



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DAVID MAGALHÃES LEITE

**REGULAGEM DA VAZÃO DE SAÍDA DE UM SILO DE TRIGO:
TESTES EXPERIMENTAIS E MODELAGEM**

FORTALEZA

2018

DAVID MAGALHÃES LEITE

**REGULAGEM DA VAZÃO DE SAÍDA DE UM SILO DE TRIGO:
TESTES EXPERIMENTAIS E MODELAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L551r Leite, David Magalhães.

Regulagem da vazão de saída de um silo de trigo: testes experimentais e modelagem / David Magalhães Leite. – 2018.

63 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

1. Trigo. 2. escoamento de grãos. 3. Experimento em escala real. 4. Calibração de equações. 5. MatLab. I. Título.

CDD 620.1

DAVID MAGALHÃES LEITE

**REGULAGEM DA VAZÃO DE SAÍDA DE UM SILO DE TRIGO:
TESTES EXPERIMENTAIS E MODELAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

Aprovada em: __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. André Valente Bueno
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Carla Freitas de Andrade
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelos conselhos, suporte e motivação dados ao longo de toda minha vida.

À minha namorada Isabella, pelo apoio, compartilhamento da vida acadêmica e por estar sempre presente nos momentos importantes.

Aos meus amigos, pela cumplicidade e as experiências transmitidas, que contribuíram no desenvolvimento de minha vida acadêmica.

Ao professor Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha, pela orientação desse trabalho. E aos demais professores do curso de Engenharia Mecânica, por todo o conhecimento passado.

Ao Grande Moinho Cearense, pela disponibilização de suas instalações e informações para realização deste trabalho, e ao Engo Marcos Aurélio Dias de Carvalho, pela sugestão do tema e incentivo à realização do trabalho.

À Queen Mary University of London, pelo fornecimento da licença estudantil do software MatLab, fundamental para a produção dos resultados aqui apresentados.

RESUMO

Em uma indústria de farinha de trigo local, o controle da vazão de esvaziamento de seus silos é feito de maneira ineficiente, passível de entupimentos ou desperdício de energia elétrica. Para tornar mais confiável o controle desse escoamento, foi necessário identificar métodos que possibilitassem sua medição logo no momento da abertura da comporta responsável por regular o volume de trigo que sai do silo. Com esse objetivo, foram realizadas medições de vazão durante o esvaziamento dos silos da indústria e relacionadas com o nível de preenchimento dos reservatórios e a magnitude da abertura da comporta de regulagem de vazão. Foram então levantados cinco modelos para o escoamento de grãos e verificada a adequação destes aos dados medidos utilizando a ferramenta *Curve Fitting Toolbox* do software *MatLab*, levando em conta que eles foram desenvolvidos por meio de modelos em escala, sem tubulações adicionais na saída do silo, ao contrário do estudado por este trabalho. Por meio da verificação de seções menores das amostras separadamente, foi possível identificar que parte dos dados havia sofrido influência de fatores externos durante sua medição, se apresentando na forma de vazões mais elevadas do que a realidade. Dessa forma, foram estabelecidos intervalos de aplicação para os dados que não sofreram influência externa, utilizando os coeficientes e modelos que melhor se adequaram a essas seções. Assim, foi possível estabelecer equações que relacionassem a abertura da comporta à vazão mássica de esvaziamento para intervalos de 16,50 a 39,60 kg/s, atendendo às principais magnitudes de escoamento necessárias para indústria, com um fator de ajuste R^2 mínimo de 0,8653. Foi possível calibrar alguns dos modelos para a condição diferenciada de haver uma tubulação abaixo do silo, sua influência foi interpretada como a divergência de alguns coeficientes dos valores observados na literatura.

Palavras-chave: Trigo. Escoamento de grãos. Experimento em escala real. Calibração de equações. MatLab.

