

RÔMULO SILVA ANASTÁCIO

**VALIDAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO
EXPERIMENTAL PARA A DETERMINAÇÃO DA
VAZÃO DE NITROGÊNIO EM TUBOS CAPILARES DE
REFRIGERAÇÃO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2021

RÔMULO SILVA ANASTÁCIO

**VALIDAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL PARA A
DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE NITROGÊNIO EM TUBOS
CAPILARES DE REFRIGERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao corpo docente da
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia, como
requisito para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Aeronáutica.

Orientador: Profº. Dr. Enio Pedone
Bandarra Filho.

UBERLÂNDIA-MG

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica
 Rodovia BR 050, KM 78, Bloco 1D, 2º andar - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 2512-6768 - www.mecanica.ufu.br - coceaero@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	ENGENHARIA AERONÁUTICA				
Defesa de:	PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO - FEMEC43100				
Data:	26/01/2021	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	10:00
Matrícula do Discente:	11321EAR001				
Nome do Discente:	RÔMULO SILVA ANASTÁCIO				
Título do Trabalho:	Validação de um equipamento experimental para a determinação da vazão de nitrogênio em tubos capilares de refrigeração				

Reuniu-se por meio de web conferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica, assim composta: Professores: Daniel Dall'Onder dos Santos - FEMEC/UFU; David Fernando Marcucci Pico - FEMEC/UFU e Enio Pedone Bandarra Filho, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o(a) presidente da mesa, Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a). **NOTA: 90**

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Enio Pedone Bandarra Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/01/2021, às 10:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Dall'Onder dos Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/01/2021, às 10:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **David Fernando Marcucci Pico, Usuário Externo**, em 26/01/2021, às 10:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2503730** e o código CRC **25B4EEED**.

*“Tu te tornas eternamente
responsável por aquilo
que cativas”*

(Antoine de Saint-Exupéry)

Agradecimento

Agradeço a Deus por me permitir alcançar meus objetivos, iluminando meu caminho, me dando força, saúde e coragem para sempre continuar.

Quero agradecer ao professor Enio Pedone Bandarra Filho, a oportunidade, o apoio e, sobretudo, a orientação durante o processo de construção deste trabalho. Agradeço imensamente ao David Fernando Marcucci Pico e ao Pedro Henrique Silva Santos pelo apoio durante os ensaios experimentais e auxílio para construção deste trabalho. Ao professor Daniel Dall'Onder dos Santos pelos ensinamentos.

Aos meus amigos que apoiaram na conclusão desta etapa, contribuindo de forma motivacional, sendo uma fração da construção deste trabalho. Aos meus pais, que não medem esforços para proporcionar o melhor para nossa família.

À Universidade Federal de Uberlândia, sobretudo a Faculdade de Engenharia Mecânica, agradeço a oportunidade de ter acesso à estrutura de produção de conhecimentos em engenharia e a possibilidade de convivência com um corpo docente qualificado durante o processo de formação em Engenharia Aeronáutica.

ANASTÁCIO, R. S. *Validação de um equipamento experimental para a determinação da vazão de nitrogênio em tubos capilares de refrigeração*. 2021. 43 fl. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeronáutica) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

O tubo capilar é o dispositivo de expansão mais comum em sistemas de refrigeração de pequeno porte, incluindo aparelhos de ar condicionado e refrigeradores domésticos. Neste contexto, seu estudo se torna bastante relevante para otimizar sua aplicação, pois pela simples escolha do tubo capilar o coeficiente de desempenho de um sistema de refrigeração pode ser melhorado. Neste trabalho mediu-se a vazão de nitrogênio seco em tubos capilares de diferentes geometrias, totalizando 450 ensaios experimentais, todos realizados de acordo com a norma ASHRAE 28, que padroniza este tipo de ensaio experimental. Foi reajustado uma correlação empírica existente na literatura, utilizando o Método de Superfície de Resposta (RMS) combinada com um Algoritmo Genético (AG), sendo um planejamento experimental combinado com um processo de otimização para obter o melhor resultado e verificar a qualidade do experimento.

Palavras-chave: Tubo Capilar, Dispositivo de Expansão, Método de Superfície e Resposta (RMS), Algoritmo Genético (AG), ASHRAE 28.

ANASTÁCIO, R. S. *Experimental equipment validation using the nitrogen flow determination in capillary refrigeration tubes*. 2021. 43 pp. Undergraduate thesis (aeronautical engineering bachelor degree) — faculty of mechanical engineering, Federal Uberlândia University, Uberlândia, Brazil.

ABSTRACT

The capillary tube is the most used expansion device in small refrigeration systems, including air conditioners and household refrigerators. Considering this context, the study of capillary tube is very important to optimize its use application in this kind of refrigeration systems, once the capillary tube has a direct impact on the system's coefficient of performance. In this work, the dry nitrogen flow was measured in capillary tubes using several geometries, totalizing 450 experiments, all of them standardized with the "ASHRAE 28", which is normally used for this kind of experiment. It was readjusted an existing empirical correlation in the literature, using response surface method (RSM) combined with a Genetic Algorithm (GA), which is an design of experiments combined with an optimization process to obtain best results and to check the quality of the experiment.

Keywords: Capillary Tube, Expansion Device, Response Surface Methodology (RSM), Genetic Algorithm (GA), ASHRAE 28.

Listas de abreviaturas e siglas

ANSI - American National Standard

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers;

DOE - (Planejamento Experimental) Design Experimental;

AG – Algoritmo Genético;

RMS - Método de Superfície de Resposta;

Lista de Símbolos

D	Diâmetro interno do tubo capilar	[mm]
L	Comprimento do tubo capilar	[m]
P_{ent}	Pressão de entrada no tubo capilar	[bar]
P_{tg}	Pressão manométrica na entrada do tubo no momento do teste	[kPa]
P_s	Pressão padrão	[kPa]
$\dot{Q}_{cond}$	Taxa de transferência de calor do condensador	
Q_m	Vazão volumétrica lida no medidor	[L/s]
Q_s	Vazão volumétrica de nitrogênio seco	[L/s]
r_s	Razão de pressão absoluta através do tubo	[-]
r_t	Razão de pressão absoluta através do tubo no momento do teste	[-]
$\dot{w}$	Taxa de trabalho	
$\dot{V}_{N_2}$	Vazão de Nitrogênio	[L/min]

SUMÁRIO

CAPITULO I	13
INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
CAPITULO II	15
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. ESCOAMENTO AO LONGO DE TUBOS CAPILARES	16
2.2. PROCEDIMENTOS PARA SELEÇÃO DE TUBOS CAPILARES	18
2.3. INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO/DIÂMETRO NA VAZÃO MÁSSICA	20
CAPITULO III	24
APARATO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA	24
3.1 CILINDRO DE NITROGÊNIO E VÁLVULA REGULADORA DE PRESSÃO	25
3.2 SEÇÃO DE TESTE	26
3.3 MEDIDOR DE VAZÃO	26
3.4 MÉTODO DE ENSAIO	27
3.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS	28
CAPÍTULO IV	32
RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1 RESULTADOS COM OS PARÂMETROS DE KIPP E SCHIMIDT	32
4.2 ANÁLISE DA COMPARAÇÃO DA CORRELAÇÃO EMPÍRICA - EXPERIMENTAL	34
CAPÍTULO V	38
CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	40
ANEXO A	43
APÊNDICE A. ALGORITMO	44
A1. ALGORITMO GENÉTICO	44
A2. FUNÇÃO OBJETIVO	45
APÊNDICE B.	46
B1. TABELA DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	46

CAPITULO I

Introdução

O sistema de refrigeração mais comum, utilizado em grandes sistemas industriais e pequenas unidades domésticas, é o de compressão mecânica de vapor. Este sistema emprega substâncias voláteis que absorvem grandes quantidades de calor quando vaporizam. Tal sistema é demonstrado de forma esquemática na Fig. 1.1. Observa-se que o sistema possui quatro componentes principais: compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador. Para constituir um ciclo termodinâmico ou um sistema térmico é necessário estes estarem interligados, conforme a Fig. 1.1, e para seu funcionamento utiliza-se um fluido de trabalho, denominado refrigerante.

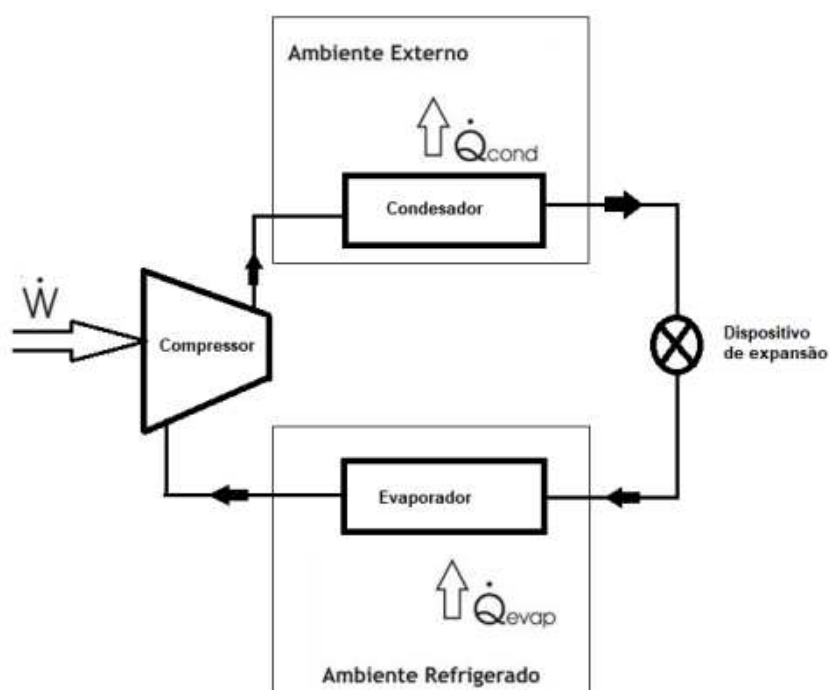


Figura 1.1 - Ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor. (Adaptado Van Wylen et al, 2003).

Iniciamos o ciclo no compressor, onde o fluido refrigerante é succionado no estado de vapor superaquecido e a baixa pressão, sendo comprimido mediante a realização de trabalho ($\dot{W}$), assim, ocasionando um aumento de temperatura e pressão. Após o compressor, o fluido passa para o condensador, onde é condensado (muda de estado de vapor para líquido) e subresfriado ao transferir calor ($\dot{Q}_{cond}$) para o ambiente externo. Na sequência, o refrigerante no estado de líquido subresfriado a alta pressão e temperatura, passa pelo dispositivo de expansão, onde ocorre uma redução de pressão e temperatura, proporcionada pela evaporação de parte do líquido, tendo uma mistura de líquido-vapor, outra função do dispositivo de expansão é regular a passagem do fluxo de refrigerante no evaporador e consequentemente a quantidade de vapor a ser succionado pelo compressor. Ao passar pelo evaporador, a mistura líquido-vapor, absorve calor do ambiente resfriado, vaporizando o fluido.

O foco deste trabalho será o dispositivo de expansão do tipo tubo capilar. Pode - se notar que a nomenclatura “tubo capilar” é utilizada erroneamente neste caso, pois o mesmo possui diâmetros grandes para produzirem um efeito de capilaridade. Porém, esta nomenclatura tornou - se comum pelo fato de seu diâmetro interno ser muito menor que o diâmetro dos demais tubos utilizados no sistema de refrigeração. Os tubos capilares são amplamente utilizados nos sistemas de refrigeração, devido seu baixo custo e simplicidade.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo obter novas constantes para a equação de Kipp e Schimidt (1961) que melhore a performance dela no ajuste e predição do comportamento de tubos capilares.

Desta forma é necessário medir vazão volumétrica de nitrogênio seco em tubos capilares com diferentes geometrias de acordo com o método alternativo da norma ASHRAE 28 - Métodos De Teste Da Capacidade De Fluxo De Refrigerante Em Tubos Capilares.

CAPITULO II

Revisão Bibliográfica

A finalidade dos dispositivos de expansão em sistemas de refrigeração, é receber o fluido refrigerante em alta pressão proveniente do condensador, regulando a vazão de refrigerante no sistema, mantendo uma diferença de pressão apropriada no sistema. Os tubos capilares apresentam uma restrição constante a vazão de refrigerante, normalmente utilizados em sistemas herméticos de refrigeração de pequeno porte, sua simplicidade e baixo custo condiciona que o sistema opere numa faixa de restrita.

O tubo capilar é comumente empregado em sistemas domésticos e seu processo de produção é através da trefilação, no qual um tubo é tracionado através de uma matriz que determina o diâmetro da peça com seção transversal constante. Normalmente são confeccionados de cobre, têm baixo custo, não possuem partes móveis, apresentam pequeno diâmetro (0,5 a 2,0 mm) e comprimento relativamente longo (1 a 6 m).

No sistema de refrigeração, o tubo capilar possui restrição fixa e uma geometria mais simples que os principais componentes. Como consequência, variações de temperatura de condensação ou carga térmica não correspondem as variações no sistema ocasionando uma redução de desempenho (Stoecker e Jones, 1985). Seu uso em sistemas comerciais de refrigeração exige um dimensionamento adequado, a fim de manter a pressão de alta próxima da condição ótima de operação.

Segundo Seixlack (1996), o tubo capilar apresenta vantagens que permitem operações em ciclo reverso, ausência de partes móveis e ainda propiciam equalização das pressões do sistema durante os ciclos de parada, possibilitando o uso de um motor de acionamento com menor torque de partida. As limitações do uso de tubos capilares são a possibilidade de ser obstruído por partículas e a exigência de uma

carga de fluido refrigerante dentro dos limites estreitos, justificando seu uso em unidades herméticas.

A Fig. 2.1 mostra um rolo de tubo capilar na forma em que são normalmente comercializados. A eficiência energética do sistema, está diretamente ligada ao dimensionamento do tubo e da carga de fluido refrigerante, devendo ser projetado com base na carga térmica e nas condições de operação. Após ter definido a geometria do tubo capilar, o ajuste da vazão de refrigerante em função da carga térmica ou da temperatura é inviabilizado.

