipiente que contenha líquido, e que possibilita o escoamento desse líquido, é genericamente denominada orifício ou bocal. Quando a parede do reservatório é espessa ou quando um tubo é adicionado externamente ao orifício (Figura 5), de modo que o jato líquido possa fluir colado à parede, tem-se o que se convencionou chamar de bocal cilíndrico externo.

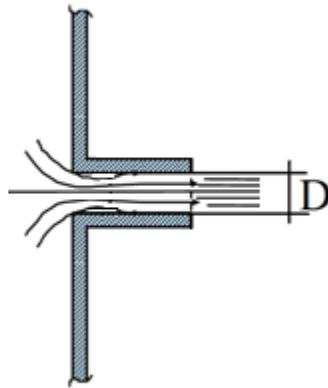


Figura 5 – Bocal cilíndrico externo. Fonte: Afredini (2000). Diâmetro do bocal (D)

2.2.3 Bocal cilíndrico interno

Quando um tubo curto é adicionado internamente a um orifício (Figura 6), tem-se o caso de um bocal cilíndrico interno.

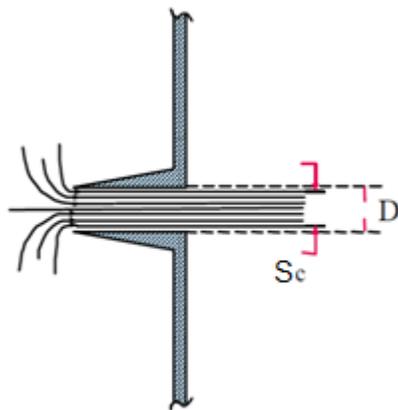


Figura 6 – Bocal cilíndrico interno. Fonte: Afredini (2000). Seção contraída (S_c), Diâmetro do bocal (D)

2.2.4 Bocais cônicos

Entre todas as formas geométricas empregadas na construção de bocais, a cônica convergente apresenta maior eficiência hidráulica e normalmente é a mais utilizada. Em experimento, Azevedo Netto (2007) demonstra que não ocorre contração no fluido em escoamento para bocais cônicos convergentes e afirma ainda que as condições hidráulicas dos bocais são influenciadas principalmente pelo formato, condições de acabamento, ângulo de convergência e comprimento do bocal. O (C_d) , para bocais cônicos divergentes e convergentes, normalmente está compreendido entre 0,95 e 0,98. Para Lencastre (1972), o (C_d) em bocais convergentes (Figuras 7 A e B), varia com o ângulo de bordadura do bocal.

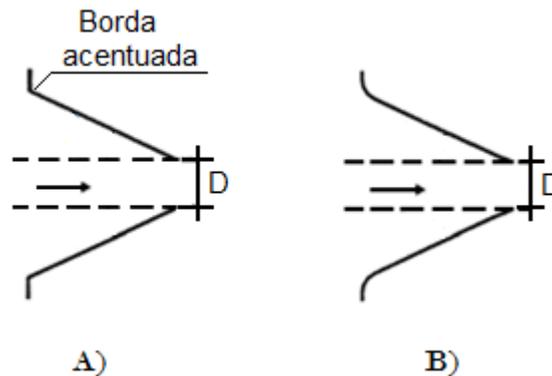


Figura 7 – Formato das bordas de entrada dos bocais convergentes. Fonte: Lencastre (1972). Diâmetro, (D)

2.3 Coeficiente de descarga

As partículas fluidas procedentes dos mais diversos pontos aproximam-se do orifício ou do bocal descrevendo trajetórias convergentes, isto obriga o jato formado a sofrer uma contração, ocorrendo um valor mínimo de área na seção em uma posição em que os filetes são paralelos, denominada seção contraída, representada na Figura 6. A razão entre a área do jato na seção contraída e a área nominal do orifício do bocal define o coeficiente de contração (C_c) apresentado na eq. (1).

$$C_c = \frac{\left(\frac{\pi \cdot D_C^2}{4}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right)} \Rightarrow C_c = \frac{A_c}{A} \quad (1)$$

em que:

- C_c – Coeficiente de contração, adimensional;
- D_C – Diâmetro contraído, m;
- D – Diâmetro do bocal, m;
- A_c – Área contraída, m²; e
- A – Área da seção do orifício, m².

Aplicando-se o teorema de Bernoulli às seções 1 e 2 (Figura 8), e tomando-se o eixo de orifício como referência obtém-se a eq. (2):

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + H_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad (2)$$

Como neste caso a seção do orifício é muito pequena em relação à coluna de água, de seu eixo até a superfície, a velocidade V_1 é desprezível, e a velocidade de escoamento na seção do orifício é dada pela eq. (3):

$$V_2 = \sqrt{2g \left(H_1 + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right)} \quad (3)$$

em que:

- V_2 – Velocidade na saída do bocal (ponto 2), m s⁻¹;
- g – Aceleração da gravidade, m s⁻²;
- H_1 – Coluna de água da superfície ao plano de referência, m.c.a;
- P_1 – Pressão na superfície (ponto 1), kg m⁻²;
- P_2 – Pressão no bocal (ponto 2), kg m⁻²; e
- γ – Peso específico do fluido, kg m⁻³.

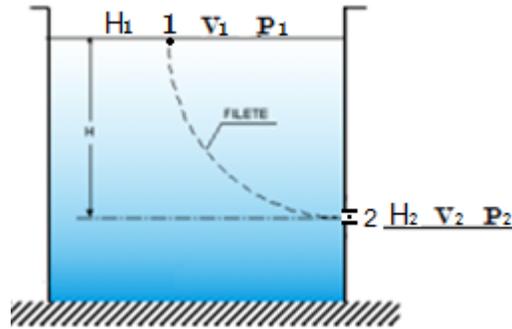


Figura 8 – Esquema do reservatório

No caso em que a veia líquida escoar para a atmosfera, $P_2 = P_1$, a eq. (4) pode ser utilizada para calcular a velocidade teórica:

$$V_2 = \sqrt{2gH} \quad (4)$$

Como a velocidade teórica do fluido é sempre maior que a velocidade real, por não levar em consideração as perdas existentes, tem-se a necessidade de introduzir o coeficiente de velocidade (C_v), conforme eq. (5):

$$C_v = \frac{V_r}{V_t} \quad (5)$$

em que:

C_v – Coeficiente de velocidade, adimensional.

V_r – Velocidade real, $m\ s^{-1}$; e

V_t – Velocidade teórica, $m\ s^{-1}$.

O produto do coeficiente de contração (C_c) pelo coeficiente de velocidade (C_v) recebe o nome de coeficiente de descarga (C_d) ou de vazão (eq. 6):

$$C_d = C_c \cdot C_v \quad (6)$$

2.4 Material e Métodos

2.4.1 Caracterização do local e do ensaio experimental

Os trabalhos foram conduzidos em ambiente fechado, no Laboratório de Irrigação da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, localizada em Piracicaba-SP, cuja sede tem as seguintes coordenadas geográficas, 22°43’ S e 47°38’ W, a uma altitude de 547 m. Foram determinados os coeficientes de descarga dos emissores comerciais, utilizados em sistema de irrigação pivô central, visando desenvolver equações de regressão para cálculo do C_d , de acordo com o diâmetro do bocal e a pressão de serviço dos emissores.

O esquema ilustrativo dos equipamentos utilizados nos ensaios é apresentado na Figura 9:

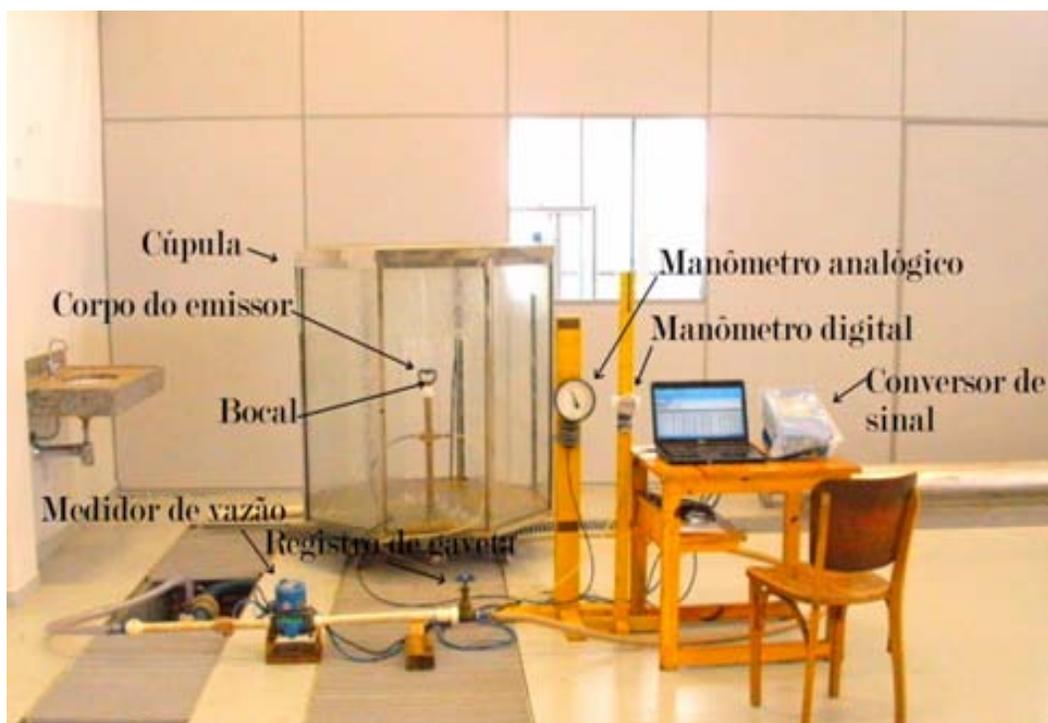


Figura 9 – Esquema ilustrativo dos equipamentos utilizados no ensaio

2.4.2 Descrição dos bocais

Para desenvolvimento da pesquisa, avaliaram-se os emissores comerciais fabricados pelas empresas Senninger, Nelson e Fabrimar, sendo estes os mais comercializados no Brasil. Dessa

forma, o experimento abrange uma amostra representativa dos emissores utilizados em pivô central existentes no mercado nacional.

Foram avaliados 45 bocais Senninger, modelo Super Spray; 42 bocais Nelson, modelo Spray 3TN e 36 bocais Fabrimar, modelo Spray Asfix (Figura 10), com três repetições, totalizando 369 bocais.

A faixa de abrangência dos diâmetros dos respectivos fabricantes é ligeiramente diferente, sendo: bocais Senninger entre 1/16" a 13/32" (\cong 1,59 a 10,32 mm); bocais Nelson entre 9/125" a 25/64" (\cong 1,83 a 9,97 mm) e os bocais Fabrimar entre 9/128" a 3/8" (\cong 1,78 a 9,52 mm).

As Figuras 11, 12 e 13 ilustram o perfil de variação de diâmetro entre os bocais avaliados juntamente com as equações ajustadas das regressões em função do número de bocal e os coeficientes de determinação.

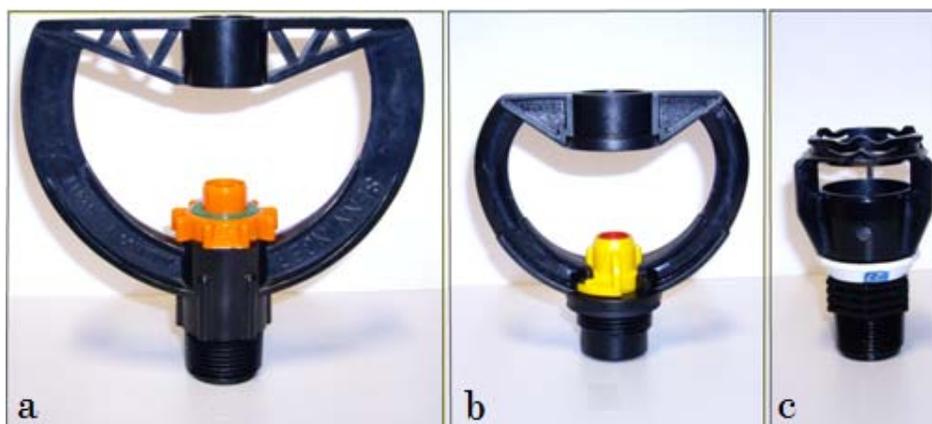


Figura 10 – Emissores: (a) Senninger, (b) Fabrimar e (c) Nelson

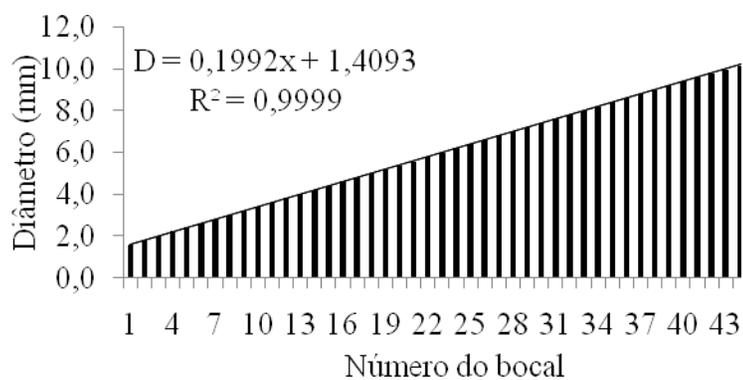


Figura 11 – Relação número do bocal e diâmetro real do fabricante Senninger

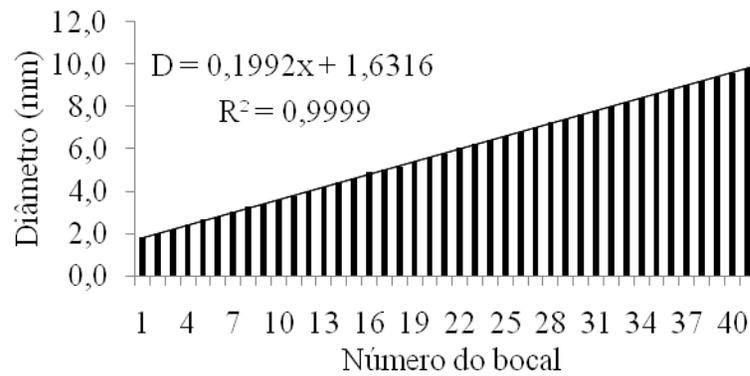


Figura 12 – Relação número do bocal e diâmetro real do fabricante Nelson

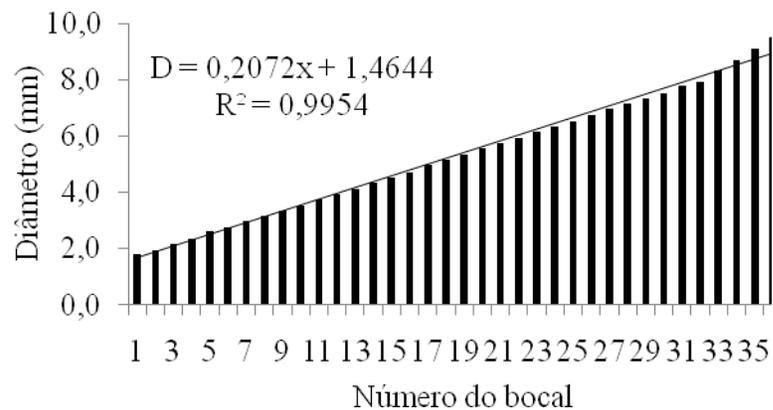


Figura 13 – Relação número do bocal e diâmetro real do fabricante Fabrimar

Na Figura 14, observam-se alguns dos bocais dos três fabricantes avaliados, sendo ilustrados somente os bocais menores, os médios e os maiores; o conjunto completo de todos os bocais avaliados encontram-se no Anexo A.