ABSTRACT

In a local wheat flour factory, the mass flow during the emptying of a grain silo is controlled in an inefficient manner, which makes the transport pipelines prone to clogging if they are fed too much grain. There is also the risk of the waste of electric energy if the volume of grains provided is not large enough. In order to make the flow control more trustworthy, finding a better method to measure the outflow as a function of the size of the aperture of a valve, which controls the volume of grains leaving the silo was necessary. With that in mind, the mass flow exiting one of the factory's silos was measured multiple times, while varying the filling of the silo and the size of the aperture of the valve. Following the collection of the data, five mathematical models were chosen, and their fitting to the experimental data was evaluated using the Curve Fitting Toolbox, from the software MatLab. It was taken into account, during the evaluation, that the the models were primarily developed for scale sized systems, in a controlled environment, as opposed to this works experiments, which were done in a large scale silo, inside a real industrial plant. By evaluating smaller partitions of the data separately, it was found that some points were influenced by external factors during their measurement, and their mass flow showed up as larger than the real flow exiting the silo. Furthermore, those points were ignored, and three applying ranges were defined using the models and coefficients that provided the best fit to the remaining experimental data. Thus, it was possible to relate the aperture of the valve to the emptying outflow, for mass flows ranging from 16,50 to 39,60 kg/s, with a minimum adjustment factor R^2 of 0,8653. It is important to mention that this work was successful in fitting some of the models evaluated to data collected from a setup that was different from the ones that were used for the development of the mathematical models. That difference being the addition of a rectangular pipe under the silo, where the grain flow passes and is controlled, before being send into the factory. The consequence of that setup difference was observed and interpreted as some divergences between the coefficients reported in previous works and the ones found by this work's experimental data fitting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transportador <i>Redler</i>	18
Figura 2 – Vista esquemática da linha de transilagem.....	21
Figura 3 – Janela de Inspeção do Redler T4 e Posicionamento da Trena.....	27
Figura 4 – Níveis de preenchimento do <i>redler</i> para cálculo do valor médio.....	27
Figura 5 - Vazão de Esvaziamento vs Altura da Coluna de Trigo no Silo.....	32
Figura 6 - Vazão de Esvaziamento vs Abertura da Comporta do Silo.....	33
Figura 7 - Vazão de Esvaziamento vs Abertura da Comporta do Silo. Modelo: Beverloo.....	34
Figura 8 – Comparativo de regressões para cada partição dos dados estudada. Modelo utilizado: Beverloo.....	36
Figura 9 - Vazão de Esvaziamento vs Abertura da Comporta do Silo. Modelo: Fowler e Glastonbury.....	38
Figura 10 – Comparativo de regressões para cada partição dos dados estudada. Modelo utilizado: Fowler e Glastonbury.....	39
Figura 11 - Vazão de Esvaziamento vs Abertura da Comporta do Silo. Modelo: Mankoc.....	40
Figura 12 – Comparativo de regressões para cada partição dos dados estudada. Modelo utilizado: Mankoc.....	42
Figura 13 - Vazão de Esvaziamento vs Abertura da Comporta do Silo. Modelo: ASABE.....	43
Figura 14 – Comparativo de regressões para cada partição dos dados estudada. Modelo utilizado: ASABE.....	45
Figura 15 - Vazão de Esvaziamento vs Abertura da Comporta do Silo. Modelo: Gregory e Fedler Laminar.....	46
Figura 16 – Comparativo de regressões para cada partição dos dados estudada. Modelo utilizado: Gregory e Fedler Laminar.....	48
Figura 17 – Comparativo das 5 regressões com melhor R^2 obtido.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medições de Vazão de Esvaziamento de Trigo para Diferentes Níveis de Preenchimento do Silo	31
Tabela 2 - Comparativo entre os Coeficientes Obtidos pela Regressão e a Literatura (Beverloo)	34
Tabela 3 - Esquema de Partições para Estudo de Confiabilidade dos Dados	35
Tabela 4 - Comparativo entre os Coeficientes Obtidos pela Regressão e a Literatura (Fowler e Glastonbury).....	38
Tabela 5 - Comparativo entre os Coeficientes Obtidos pela Regressão e a Literatura (Equação de Mankoc).....	41
Tabela 6 - Comparativo entre os Coeficientes Obtidos pela Regressão e a Literatura (Equação da ASABE).....	44
Tabela 7 - Comparativo entre os Coeficientes Obtidos pela Regressão e a Literatura (Gregory e Fedler Laminar)	47
Tabela 8 - Comparativo entre os Coeficientes de Determinação Obtidos por Cada Partição e Cada Modelo.	49
Tabela 9 - Comparativo entre os Coeficientes das Equações Obtidos por Cada Partição e Cada Modelo.	51
Tabela 10 - Comparativo entre os Coeficientes das Equações Obtidos por Cada Partição e Cada Modelo, Após Exclusão de Dados com Qualidade Inferior.....	53
Tabela 11 – Ranking de Partições com Base em seu R^2	54
Tabela 12 – Diferença entre valores medidos e calculados para o ponto de abertura mais alta da comporta.	56
Tabela 13 – Diferença entre valores obtidos para as partições de Beverloo 5/5 e de Gregory e Fedler 3/3 e os dados experimentais.	57