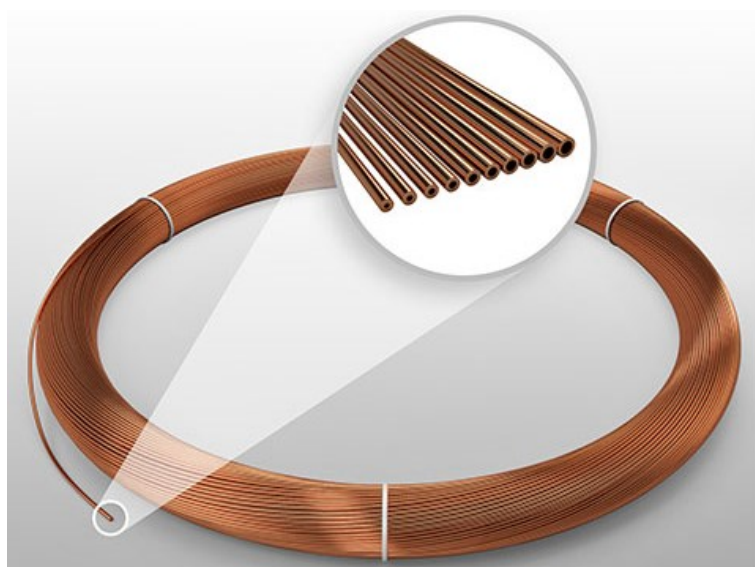


Figura 2.1 - Tubo capilar de cobre.

2.1. Escoamento ao longo de tubos capilares

Estudos verificam a existência da condição de escoamento crítico, ou escoamento bloqueado na saída de tubos capilares, sendo que, uma vez alcançada essa condição, a redução posterior de pressão de evaporação não exerce influência sobre o fluxo de massa na saída do tubo.

Ao longo de um tubo reto de seção transversal constante, com escoamento monofásico compressível, é dito como crítico o escoamento bloqueado quando a pressão a jusante do tubo é suficiente baixa, ao ponto que a velocidade do escoamento em sua saída iguale à velocidade do som, isto corresponde ao ponto em que a entropia do fluido atinge valor máximo. Neste caso, podemos representar esse escoamento pela *linha de Fanno*, caso seja considerado unidimensional, adiabático e em regime permanente, conforme representado no diagrama entalpia-entropia na Fig.

2.2, em que, observa – se a redução da entalpia com a entropia em direção a saída do tubo.

Após atingida a velocidade do som, ocorre a redução da pressão do fluido ou de sua temperatura, conseqüentemente resultando na redução de sua entropia. A máxima entropia representa uma limitação física, imposta pela segunda lei da Termodinâmica, e ocorre na saída do tubo quando $ds/dh \rightarrow 0$ (Stoecker e Jones, 1985). Para um dado fluxo de massa e condições de entrada, o fluido não pode atingir a velocidade do som no interior do tubo, somente na saída.

Variações na pressão de evaporação abaixo do valor correspondente à condição crítica não influenciam a vazão mássica de refrigerante e o escoamento no tubo não pode ser mais acelerado. A redução de pressão no evaporador implica em um aumento na vazão mássica, ocorrendo somente acima do valor crítico.

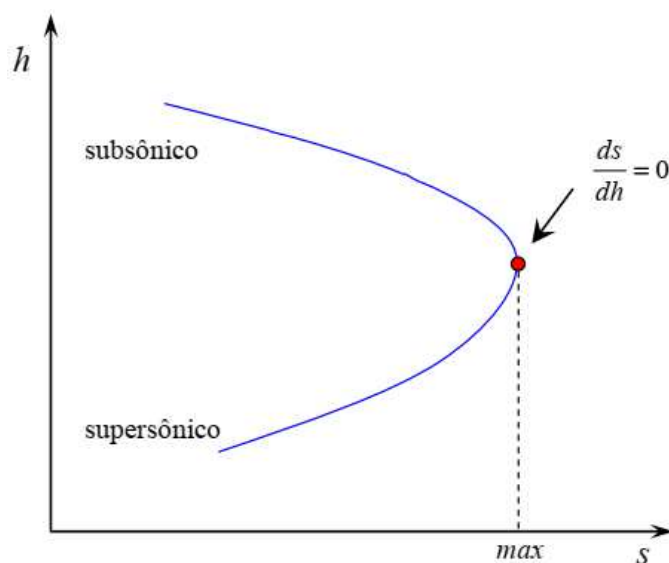


Figura 2.2 - Diagrama esquemático h-s para o escoamento adiabático com atrito em duto e seção transversal constante - Linha de Fanno. Adaptado: Seixlack, 1996.

O tubo capilar é um dispositivo de expansão relativamente simples, porém o escoamento do fluido refrigerante no seu interior é complexo. Isto se deve à mudança de fase ao longo do tubo, e assim podemos dividir o escoamento em duas regiões: uma de escoamento monofásico e outra de escoamento bifásico, contendo uma mistura líquido-vapor. Outro fator identificado é que o escoamento é turbulento numa faixa de números de Reynolds entre 4×10^3 a 20×10^3 , podendo atingir a condição crítica.

A Fig. 2.3 ilustra o escoamento em um tubo capilar adiabático de um fluido refrigerante convencional, com entrada a partir do condensador (1), até o evaporador (5). Na entrada do capilar, ponto (2), o fluido está numa pressão inferior à pressão de condensação devido a perda de carga na conexão de entrada. Ao longo do tubo, até o ponto (3a), devido aos efeitos viscosos a pressão do fluido diminui linearmente, mantendo sua temperatura constante. O fluido atinge a condição de saturação no ponto (3a), mas não vaporiza instantaneamente, caracterizando o início da região metaestável. A região bifásica do escoamento inicia no ponto (3), onde o refrigerante retorna à condição de equilíbrio termodinâmico em (3b), até no ponto (4). Do ponto (3b) até o ponto (4), o fluido se encontra na região bifásica, a perda de carga é provocada pelo atrito e pela aceleração do fluido, devido ao contínuo aumento do comprimento do tubo. No ponto (4), podemos observar que surge a pressão sônica ou bloqueio. No ponto (5), o fluido está sujeito a expansão abrupta, em que ondas de expansão promovem a redução da pressão do refrigerante até a pressão de evaporação. (Gonçalves, 1994; Cunha, 2001).

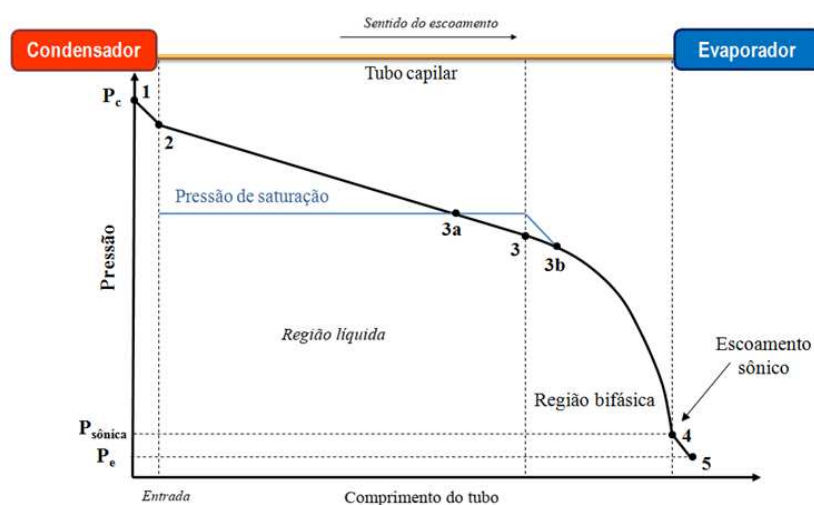


Figura 2.3 - Escoamento de fluido refrigerante através de um tubo capilar adiabático. Adaptado: de Silva, 2008.

2.2. Procedimentos para seleção de tubos capilares

O principal interesse de fabricantes de sistemas de refrigeração é obter o par diâmetro/comprimento de tubo capilar para atender as necessidades de projeto de um sistema, especificados os parâmetros de escoamento na entrada e saída do tubo. Para isso, a importância de métodos que permitam o dimensionamento dos tubos de uma forma otimizada.

Sabendo da influência do tubo capilar sobre o desempenho do sistema, procedimentos de tentativa e erro são utilizados, nos quais o tubo é cortado e testado até fornecer as condições requeridas. Tal processo não é muito eficiente, visto que pode ocorrer a instalação de um tubo de comprimento que não forneça a pressão com sucção requerida pelo sistema.

Em 1976, a American Society for Testing Materials (ASTM) publicou normas técnicas para padronizar a fabricação de tubos capilares de cobre, sendo requisitos estabelecidos que contemplavam a composição do cobre, procedimento para amostragem, testes de rejeição de lote, características do processo de produção e cuidados para embalagem e distribuição. A norma ANSI/ASTM B360 estabeleceu limites de tolerância para variações máximas dos diâmetros interno ($\pm 0,025$ mm) e externo ($\pm 0,051$ mm) do tubo capilar.

Segundo as revisões de trabalhos sobre tubos capilares realizados por Sweedyk (1981), seus estudos abordaram os aspectos do processo de seleção e fabricação, dos efeitos de rugosidade e do diâmetro interno. Através de testes com nitrogênio seco, Sweedyk (1981) observou diferenças na vazão mássica de nitrogênio em tubos capilares do mesmo comprimento e diâmetro interno, mas procedente de diferentes fornecedores. Tais discrepâncias são atribuídas às variações nos métodos de fabricação, que alteravam o diâmetro interno e sua rugosidade. Os procedimentos utilizados por Sweedyk (1981) foram padronizados pela norma ANSI/ASHRAE 28 (1996).

Diagramas desenvolvidos pela ASHRAE (1983) são de fácil uso para determinar o a vazão mássica quando conhecidas as dimensões do tubo capilar, ou quando conhecidos os parâmetros geométricos do tubo para determinar a vazão mássica. Esses diagramas são oriundos do trabalho de Whitesel (1957), o qual não leva em consideração o efeito do grau de sub-resfriamento do fluido.

A norma ASHRAE 28 é um procedimento para testar a capacidade de tubos capilares em termo de vazão mássica utilizando nitrogênio seco, sob determinadas condições através do tubo de interesse. Esse procedimento não define características do comportamento do escoamento ao longo do tubo em um ciclo de refrigeração, mas o de vazão mássica de nitrogênio é um indicativo dessas características, mesmo que a relação matemática entre as duas condições não possa ser precisamente estabelecida.

2.3. Influência do comprimento/diâmetro na vazão mássica

Um grande acervo de pesquisas relacionadas a tubos capilares adiabáticos tem sido construído nos últimos anos, estes trabalhos envolvem tanto correlações experimentais, como simulações numéricas, possibilitando analisar e projetar as dimensões dos tubos capilares. Jung et al (1999), apresentam projeções das dimensões do tubo capilar para determinar a vazão mássica de refrigerante num sistema de refrigeração baseado no modelo de Stoecker (1985). Jung et al (1999), delinearam o escoamento através de um tubo capilar como uma função do diâmetro interno e do comprimento do capilar, levando em consideração efeitos devido ao grau de sub-resfriamento, como: fator de atrito e viscosidade, área de contração e misturas. O modelo de equações obtidas foi comparado com o modelo da ASHRAE e validado com resultados experimentais para R407C, R12, R134a e R22. Após os resultados obtidos, desenvolveram um modelo de regressão linear para analisar a dependência da vazão mássica de refrigerante com as dimensões do tubo, com o grau de sub-resfriamento e a temperatura de condensação. Os resultados obtidos por Jung et al (1999) são apresentados na Fig. 2.4.

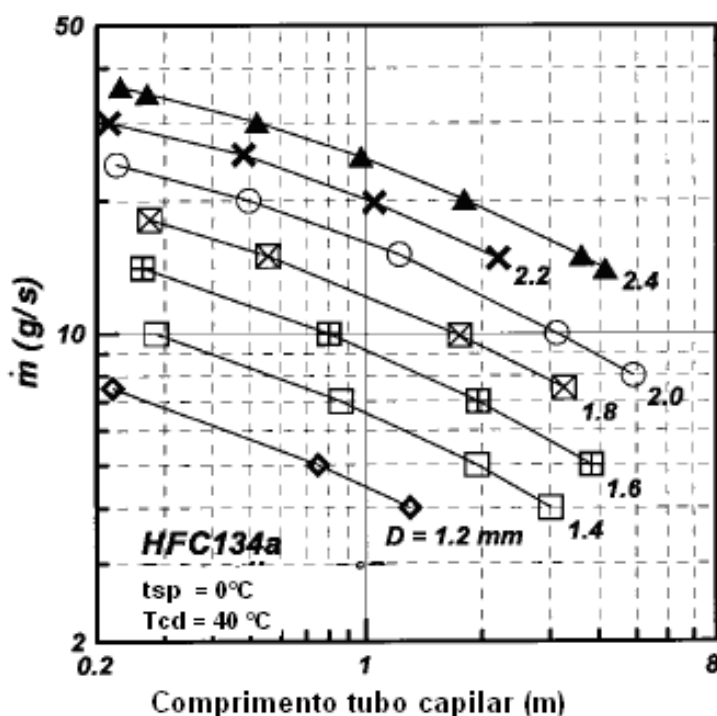


Figura 2.4 - Desempenho do tubo capilar para R134a do experimento de Jung et al (1999)

Segundo Wei et al (2001), as dimensões do tubo capilar dependem do tamanho do sistema de refrigeração. Seus estudos constatou a influência da geometria do tubo sobre a vazão mássica de refrigerante R407C, eles realizaram a análise e comparação a vazão mássica entre capilares espiralares e reto, constatando que a vazão mássica de refrigerante reduz com a redução do diâmetro do enrolamento do tubo, mas quando comparado com o reto, não apresentou mudanças significativas ao variar a pressão de condensação na entrada do tubo ou grau de sub-resfriamento.