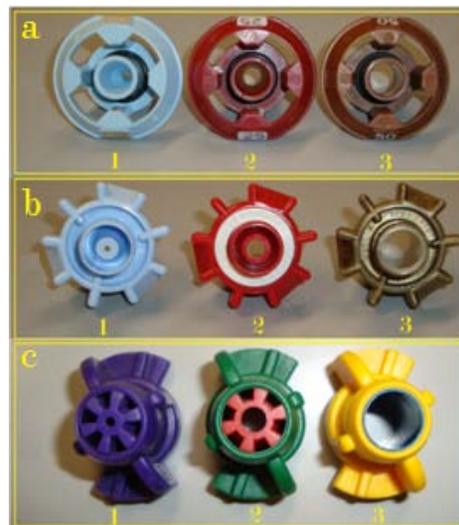


Figura 14 – Bocais: (a) Nelson, (b) Senninger e (c) Fabrimar; (1) menor diâmetro, (2) diâmetro médio e (3) maior diâmetro

2.4.2.1 Determinação do diâmetro dos bocais

Os diâmetros dos bocais foram medidos por meio de um projetor de perfil óptico (Figura 15), marca Starrett, modelo HB 400, que permite aferir com precisão (erro máximo de leitura de 1%) o diâmetro do orifício projetado.

O projetor emite uma luz sobre o objeto passando posteriormente por uma lente de aumento, incidindo sua imagem verticalmente sobre uma superfície que contém o perfil óptico.

O equipamento é provido de um micro-computador com *software* QC 4000 que interpreta os sinais enviados pelo sensor, permitindo que a figura do objeto seja exportada com extensão “dtx”, podendo ser visualizada em *software* específico para desenho e determinação de área. No caso dos bocais utilizados que apresentam forma geométrica circular, a leitura do diâmetro é realizada diretamente, sem a necessidade de realizar a montagem de seu formato, como é o caso de um objeto que não possui área geométrica definida.

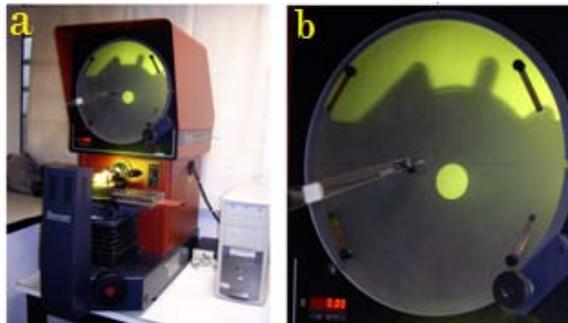


Figura 15 – a) projetor de perfil óptico e b) imagem aproximada do perfil do diâmetro do bocal na tela do projetor

2.4.3 Descrição dos medidores de vazão

No processo de medição das vazões dos bocais foram utilizados três medidores eletromagnéticos indutivos (diferentes faixas de vazão) a Figura 16 apresenta o medidor ½”. Devido à característica física dos bocais analisados (Tabelas 1, 2, e 3), por meio do procedimento hidráulico de avaliação (pressões variando de 6 a 30 PSI), há uma grande faixa de vazão compreendida entre o menor e o maior bocal, faixa esta que não pode ser determinada utilizando-se apenas um medidor, em virtude da característica específica dos medidores magnéticos, que

apresentam diferentes vazões de trabalho. Assim, cada medidor foi utilizado para avaliar apenas os bocais que apresentassem faixas de vazão contidas em sua própria faixa.

As características técnicas dos medidores utilizados estão apresentadas na Tabela 4.



Figura 16 – Medidor de vazão eletromagnético indutivo

Tabela 1 – Diâmetro medido dos bocais Senninger Super Spray

Número do bocal	Diâmetro Interno (mm)	Número do bocal	Diâmetro interno (mm)	Número do bocal	Diâmetro interno (mm)
4,0	1,599	11,5	4,595	19,0	7,595
4,5	1,834	12,0	4,800	19,5	7,793
5,0	2,006	12,5	4,992	20,0	8,002
5,5	2,229	13,0	5,181	20,5	8,184
6,0	2,396	13,5	5,385	21,0	8,405
6,5	2,61	14,0	5,564	21,5	8,608
7,0	2,799	14,5	5,792	22,0	8,785
7,5	3,004	15,0	5,997	22,5	8,979
8,0	3,203	15,5	6,192	23,0	9,182
8,5	3,39	16,0	6,403	23,5	9,388
9,0	3,582	16,5	6,570	24,0	9,604
9,5	3,805	17,0	6,812	24,5	9,748
10,0	3,987	17,5	6,986	25,0	9,966
10,5	4,196	18,0	7,206	25,5	10,137
11,0	4,377	18,5	7,393	26,0	10,350

Tabela 2 – Diâmetro medido dos bocais Nelson Spray 3TN

(continua)

Número do bocal	Diâmetro Interno (mm)	Número do bocal	Diâmetro interno (mm)	Número do bocal	Diâmetro interno (mm)
9	1,831	23	4,613	37	7,410
10	2,026	24	4,915	38	7,639
11	2,213	25	5,008	39	7,829
12	2,445	26	5,173	40	7,977
13	2,662	27	5,398	41	8,166
14	2,810	28	5,59	42	8,427

Tabela 2 – Diâmetro medido dos bocais Nelson Spray 3TN (conclusão)

Número do bocal	Diâmetro interno (mm)	Número do bocal	Diâmetro interno (mm)	Número do bocal	Diâmetro interno (mm)
15	3,036	29	5,768	43	8,621
16	3,274	30	6,042	44	8,814
17	3,402	31	6,249	45	9,008
18	3,611	32	6,435	46	9,197
19	3,793	33	6,617	47	9,402
20	3,997	34	6,808	48	9,577
21	4,200	35	7,017	49	9,797
22	4,399	36	7,252	50	9,977

Tabela 3 – Diâmetro medido dos bocais Fabrimar Spray Asfix

Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro interno (mm)	Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro interno (mm)	Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro interno (mm)
1,8	1,786	4,2	4,128	6,6	6,521
2,0	1,950	4,4	4,351	6,8	6,750
2,2	2,156	4,6	4,527	7,0	6,952
2,4	2,349	4,8	4,704	7,2	7,125
2,6	2,595	5,0	4,980	7,4	7,328
2,8	2,748	5,2	5,140	7,6	7,526
3,0	2,982	5,4	5,341	7,8	7,769
3,2	3,147	5,6	5,561	8,0	7,934
3,4	3,352	5,8	5,732	8,4	8,309
3,6	3,541	6,0	5,935	8,8	8,693
3,8	3,751	6,2	6,134	9,2	9,109
4,0	3,940	6,4	6,336	9,6	9,516

Tabela 4 – Características dos medidores de vazão

Medidor magnético	Diâmetro nominal		Faixa de medição com Acerácea de 99%			
	(mm)	Polegada	(L min ⁻¹)		(m ³ h ⁻¹)	
indutivo						
1	12,7	1/2"	0,00	– 16,67	0,00	– 1,00
2	25,4	1"	16,67	– 66,67	1,00	– 4,00
3	38,1	1 1/2"	66,67	– 150,0	4,00	– 9,00

É importante ressaltar que os medidores eletromagnéticos devem ser utilizados em líquidos que tenham condutividade elétrica mínima de 20 $\mu\text{S cm}^{-1}$ para água desmineralizada e 5 $\mu\text{S cm}^{-1}$ para demais fluidos.

2.4.3.1 Calibração dos medidores de vazão

Para maior exatidão nas determinações das vazões, foram efetuadas calibrações rotineiras a cada dois dias de trabalhos nos medidores de vazão, utilizando um tanque volumétrico de medição, com capacidade de 1.200 litros, provido de régua com escala graduada.

Para o processo de calibração, os medidores foram estabilizados em suas respectivas vazões médias, reguladas por um registro de ajuste fino. Com o nível da água do tanque no ponto zero da régua graduada, iniciou-se a coleta do volume com quatro repetições, por um período de 15 minutos para os três medidores utilizados no ensaio. Relacionou-se o volume coletado (volume real) com o volume do medidor vazão (volume teórico), estimando-se em termo percentual o diferencial volumétrico entre os respectivos valores, conforme eq. (7):

$$D_v = \frac{\text{Maior volume} - \text{Menor volume}}{\text{Maior volume}} \cdot 100 \quad (7)$$

em que:

D_v – Diferencial de volume, %.

2.4.4 Descrição dos manômetros

Por motivo de segurança experimental, as pressões de ensaio foram monitoradas por dois manômetros simultaneamente: digital e analógico (Figura 17). Este procedimento permite monitorar com maior segurança as pressões de ensaio, evitando algum descontrole por voltagem de bateria inadequada e pelo amortecimento eletrônico do sistema digital. Os dois manômetros apresentam erro máximo de leitura de 0,5%, o digital com escala de 0,00 a 213,35 PSI e o analógico com escala graduada de 0,00 a 35,40 PSI, sendo que os mesmos foram previamente calibrados em um manômetro de peso morto.

Os manômetros foram instalados seguindo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT (1991), com a tomada de pressão conectada em um ponto localizado aproximadamente a 0,2 m abaixo do bocal, com o manômetro situado no mesmo plano horizontal (nível) do bocal.

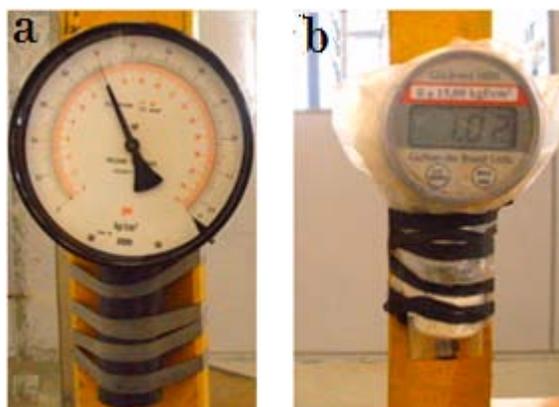


Figura 17 – Manômetros: a) analógico e b) digital

2.4.4.1 Calibração dos manômetros

As calibrações preventivas dos manômetros foram realizadas durante todo o ciclo do experimento (Figura 18), sempre no início dos ensaios, aferindo-se as pressões de 10, 15, 20, 25 e 30 PSI, estando estas pressões dentro da faixa de avaliação experimental, as quais puderam ser aferidas, uma vez que o manômetro de peso morto tem pressões previamente estabelecidas. Foram realizados três ciclos de medição em cada pressão estabelecida.

A regressão dos valores médios de calibração do manômetro digital e analógico é apresentada nas Figuras 19 e 20.

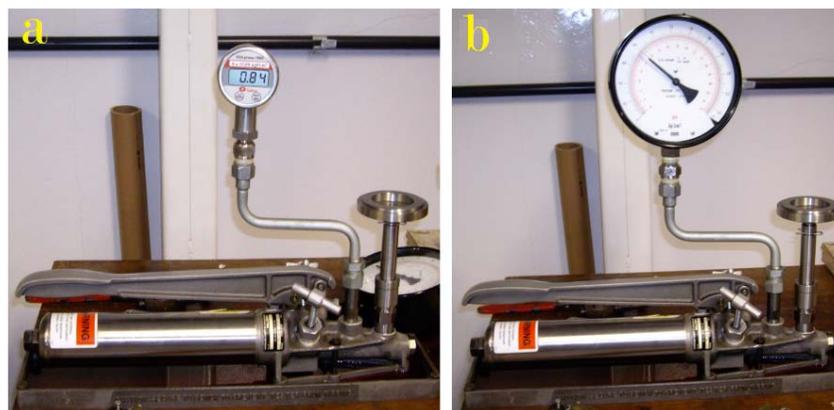


Figura 18 – Calibração dos manômetros utilizando peso morto, a) digital e b) analógico

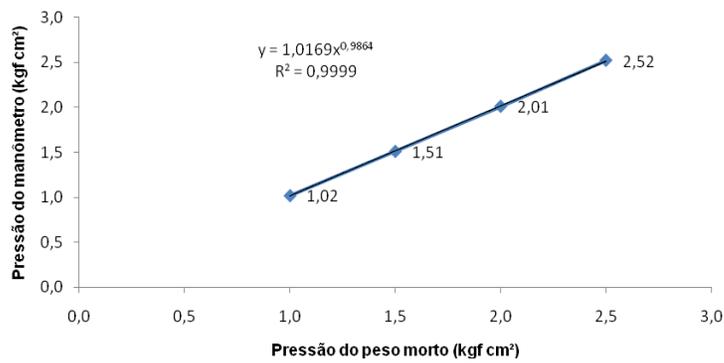


Figura 19 – Dados e equação de regressão dos valores médios de calibração do manômetro digital

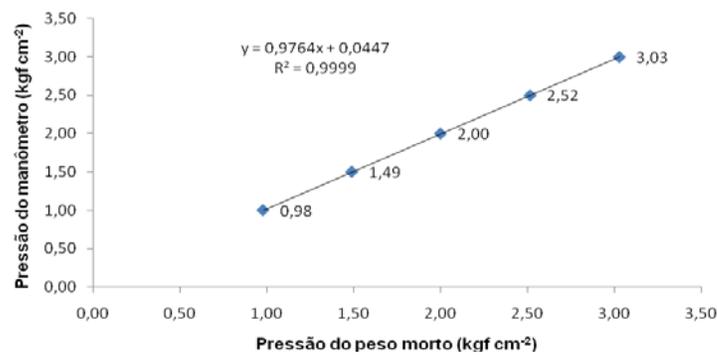


Figura 20 – Dados e equação de regressão dos valores médios de calibração do manômetro analógico

A relação entre as pressões estabelecidas no peso morto e as pressões aferidas nos manômetros com seus respectivos erros de calibração pode ser observada na Tabela 5.