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área de abertura da comporta (m^2)
A'	área da abertura da comporta corrigida com k (m^2)
ab	altura da abertura da comporta (m)
b	expoente de correção de Mankoc
C_0	constante de escoamento da ASABE ($m^3/cm^{n'+2}h$)
C_b	constante de Beverloo
C_f	constante de Fowler e Glastonbury
C'	constante de Mankoc ($kg/m^{2,5}s$)
D_0	diâmetro da abertura da comporta (m)
D_h	diâmetro hidráulico da abertura da comporta (m)
D_h'	diâmetro hidráulico da abertura corrigido com k (m)
D_s	diâmetro do silo (m)
d	diâmetro da engrenagem (m)
d_p	diâmetro do grão (m)
$f(T_{SR})$	fator de rugosidade do grão (cm)
g	gravidade (m/s^2)
h	nível de preenchimento do silo (m)
h_m	altura da massa de grãos (m)
K	constante de Janssen
k	fator de correção de Beverloo para a abertura da comporta
k'	coeficiente de arrasto de Gregory e Fedler (kg/m^2s)
l	largura da tubulação (m)
L_m	comprimento mínimo do grão (cm)
N	velocidade angular (rpm)
n	expoente da equação de Fowler e Glastonbury
n'	expoente para escoamento da ASABE
p_h	parcela horizontal da tensão sobre os grãos (Pa)
p_v	parcela vertical da tensão sobre os grãos (Pa)
Q	vazão (kg/s)
R	abertura relativa (D_h/d_p)

V	velocidade linear (m/s)
ρ	densidade aparente da massa de grãos (kg/m^3)
μ_s	coeficiente de atrito
ϕ	ângulo de fricção interna ($^\circ$)
R^2	Coeficiente de determinação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	13
2.1	Vazão de esvaziamento vs preenchimento de um silo cilíndrico.....	13
2.2	Modelos para o escoamento de grãos.....	14
2.3	Transportador <i>Redler</i>	18
3	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	20
3.1	Silos	20
3.2	Linha de transilagem	21
4	METODOLOGIA	24
4.1	Análise laboratorial	24
4.1.1	Densidade aparente.....	24
4.1.2	Diâmetro médio dos grãos	25
4.2	Influência da altura da coluna de trigo	25
4.3	Abertura da comporta.....	26
4.4	Cálculos e Análise dos Dados.....	28
5	RESULTADOS.....	30
5.1	Influência da altura da coluna de trigo	31
5.2	Relação entre vazão e abertura da comporta	33
5.2.1	Modelo de Beverloo et al. (1961)	34
5.2.2	Modelo de Fowler e Glastonbury (1959)	37
5.2.3	Modelo de Mankoc et al. (2007).....	40
5.2.4	Modelo da ASABE (1992)	43
5.2.5	Modelo de Gregory e Fedler (1987) para Escoamento Laminar	46
5.2.6	Comparativo dos Modelos.....	49
5.2.7	Escolha do Modelo.....	54
6	CONCLUSÃO	60

7	REFERÊNCIAS	62
---	-------------------	----

1 INTRODUÇÃO

No último século, o escoamento de grãos por uma abertura foi amplamente estudado. Diversos pesquisadores desenvolveram equações empíricas e teóricas para tentar prever o comportamento desse tipo de escoamento. Seu entendimento possui amplas aplicações industriais, como em setores alimentícios, farmacêuticos e de mineração, e a possibilidade de encontrar o valor de uma vazão por meio de cálculos eliminaria a necessidade de despesas com balanças de fluxo em sistemas que não são de alta precisão.

Mesmo sendo importante para aplicações industriais, são raros os estudos no âmbito de escoamento de grãos realizados em uma planta real. A maior parte dos trabalhos é feita com modelos em escala de silos, e realizada em laboratório, sob condições ideais. Além disso, os estudos verificam o comportamento do fluxo somente até a abertura abaixo do reservatório, avaliando somente a relação entre a vazão, o tamanho e o formato da referida abertura. Componentes adicionais como tubulações ligadas ao silo normalmente não são incluídos nessas pesquisas.

No presente trabalho, propõe-se o estudo do esvaziamento de um silo de trigo em em uma planta industrial real. Localizada abaixo dele, está conectada uma tubulação inclinada que envia os grãos escoados para a produção, por meio de transportadores de corrente *redler*, onde foram feitas as medições de vazão.

Atualmente, o controle do esvaziamento do silo nessa indústria é feito de maneira incerta, tendo que ser reajustado ocasionalmente, por conta de entupimentos por carga excessiva. Em contrapartida, quando se aplica uma carga reduzida para prevenir entupimentos, é desperdiçada energia, pois os equipamentos de transporte acabam funcionando por mais tempo.