Choi et al (2004), implementaram parâmetros dimensionais baseados em resultados experimentais para R407C, R22 e R290, e desenvolveram uma equação de correlação para vazão mássica de fluido refrigerante através de tubo capilar. Tais parâmetros foram derivados do Teorema de Pi – Buckingham, considerando a geometria, propriedades do refrigerante sobre a vazão mássica e condições de entrada no capilar. Este modelo foi comparado com resultados experimentais obtidos para R600a, R134a, R152a e R22, apresentados na Fig. 2.5.

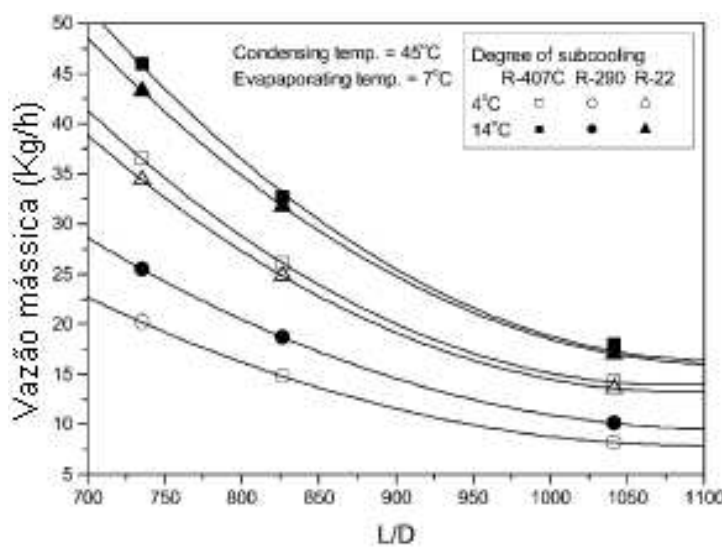


Figura 2.5 - Resultados do modelo de Choi et al (2004).

Yang e Wang (2007), com base em resultados de outras pesquisas, através de aproximações analíticas, desenvolveram uma equação de correlação que define o escoamento de refrigerante em tubos capilares. Eles utilizaram o modelo de equilíbrio homogêneo para fluidos bifásicos ou mistura bifásica na entrada do capilar. Seus resultados são apresentados na Fig. 2.6.

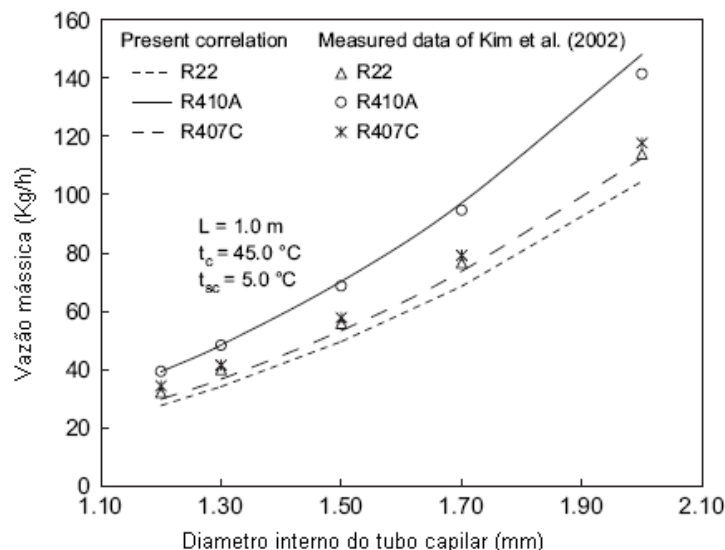


Figura 2.6 - Resultados do modelo de Yang e Wang (2007).

A restrição ocasionada por um tubo capilar está relacionada com sua geometria, sendo que, quanto menor o diâmetro interno ou maior o comprimento do tubo, a restrição imposta ao escoamento será maior. Kipp e Schmidt (1961), demonstraram que tubos com diferentes diâmetros podem ser equivalentes, desde que o comprimento de um em relação ao outro seja proporcional, de forma que compense a diferença entre os diâmetros.

Os ensaios experimentais em tubos capilares realizados por Kipp e Schmidt (1961) resultou em uma correlação empírica que relaciona a vazão volumétrica de nitrogênio seco com a geometria do tubo capilar e com a pressão de entrada. Essa correlação é apresentada na Eq. 2.1:

$$\dot{V}_{N_2} = c_1 L^{-c_2} D^{c_3} \sqrt{P_{ent}^2 - 1} \quad (2.1)$$

onde os parâmetros $c_1 = 2,5$, $c_2 = 0,5$ e $c_3 = 2,5$ são determinados por Kipp e Schmidt. A vazão de nitrogênio é calculada em [L/min], L é o comprimento [m], D é o diâmetro interno do capilar [mm] e P_{ent} é a pressão de entrada de nitrogênio seco [bar]. Esta metodologia permite determinar as dimensões geométricas de um tubo capilar, a partir de uma vazão de nitrogênio conhecida. Com a expansão num tubo capilar se o fluido tiver umidade acimado recomendado ele irá formar gelo e bloquear o capilar, então é recomendado que a pureza do nitrogênio seja de no mínimo 99,95%, desta forma é atribuído o nome de nitrogênio seco.

A correlação de Kipp e Schmidt (1961) utiliza nitrogênio seco para realizar a medição e fazer uma equivalência da vazão volumétrica em tubos capilares com outros fluidos refrigerantes. A norma ASHRAE 28, diz que a capacidade de um fluido num tubo capilar pode ser expressa em litros de nitrogênio.

Boeng J. (2012) utilizou uma bancada para a realização de testes capilares utilizando nitrogênio desenvolvida por Melo et al (1998) para a realização de 28 ensaios experimentais com tubos capilares de diferentes geometrias e com diferentes pressões de entradas. As vazões obtidas por Boeng J. (2012) foram comparadas com as previsões da correlação proposta por Kipp e Schmidt (1961), onde os resultados experimentais obtidos apenas 65% foram previstos pela correção com erros inferiores a $\pm 10\%$.

Desta forma, devido a relativa divergência entre os resultados experimentais e as estimativas da correlação de Kipp e Schmidt (1961), Boeng J (2012) reajustou os parâmetros da correlação utilizando o Método de Superfície de Resposta (RMS) para encontrar novos parâmetros para a correlação, onde 97% dos valores experimentais ficaram dentro da faixa de erro de $\pm 10\%$.

No presente trabalho, a correlação de Kipp e Schmidt (1961) foi utilizada para comparar os resultados experimentais de uma bancada desenvolvida de acordo com norma ASHRAE 28. Medindo – se a vazão de nitrogênio seco que passa pelo capilar a uma determinada pressão de entrada e geometrias conhecidas do tubo capilar, é possível verificar a relação experimental com a correlação de Kipp e Schmidt (1961).

CAPITULO III

Aparato Experimental e Metodologia

A bancada experimental desenvolvida opera no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia da Faculdade de Engenharia Mecânica (LestNano), na Universidade Federal de Uberlândia. O aparato experimental foi montado de acordo com o método alternativo da norma ASHRAE 28, sendo ele constituído basicamente por um cilindro de nitrogênio que fornece o fluido de trabalho com um regulador de pressão, acoplado a um transdutor de pressão para medir a pressão de entrada no tubo capilar. Na sequência encontra-se a seção de testes, na qual foram acopladas diferentes geometrias de tubos capilares. Ao final da bancada foi montado um medidor de vazão do tipo rotâmetro. O desenho esquemático da bancada de medição de vazão por nitrogênio seco é apresentado na Fig.3.1

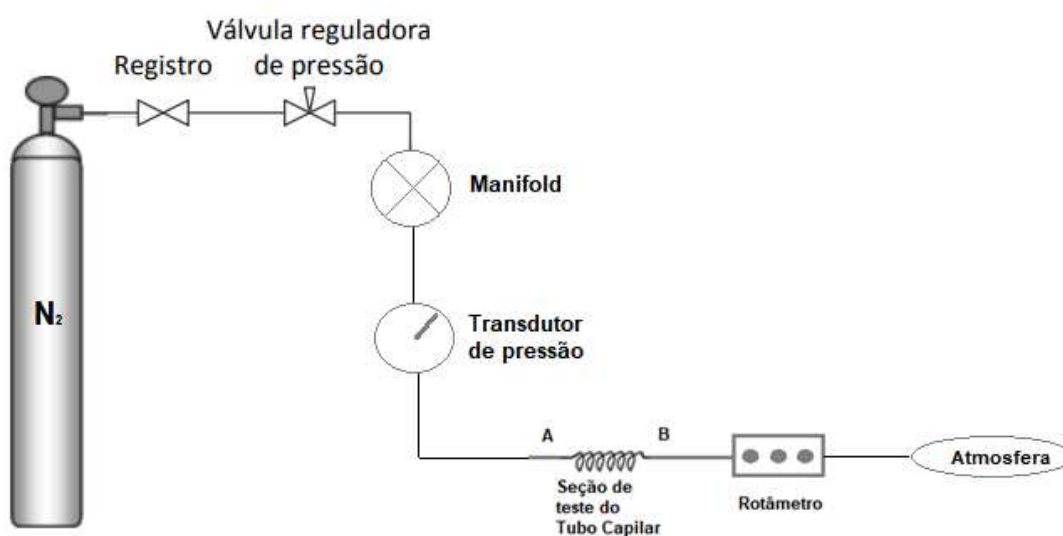


Figura 3.1- Esquema da bancada de medição de vazão do tubo capilar de acordo com a norma ASHRAE 28.

A bancada foi usada para a realização de 450 ensaios experimentais com tubos capilares de diferentes geometrias (diâmetro interno de 0,7874 mm, 0,9144 mm, 1,0668 mm, 1,27 mm e 1,6256 mm e comprimento de 1 m, 2 m e 3 m) que comercialmente representam as seguintes medidas (diâmetro interno de 0,031 pol, 0,036 pol, 0,042 pol, 0,050 pol e 0,064 pol), as pressões de entrada foram variadas entre - 850 kPa, 950 kPa e 1050 kPa. Realizou – se réplicas de outros tubos capilares, com as mesmas geometrias e condições de operações de teste, totalizando 170 dos 450 ensaios para esses outros capilares, só não foi possível realizar réplica para os capilares com comprimento de 1 metro.

3.1 Cilindro de nitrogênio e válvula reguladora de pressão

Seguindo a norma ASHRAE 28, para realizar os experimentos no método alternativo, o suprimento de nitrogênio seco deve fornecer uma pressão mínima de 850kPa de forma constante. Para sua regulagem, é necessário ter uma válvula que possibilite variar a pressão de forma pontual, representado pela Fig. 3.2 (A). A norma exige que o medidor de pressão deva possuir uma resolução entre 0 – 1100 kPa, neste caso utilizou o *manifold* da fabricante Testo, representado na Fig. 3.2 (B), suas características são descritas no Anexo A.

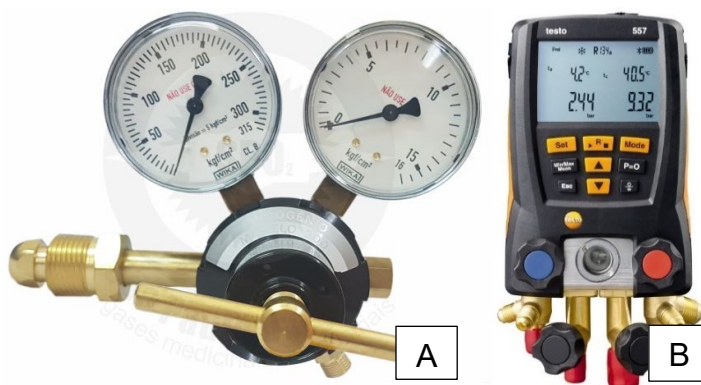


Figura 3.2 - Válvula reguladora de pressão (A), Manifold Testo modelo 557 (B). Fonte: catalogo do fabricante.

3.2 Seção de teste

A seção de teste possui uma válvula de acoplamento rápido para conectar o tubo capilar ao sensor de pressão e ao medidor de vazão, de forma que não altere o escoamento no tubo. Nos tubos capilares foi soldado uma extensão de tubo de 6,35 mm contendo um flange e uma porca flange, exemplificado na Fig. 3.3, para facilitar o acoplamento na válvula.

A norma ASHRAE 28 estipula que o tubo deve ser, preferencialmente, testado como um tubo reto. Se as limitações da bancada de teste tornem necessário enrolar ou dobrar a amostra, o raio mínimo de curvatura não deve ser inferior a 300 mm (11,8 pol.).



Figura 3.3 - Exemplo da conexão porca flange utilizada no tubo capilar.

3.3 Medidor de vazão

O rotâmetro transparente de área variável da Fig. 3.4 tem um flutuador com geometria cônica que, sob a ação do escoamento, se desloca no tubo de vidro vertical e assume uma certa posição de equilíbrio para cada vazão dada. Assim, o rotâmetro fornece uma medida prontamente visível da vazão. Sua capacidade pode ser alterada, por meio de flutuadores e do tubo de vidro com diferentes tamanhos e o tubo precisa estar na vertical.



Figura 3 - Rotâmetro para gases - Haake Medingen GMBH modelo WH12.

A vazão obtida no rotâmetro deve ser corrigida considerando a pressão atmosférica do local do teste esteja de acordo com a norma ASHRAE 28.

3.4 Método de ensaio

Os ensaios experimentais consistem na medição da vazão de nitrogênio seco através dos tubos capilares para verificar a correlação da equação 2.1 de Kipp e Schmidt (1961) de acordo com a norma da ASHRAE 28. A metodologia de análise consiste inicialmente em medir a vazão de nitrogênio através de cada um dos tubos capilares utilizando uma bancada de testes específica, ilustrada na Fig. 3.1. Para tanto, abre-se o registro, libera-se o nitrogênio seco para o circuito, regula-se a pressão de entrada por meio de uma válvula reguladora e verifica se a pressão de entrada no tubo capilar através do *manifold* é a de interesse para os testes. Na sequência é necessário aguardar aproximadamente 10-15 segundos para o prumo do rotâmetro estabilizar, e desta forma realizar uma medida precisa da vazão volumétrica.