Tabela 5 – Erro dos manômetros digital e analógico aferidos ao peso morto

Manômetro peso morto (kgf/cm ²)	Manômetro analógico (kgf/cm ²)	Manômetro digital (kgf/cm ²)	Erro sistemático	
			Manômetro analógico (%)	Manômetro digital (%)
1,0	0,98	1,02	2,00	1,96
1,5	1,49	1,51	0,67	0,66
2,0	2,00	2,01	0,00	0,50
2,5	2,52	2,52	0,60	0,79
3,0	3,03	3,02	0,92	0,56

2.4.5 Quantificação da variação do diâmetro dos bocais plásticos em função da pressão de operação do emissor

Avaliou-se a possível suscetibilidade de deformação dos bocais (elasticidade do material plástico) quando submetidos a pressões relativamente altas. Os equipamentos utilizados e o arranjo dos mesmos estão ilustrados na Figura 21.

Foram selecionados quatro diferentes diâmetros de bocais para serem avaliados, sendo eles: 7,5; 12; 17,5; 24,5 (números de identificação dos bocais), fabricados pela Senninger. Devido ao formato dos bocais dos demais fabricantes (Nelson e Fabrimar) não foi possível efetuar a avaliação dos mesmos. Isto porque o acabamento final da parte externa do bocal não possibilita o acoplamento das hastes do paquímetro junto à parede do orifício do bocal.

Procurou-se selecioná-los de forma representativa entre todos os diâmetros compreendidos no experimento. Os referidos bocais foram submetidos a pressões internas variando de 0 a 100 PSI. Os ensaios foram realizados com o emissor instalado na horizontal, sobre uma plataforma de madeira de 0,8 m de altura, com o jato d'água direcionado para uma cúpula.

Para observar a ocorrência ou não da variação do diâmetro do bocal com a variação de pressão, utilizou-se um paquímetro digital, instalado transversalmente ao sentido do emissor. Foi utilizada uma fita elástica para firmar sutilmente e com pressão contínua as hastes do paquímetro junto às extremidades da parede do bocal.

É importante ressaltar que a posição de ensaio dos emissores é apenas para facilitar o acoplamento do paquímetro junto ao bocal.

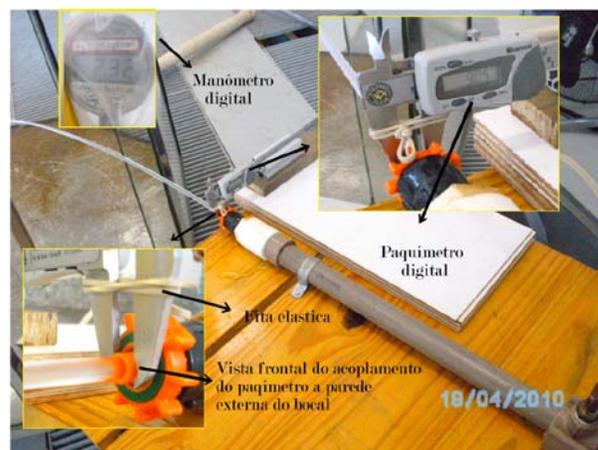


Figura 21 – Esquema ilustrativo dos equipamentos utilizado no ensaio

2.4.6 Quantificação da concentração de ar da água utilizada nos ensaios

Visando-se considerar a incorporação de ar, que pode chegar a 21 L m^{-3} de água, realizou-se a quantificação da concentração de ar da água do reservatório, que foi utilizada no ensaio.

A determinação foi realizada pelo método do picnômetro. Para calibrar o volume do picnômetro, os mesmos foram lavados com água deionizada e levados à estufa com temperatura de aproximadamente $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas, posteriormente foram pesados em uma balança analítica de precisão, com 4 casas decimais (modelo Scientech AS-210) para obtenção da massa do picnômetro vazio (M_1). Em seguida, os picnômetros foram enchidos cuidadosamente com água, de modo a não formar bolhas de ar, suas partes externas foram secas com auxílio de papel toalha e estes foram novamente pesados para a obtenção da massa do picnômetro com água (M_2). O mesmo processo foi realizado com água sem ar. Para retirar a maior concentração de ar a água foi fervida por um período de 15 minutos, posteriormente a mesma foi levada a uma câmara de vácuo para retirar o ar retido a uma maior tensão junto às moléculas do líquido.

A temperatura da água foi medida utilizando-se um termômetro de mercúrio, com divisão de escala igual a $1 \text{ }^\circ\text{C}$.

O processo de pesagem dos picnômetros pode ser visto na Figura 22.



Figura 22 – Pesagem dos picnômetros com água, utilizando balança analítica

De posse da massa do picnômetro vazio (M_1), da massa do picnômetro preenchido com água (M_2) e da massa específica da água (Tabelado), foi determinado o volume (V) da água, a partir da eq. (8).

Relacionando-se os volumes da água com e sem ar, estimou-se o percentual de ar incorporado junto à água.

$$V = \frac{(M_2 - M_1)}{\gamma_{H_2O}} \times 1000 \quad (8)$$

em que:

- V – Volume da água, L;
- M_2 – Massa do picnômetro com água, kg;
- M_1 – Massa do picnômetro vazio, kg, e
- γ_{H_2O} – Massa específica da água, kg m⁻³.

2.4.7 Determinação do coeficiente de contração

Com o intuito de verificar a ação direta do coeficiente de contração (C_c) sobre o coeficiente de descarga (C_d), avaliou-se a ocorrência de contração do jato de água na seção do orifício.

As partículas fluidas que descrevem trajetórias convergentes obrigam o jato a sofrer uma contração em uma seção transversal, ocorrendo um valor mínimo de área na seção em uma posição em que os filetes são paralelos, a qual é denominada seção contraída (POTO, 2006).

A partir de imagens fotográficas (Figura 23), foi avaliada a ocorrência de contração, utilizando o *software* AutoCAD 2005, medindo-se o diâmetro do jato d'água e comparando-o com o diâmetro do bocal, determinado com o projetor de perfil óptico. Para converter a escala da imagem, foi utilizada uma trena métrica projetada perpendicularmente ao sentido do jato e posicionada atrás do emissor.

Foram avaliados os bocais 1,8 (1,786 mm); 6,0 (5,935 mm) e 9,6 (9,516 mm) fabricados pela Fabrimar, sendo os bocais submetidos às pressões de 10, 15, 20 e 30 PSI.

As pressões foram determinadas utilizando-se um manômetro digital com escala de 0,00 a 213,35 PSI, apresentando erro máximo de leitura de 0,5%.

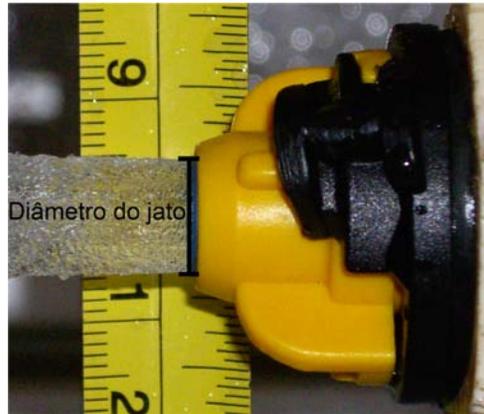


Figura 23 – Diâmetro do jato d'água

2.4.8 Determinação do coeficiente de descarga

Uma vez obtidos os valores de vazão e pressão em cada ponto, os coeficientes de descarga (C_d) foram calculados por meio da eq. (9), chamada de lei dos orifícios:

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2gH} \quad (9)$$

Isolando-se C_d , a equação anterior pode ser representada pela eq. (10):

$$C_d = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{2gH}} \quad (10)$$

em que:

- Q – Vazão que passa pelo bocal, $m^3 s^{-1}$;
- C_d – Coeficiente de descarga, adimensional;
- A – Área do bocal, m^2 ;
- g – Aceleração da gravidade, $m s^{-2}$;
- H – Pressão de serviço, m.c.a;
- π – 3,1416...; e
- d – Diâmetro do orifício do bocal, m.

2.4.9 Avaliação da uniformidade de aplicação de água em sistemas dimensionados com os coeficientes de descarga médios para cada pressão e específicos para cada diâmetro de bocal

2.4.9.1 Distribuição da lâmina ao longo da linha lateral do sistema

Com objetivo de avaliar a uniformidade de distribuição de água da linha lateral em sistema pivô central dimensionado com a média do coeficiente de descarga (C_d) de cada pressão de operação e com valores específicos para cada diâmetro do bocal, realizaram-se simulações de dimensionamento com ambos os valores de C_d (médio e específico) e em seguida procedeu-se à avaliação da uniformidade dos mesmos.

As simulações foram realizadas para todas as marcas de bocais avaliadas, nas pressões de 10, 15 e 20 PSI, as quais são comumente as mais utilizadas no procedimento de dimensionamento deste equipamento.

Em todos os dimensionamentos foram utilizados a mesma vazão e espaçamentos entre emissores. O sistema apresenta raio irrigado de 490 m, 13 torres acionadoras, balanço de 22,5 m; com 196 emissores distribuídos na linha lateral.

O perfil de distribuição da lâmina d'água foi simulado a partir da relação entre o volume aplicado por emissor e a respectiva área teórica irrigada pelo mesmo, definida pela largura do espaçamento entre emissores e o perímetro irrigado pelo emissor (Equação 11). A simulação da sobreposição da lâmina ao longo da lateral do sistema foi realizada utilizando-se placa defletora lisa plana (dados obtidos a partir de catálogos de fabricante).

Os dados técnicos dos defletores são apresentados na Tabela 6.

$$L_E = \frac{V_E}{A} \quad (11)$$

em que:

L_E – Lâmina aplicada por emissor, mm;

V_E – Volume aplicado pelo emissor, L; e

A – Área molhada por emissor, m².

Tabela 6 – Dados técnicos das placas defletoras de emissores pivô central

Placa de defletora	Pressão (PSI)	Diâmetro irrigado (m)
Lisa plana	10	5
Lisa plana	15	6,5
Lisa plana	20	12,9

2.4.9.2 Coeficiente de uniformidade de aplicação

Seria complexo desenvolver uma equação teórica para estimar a distribuição da lâmina em sistema pivô central, pois ela depende da influência climática, do conjunto de emissores, da topografia, do movimento do equipamento, entre outros fatores. Evans et al. (1995) salienta que um mapa de distribuição espacial da lâmina aplicada pode ser construído a partir de um número suficientemente grande de observações.

Não sendo possível coletar a lâmina em campo, uma vez que o sistema não foi implantado, a simulação da uniformidade de distribuição de água foi realizada com base nos valores da lâmina aplicada por emissor, com base em um perfil plano, definido pela lâmina média e pelo alcance máximo especificado pelo catálogo do fabricante de cada emissor. Ou seja, a simulação da avaliação do sistema foi baseada em um perfil de aplicação radial.

Para estimativa do coeficiente de uniformidade de aplicação, utilizou-se a equação proposta por Heerman e Hein (1968) adaptada da equação de Christiansen (eq. 12). Os cálculos foram realizados utilizando-se uma planilha eletrônica de avaliação de sistema pivô central da Microsoft Office Excel

$$CUC = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N A_i |X_i - MP|}{MP \cdot \sum_{i=1}^N A_i} \right] \quad (12)$$

em que:

- CUC – coeficiente de uniformidade de Christiansen, (%);
- MP – média ponderada da lamina aplicada por emissor, mm;
- X_i – lâmina aplicada por emissor i , mm;
- A_i – área representada pelo emissor i ; e
- N – número de emissores.

2.5 Resultados e Discussão

2.5.1 Avaliação da variação do diâmetro dos bocais em função da pressão de funcionamento do emissor

De acordo com a literatura, para a matéria-prima termoplástica utilizada na fabricação do inserto (bocais Fabrimar), qualquer deformação por esforço compressivo na ordem de 0,5 mm, geraria uma deformação permanente irreversível que seria perceptível após o teste, ao medir-se novamente o diâmetro. Além disso, conforme nota do fabricante, a tensão de ruptura do referido material é da ordem de 435,11 PSI (3000 kPa) (TEIXEIRA et al., 2007).

Na avaliação realizada, não foi evidenciada qualquer variação do diâmetro dos bocais dentro da faixa de pressão ensaiada, compreendida entre 0 e 100 PSI (0 a 7,03 kgf cm⁻²). Deste modo, observa-se uma engenharia de material adequada aos bocais de pivô central da empresa Senninger. Os bocais, dos demais fabricantes não foram testados, pois não era possível posicionar o paquímetro digital externamente ao emissor.