O primeiro ensaio foi realizado com os capilares de 3 metros de diferentes diâmetros (diâmetro interno de 0,7874 mm, 0,9144 mm, 1,0668 mm, 1,27 mm e 1,6256 mm), sendo realizados 6 ensaios para cada uma das pressões (850kPa, 950kPa e 1050kPa). Ou seja, para o tubo capilar de diâmetro de 0,7874 mm e comprimento 3 m, realizou a medição da vazão volumétrica alterando as pressões (850 kPa, 950 kPa

e 1050 kPa) de forma aleatória, e para cada pressão realizou 6 ensaios, totalizando para essa geometria de capilar 18 ensaios, esse procedimento foi realizado para todas possíveis combinações de geometria citada. Utilizando o mesmo procedimento, reduziu-se o comprimento do capilar para 2 metros e 1 metro. Foram realizadas réplicas de cada combinação de outros capilares do mesmo fabricante com o mesmo comprimento e diâmetro, com exceção dos capilares de comprimento de 1 metro, obtendo-se o total de 450 ensaios experimentais.

3.5 Processamento dos dados

O presente trabalho é eminentemente experimental, e para verificar se os resultados do ensaio estão conforme o que é previsto pela correlação de Kipp e Schmidt (1961), inicialmente utilizou-se seus parâmetros $c_1 = 2,5$, $c_2 = 0,5$ e $c_3 = 2,5$, onde os resultados apresentaram apenas 51,78% dentro da faixa de erro de $\pm 10\%$. Desta forma a correlação não é válida utilizando os parâmetros propostos por Kipp e Schmidt (1961), pois tendo como base o trabalho desenvolvido por Boeng J. (2012) ele encontrou que 65% dos resultados estão dentro da faixa de erro.

Buscando novas constantes utilizadas na Eq. 2.1 de Kipp e Schmidt (1961), realizou um método semelhante ao utilizado por Boeng J. (2012), na qual neste trabalho utilizou o Método de Superfície Resposta (RMS) através do software *Statistica*, o qual utiliza o modelo de planejamento experimental conhecido como *Design of Experiments* (DOE), que maximiza economicamente as informações em um experimento, alterando deliberadamente uma ou mais variáveis (ou fatores) do processo para observar o efeito que as mudanças têm em uma ou mais variáveis de resposta. O DOE é um procedimento eficiente para o planejamento de experimentos de forma que os dados obtidos possam ser analisados para produzir conclusões válidas e objetivas.

É comum começar com um modelo de processo do tipo '*Black Box*', com vários fatores de entrada discretos ou contínuos que podem ser controlados, isto é, variados à vontade por quem realiza o experimento. As respostas de saída são consideradas contínuas. Os dados experimentais são utilizados para derivar um modelo empírico (aproximação) ligando as saídas e entradas. Esses modelos empíricos geralmente contêm termos de primeira e segunda ordem.

Frequentemente, o experimento deve levar em conta uma série de fatores não controlados que podem ser discretos, como diferentes máquinas ou operadores, e / ou contínuos, como temperatura ambiente ou umidade.

Os modelos empíricos mais comuns que se ajustam aos dados experimentais assumem uma forma linear ou quadrática. Um modelo linear com dois fatores, X_1 e X_2 , pode ser escrita de acordo com a Eq. 3.2:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \quad (3.2)$$

onde, Y é a resposta para determinados níveis dos efeitos principais X_1 e X_2 e o termo $X_1 X_2$ é incluído para contabilizar um possível efeito de interação entre X_1 e X_2 . A constante β_0 é a resposta de Y quando ambos os efeitos principais são 0.

Para uma situação mais complexa, com mais variáveis de entrada, um modelo linear com três fatores X_1 , X_2 , X_3 e uma resposta, Y , seria semelhante (se todos os termos possíveis fossem incluídos no modelo):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{123} X_1 X_2 X_3 + \varepsilon \quad (3.2)$$

Os três (k) termos com um "X" são os termos de efeitos principais. Existem $k(k-1) / 2 = 3 * 2 / 2 = 3$ termos de interação de duas vias e 1 termo de interação de três vias (que geralmente é omitido, para simplificar). Quando os dados experimentais são analisados, todos os parâmetros " β " desconhecidos são estimados e os coeficientes dos termos "X" são testados para ver quais são significativamente diferentes de 0.

Um modelo quadrático ou modelo de segunda ordem (normalmente utilizado em DOE de superfície de resposta com suspeita de curvatura) não inclui o termo de interação de três vias, mas adiciona mais três termos ao modelo linear, a saber:

$$\beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2$$

O objetivo do Método da Superfície de Resposta (RMS) é permitir estimar no experimento a interação e até mesmo os efeitos quadráticos e, portanto, nos dar uma ideia da forma (local) da superfície de resposta que estamos investigando. Por esse

motivo, eles são chamados de modelo de método de superfície de resposta (RSM), utilizados para:

- Encontrar configurações de processo otimizadas ou ideais;
- Resolva problemas de processo e pontos fracos; e
- Tornar um produto ou processo mais robusto contra influências externas e não controláveis.

Para o processamento dos dados, realizou-se um planejamento experimental não fatorial, sem repetição no ponto central para variar as constantes da correlação de Kipp e Schmidt e reduzir o erro com os resultados experimentais. Desta forma, criou-se um metamodelo para modelar o erro matemático da equação e utilizando o Algoritmo genético para iniciar e achar o mínimo de erro possível.

O algoritmo genético (AG), que é um método de otimização e busca inspirados nos mecanismos de evolução de populações de seres vivos. Estes algoritmos seguem o princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto, declarado em 1859 pelo naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin em seu livro *A Origem das Espécies*. De acordo com Charles Darwin, “Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes”.

Otimização é a busca da melhor solução para um dado problema. Consiste em tentar várias soluções e utilizar a informação obtida neste processo de forma a encontrar soluções cada vez melhores.

As técnicas de busca e otimização, geralmente, apresentam:

- Um espaço de busca, onde estão todas as possíveis soluções do problema;
- Uma função objetivo (algumas vezes chamada de função de aptidão na literatura de AGs), que é utilizada para avaliar as soluções produzidas, associando a cada uma delas uma nota.

Em termos matemáticos, a otimização consiste em achar a solução que corresponde ao ponto de máximo ou mínimo da função objetivo, utilizado neste trabalho para minimizar o erro da equação de correlação. O desenvolvimento do algoritmo genético é descrito no Apêndice A.

Aplicando o processamento de dados descrito e tomando como partida os valores de c_1 , c_2 e c_3 fornecidos por Kipp e Schmidt (1961), obteve – se a correlação representada pela Eq. 3.4, a qual será a função objetivo utilizada no algoritmo genético para determinar os novos parâmetros c_1 , c_2 e c_3 . A Tabela 3.1, apresenta o coeficiente

de regressão calculado no *software Statistica* com seus respectivos intervalos de confiança para a Eq. 3.4.

Tabela 3.1 – Regressão dos coeficientes.

Parâmetro Estimado	Coeficiente De Regressão	Erro Padrão	-95% Confiança	+95% Confiança
β_0	74,5381139	2,34709147	68,9881245	80,0881033
β_1	-41,2719255	0,709949706	-42,9506898	-39,5931612
β_2	8,04628029	0,960247933	5,77565474	10,3169058
β_2^2	-30,1018125	0,221752808	-30,6261746	-29,5774505
β_3	17,9300555	1,34592725	14,7474433	21,1126677
β_3^2	-3,77991417	0,221752808	-4,30427624	-3,25555211
β_{12}	26,4238179	0,263080341	25,8017318	27,0459041
β_{13}	-4,3284192	0,263080341	-4,95050535	-3,70633304
β_{23}	5,78634275	0,263080341	5,1642566	6,40842891

$$e = 74.538 + C_1(-41.272) + C_2(8.0463) + C_2^2(-30.102) + C_3(17.930) + \\ + C_3^2(-3.779) + C_1C_2(26.424) + C_1C_3(-4.328) + C_2C_3(5.786) \quad (3.4)$$

A Eq. 3.4 representa o metamodelo que minimiza o erro da equação de correlação determinado no *software Statistica*, após 7 interações com o algoritmo genético, chegou – se nos novos parâmetros $c_1 = 2.3544$, $c_2 = 0.38354$ e $c_3 = 2.63232$ que proporcionam o melhor resultado para a aplicação na equação de Kipp e Schimidt (1961).

CAPÍTULO IV

Resultados e Discussões

Os ensaios experimentais foram realizados de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 3. No total, foram realizados 450 ensaios experimentais, e a tabela com os ensaios é apresentada no Apêndice B devido a sua extensão. Os ensaios tiveram como objetivo avaliar a vazão de nitrogênio para diferentes geometrias de tubos capilares.

4.1 Resultados com os parâmetros de Kipp e Schmidt

Utilizando os parâmetros de Kipp e Schmidt (1961), $c_1 = 2,5$, $c_2 = 0,5$ e $c_3 = 2,5$, obteve-se que dos 450 ensaios apenas 233 (51,78%) estão entre a faixa de erro de $\pm 10\%$. A Fig. 4.1 demonstra graficamente este resultado.

Cabe destacar que o modelo utilizado por Boeng J. (2012) prevê que 65% dos resultados experimentais estavam com erro inferiores a $\pm 10\%$ utilizando os parâmetros fornecido por Kipp e Schmidt (1961). Então, através do método descrito na seção 4.2 para determinar os novos parâmetros, foram utilizados os coeficientes $c_1 = 2.3544$, $c_2 = 0.38354$ e $c_3 = 2.63232$ e obteve-se que dos 450 ensaios, 333 (74%) estão entre a faixa de erro de $\pm 10\%$. A Fig. 4.2 demonstra graficamente este resultado e na Fig. 4.3 mostrada a comparação entre os novos parâmetros fornecidos por Kipp e Schmidt (1961).

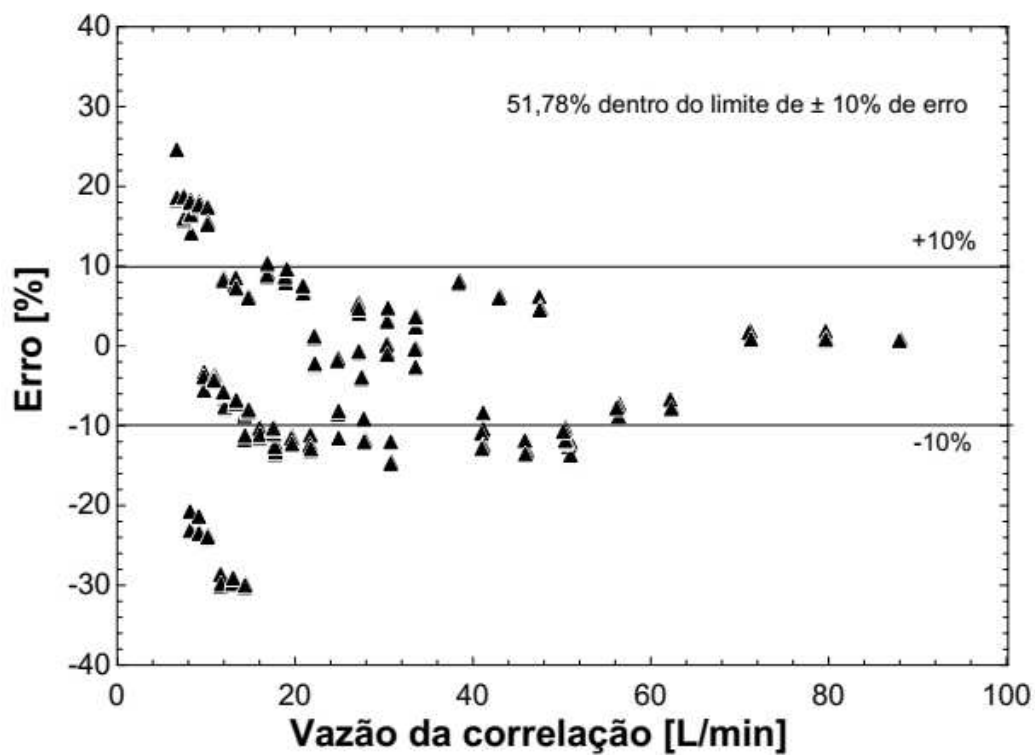


Figura 4.1 - Faixa de erro com parâmetros de Kipp e Schmidt (1961).

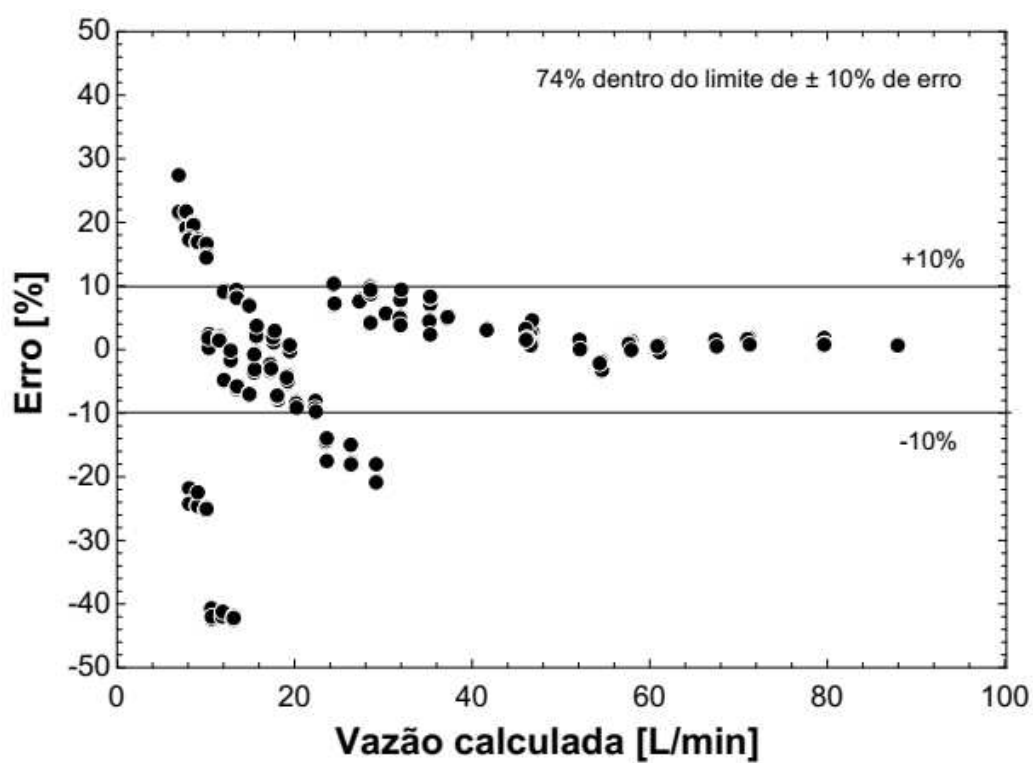


Figura 4.2 - Faixa de erro com novos parâmetros.

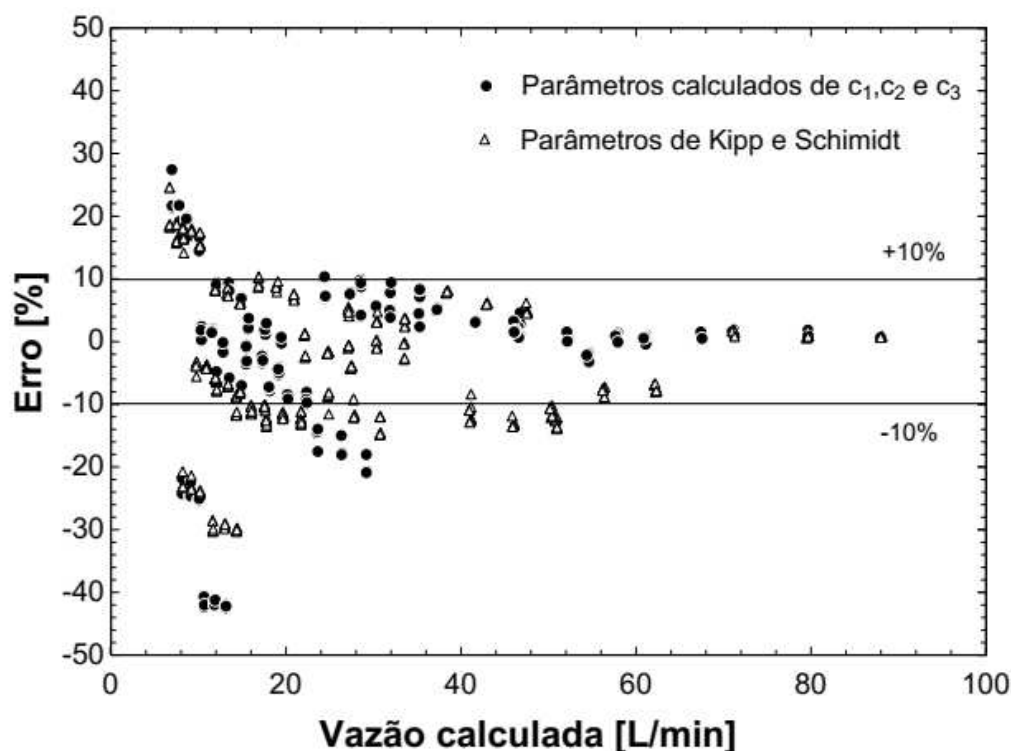


Figura 4.3 – Comparação com os novos parâmetros com os parâmetros de Kipp e Schmidt.

4.2 Análise da comparação da correlação empírica - experimental

As Figs. 4.4 - 4.9 mostram resultados da comparação da correlação com os dados experimentais para diferentes configurações de capilares. Pode – se verificar que o tubo capilar de diâmetro 0,7874 mm para todos os comprimentos esteve fora da faixa de $\pm 10\%$ de erro, apresentado erros acima de 17%.

Quanto à configuração dos capilares de 0,9144 mm, 1,27 mm e 1,6256 mm, todos os comprimentos estiveram dentro da faixa de erro de $\pm 10\%$, com exceção de algumas medidas do capilar de 1,27 mm.

Quanto ao capilar de 1,0668 mm, ad configurações de 3 e 2 metros estiveram dentro da faixa de erro de $\pm 10\%$. Já para a configuração de 1 metro, todos os valores estão fora da faixa, apresenta erros entre 13% a 15%.

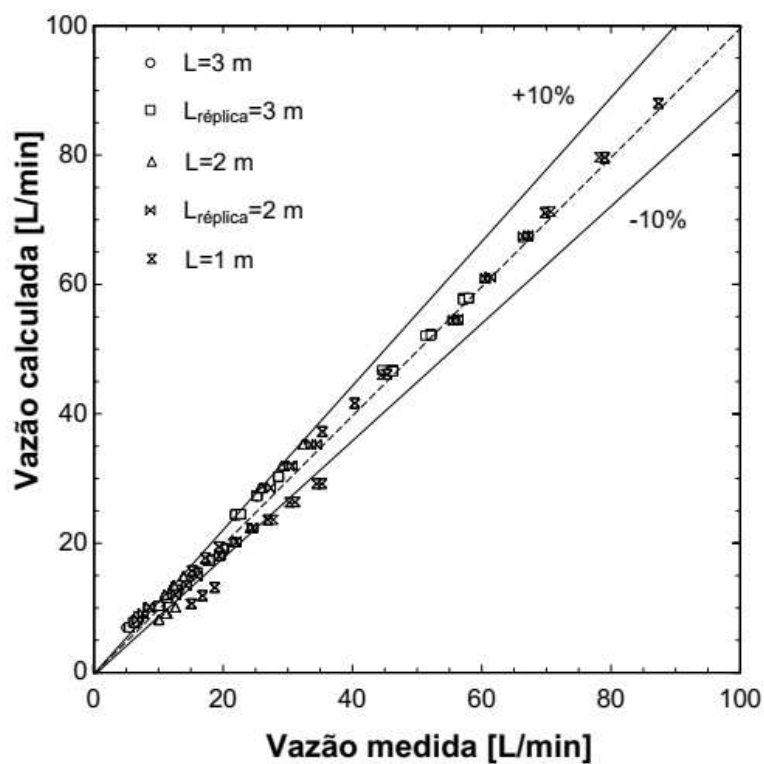


Figura 4.4 - Comparação da correlação com os dados experimentais com todas geometrias de tubos capilares.

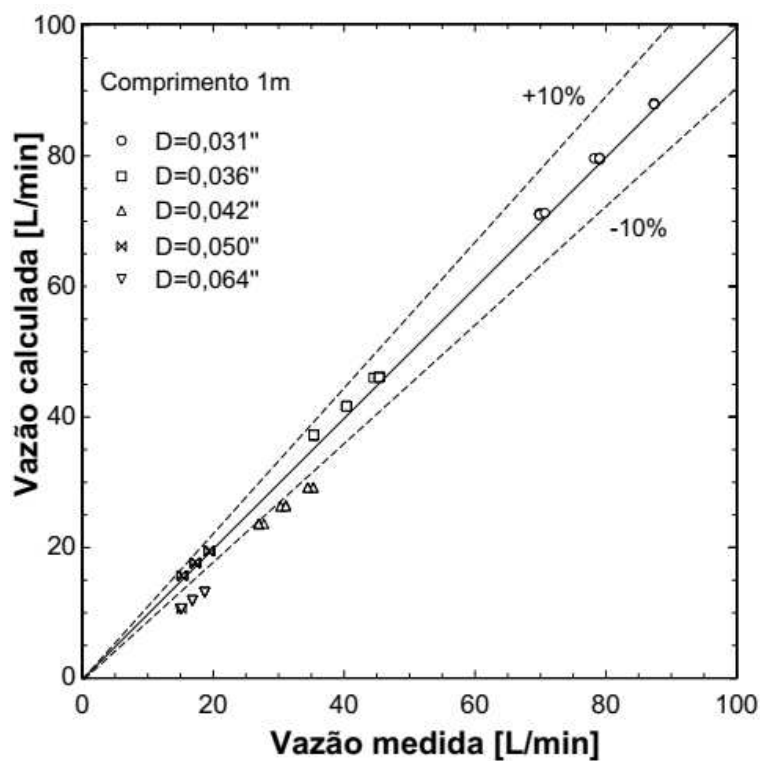


Figura 4.5 - Comparação da correlação com os dados experimentais de todos os diâmetros para o tubo capilar de 1 metro.

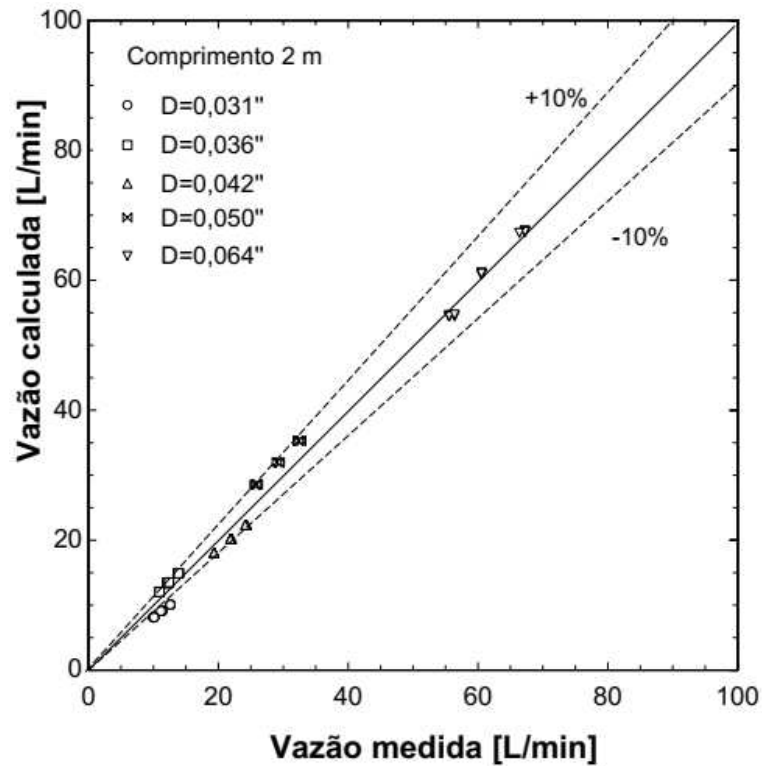


Figura 4.6 - Comparação da correlação com os dados experimentais de todos os diâmetros para o tubo capilar de 2 metros.

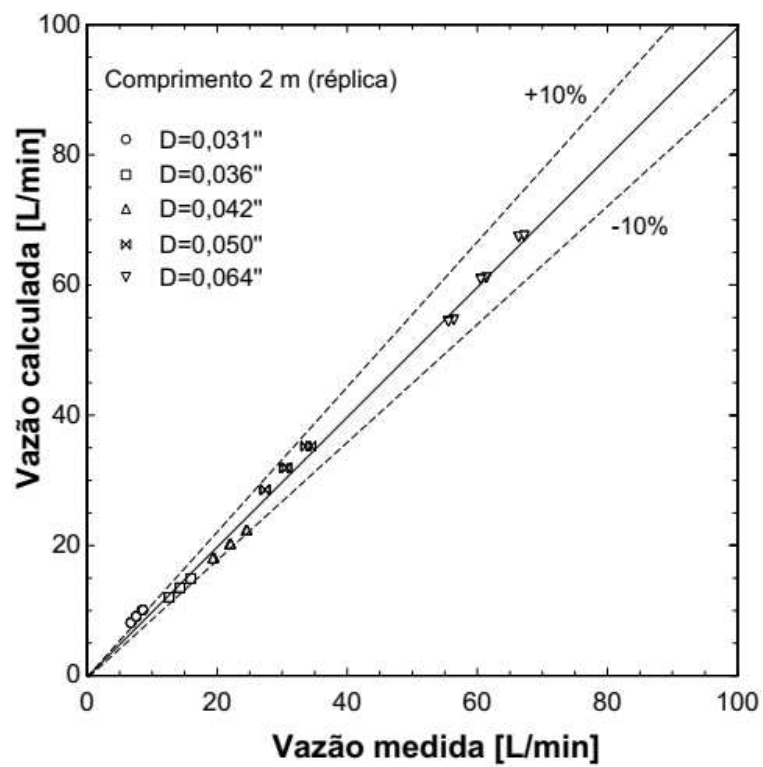


Figura 4.7 - Comparação da correlação com os dados experimentais de todos os diâmetros para o tubo capilar de 2 metros (réplica).