2.5.2 Quantificação da concentração de ar dissolvido na água do reservatório de irrigação

O percentual de concentração de ar dissolvido na água do reservatório de irrigação, utilizada nos ensaios, pode ser observado na Tabela 7. A quantidade de gases dissolvidos em determinado volume de água depende da solubilidade dos solutos, da pressão atmosférica e da temperatura do solvente. A solubilidade de um gás diminui com a diminuição da pressão (BOYER et al., 1999).

Tabela 7 – Concentração de ar dissolvido na água do laboratório de irrigação

Repetições	Picnômetro			Massa da água		Volume		Concentração de ar (%)
	Seco (g)	Água com ar (g)	Água sem ar (g)	Com ar (g)	Sem ar (g)	Água com ar (L)	Água sem ar (L)	
1	33,145	89,015	89,021	55,870	55,876	0,05608	0,0561	0,0097
2	36,276	84,078	84,093	47,801	47,817	0,04798	0,0480	0,0324
3	34,690	97,570	97,575	62,880	62,886	0,06312	0,0631	0,0089
4	36,733	101,68	101,70	64,947	64,966	0,06519	0,0652	0,0305
5	34,597	98,024	98,049	63,427	63,452	0,06367	0,0637	0,0386
Média	35,088	94,073	94,087	58,985	58,999	0,05921	0,0592	0,0240

A água utilizada no ensaio apresentou baixa concentração de ar dissolvido, com valor médio de 0,024%, que representa um volume de 0,2401 litros de ar por metro cúbico de água, valor muito inferior ao citado na literatura, em que a incorporação de ar pode chegar a 21 L m⁻³ de água. Desta forma, foi descartada a possibilidade de alterações significativas no processo de determinação do volume da água (medidor magnético indutivo) por suposto excesso de ar na água, diminuindo sua massa específica.

2.5.3 Coeficiente de contração

O coeficiente de descarga (C_d) para bocais convergentes varia com o ângulo da borda de entrada do bocal (LENCASTRE, 1972).

Para os bocais avaliados, não existem bordas de entrada. Isto porque o corpo do emissor é dimensionado para coincidir o diâmetro de saída com o diâmetro de entrada do bocal (Figura 24). Assim, as peças se unem dando seguimento ao perfil de convergência dos orifícios (orifício do corpo do emissor e do bocal), guiando a veia fluida até atingir a seção mais estrangulada do elemento, de forma a reduzir a perda de energia do líquido. Desta forma, a contração do jato é menor que em bocais com bordas acentuadas, elevando o valor do coeficiente de descarga dos bocais. Quando a entrada dos bocais tem bordas arredondadas, os coeficientes são ainda mais próximos à unidade, com isso tem-se perda de carga pequena, resultando em valor elevado do coeficiente de velocidade (NEVES, 1974).

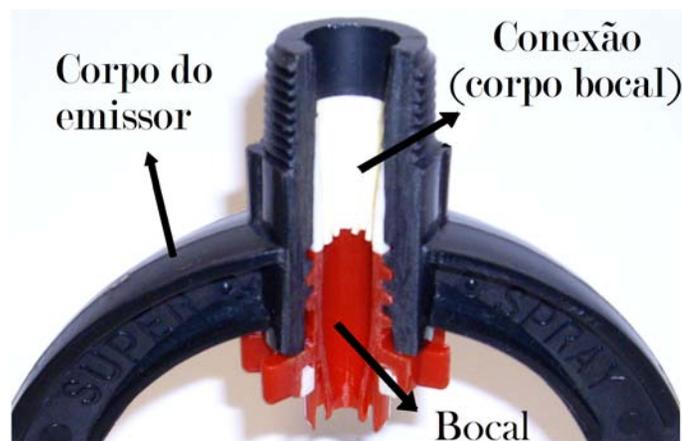


Figura 24 – Visualização do perfil de conexão do bocal com o corpo do emissor

Avaliando as imagens fotográficas com o *software* AutoCAD 2005, não foi possível observar a contração do jato de água na saída do bocal. Isto porque pressupõe-se que a contração esteja ocorrendo na parte interna do bocal. Ao passar pela aresta do orifício, o jato tende a se expandir e logo após a saída do bocal o diâmetro do jato d'água já é ligeiramente superior ao diâmetro do bocal.

Para todos os bocais avaliados, o diâmetro do jato foi ligeiramente superior ao diâmetro do orifício (Tabela 8).

Tabela 8 – Diâmetro do jato d'água

Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro do bocal (mm)	Diâmetro do jato (mm)
1,8	1,786	1,799
6,0	5,935	6,297
9,6	9,516	9,853

2.5.4 Coeficiente de descarga

Os coeficientes de descarga variaram entre 0,88 e 0,98; valores muito próximos foram citados por Raposo (1979), o qual afirma que, em sistemas de irrigação por aspersão, o valor de C_d não é constante, variando um pouco com o diâmetro e pressão de funcionamento e permanecendo entre 0,85 e 0,99, com um valor médio de 0,95.

Na Tabela 9 encontram-se os valores de média e moda dos coeficientes de descarga para os três fabricantes avaliados em diferentes pressões de funcionamento.

Tabela 9 – Valores de média e moda dos coeficientes de descarga

Pressão (PSI)	Coeficiente de descarga (C_d)					
	Senninger		Nelson		Fabrimar	
	Média	Moda	Média	Moda	Média	Moda
10	0,93	0,94	0,92	0,93	0,93	0,94
15	0,94	0,95	0,93	0,94	0,94	0,95
20	0,95	0,96	0,94	0,94	0,95	0,95

Nas Figuras 26, 27 e 28 encontram-se as curvas dos coeficientes de descarga (C_d) dos três fabricantes, observadas experimentalmente em função do diâmetro de bocal para quatro pressões

de funcionamento (10, 15, 20, e 30 PSI), permitindo observar efeitos significativos da pressão, do diâmetro e do ângulo de convergência no valor do coeficiente de descarga (C_d).

Os bocais avaliados apresentaram comportamento relativamente diferenciados quanto ao perfil de tendência das curvas das regressão. Isto ocorre porque os bocais diferenciam-se de acordo com o fabricante nos seguintes fatores: perfil e ângulo de convergência do orifício, comprimento do bocal, número total de diâmetro por fabricante e acabamento final. Os valores de C_d variam de acordo com o ângulo de convergência e o comprimento do bocal (NEVES, 1974). Delmée (1995) afirma que a superfície da face interna não poderá apresentar rugosidade superior a 0,0003 vezes o diâmetro.

Todas as curvas de regressões apresentaram forma quadrática (diâmetro do bocal x C_d); este fato deve-se à variação do ângulo de convergência dos bocais, que são diferentes para cada fabricante em função do diâmetro, sendo que normalmente o ângulo é reduzido com o aumento do diâmetro. Desta forma, quanto menor o orifício, maior o ângulo de convergência. Como os menores e os maiores bocais apresentam menor eficiência em relação aos intermediários, conforme aumentam o diâmetro conseqüentemente reduzem a convergência, a curva do C_d se desloca no sentido ascendente até um ponto de máximo valor, posteriormente a mesma assume trajetória decrescente até o último bocal.

No ponto de máxima eficiência, encontra-se o ângulo de convergência em que os bocais apresentam melhor rendimento hidráulico (Figura 25). A partir deste ângulo, a redução da convergência do orifício passa a ocasionar maior dissipação de energia do fluido em escoamento, reduzindo a eficiência do bocal. Neves (1974) verificou uma máxima eficiência de bocal para ângulo igual a $13^{\circ}30'$ e comprimento igual a 2,5 vezes o diâmetro do bocal.

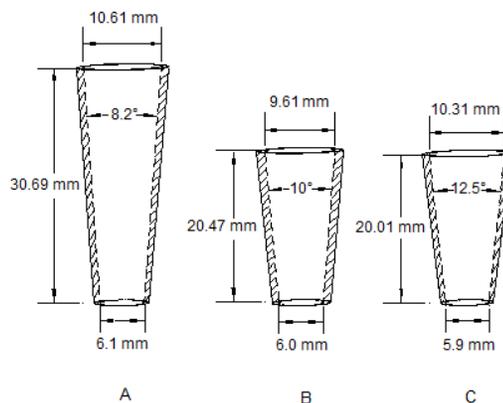


Figura 25 – Ângulo de convergência em que o bocal de ambos os fabricantes apresenta melhor rendimento hidráulico. Bocais: (A) Senninger, (B) Nelson e (C) Fabrimar

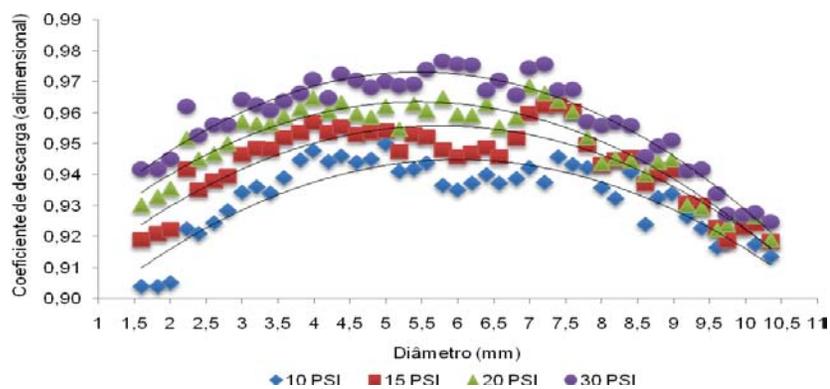


Figura 26 – Curvas dos coeficientes de descarga dos bocais Senninger em função do diâmetro do bocal operando com pressões de 10, 15, 20 e 30 PSI

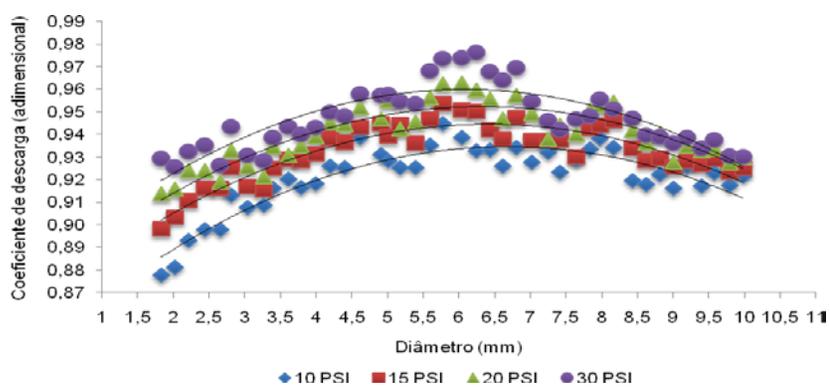


Figura 27 – Curvas dos coeficientes de descarga dos bocais Nelson em função do diâmetro do bocal operando com pressões de 10, 15, 20 e 30 PSI

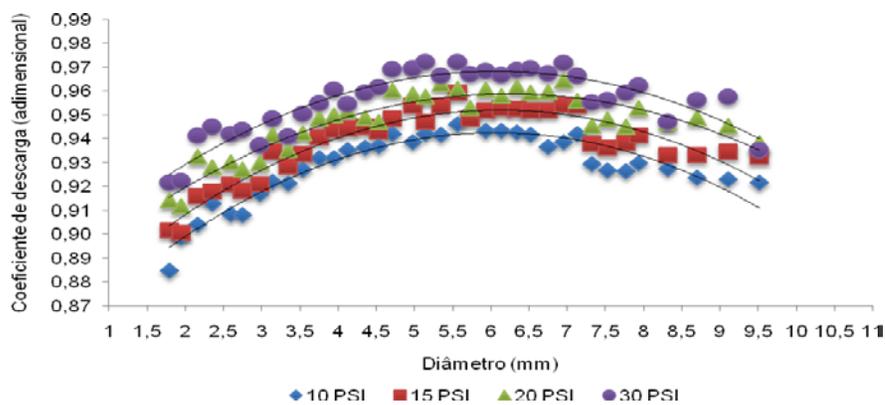


Figura 28 – Curvas dos coeficientes de descarga dos bocais Fabrimar em função do diâmetro do bocal operando com pressões de 10, 15, 20 e 30 PSI

Nas Tabelas 10, 11 e 12 encontram-se as equações ajustadas, em função da pressão de serviço e do diâmetro do bocal. Observa-se um efeito quadrático significativo ($p < 0,01$) para a variável diâmetro em todas as pressões avaliadas. O coeficiente de determinação das equações variou com o fabricante e com a pressão de funcionamento, na faixa de 0,719 e 0,932 ajustando-se a um modelo polinomial.

Tabela 10 – Equações dos coeficientes de descarga dos bocais Senninger em função do diâmetro do bocal (mm)

Pressão (PSI)	Equação	F	R ²
10	$C_d = -0,0017978 D^2 + 0,0215875 D + 0,8799767$	**	0,79873
15	$C_d = -0,0018565 D^2 + 0,0213390 D + 0,8944407$	**	0,80497
20	$C_d = -0,0019732 D^2 + 0,0215027 D + 0,9049165$	**	0,88832
30	$C_d = -0,0021499 D^2 + 0,0234275 D + 0,9092209$	**	0,93290

** Significativo a 1% de probabilidade

Tabela 11 – Equações dos coeficientes de descarga dos bocais Nelson em função do diâmetro do bocal (mm)

Pressão (PSI)	Equação	F	R ²
10	$C_d = -0,0020883 D^2 + 0,0278723 D + 0,8415777$	**	0,84105
15	$C_d = -0,0020194 D^2 + 0,0258972 D + 0,8613968$	**	0,84630
20	$C_d = -0,0020457 D^2 + 0,0258758 D + 0,8704095$	**	0,79070
30	$C_d = -0,0022330 D^2 + 0,0271460 D + 0,8773646$	**	0,71983

** Significativo a 1% de probabilidade

Tabela 12 – Equações dos coeficientes de descarga dos bocais Fabrimar em função do diâmetro do bocal (mm)

Pressão (PSI)	Equação	F	R ²
10	$C_d = -0,0026382 D^2 + 0,0319711 D + 0,8456675$	**	0,90030
15	$C_d = -0,0025697 D^2 + 0,0314725 D + 0,8555731$	**	0,89448
20	$C_d = -0,0021887 D^2 + 0,0272734 D + 0,8738154$	**	0,87380
30	$C_d = -0,0023644 D^2 + 0,0286654 D + 0,8813079$	**	0,85011

** Significativo a 1% de probabilidade

2.5.5 Relação entre as vazões observadas experimentalmente e calculadas utilizando valores médios do C_d de cada pressão de operação

As Figuras 29, 30 e 31 estão apresentando o percentual de desvio relacionando as vazões determinadas em ensaio com as vazões calculadas (%), utilizando-se os valores médios de C_d para cada pressão.