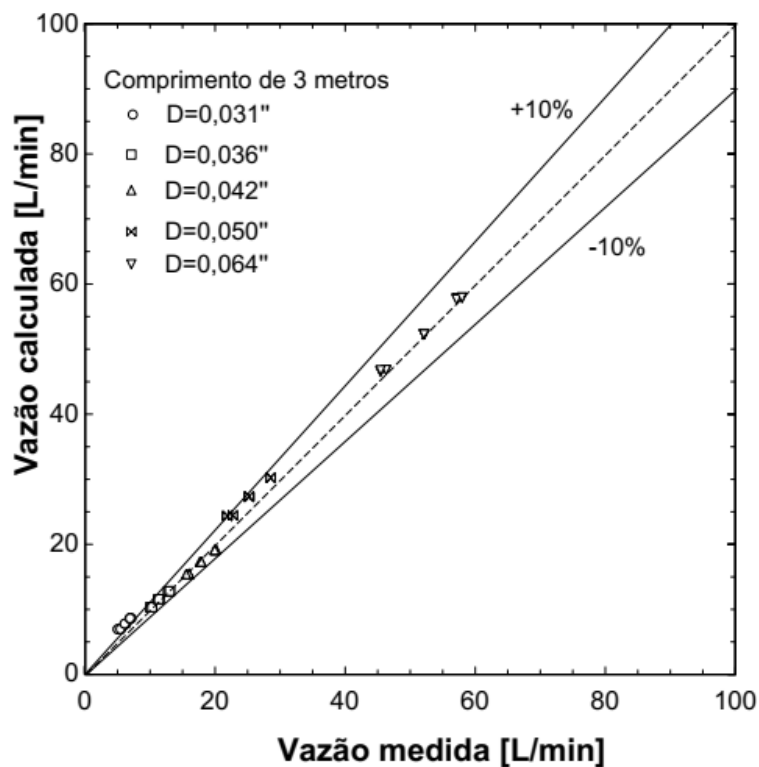


Figura 4.8 - Comparação da correlação com os dados experimentais de todos os diâmetros para o tubo capilar de 3 metros

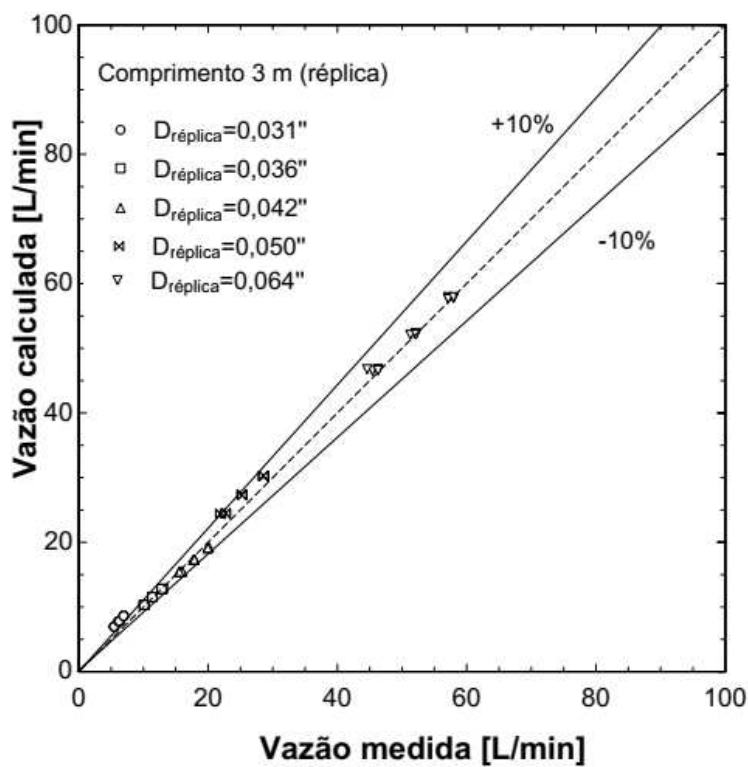


Figura 4.4 - Comparação da correlação com os dados experimentais de todos os diâmetros para o tubo capilar de 3 metros (réplica).

CAPÍTULO V

Conclusão

O presente trabalho propôs a avaliar a vazão volumétrica de nitrogênio seco em tubos capilares, variando a geometria do tubo e a pressão de nitrogênio, através da bancada experimental que está de acordo com o modelo alternativo da norma ASHRAE 28. Este trabalho experimental adicionou dados significativos à literatura, onde foram realizados 450 ensaios com diferentes geometrias de tubos capilares.

Para confrontar o resultado experimental com o modelo da correlação empírica, utilizou a relação da equação de Kipp e Schmidt (1961) que quando o modelo foi utilizado por Boeng J. (2012) encontrou que apenas 65% da comparação entre o modelo da correlação com os dados experimentais estavam dentro faixa de erro menor que $\pm 10\%$. Sendo que neste trabalho apenas 51,78% dos dados estavam dentro da faixa de erro menor que $\pm 10\%$.

Para determinar os parâmetros (c_1 , c_2 e c_3) utilizados na equação de Kipp e Schmidt, foi utilizado o Método de Superfície de Resposta (RMS) e um Algoritmo Genético (AG) para otimização do resultado. Através das constantes obtidas $c_1 = 2.3544$, $c_2 = 0.38354$ e $c_3 = 2.63232$, possibilitou uma melhor comparação da correlação empírica aos 450 ensaios experimentais, dado que 333 ensaios (74%) estão dentro dos limites de $\pm 10\%$ de erro.

Pode – se inferir que os seguintes fatores contribuíram para a discrepância encontrada nos testes do tubo capilar de diâmetro 0,7874 mm:

- a) O comportamento do tubo capilar pode estar fora da faixa de validade da equação de Kipp e Schmidt (1961);

- b) Falha no acoplamento do capilar na seção de teste, pois para as medidas do capilar com comprimento de 3 metros e a réplica de 2 metros a vazão experimental ficou abaixo da vazão da correlação empírica;
- c) Obstrução ou amassamento de alguma parte da geometria do capilar, com a consequente alteração da seção transversal e redução da vazão de nitrogênio. Pode constar essa falha nos testes dos capilares de 3 metros, na réplica de 2 metros que a vazão experimental é abaixo da correlação empírica, enquanto nos capilares de 2 metros e 1 metro a vazão experimental é acima da vazão da correlação empírica; e
- d) A soldagem do tubo capilar com a conexão pode ter alterado localmente a geometria, ou mesmo depositado particulados no interior do capilar.

REFERÊNCIAS

ASHRAE Standard 28. **Method of Testing Flow Capacity of Refrigerant Capillary Tubes**. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers. Atlanta, GA, USA, 1996.

ASTM, **Standard specification for hard-drawn copper capillary tube for restrictor applications**, American National Standard ANSI/ASTM B 360 – 76, USA, 1976.

Bansal, P. K.; Rupasinghe, A. S. **An Homogeneous Model for Adiabatic Capillary Tubes**, Applied Thermal Engineering, Vol. 18, Nos 3~1 -, pp. 207 219, New Zealand, 1998.

Boeng, J.; **Uma metodologia para a seleção do par tubo capilar - carga de refrigerante que maximiza o desempenho de refrigeradores domésticos**, Dissertação de Mestrado, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2012.

Florianópolis, SC, 2012.

Choi, J. M.; Kim, Y. C. **Influence of the expansion device on the performance of a heat pump using R407C under a range of charging conditions**, International Journal of Refrigeration, Vol. 27:378 - 384, 2004.

Chunlu Z.; Guoliang D. **Approximate analytic solutions of adiabatic capillary tube**, International journal of refrigeration. ELSEVIER. China, v. 27, p.17 - 24, jul. 2004.

Cunha, A. F. V. **Escoamento de HCFC22 através de tubos capilares para aplicações de refrigeração comercial**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2001.

Dossat, R.J. **Principles of refrigeration**, 3rd. Ed. Prentice Hall, New Jersey, 1991.

Ferraz F.; Gomes M., **O Histórico Da Refrigeração Fluidos Refrigerantes Ozônio/ Processo De Formação / Destruição Sistemas De Refrigeração Componentes De Um Sistema De Refrigeração**, Apostila de Refrigeração, Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia, Santo Amaro-BA, 2008.

Fox, R. W., Pritchard, P. J., McDonald, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**, 6ªed., LTC, 2006.

Gonçalves, J. M. **Análise experimental do escoamento de fluidos refrigerantes em tubos capilares**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 1994.

Jung, D.; Park, C.; Park, B. **Capillary Tube Selection for HCFC22 Alternatives**. International journal of refrigeration. ELSEVIER. Korea, v. 22, p. 604 - 614, jun. 1999.

Kipp, E., Schmidt, H. **Bemessung von Kapillarrohren als Drosselorgan für Kaltesetze**. Kaltetechnik, 13 Jahrgang, Heft 2, 1961.

Li Yang; Wen Wang; **A generalized correlation for the characteristics of adiabatic capillary tube**. International journal of refrigeration. ELSEVIER. China, v 31, p.197 - 203, jul. 2007.

Melo, C., Ferreira, R. T. S., Pereira, R. H. **Modeling Adiabatic Capillary Tubes: a Critical Analysis**, Proceedings of the International Refrigeration Conference - Energy, Efficiency and New Refrigerants, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, vol. I, pp. 113-122, 1992.

Melo, C., Marcinichen, J. B., Silveira, S. J., Stahelin, R. **Construção, calibração e validação de uma bancada de medição de vazão de nitrogênio em tubos capilares**. Relatório Interno, POLO, UFSC, 1998.

Seixlack, A. L. **Modelagem do escoamento bifásico em tubos capilares**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 1996.

Silva, D. L. **Análise teórico-experimental da expansão transcítica de dióxido de carbono em tubos capilares adiabáticos**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

Sweedyk, J. M., 1981, **Capillary tubes – their standardization and use**, ASHRAE Transactions, Vol. 87, part 1, pp. 1069-1076.

Stoecker, W. F., JONES, J. W. **Refrigeração e Ar Condicionado**, Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda, São Paulo, 1985.

Van Wylen G. J.; Borgnakke C.; Sontag R. E. **Fundamentos da termodinâmica Clássica**, 6. Ed. Rua Edgard Blucher Ltda, 2003.

Wei, C., Wang, C., Lin, Y., Leu, J. **An Experimental Study of the Performance of Capillary Tubes for R-407C Refrigerant**, ASHRAE Transactions, Vol.105, Part 2, 1999.

Whitesel, H. A. **Capillary Two-Phase Flow, Refrigerating Engineering**, vol. 65, n. 4, pp. 42 - 44 e pp. 98 - 99, 1957a.

Whitesel, H. A. **Capillary Two-Phase Flow, Part I I**, Refrigerating Engineering, vol. 65, n. 9, pp. 35 – 40, 1957b.

ANEXO A

Tabela de informações técnicas do Manifold Testo 557

Medição temperatura	
Faixa de medição	-50 a +150 °C
Exatidão	±0,5 °C
Resolução	0,1 °C
Conexão de sonda	2 x Plug-in (NTC)
Medição de pressão	
Faixa de medição	-1 a 60 bar
Exatidão	±0,5 % Fs
Resolução	0,01 bar
Conexão de sonda	3 x 1/4" - SAE + 1 x 3/8" - SAE
Rel. sobrecarga (alta pressão)	65 bar

Fonte: <https://www.testo.com/pt-BR/testo-557-kit/p/0563-1557>

APÊNDICE A. ALGORITMO

A1. Algoritmo Genético

```

clear all
close all
clc
tic;

%% Parameter Range Definition

a = [2.35    2.45];    %c1
b = [0.34    0.44];    %c2
c = [2.62    2.72];    %c3

LB = [a(1),b(1),c(1)]; %Limites inferiores
UB = [a(2),b(2),c(2)]; %Limites Superiores

%% Solver configuration

numberOfVariables = size(LB,2);
generations_number = 100;
population_size = 1000;
EliteCount_Data = round(0.05*population_size);

options = gaoptimset('UseParallel',false);
options = gaoptimset(options,'PopulationSize',population_size);
options = gaoptimset(options,'PopInitRange', [LB;UB;]);
options = gaoptimset(options,'Generations',generations_number);
options = gaoptimset(options,'PopulationType','doubleVector');%'bitstring'
| 'custom' | {'doubleVector'}
options = gaoptimset(options,'EliteCount',
EliteCount_Data);%0.05*ParamsGA.population_size
options = gaoptimset(options,'StallGenLimit',100);
options = gaoptimset(options,'Display',
'iter');%'off','iter','diagnose','fina'

rng default
FitnessFunction = @(x)otimizada(x);

%% solver

[x,fval] =
ga(FitnessFunction,numberOfVariables,[],[],[],[],LB,UB,[],[],options);
c_1=x(1)
c_2=x(2)
c_3=x(3)
e=fval

toc;

```

A2. Função objetivo

```
function z = otimizada(x)

c_1=x(1);
c_2=x(2);
c_3=x(3);

%%1° interação c1-[-1<0<1], c2-[-1<0<1], c3-[-1<0<1]
%%e = 0.73882+c_1*(-1.31999)+c_2*(1.80584)+(c_2^2)*(-0.40669)+c_3*(-
0.13515)+c_1*c_2*(0.30020);

%%2° interação 1-[2.4<2.5<2.6], c2-[0.4<0.5<0.6], c3-[2.4<2.5<2.6]
%e= 2.26665913+c_1*(-3.91665757)+(c_2)*(5.8803246)+(c_2^2)*(-
0.277777316)+(c_3)*(-0.898211766)+(c_3^2)*(-
0.0348831039)+(c_1*c_2)*(0.234970595)+(c_1*c_3)*(-
0.0359532072)+(c_2*c_3)*(0.047341216);

%%3° interação
%e= -3.42614709+c_1*(-1.98793687)+c_2*(3.44371511)+c_3*(-0.473101932);

%%4° Interação c1-[2,55<2,6< 2,65], c2-[0,39<0,42<0,45],c3-[2,45<2,5<2,55]
%e= -6.71028601+(c_1)*(-2.05254449)+(c_2)*(1.97384218)+(c_2^2)*(-
0.0280813016)+(c_3)*(-0.486623044)+(c_3^2)*(-
0.0095241461)+(c_1*c_2)*(0.0379558414)+(c_1*c_3)*(-
0.00935828081)+(c_2*c_3)*(0.00793307326);

%%5° Interação c1-[2,2<2,4<2,6], c2-[0,35<0,39<0,44], c3-[2,6<2,67<2,74]
%e=-1.91639619+c_1*(-8.48899655)+c_2*(2.84636881)+c_3*(-
0.725919812)+c_1*c_2*(0.236691525);

%%6° Interação c1-[2,4<2,45<2,5], c2-[0,38<0,4<0,42],c3-
[2,65<2,67<2,69]
%e= -3.48796171+c_1*(-2.11216297)+c_2*(1.2820701)+(c_2^2)*(-
0.0121648855)+c_3*(-0.210778606)+(c_3^2)*(-
0.00153434965)+(c_1*c_2)*(0.0261636141)+(c_1*c_3)*(-
0.004301735)+(c_2*c_3)*(0.00234014181);

%%7° Interação c1-[2,35<2,4<2,45], c2-[0,34<0,39<0,44],c3-
[2,62<2,67<2,72]
e= 74.5381139+c_1*(-41.2719255)+c_2*(8.04628029)+(c_2^2)*(-
30.1018125)+c_3*(17.9300555)+(c_3^2)*(-
3.77991417)+c_1*c_2*(26.4238179)+c_1*c_3*(-4.3284192)+c_2*c_3*(5.78634275);

z= abs(e); %funcao a ser otimizada
```

APÊNDICE B.

B1. Tabela dos ensaios experimentais

Din [pol]	L [m]	Pent [kPa]	Qmedida [L/h]	Qmedida [L/m]	Qteorica [L/min]	Erro [%]
0,031	3	851	325	5,47	6,974	21,57
0,031	3	851	325	5,47	6,974	21,57
0,031	3	851	325	5,47	6,974	21,57
0,031	3	849	300	5,049	6,958	27,43
0,031	3	849	300	5,049	6,958	27,43
0,031	3	852	325	5,47	6,983	21,66
0,031	3	951	375	6,306	7,805	19,21
0,031	3	951	375	6,306	7,805	19,21
0,031	3	952	375	6,306	7,813	19,29
0,031	3	949	362,5	6,096	7,788	21,73
0,031	3	952	375	6,306	7,813	19,29
0,031	3	950	362,5	6,095	7,796	21,82
0,031	3	1050	412,5	6,931	8,626	19,65
0,031	3	1050	412,5	6,931	8,626	19,65
0,031	3	1052	425	7,141	8,642	17,37
0,031	3	1049	412,5	6,931	8,617	19,57
0,031	3	1052	412,5	6,931	8,642	19,8
0,031	3	1050	412,5	6,931	8,626	19,65
0,036	3	850	600	10,1	10,31	2,067
0,036	3	851	600	10,1	10,32	2,185
0,036	3	849	600	10,1	10,3	1,949
0,036	3	849	600	10,1	10,3	1,949
0,036	3	848	600	10,1	10,29	1,831
0,036	3	852	612,5	10,31	10,34	0,2672
0,036	3	951	675	11,35	11,55	1,758
0,036	3	951	675	11,35	11,55	1,758
0,036	3	951	675	11,35	11,55	1,758
0,036	3	951	675	11,35	11,55	1,758
0,036	3	952	675	11,35	11,57	1,863
0,036	3	952	675	11,35	11,57	1,863
0,036	3	1051	762,5	12,81	12,78	-0,2392
0,036	3	1052	775	13,02	12,79	-1,784
0,036	3	1049	762,5	12,81	12,76	-0,4335
0,036	3	1050	775	13,02	12,77	-1,981
0,036	3	1048	762,5	12,81	12,74	-0,5309
0,036	3	1052	775	13,02	12,79	-1,784
0,042	3	849	950	15,99	15,43	-3,611
0,042	3	851	950	15,99	15,47	-3,362
0,042	3	848	925	15,57	15,41	-1,006

Din [pol]	L [m]	Pent [kPa]	Qmedida [L/h]	Qmedida [L/m]	Qteorica [L/min]	Erro [%]
0,042	3	850	950	15,99	15,45	-3,487
0,042	3	852	950	15,99	15,49	-3,238
0,042	3	848	925	15,57	15,41	-1,006
0,042	3	951	1063	17,87	17,31	-3,207
0,042	3	950	1063	17,87	17,29	-3,317
0,042	3	951	1063	17,87	17,31	-3,207
0,042	3	949	1050	17,66	17,27	-2,212
0,042	3	950	1050	17,66	17,29	-2,102
0,042	3	952	1063	17,87	17,33	-3,096
0,042	3	1048	1188	19,95	19,1	-4,491
0,042	3	1052	1200	20,16	19,17	-5,183
0,042	3	1051	1200	20,16	19,15	-5,284
0,042	3	1049	1188	19,95	19,11	-4,39
0,042	3	1049	1188	19,95	19,11	-4,39
0,042	3	1050	1188	19,95	19,13	-4,289
0,05	3	851	1350	22,72	24,44	7,03
0,05	3	849	1300	21,88	24,38	10,26
0,05	3	852	1350	22,72	24,47	7,142
0,05	3	848	1300	21,88	24,35	10,15
0,05	3	850	1300	21,88	24,41	10,37
0,05	3	848	1300	21,88	24,35	10,15
0,05	3	951	1500	25,22	27,35	7,777
0,05	3	948	1500	25,22	27,26	7,48
0,05	3	951	1500	25,22	27,35	7,777
0,05	3	949	1500	25,22	27,29	7,579
0,05	3	948	1500	25,22	27,26	7,48
0,05	3	952	1500	25,22	27,38	7,876
0,05	3	1050	1700	28,56	30,23	5,502
0,05	3	1050	1700	28,56	30,23	5,502
0,05	3	1049	1700	28,56	30,2	5,411
0,05	3	1053	1700	28,56	30,31	5,776
0,05	3	1049	1700	28,56	30,2	5,411
0,05	3	1050	1700	28,56	30,23	5,502
0,064	3	852	2750	46,28	46,76	1,011
0,064	3	848	2700	45,44	46,53	2,342
0,064	3	849	2700	45,44	46,59	2,46
0,064	3	850	2700	45,44	46,65	2,577
0,064	3	853	2750	46,28	46,81	1,13
0,064	3	852	2700	45,44	46,76	2,811
0,064	3	950	3100	52,13	52,21	0,1513
0,064	3	953	3100	52,13	52,37	0,4717
0,064	3	951	3100	52,13	52,26	0,2583
0,064	3	952	3100	52,13	52,32	0,3651

Din [pol]	L [m]	Pent [kPa]	Qmedida [L/h]	Qmedida [L/m]	Qteorica [L/min]	Erro [%]
0,064	3	951	3100	52,13	52,26	0,2583
0,064	3	951	3100	52,13	52,26	0,2583
0,064	3	1053	3450	57,97	57,93	-0,06885
0,064	3	1051	3400	57,13	57,82	1,191
0,064	3	1052	3450	57,97	57,87	-0,1655
0,064	3	1050	3400	57,13	57,76	1,095
0,064	3	1048	3400	57,13	57,65	0,9031
0,064	3	1053	3450	57,97	57,93	-0,06885
0,031	3	852	325	5,47	6,983	21,66
0,031	3	848	325	5,47	6,949	21,28
0,031	3	851	325	5,47	6,974	21,57
0,031	3	850	325	5,47	6,966	21,47
0,031	3	849	325	5,47	6,958	21,38
0,031	3	852	325	5,47	6,983	21,66
0,031	3	948	375	6,306	7,78	18,95
0,031	3	947	375	6,306	7,771	18,86
0,031	3	950	375	6,306	7,796	19,12
0,031	3	948	362,5	6,096	7,78	21,65
0,031	3	949	362,5	6,096	7,788	21,73
0,031	3	950	375	6,306	7,796	19,12
0,031	3	1054	412,5	6,931	8,659	19,96
0,031	3	1048	412,5	6,931	8,609	19,49
0,031	3	1050	412,5	6,931	8,626	19,65
0,031	3	1051	412,5	6,931	8,634	19,73
0,031	3	1050	412,5	6,931	8,626	19,65
0,031	3	1049	412,5	6,931	8,617	19,57
0,036	3	853	600	10,1	10,35	2,42
0,036	3	852	600	10,1	10,34	2,303
0,036	3	850	600	10,1	10,31	2,067
0,036	3	849	600	10,1	10,3	1,949
0,036	3	853	600	10,1	10,35	2,42
0,036	3	848	600	10,1	10,29	1,831
0,036	3	950	675	11,35	11,54	1,653
0,036	3	954	675	11,35	11,59	2,073
0,036	3	948	675	11,35	11,52	1,441
0,036	3	951	675	11,35	11,55	1,758
0,036	3	950	675	11,35	11,54	1,653
0,036	3	948	675	11,35	11,52	1,441
0,036	3	1051	762,5	12,81	12,78	-0,2392
0,036	3	1051	762,5	12,81	12,78	-0,2392
0,036	3	1047	762,5	12,81	12,73	-0,6285
0,036	3	1050	762,5	12,81	12,77	-0,3362
0,036	3	1053	775	13,02	12,81	-1,686

Din [pol]	L [m]	Pent [kPa]	Qmedida [L/h]	Qmedida [L/m]	Qteorica [L/min]	Erro [%]
0,036	3	1052	762,5	12,81	12,79	-0,1423
0,042	3	849	950	15,99	15,43	-3,611
0,042	3	850	925	15,57	15,45	-0,7634
0,042	3	852	925	15,57	15,49	-0,5215
0,042	3	848	925	15,57	15,41	-1,006
0,042	3	853	950	15,99	15,51	-3,114
0,042	3	850	925	15,57	15,45	-0,7634
0,042	3	954	1063	17,87	17,37	-2,876
0,042	3	952	1063	17,87	17,33	-3,096
0,042	3	949	1063	17,87	17,27	-3,428
0,042	3	952	1063	17,87	17,33	-3,096
0,042	3	948	1050	17,66	17,26	-2,321
0,042	3	953	1063	17,87	17,35	-2,986
0,042	3	1050	1188	19,95	19,13	-4,289
0,042	3	1053	1188	19,95	19,19	-3,987
0,042	3	1050	1188	19,95	19,13	-4,289
0,042	3	1048	1188	19,95	19,1	-4,491
0,042	3	1054	1200	20,16	19,21	-4,98
0,042	3	1049	1188	19,95	19,11	-4,39
0,05	3	851	1300	21,88	24,44	10,47
0,05	3	850	1350	22,72	24,41	6,918
0,05	3	848	1300	21,88	24,35	10,15
0,05	3	850	1300	21,88	24,41	10,37
0,05	3	852	1350	22,72	24,47	7,142
0,05	3	853	1350	22,72	24,5	7,253
0,05	3	952	1500	25,22	27,38	7,876
0,05	3	951	1500	25,22	27,35	7,777
0,05	3	951	1500	25,22	27,35	7,777
0,05	3	949	1500	25,22	27,29	7,579
0,05	3	952	1500	25,22	27,38	7,876
0,05	3	949	1500	25,22	27,29	7,579
0,05	3	1051	1700	28,56	30,26	5,594
0,05	3	1049	1700	28,56	30,2	5,411
0,05	3	1053	1700	28,56	30,31	5,776
0,05	3	1049	1700	28,56	30,2	5,411
0,05	3	1050	1700	28,56	30,23	5,502
0,05	3	1052	1700	28,56	30,29	5,685
0,064	3	848	2700	45,44	46,53	2,342
0,064	3	852	2650	44,6	46,76	4,611
0,064	3	852	2750	46,28	46,76	1,011
0,064	3	852	2750	46,28	46,76	1,011
0,064	3	850	2750	46,28	46,65	0,773
0,064	3	849	2750	46,29	46,59	0,6535

Din [pol]	L [m]	Pent [kPa]	Qmedida [L/h]	Qmedida [L/m]	Qteorica [L/min]	Erro [%]
0,064	3	950	3100	52,13	52,21	0,1513
0,064	3	953	3100	52,13	52,37	0,4717
0,064	3	951	3100	52,13	52,26	0,2583
0,064	3	951	3100	52,13	52,26	0,2583
0,064	3	948	3050	51,29	52,09	1,551
0,064	3	949	3100	52,13	52,15	0,0441
0,064	3	1053	3400	57,13	57,93	1,381
0,064	3	1051	3450	57,97	57,82	-0,2624
0,064	3	1052	3450	57,97	57,87	-0,1655
0,064	3	1050	3400	57,13	57,76	1,095
0,064	3	1048	3400	57,13	57,65	0,9031
0,064	3	1053	3450	57,97	57,93	-0,06885
0,031	2	850	600	10,1	8,138	-24,09
0,031	2	849	600	10,1	8,128	-24,24
0,031	2	848	587,5	9,888	8,119	-21,8
0,031	2	850	600	10,1	8,138	-24,09
0,031	2	849	600	10,1	8,128	-24,24
0,031	2	849	600	10,1	8,128	-24,24
0,031	2	951	675	11,35	9,118	-24,48
0,031	2	950	675	11,35	9,108	-24,62
0,031	2	952	675	11,35	9,127	-24,35
0,031	2	950	675	11,35	9,108	-24,62
0,031	2	950	675	11,35	9,108	-24,62
0,031	2	949	662,5	11,14	9,098	-22,44
0,031	2	1048	750	12,6	10,06	-25,3
0,031	2	1052	750	12,6	10,1	-24,81
0,031	2	1049	750	12,6	10,07	-25,17
0,031	2	1048	750	12,6	10,06	-25,3
0,031	2	1048	750	12,6	10,06	-25,3
0,031	2	1050	750	12,6	10,08	-25,05
0,036	2	851	650	10,94	12,06	9,296
0,036	2	848	650	10,94	12,02	8,967
0,036	2	850	650	10,94	12,05	9,186
0,036	2	852	650	10,94	12,08	9,404
0,036	2	849	650	10,94	12,03	9,077
0,036	2	849	650	10,94	12,03	9,077
0,036	2	949	725	12,19	13,47	9,484
0,036	2	949	725	12,19	13,47	9,484
0,036	2	939	725	12,19	13,32	8,501
0,036	2	948	725	12,19	13,45	9,387
0,036	2	952	737,5	12,4	13,51	8,219
0,036	2	951	737,5	12,4	13,5	8,121
0,036	2	1051	825	13,86	14,93	7,165