Observa-se que nas pressões de 15 PSI em todos os fabricantes as vazões apresentaram maior variação em relação às demais. Isto ocorre porque o C_d médio para essa pressão é inferior ao específico da grande maioria dos bocais. Neste caso, a da moda do C_d , poderá melhor se ajustar para esta pressão.

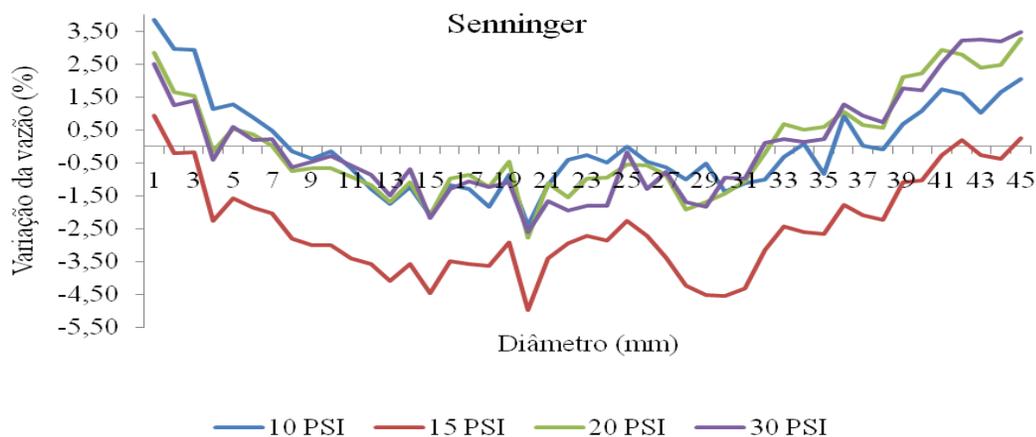


Figura 29 – Variação das vazões determinadas experimentalmente com relação à calculada utilizando C_d médio de cada pressão

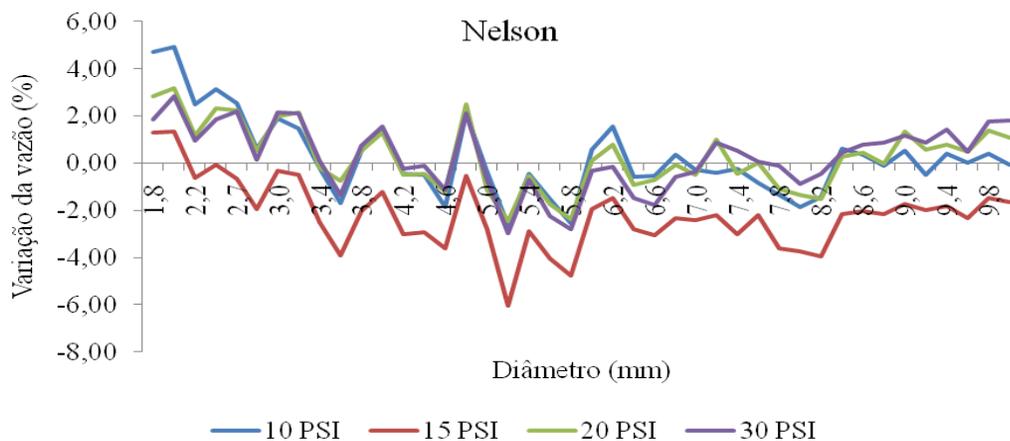


Figura 30 – Variação das vazões determinadas experimentalmente com relação à calculada utilizando C_d médio de cada pressão

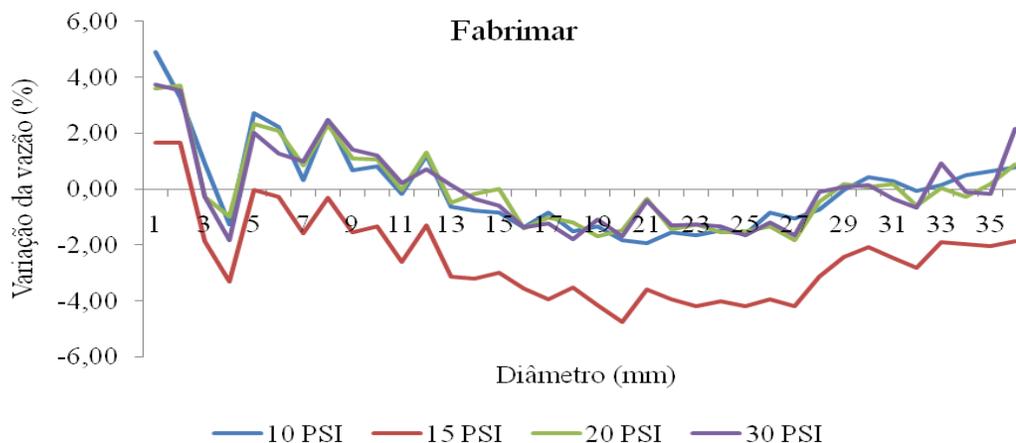


Figura 31 – Variação das vazões determinadas experimentalmente com relação à calculada utilizando C_d médio de cada pressão

2.5.6 Avaliação da uniformidade de aplicação de água em dimensionamento com coeficientes de descarga médio de cada pressão e específico para cada diâmetro de bocal

2.5.6.1 Distribuição da lâmina ao longo da linha lateral do sistema

Nas Figuras 32, 33 e 34 encontram-se os perfis de distribuição da lâmina bruta aplicada para as configurações de bocais dimensionados com os valores médios do C_d nas pressões de 10, 15 e 20 PSI e com valores de C_d específicos de cada diâmetro de bocal.

O perfil de distribuição das lâminas não se diferenciou significativamente ao longo de toda a linha lateral do pivô, para as mesmas pressões de funcionamento. A pressão de 15 PSI apresentou maior variação entre as lâminas, no entanto essa variação não é significativa para fins de aplicações práticas.

Um dos fatores que minimizam os erros entre os processos de dimensionamentos é o fato de que, por não existir bocais comerciais idênticos aos diâmetros dimensionados, é necessário selecionar o diâmetro comercial mais próximo. Assim, mesmo ocorrendo certas diferenças entre os diâmetros calculados, quando se escolhe o diâmetro comercial, na maioria das vezes, seleciona-se o mesmo bocal para ambos os procedimentos de dimensionamento.

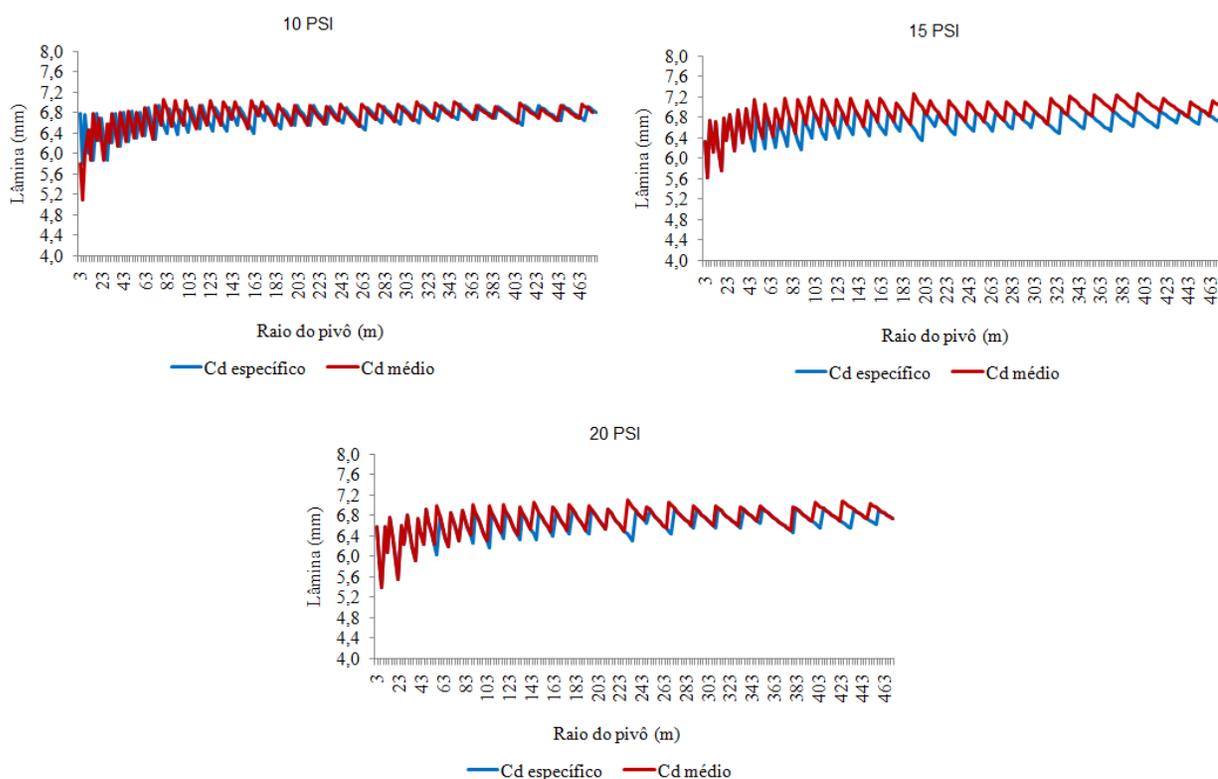


Figura 32 – Perfil de distribuição para os bocais Senninger operando

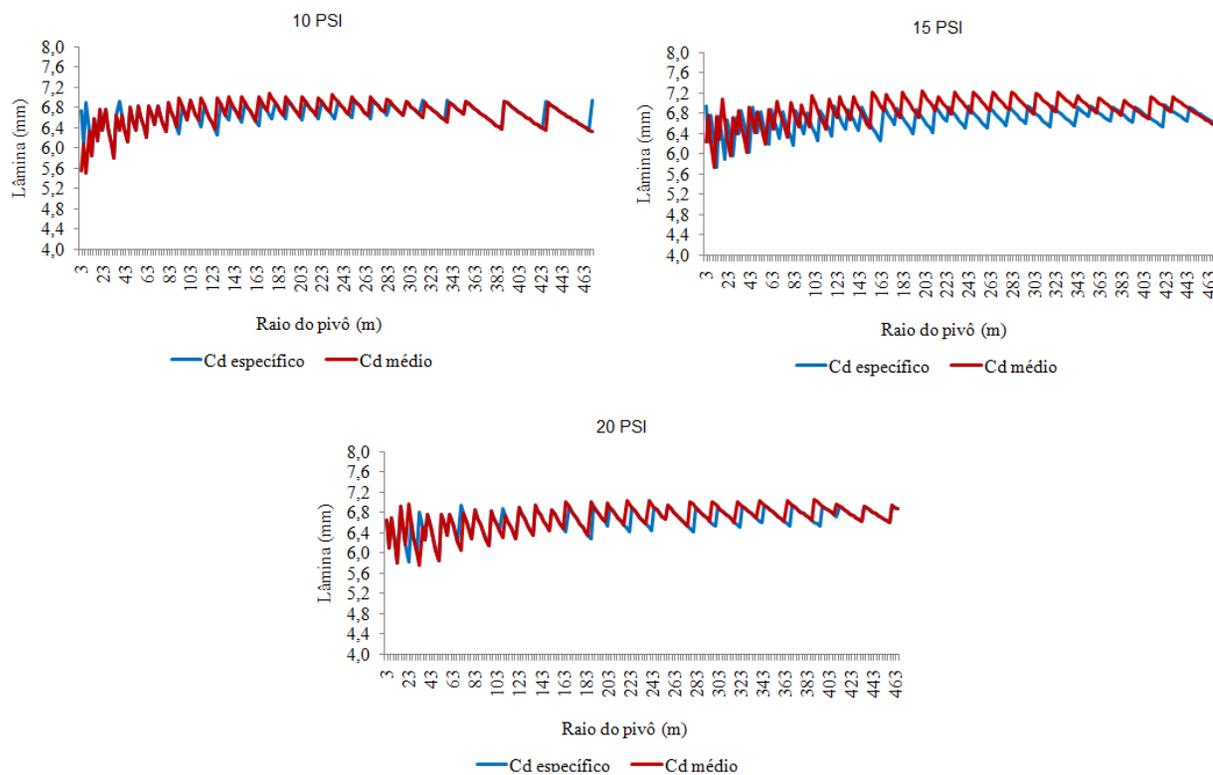


Figura 33 – Perfil de distribuição para os bocais Fabrimar

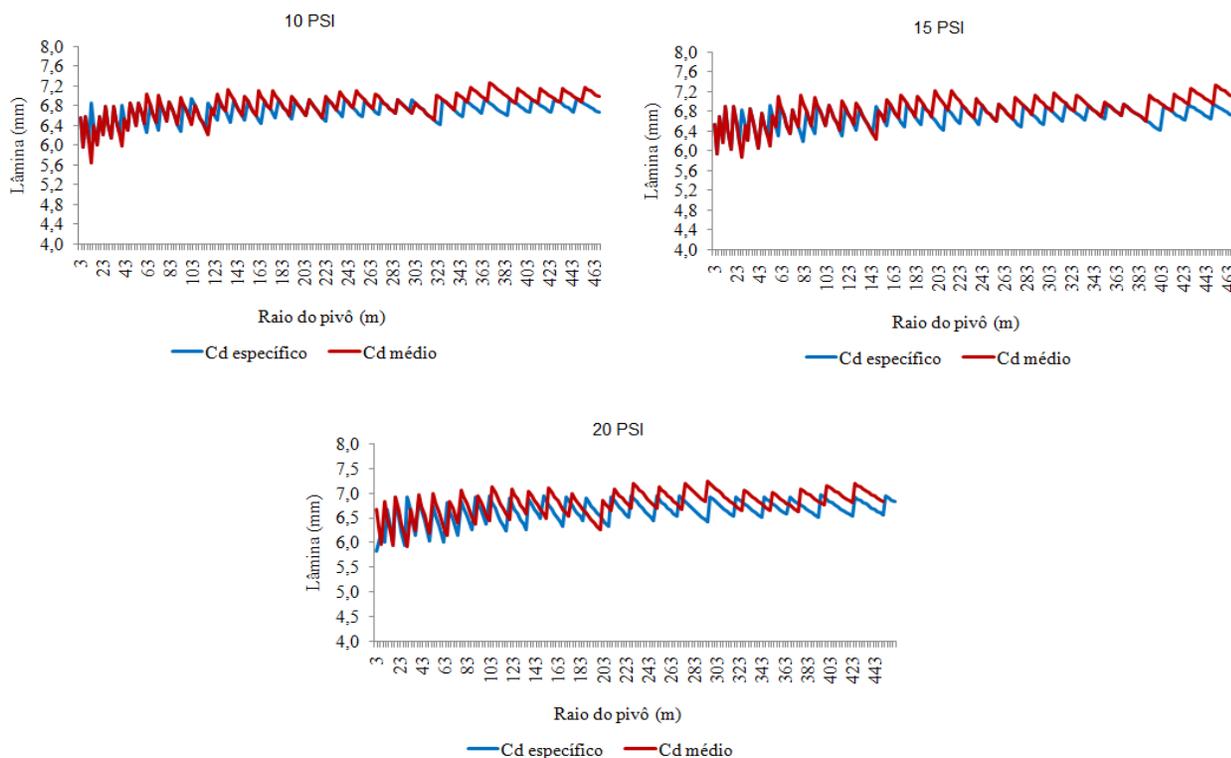


Figura 34 – Perfil de distribuição para os bocais Nelson

Nas Figuras 35, 36 e 37, estão ilustrado o perfil de distribuição das vazões na linha do sistema em diferentes pressões e para os três fabricantes avaliados.

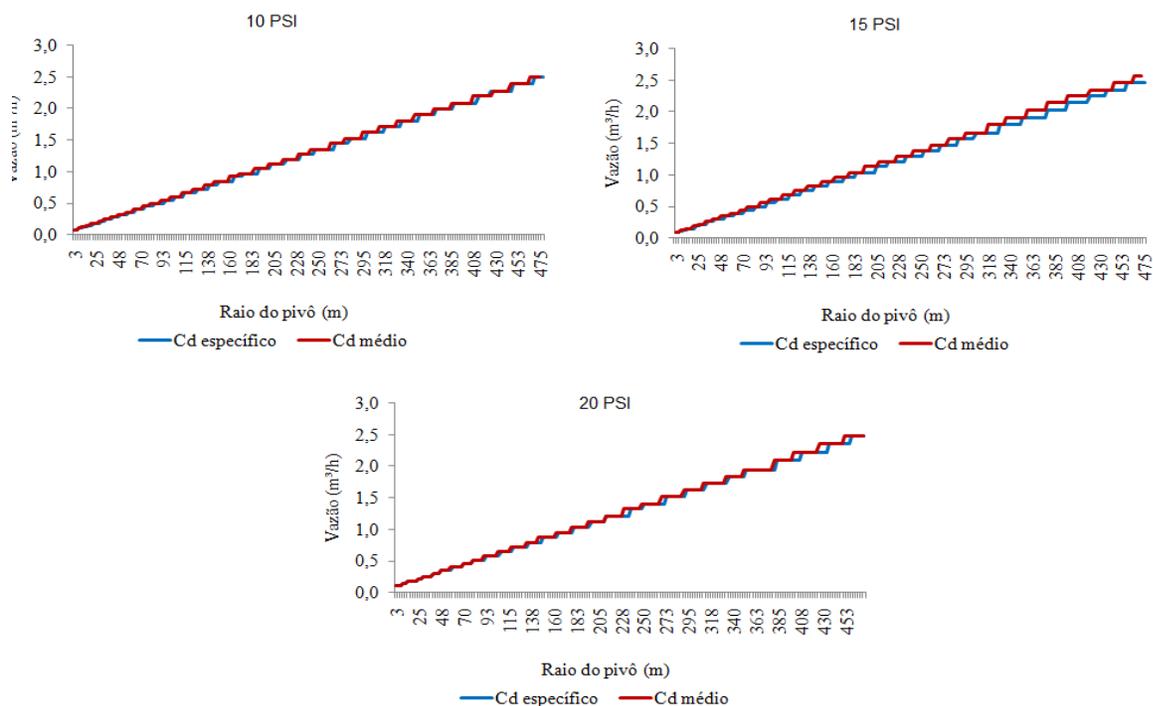


Figura 35 – Perfil de distribuição das vazões na linha do sistema dimensionados com bocais Senninger

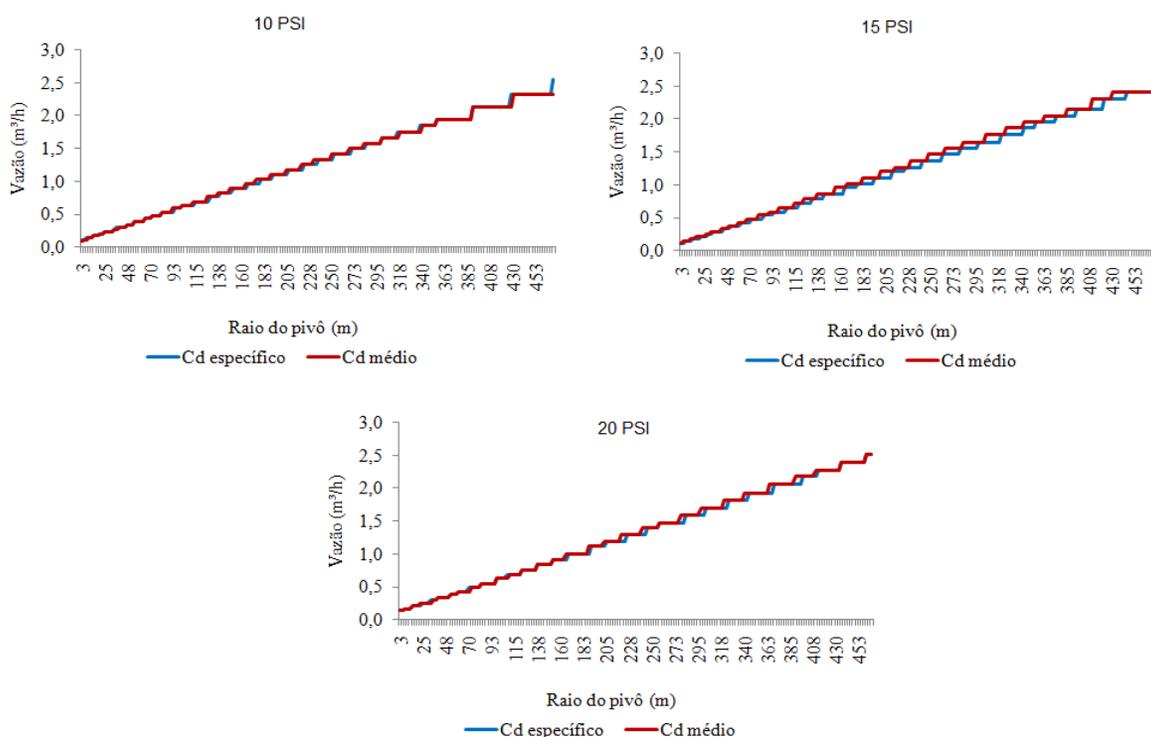


Figura 36 – Perfil de distribuição das vazões na linha do sistema dimensionados com bocais Fabrimar

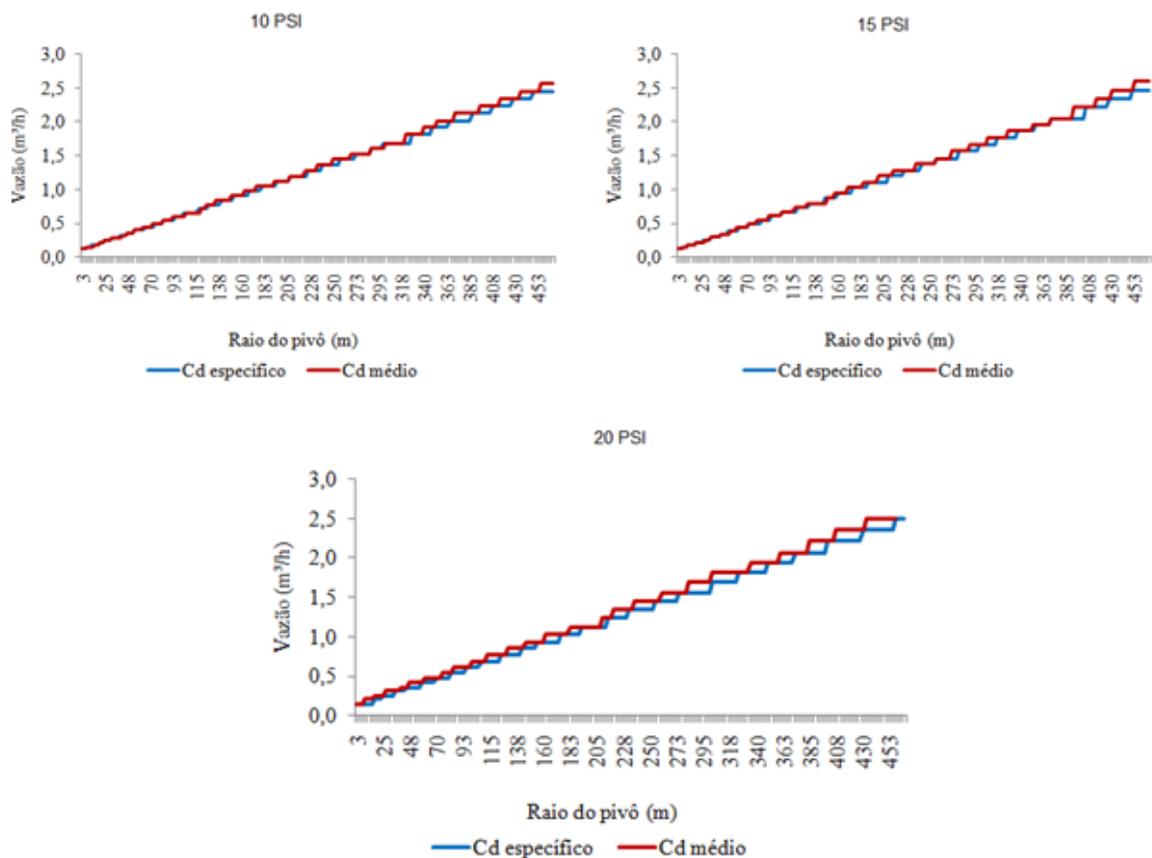


Figura 37 – Perfil de distribuição das vazões na linha do sistema dimensionados com bocais Nelson

As Figuras 38, 39 e 40, ilustram o coeficiente de variação (CV) das lâminas aplicadas na linha lateral do pivô, calculadas com C_d médio e específico nas pressões de 10, 15 e 20 PSI para os três fabricantes avaliados.

Observa-se que grande parte das lâminas apresentou baixa variabilidade, com CV menor que 10%, em alguns pontos isolados obtiveram variabilidade média entre 10 e 20%.

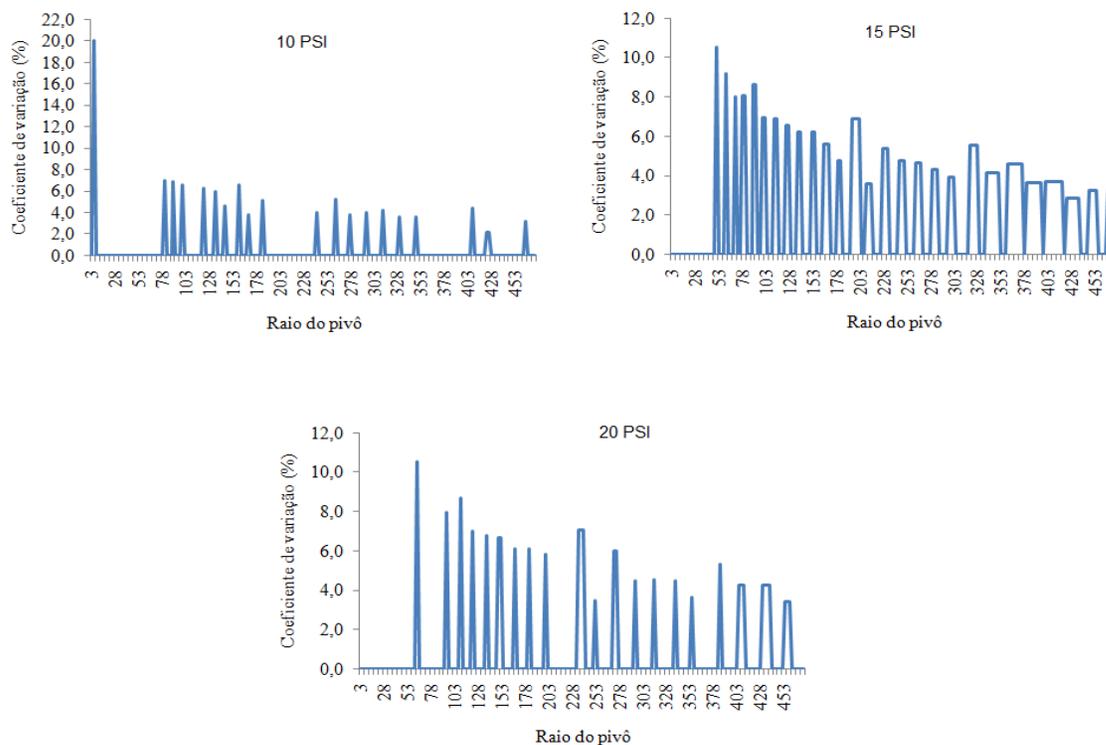


Figura 38 – Coeficiente de variação da lâmina aplicada calculadas utilizando C_d médio e específico para os bocais Senninger