Din [pol]	L [m]	Pent [kPa]	Qmedida [L/h]	Qmedida [L/m]	Qteorica [L/min]	Erro [%]
0,036	2	1050	825	13,86	14,92	7,075
0,036	2	1051	825	13,86	14,93	7,165
0,036	2	1050	825	13,86	14,92	7,075
0,036	2	1050	825	13,86	14,92	7,075
0,036	2	1048	825	13,86	14,89	6,894
0,042	2	851	1150	19,36	18,07	-7,102
0,042	2	850	1150	19,36	18,05	-7,231
0,042	2	852	1150	19,36	18,09	-6,974
0,042	2	849	1150	19,36	18,03	-7,36
0,042	2	851	1150	19,36	18,07	-7,102
0,042	2	851	1150	19,36	18,07	-7,102
0,042	2	951	1313	22,07	20,22	-9,129
0,042	2	952	1313	22,07	20,25	-9,012
0,042	2	951	1300	21,86	20,22	-8,09
0,042	2	949	1300	21,86	20,18	-8,322
0,042	2	948	1300	21,86	20,16	-8,438
0,042	2	949	1300	21,86	20,18	-8,322
0,042	2	1051	1438	24,15	22,37	-7,957
0,042	2	1048	1450	24,36	22,31	-9,213
0,042	2	1050	1450	24,36	22,35	-9,002
0,042	2	1049	1450	24,36	22,33	-9,107
0,042	2	1049	1450	24,36	22,33	-9,107
0,042	2	1050	1438	24,15	22,35	-8,062
0,05	2	851	1525	25,67	28,55	10,1
0,05	2	850	1525	25,67	28,52	9,996
0,05	2	852	1550	26,09	28,59	8,74
0,05	2	851	1538	25,88	28,55	9,367
0,05	2	848	1525	25,67	28,45	9,779
0,05	2	851	1538	25,88	28,55	9,367
0,05	2	952	1750	29,43	31,99	8,001
0,05	2	952	1750	29,43	31,99	8,001
0,05	2	951	1750	29,43	31,95	7,902
0,05	2	950	1750	29,43	31,92	7,804
0,05	2	950	1750	29,43	31,92	7,804
0,05	2	953	1725	29,01	32,02	9,412
0,05	2	1051	1950	32,76	35,35	7,307
0,05	2	1049	1950	32,76	35,28	7,127
0,05	2	1051	1925	32,34	35,35	8,495
0,05	2	1049	1925	32,34	35,28	8,318
0,05	2	1048	1925	32,34	35,24	8,229
0,05	2	1049	1925	32,34	35,28	8,318
0,064	2	850	3350	56,38	54,49	-3,467
0,064	2	849	3300	55,54	54,43	-2,046

Din [pol]	L [m]	Pent [kPa]	Qmedida [L/h]	Qmedida [L/m]	Qteorica [L/min]	Erro [%]
0,064	2	852	3300	55,54	54,62	-1,679
0,064	2	851	3350	56,38	54,56	-3,343
0,064	2	850	3300	55,54	54,49	-1,923
0,064	2	853	3350	56,38	54,69	-3,095
0,064	2	950	3600	60,53	60,99	0,7467
0,064	2	950	3600	60,53	60,99	0,7467
0,064	2	949	3600	60,54	60,93	0,6401
0,064	2	953	3600	60,53	61,18	1,065
0,064	2	949	3600	60,54	60,93	0,6401
0,064	2	951	3600	60,53	61,05	0,8531
0,064	2	1052	4000	67,21	67,61	0,592
0,064	2	1052	4000	67,21	67,61	0,592
0,064	2	1050	4000	67,21	67,48	0,3996
0,064	2	1049	4000	67,21	67,41	0,303
0,064	2	1050	4000	67,21	67,48	0,3996
0,064	2	1047	3950	66,37	67,28	1,358
0,031	2	849	400	6,732	8,128	17,17
0,031	2	849	400	6,732	8,128	17,17
0,031	2	853	400	6,732	8,167	17,57
0,031	2	849	400	6,732	8,128	17,17
0,031	2	853	400	6,732	8,167	17,57
0,031	2	850	400	6,732	8,138	17,27
0,031	2	951	450	7,567	9,118	17,01
0,031	2	951	450	7,567	9,118	17,01
0,031	2	954	450	7,567	9,147	17,28
0,031	2	949	450	7,567	9,098	16,83
0,031	2	948	450	7,567	9,089	16,74
0,031	2	950	450	7,567	9,108	16,92
0,031	2	1053	512,5	8,611	10,11	14,79
0,031	2	1051	512,5	8,611	10,09	14,63
0,031	2	1050	500	8,401	10,08	16,63
0,031	2	1050	500	8,401	10,08	16,63
0,031	2	1053	512,5	8,611	10,11	14,79
0,031	2	1049	512,5	8,611	10,07	14,46
0,036	2	850	750	12,62	12,05	-4,785
0,036	2	848	750	12,62	12,02	-5,038
0,036	2	849	750	12,62	12,03	-4,911
0,036	2	850	750	12,62	12,05	-4,785
0,036	2	849	750	12,62	12,03	-4,911
0,036	2	850	750	12,62	12,05	-4,785
0,036	2	952	850	14,29	13,51	-5,781
0,036	2	949	850	14,29	13,47	-6,122
0,036	2	951	850	14,29	13,5	-5,895

Din [pol]	L [m]	Pent [kPa]	Qmedida [L/h]	Qmedida [L/m]	Qteorica [L/min]	Erro [%]
0,036	2	948	850	14,29	13,45	-6,236
0,036	2	951	850	14,29	13,5	-5,895
0,036	2	952	850	14,29	13,51	-5,781
0,036	2	1049	950	15,96	14,9	-7,109
0,036	2	1052	950	15,96	14,95	-6,798
0,036	2	1049	950	15,96	14,9	-7,109
0,036	2	1048	950	15,96	14,89	-7,212
0,036	2	1051	950	15,96	14,93	-6,901
0,036	2	1050	950	15,96	14,92	-7,005
0,042	2	850	1150	19,36	18,05	-7,231
0,042	2	854	1163	19,57	18,14	-7,877
0,042	2	854	1163	19,57	18,14	-7,877
0,042	2	851	1150	19,36	18,07	-7,102
0,042	2	849	1150	19,36	18,03	-7,36
0,042	2	850	1150	19,36	18,05	-7,231
0,042	2	950	1300	21,86	20,2	-8,206
0,042	2	952	1313	22,07	20,25	-9,012
0,042	2	954	1313	22,07	20,29	-8,779
0,042	2	955	1313	22,07	20,31	-8,663
0,042	2	948	1300	21,86	20,16	-8,438
0,042	2	951	1313	22,07	20,22	-9,129
0,042	2	1051	1463	24,57	22,37	-9,835
0,042	2	1053	1463	24,57	22,42	-9,623
0,042	2	1049	1463	24,57	22,33	-10,05
0,042	2	1050	1463	24,57	22,35	-9,941
0,042	2	1048	1450	24,36	22,31	-9,213
0,042	2	1052	1463	24,57	22,39	-9,729
0,05	2	851	1625	27,35	28,55	4,209
0,05	2	852	1625	27,35	28,59	4,324
0,05	2	852	1625	27,35	28,59	4,324
0,05	2	848	1625	27,35	28,45	3,863
0,05	2	850	1625	27,35	28,52	4,094
0,05	2	851	1625	27,35	28,55	4,209
0,05	2	950	1800	30,27	31,92	5,169
0,05	2	952	1825	30,69	31,99	4,058
0,05	2	951	1825	30,69	31,95	3,955
0,05	2	952	1825	30,69	31,99	4,058
0,05	2	948	1800	30,27	31,85	4,966
0,05	2	950	1825	30,69	31,92	3,852
0,05	2	1047	2050	34,45	35,21	2,175
0,05	2	1049	2000	33,6	35,28	4,746
0,05	2	1048	2000	33,6	35,24	4,653
0,05	2	1046	2000	33,61	35,18	4,468

Din [pol]	L [m]	Pent [kPa]	Qmedida [L/h]	Qmedida [L/m]	Qteorica [L/min]	Erro [%]
0,05	2	1048	2050	34,45	35,24	2,27
0,05	2	1049	2050	34,44	35,28	2,364
0,064	2	853	3350	56,38	54,69	-3,095
0,064	2	850	3300	55,54	54,49	-1,923
0,064	2	849	3300	55,54	54,43	-2,046
0,064	2	852	3350	56,38	54,62	-3,219
0,064	2	850	3300	55,54	54,49	-1,923
0,064	2	848	3300	55,54	54,36	-2,169
0,064	2	951	3650	61,37	61,05	-0,524
0,064	2	949	3600	60,54	60,93	0,6401
0,064	2	952	3650	61,37	61,12	-0,4164
0,064	2	952	3650	61,37	61,12	-0,4164
0,064	2	950	3600	60,53	60,99	0,7467
0,064	2	948	3600	60,54	60,86	0,5333
0,064	2	1050	4000	67,21	67,48	0,3996
0,064	2	1048	3950	66,37	67,35	1,454
0,064	2	1048	3950	66,37	67,35	1,454
0,064	2	1052	4000	67,21	67,61	0,592
0,064	2	1049	3950	66,37	67,41	1,549
0,064	2	1051	4000	67,21	67,54	0,4959
0,031	1	851	900	15,15	10,63	-42,51
0,031	1	852	900	15,15	10,64	-42,34
0,031	1	851	887,5	14,94	10,63	-40,53
0,031	1	852	900	15,15	10,64	-42,34
0,031	1	850	887,5	14,94	10,62	-40,7
0,031	1	854	900	15,15	10,67	-42
0,031	1	948	1000	16,82	11,86	-41,82
0,031	1	950	1000	16,82	11,88	-41,52
0,031	1	948	1000	16,82	11,86	-41,82
0,031	1	947	1000	16,82	11,84	-41,98
0,031	1	953	1000	16,81	11,92	-41,07
0,031	1	952	1000	16,81	11,91	-41,22
0,031	1	1052	1113	18,69	13,17	-41,92
0,031	1	1052	1113	18,69	13,17	-41,92
0,031	1	1048	1113	18,69	13,12	-42,47
0,031	1	1050	1113	18,69	13,15	-42,19
0,031	1	1048	1113	18,69	13,12	-42,47
0,031	1	1050	1113	18,69	13,15	-42,19
0,036	1	850	900	15,15	15,72	3,612
0,036	1	852	912,5	15,36	15,75	2,508
0,036	1	847	912,5	15,36	15,66	1,919
0,036	1	849	900	15,15	15,7	3,496
0,036	1	849	912,5	15,36	15,7	2,155

Din [pol]	L [m]	Pent [kPa]	Qmedida [L/h]	Qmedida [L/m]	Qteorica [L/min]	Erro [%]
0,036	1	851	900	15,15	15,73	3,728
0,036	1	953	1038	17,45	17,64	1,132
0,036	1	951	1025	17,24	17,61	2,114
0,036	1	953	1025	17,24	17,64	2,323
0,036	1	951	1025	17,24	17,61	2,114
0,036	1	949	1025	17,24	17,57	1,903
0,036	1	959	1025	17,23	17,76	2,946
0,036	1	1047	1150	19,32	19,4	0,4173
0,036	1	1051	1150	19,32	19,48	0,8026
0,036	1	1053	1163	19,53	19,52	-0,08207
0,036	1	1049	1150	19,32	19,44	0,6103
0,036	1	1051	1163	19,53	19,48	-0,2757
0,036	1	1050	1150	19,32	19,46	0,7065
0,042	1	853	1600	26,93	23,63	-13,95
0,042	1	853	1650	27,77	23,63	-17,51
0,042	1	850	1600	26,93	23,55	-14,36
0,042	1	848	1600	26,93	23,49	-14,64
0,042	1	850	1600	26,93	23,55	-14,36
0,042	1	853	1600	26,93	23,63	-13,95
0,042	1	949	1850	31,11	26,33	-18,16
0,042	1	953	1850	31,11	26,44	-17,66
0,042	1	952	1850	31,11	26,41	-17,79
0,042	1	948	1800	30,27	26,3	-15,09
0,042	1	949	1800	30,27	26,33	-14,97
0,042	1	950	1850	31,11	26,35	-18,04
0,042	1	1050	2100	35,28	29,16	-21,01
0,042	1	1052	2050	34,44	29,21	-17,9
0,042	1	1053	2100	35,28	29,24	-20,66
0,042	1	1051	2100	35,28	29,19	-20,89
0,042	1	1051	2050	34,44	29,19	-18,02
0,042	1	1051	2050	34,44	29,19	-18,02
0,05	1	852	2100	35,34	37,29	5,221
0,05	1	853	2100	35,34	37,34	5,335
0,05	1	850	2100	35,34	37,2	4,993
0,05	1	849	2100	35,35	37,16	4,879
0,05	1	849	2100	35,35	37,16	4,879
0,05	1	851	2100	35,34	37,25	5,107
0,05	1	950	2400	40,36	41,64	3,076
0,05	1	949	2400	40,36	41,59	2,972
0,05	1	951	2400	40,36	41,68	3,18
0,05	1	949	2400	40,36	41,59	2,972
0,05	1	952	2400	40,36	41,73	3,284
0,05	1	950	2400	40,36	41,64	3,076

Din [pol]	L [m]	Pent [kPa]	Qmedida [L/h]	Qmedida [L/m]	Qteorica [L/min]	Erro [%]
0,05	1	1051	2700	45,37	46,11	1,617
0,05	1	1049	2650	44,53	46,02	3,252
0,05	1	1051	2700	45,37	46,11	1,617
0,05	1	1053	2700	45,37	46,2	1,807
0,05	1	1052	2700	45,37	46,16	1,712
0,05	1	1050	2700	45,37	46,07	1,522
0,064	1	850	4150	69,85	71,09	1,746
0,064	1	851	4150	69,85	71,17	1,864
0,064	1	849	4150	69,85	71	1,628
0,064	1	851	4150	69,85	71,17	1,864
0,064	1	849	4150	69,85	71	1,628
0,064	1	852	4200	70,69	71,26	0,801
0,064	1	949	4700	79,03	79,48	0,5627
0,064	1	951	4650	78,19	79,65	1,831
0,064	1	949	4700	79,03	79,48	0,5627
0,064	1	950	4700	79,03	79,56	0,6693
0,064	1	952	4700	79,03	79,73	0,882
0,064	1	951	4700	79,03	79,65	0,7758
0,064	1	1050	5200	87,37	88,03	0,7461
0,064	1	1049	5200	87,37	87,94	0,6499
0,064	1	1049	5200	87,37	87,94	0,6499
0,064	1	1051	5200	87,37	88,11	0,8421
0,064	1	1050	5200	87,37	88,03	0,7461
0,064	1	1049	5200	87,37	87,94	0,6499