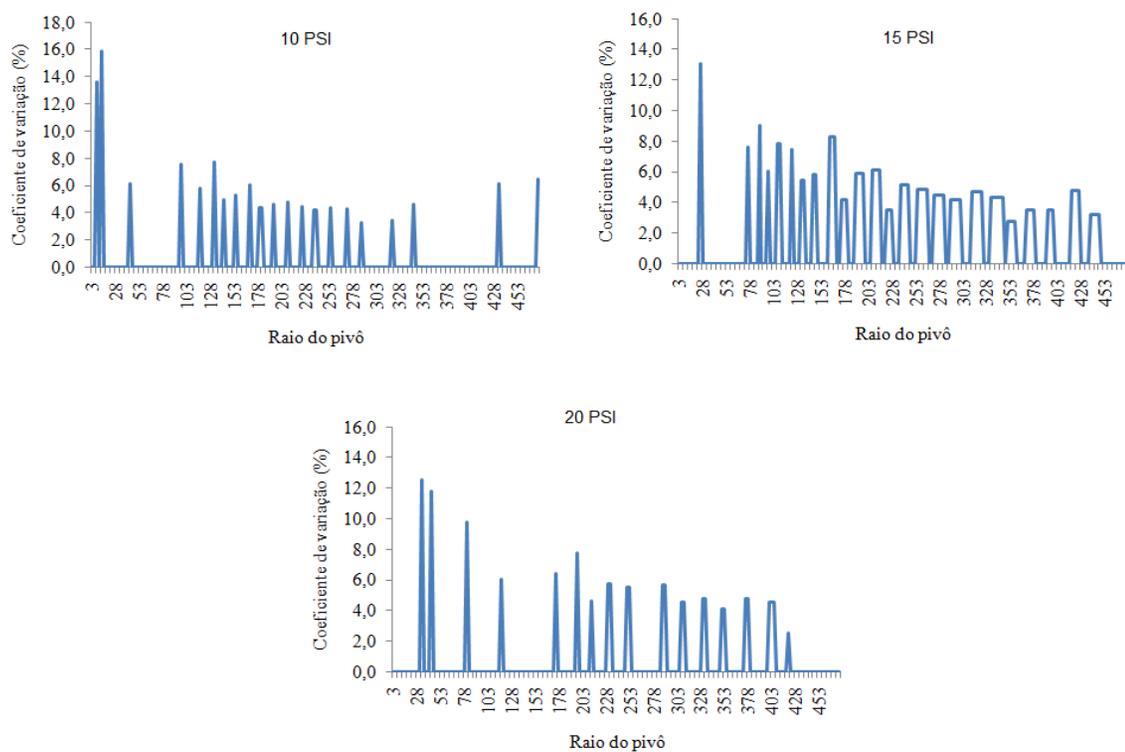


Figura 39 – Coeficiente de variação da lâmina aplicada calculadas utilizando C_d médio e específico para os bocais Fabrimar

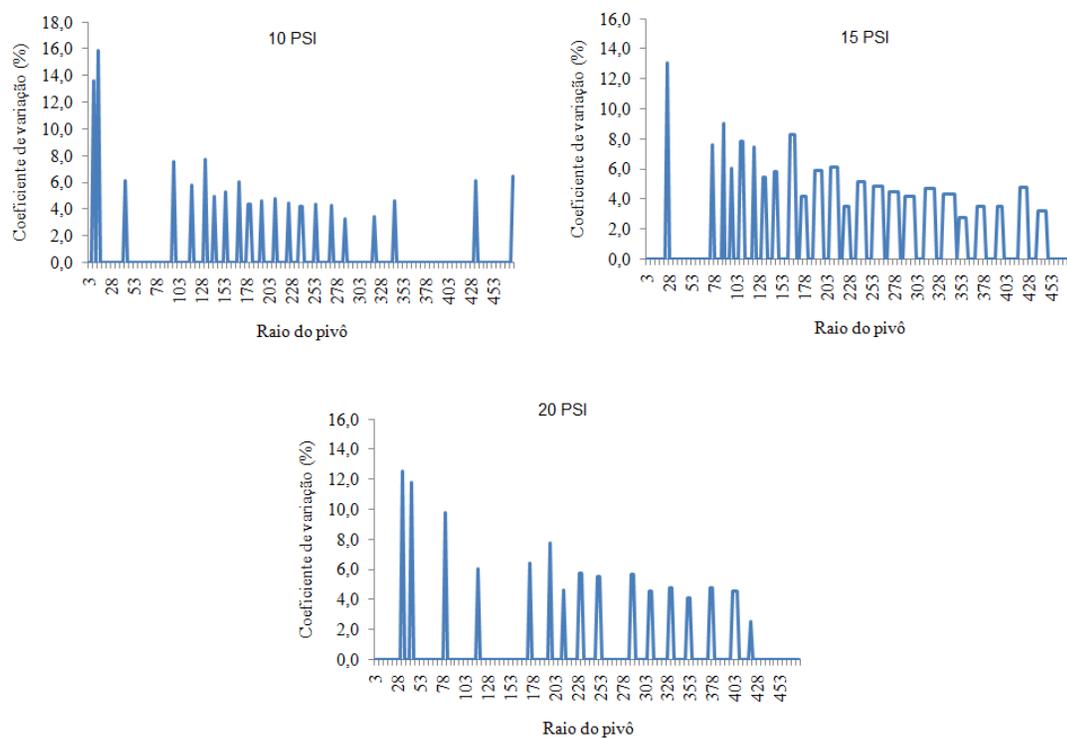


Figura 40 – Coeficiente de variação da lâmina aplicada calculadas utilizando C_d médio e específico para os bocais Nelson

A Figura 41 apresenta os respectivos erros da lâmina aplicada em 21 horas quando dimensionado com C_d médio.

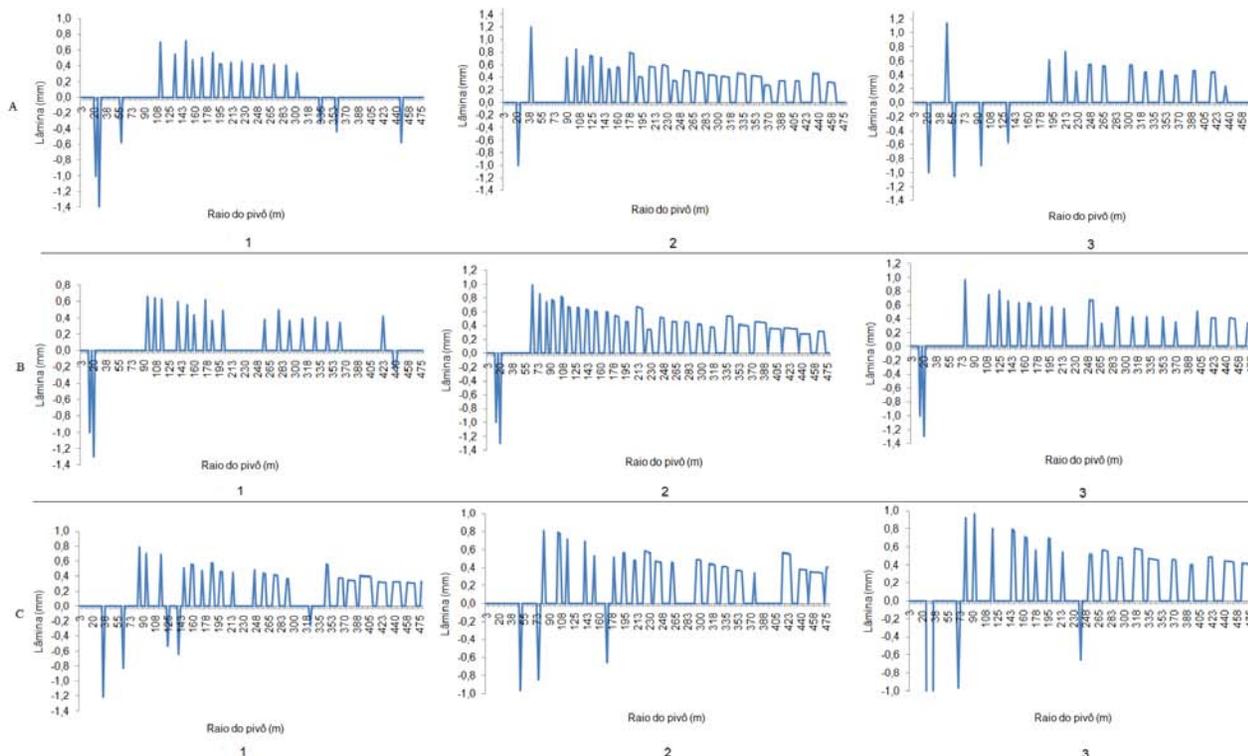


Figura 41 – Erro na lâmina aplicada, dimensionada com C_d médio; (A) Senninger, (B) Nelson e (C) Fabrimar; (1) 10 PSI, (2) 15 PSI e (3) 20 PSI

Observa-se, nos gráficos acima, que ocorrem pequenas variações nas lâminas aplicadas variando sensivelmente entre as diferentes características hidráulicas dimensionadas.

Nas Tabelas 13, 14 e 15, se encontra o resumo do dimensionamento com os respectivos erros apresentados para a dada particularidade de configuração da referida simulação, para os três fabricantes.

Ocorreu pouca diferença entre as vazões para as configurações de bocais simuladas, variando com a pressão de funcionamento do sistema e com o fabricante do bocal. Observa-se que o erro ocasionado na lâmina aplicada é insignificante, porque neste caso o mesmo foi distribuído em toda a área irrigada. No entanto, o perfil de distribuição de água é irregular, pois se aplicam lâminas diferentes em cada ponto da área. Assim, não é descartada a possibilidade de uma aplicação com irregularidade significativa em pontos isolados da área.

Tabela 13 – Respectivos erros ocasionados na lâmina aplicada em 21 horas, ao utilizar C_d médio, para os bocais Senninger

Pressão (PSI)	Vazão total do sistema		Vazão			Erro sobre a Lâmina (mm/dia)
	Cd específico ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Cd médio ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Superestimada ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Subestimada ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Total ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	
10	243,84	245,02	1,406	2,707	4,113	0,11
15	242,68	251,28	8,596	2,300	10,896	0,30
20	241,65	244,95	3,298	2,300	5,598	0,16

Tabela 14 – Respectivos erros ocasionados na lâmina aplicada em 21 horas, ao utilizar C_d médio, para os bocais Nelson

Pressão (PSI)	Vazão total do sistema		Vazão			Erro sobre a Lâmina (mm/dia)
	Cd específico ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Cd médio ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Superestimada ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Subestimada ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Total ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	
10	243,19	248,57	5,634	3,493	9,127	0,25
15	242,49	249,07	6,747	2,464	9,210	0,26
20	240,91	246,55	6,233	12,649	18,882	0,53

Tabela 15 – Respectivos erros ocasionados na lâmina aplicada em 21 horas, ao utilizar C_d médio, para os bocais Fabrimar

Pressão (PSI)	Vazão total do sistema		Vazão			Erro sobre a Lâmina (mm/dia)
	Cd específico ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Cd médio ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Superestimada ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Subestimada ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Total ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	
10	241,34	241,79	1,138	5,102	6,240	0,17
15	242,36	249,53	7,286	9,243	16,529	0,46
20	241,55	243,77	2,391	4,806	7,197	0,20

Analisando os resultados das Tabelas acima, observa-se que os erros se diferenciam principalmente entre as pressões de operação, evidenciando que o erro de dimensionamento devido à utilização de C_d médio varia para cada particularidade de configuração (distribuição) de bocais e com a pressão de operação dos emissores.

2.5.6.2 Coeficiente de uniformidade de distribuição

Na Tabela 17, encontram-se os valores teóricos de CUC (Coeficiente de Uniformidade de Christiansen) para os três fabricantes, operando em diferentes pressões.

Os resultados teórico obtidos mostram que os valores de CUC não se diferenciaram de forma significativa entre os métodos de dimensionamento (C_d médio e específico) e entre os fabricantes dos bocais.

Tabela 16 – Coeficiente de uniformidade de Christiansen para C_d médio e específico de cada diâmetro de bocal

Pressão (PSI)	Senninger		Nelson		Fabrimar	
	Coeficiente de descarga (C_d)					
	Específico	Médio	Específico	Médio	Específico	Médio
	Coeficiente de Uniformidade Christiansen (CUC)					
10	98,59%	98,04%	98,56%	98,14%	98,33%	98,13%
15	98,59%	98,04%	98,41%	98,10%	97,67%	97,30%
20	98,62%	98,04%	98,34%	98,24%	97,94%	97,79%

É importante ressaltar que apesar dos resultados teóricos terem apresentado valores elevados de CUC, superior aos dados encontrados na literatura, os resultados reais serão ligeiramente inferiores, devido a pequenas perdas existentes.

3 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nas conduções do ensaio permitiram chegar às seguintes conclusões:

- a) O coeficiente de descarga dos bocais comerciais, utilizados em sistemas de irrigação pivô central, está compreendido entre 0,88 a 0,98;
- b) O coeficiente de descarga varia em função do diâmetro do bocal, da pressão de operação e do ângulo de convergência;
- b) Não ocorreram diferenças significativas do coeficiente de descarga entre os emissores dos diferentes fabricantes;
- c) A variação de vazão provocada pela utilização de um C_d médio é insignificante no dimensionamento dos emissores do sistema de irrigação pivô central quando comparada ao cálculo do C_d específico para cada diâmetro de bocal;
- d) O desvio na vazão teórica do sistema pivô central empregando um C_d médio quando comparado ao C_d específico para cada diâmetro de bocal variará conforme a distribuição dos bocais ao longo da linha lateral do sistema (aproximação do diâmetro comercial), com a pressão de operação e com o fabricante do emissor utilizado;
- e) O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) teórico não apresentou diferença significativa entre os dois processos de dimensionamento e nem entre os fabricantes analisados.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília, 2009. 93 p.
- ALFREDINI, P. **Experiência de laboratório**. São Paulo: USP, Escola Politécnica, Dep. de Eng. Hidráulica. 2000. 56 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRISO 9261**: Equipamentos de irrigação agrícola - Emissores e tubos emissores - Especificação e métodos de ensaio. São Paulo, 1991. 13 p.
- AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNADEZ, M.F.; ARAÚJO, R.; ITO, A.E. **Manual de hidráulica**. 8.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998. 670 p.
- BARRETO, A.N.; SILVA, A.A.G.; BOLFE, E.L. **Irrigação e drenagem na empresa agrícola: impacto ambiental versus sustentabilidade**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros; Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004. 418 p.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 2008.656 p.
- BOYER, T.P; CONKRIGHT, M.; LEVITUS, S. Seasonal variability of dissolved oxygen and percent oxygen saturation in the Atlantic and Pacific Oceans. **Deep-Sea Research**, Oxford, v. 46, p. 1593-1613, 1999.
- CHRISTOFIDIS, D. **Água: gênese, gênero e sustentabilidade alimentar no Brasil**. Brasília: Secretaria de Infraestrutura Hídrica/PROÁGUA, 2006. 18 p. (Relatório Técnico).
- COELHO, R.D. **Contribuições para a irrigação pressurizada no Brasil**. 2007. 192 p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- DELMÉE, G.J. **Manual de medição de vazão**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1995. 466 p.
- EVANS, R.G.; HANS, S.; KROEGER, M W. Spatial distribution and uniformity evaluations for chemigation with center pivots. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 38, n. 1, p. 85-92, 1995.
- FAO. **Agriculture and water scarcity: a programmatic approach to water use efficiency and agricultural productivity**. Rome: Twentieth Session, Committee on Agriculture, 2007. 86 p.
- FOLEGATTI, M.V.; PESSOA, P.C.S.; PAZ, V.P.S. Avaliação do desempenho de um pivô central de grande porte e baixa pressão. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. 1, p. 119–127, jan. 1998.

GEO Brasil: **Recursos hídricos**: componentes da série de relatórios sobre o estado e perspectivas do meio ambiente no Brasil. Brasília: Ministério do Meio Ambiente; Agência Nacional de Águas, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2007. 264 p.

GILLEY, J.R.; WATTS, D.G. Possible energy savings in irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 103, n. 1R4, p. 445-457, Dec. 1977.

HEERMAN, D.F.; HEIN, P.R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system. **Transaction of the ASAE**, ST. Joseph, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1968.

LENCASTRE, A. **Manual de hidráulica geral**. São Paulo: Edgard Blucher, 1972. 411 p.

LYLE, W.M.; BORDOVSKY, J.P. LEPA irrigation system evaluation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 26, p. 776-781, 1983.

NEVES, E.T. **Curso de hidráulica**. Porto Alegre: Globo, 1974. 133 p.

NEW, L.; FIPPS, G. **Lepa conversion and management**. Texas Agricultural Extension Service, B-1691, 1990. 1 v.

PAIR, C.H. **Irrigation**. Arlington: The Irrigation Association, 1983. 686 p.

PESSOA, P.C.S. **Desempenho de um sistema pivô central com diferentes configurações de emissores ao longo do ciclo de uma cultura de milho (Zea mays L.)**. 1994. 95 p. Dissertação - (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: USP, Escola de Engenharia de São Carlos, 2006. 352 p. (Projeto REENGE).

RAPOSO, J.R. **A rega por aspersão**. Lisboa: Livraria Clássica, 1979. 339 p.

SCHNEIDER, A.D.; HOWELL, T.A. Grain sorghum response to sprinkler application methods and system capacity. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 38, n. 6, p. 1693-1697, 1995.

SECRETARIA EXTRAORDINÁRIA DA IRRIGAÇÃO E USOS MÚLTIPLOS DA ÁGUA, RS. **Potencial brasileiro para desenvolvimento sustentável da irrigação**. Disponível em: <<http://www.siuma.rs.gov.br/index.php?action=noticia&cod=191>>. Acesso em: 10 fev. 2010.

SOUZA, P.C. **Programa computacional para avaliação uniformidade e eficiência de aplicação em sistemas de irrigação por pivô central sob condição de quimigação**. 2006. 146 p. Dissertação (Livre Docência) – Universidade do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

TEXEIRA, M.B.; MELO, R.F.; COELHO, R.D. Coeficiente de descarga de emissores de pivô central. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 1, p. 123-134, jan. 2007.

VILELA, L.A.A. **Irrigação por autopropelido e pivô central**. Lavras: FAEPE, 1999. 82 p.

YAZAR, A.; SEZEN, S.M.; SESVEREN, S. LEPA and trickle irrigation of cotton in the Southeast Anatolia Project (GAP) area in Turkey. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 54, p. 189-203, 2002.

ZOLLIN, C.A. Área irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39., 2010, Vitória. **Anais...** Vitória: Incaper, 2010. 1 CD-ROM.

ANEXOS

ANEXO A – Diâmetros internos e coeficientes de variação dos bocais

Tabela 17 – Diâmetros internos e coeficiente de variação dos bocais Senninger. Repetição (R). Diâmetro (D) (continua)

Número do bocal	R 1 (mm)	R 2 (mm)	R 3 (mm)	D médio (mm)	Cv (%)
4,0	1,581	1,611	1,604	1,599	0,982
4,5	1,831	1,834	1,837	1,834	0,164
5,0	2,002	2,011	2,006	2,006	0,225
5,5	2,224	2,233	2,229	2,229	0,202
6,0	2,388	2,398	2,401	2,396	0,284
6,5	2,599	2,617	2,615	2,610	0,378
7,0	2,796	2,801	2,800	2,799	0,095
7,5	3,002	3,009	3,002	3,004	0,135
8,0	3,191	3,209	3,210	3,203	0,334
8,5	3,382	3,396	3,392	3,390	0,213
9,0	3,594	3,560	3,593	3,582	0,540
9,5	3,817	3,793	3,805	3,805	0,315
10,0	3,988	3,981	3,993	3,987	0,151
10,5	4,194	4,205	4,190	4,196	0,185
11,0	4,389	4,394	4,347	4,377	0,590
11,5	4,565	4,591	4,630	4,595	0,712
12,0	4,799	4,772	4,829	4,800	0,594
12,5	4,995	4,971	5,010	4,992	0,394
13,0	5,152	5,150	5,242	5,181	1,014
13,5	5,358	5,374	5,424	5,385	0,639
14,0	5,603	5,552	5,538	5,564	0,615
14,5	5,801	5,752	5,824	5,792	0,635
15,0	5,992	5,968	6,030	5,997	0,521
15,5	6,189	6,163	6,224	6,192	0,494
16,0	6,402	6,356	6,452	6,403	0,750
16,5	6,572	6,526	6,612	6,570	0,655
17,0	6,807	6,782	6,848	6,812	0,489
17,5	6,981	6,958	7,018	6,986	0,433
18,0	7,201	7,180	7,238	7,206	0,407
18,5	7,386	7,363	7,429	7,393	0,453
19,0	7,540	7,591	7,655	7,595	0,759
19,5	7,787	7,764	7,829	7,793	0,423
20,0	7,977	7,984	8,046	8,002	0,475
20,5	8,165	8,164	8,224	8,184	0,420
21,0	8,380	8,381	8,453	8,405	0,498
21,5	8,598	8,570	8,655	8,608	0,503
22,0	8,730	8,780	8,846	8,785	0,662
22,5	8,941	8,952	9,045	8,979	0,636
23,0	9,118	9,172	9,256	9,182	0,757

Tabela 17 – Diâmetros internos e coeficiente de variação dos bocais Senninger. Repetição (R). Diâmetro (D)

Número do bocal	R 1 (mm)	R 2 (mm)	R 3 (mm)	D médio (mm)	Cv (%)
23,5	9,346	9,359	9,459	9,388	0,659
24,0	9,559	9,589	9,665	9,604	0,569
24,5	9,732	9,739	9,772	9,748	0,219
25,0	9,954	9,968	9,976	9,966	0,112
25,5	10,133	10,139	10,138	10,137	0,032
26,0	10,328	10,380	10,341	10,350	0,261

Tabela 18 – Diâmetros internos e coeficiente de variação dos bocais Nelson. Repetição (R). Diâmetro (D) (continua)

Número do bocal	R 1 (mm)	R 2 (mm)	R 3 (mm)	D méd. (mm)	Cv (%)
9	1,836	1,834	1,824	1,831	0,351
10	2,031	2,038	2,009	2,026	0,747
11	2,219	2,213	2,206	2,213	0,294
12	2,425	2,460	2,449	2,445	0,732
13	2,651	2,673	2,662	2,662	0,413
14	2,797	2,831	2,803	2,810	0,646
15	3,049	3,049	3,009	3,036	0,761
16	3,278	3,282	3,261	3,274	0,341
17	3,380	3,435	3,391	3,402	0,855
18	3,580	3,643	3,611	3,611	0,872
19	3,776	3,810	3,794	3,793	0,448
20	4,001	4,042	3,947	3,997	1,192
21	4,203	4,208	4,190	4,200	0,221
22	4,401	4,407	4,389	4,399	0,208
23	4,605	4,593	4,642	4,613	0,554
24	4,961	4,948	4,837	4,915	1,386
25	5,002	4,994	5,029	5,008	0,366
26	5,158	5,131	5,229	5,173	0,979
27	5,377	5,371	5,445	5,398	0,761
28	5,586	5,564	5,621	5,590	0,514
29	5,795	5,729	5,780	5,768	0,600
30	6,076	6,081	5,968	6,042	1,057
31	6,160	6,364	6,222	6,249	1,674
32	6,376	6,449	6,480	6,435	0,830
33	6,584	6,628	6,638	6,617	0,434
34	6,808	6,689	6,927	6,808	1,748
35	7,048	7,010	6,992	7,017	0,407
36	7,183	7,265	7,309	7,252	0,882
37	7,395	7,439	7,396	7,410	0,339
38	7,631	7,656	7,629	7,639	0,197

Tabela 18 – Diâmetros internos e coeficiente de variação dos bocais Nelson. Repetição (R). Diâmetro (D)

Número do bocal	R 1 (mm)	R 2 (mm)	R 3 (mm)	D médio (mm)	Cv (%)
39	7,873	7,785	7,830	7,829	0,562
40	7,983	7,970	7,978	7,977	0,082
41	8,161	8,170	8,162	8,164	0,060
42	8,372	8,464	8,445	8,427	0,576
43	8,561	8,681	8,645	8,629	0,714
44	8,786	8,818	8,838	8,814	0,298
45	8,982	9,002	9,040	9,008	0,327
46	9,159	9,218	9,214	9,197	0,358
47	9,368	9,393	9,446	9,402	0,424
48	9,534	9,589	9,607	9,577	0,397
49	9,763	9,803	9,826	9,797	0,325
50	9,920	9,990	10,022	9,977	0,523

Tabela 19 – Diâmetros internos e coeficiente de variação dos bocais Fabrimar. Repetição (R). Diâmetro (D)

D nominal bocal	R 1 (mm)	R 2 (mm)	R 3 (mm)	D médio (mm)	Cv (%)
1,8	1,789	1,787	1,783	1,786	0,171
2,0	1,947	1,951	1,953	1,950	0,157
2,2	2,160	2,176	2,133	2,156	1,008
2,4	2,384	2,291	2,371	2,349	2,144
2,6	2,609	2,588	2,589	2,595	0,456
2,8	2,751	2,736	2,756	2,748	0,379
3,0	3,009	2,984	2,952	2,982	0,958
3,2	3,171	3,120	3,150	3,147	0,814
3,4	3,355	3,349	3,353	3,352	0,091
3,6	3,554	3,563	3,507	3,541	0,849
3,8	3,764	3,733	3,756	3,751	0,429
4,0	3,931	3,960	3,930	3,940	0,432
4,2	4,114	4,146	4,125	4,128	0,394
4,4	4,335	4,314	4,404	4,351	1,082
4,6	4,529	4,508	4,543	4,527	0,389
4,8	4,719	4,714	4,678	4,704	0,476
5,0	4,953	4,997	4,989	4,980	0,471
5,2	5,143	5,142	5,135	5,140	0,085
5,4	5,349	5,330	5,344	5,341	0,184
5,6	5,575	5,537	5,570	5,561	0,371
5,8	5,720	5,731	5,745	5,732	0,219
6,0	5,947	5,923	5,935	5,935	0,202
6,2	6,141	6,127	6,135	6,134	0,114
6,4	6,342	6,349	6,316	6,336	0,274
6,6	6,588	6,447	6,529	6,521	1,086
6,8	6,749	6,749	6,753	6,750	0,034

Tabela 19 – Diâmetros internos e coeficiente de variação dos bocais Fabrimar. Repetição (R). Diâmetro (D)

D nominal bocal	R 1 (mm)	R 2 (mm)	R 3 (mm)	D médio (mm)	Cv (%)
7,0	6,953	6,955	6,949	6,952	0,044
7,2	7,129	7,125	7,121	7,125	0,056
7,4	7,336	7,319	7,328	7,328	0,116
7,6	7,539	7,515	7,524	7,526	0,161
7,8	7,778	7,765	7,764	7,769	0,101
8,0	7,931	7,926	7,946	7,934	0,131
8,4	8,315	8,329	8,284	8,309	0,277
8,8	8,686	8,697	8,697	8,693	0,073
9,2	9,109	9,091	9,128	9,109	0,203
9,6	9,518	9,515	9,516	9,516	0,016

ANEXO B – Conjunto de Bocais dos os fabricantes avaliados

Figura 42 – Conjunto de bocais Senninger



Figura 43 – Conjunto de bocais Nelson



Figura 44 – Conjunto de bocais Fabrimar