Tem-se então por objetivo, avaliar a adequação de cinco modelos matemáticos para o escoamento de grãos, desenvolvidos pelos meios mencionados anteriormente, ao escoamento de esvaziamento dos silos. A partir dessa avaliação, pretende-se definir faixas de aplicação das equações obtidas, de forma a relacionar a vazão mássica de trigo que sai do silo à magnitude da abertura de uma comporta, que se localiza na tubulação abaixo do silo, e é responsável pelo controle de vazão.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 Vazão de esvaziamento vs preenchimento de um silo cilíndrico

O escoamento de grãos se comporta de maneira diferente de um escoamento líquido. Por se tratar de partículas discretas e, para o trigo, de baixa coesão (BUCKLIN et al., 2013), existem modelos específicos que tentam prever esse comportamento.

Em seus trabalhos, Duran (2000) e Sperl (2006) reforçaram o fenômeno descrito por Janssen (1895), que descreve o comportamento da pressão vertical sobre os grãos ao longo de um silo vertical. A propriedade tende a atingir a saturação, provinda do redirecionamento das forças de contato entre os grãos. Em consequência desse fenômeno, para alturas de camada de grãos que ultrapassem um certo valor, o efeito do peso dos grãos em um silo sobre sua vazão de esvaziamento é negligenciável.

Para um silo cilíndrico, Duran (2000) interpretou as equações de Janssen, definindo que a pressão se comportaria da seguinte forma:

$$p_v(h) = \rho g \left(\frac{D_s}{4K\mu_s} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{4K\mu_s}{D_s} h \right) \right] \quad (1)$$

Sendo p_v pressão vertical no produto, ρ a densidade aparente, g a aceleração gravitacional, D_s o diâmetro do reservatório, μ_s o coeficiente de atrito entre o produto e as paredes do silo, h a profundidade medida a partir do topo da coluna de grãos e K a constante de Janssen, que é a razão de proporção entre as pressões horizontal e vertical incidindo sobre o grão: $p_h = Kp_v$.

Observando a equação, é possível ver que um alto valor de K leva p_v a tender à constância, com o aumento de h . Bucklin et al. (2013) descrevem que durante o descarregamento de um silo, os grãos tendem a alterar seus estados de pressão, de forma que a pressão horizontal supera a vertical. Contudo, após a interrupção do descarregamento, o estado se mantém até que o reservatório seja completamente esvaziado. Em consequência, o valor de K se torna maior do que 1, reforçando a tese de estagnação da pressão.

Nedderman et al. (1982) estudaram o fluxo de esvaziamento de recipientes de grãos com bases cônicas. Foi encontrado que para silos com sua base nesse formato, o valor

de K poderia ser aproximado utilizando ϕ , o ângulo de fricção interna entre os grãos, através da seguinte equação:

$$K = \left(\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \right) \quad (2)$$

É comum para grãos que ϕ esteja entre 25° e 50° (BUCKLIN et al., 2013; KIBAR, 2016; NEDDERMAN et al., 1982), dessa forma, K deverá estar entre 2,5 e 7,5. Com isso, para as condições estudadas, o valor da exponencial na Equação 1 crescerá rapidamente com h , mostrando a constância na pressão vertical, e conseqüentemente, em sua influência sobre o escoamento.

2.2 Modelos para o escoamento de grãos

Seguindo os estudos de Janssen (1895), diversos modelos foram propostos para tentar explicar o escoamento de saída na base de um silo, contudo, a maioria se aplicando somente a casos ou intervalos de fluxo específicos. Fowler e Glastonbury (1959) e Beverloo, Leniger e Velde (1961) estudaram esse processo para vários diâmetros de reservatório, tipos de grãos, tamanhos e formatos de furos de abetura. A partir dessas comparações, foi possível reforçar o que já era proposto anteriormente: o efeito da altura da camada de trigo sobre a vazão pode ser desconsiderado. Seus modelos tomaram as formas das Equações 3 e 4:

Equação de Fowler e Glastonbury:

$$Q = C_f \rho A \sqrt{2gD_h} \times \left(\frac{D_h}{d_p} \right)^n \quad (3)$$

Equação de Beverloo:

$$Q = C_b \rho \sqrt{g} \times (D_o - kd_p)^{2,5} \quad (4)$$

Sendo ρ a densidade aparente do grão, D_h o diâmetro hidráulico e D_o o diâmetro real do furo na base do silo, A a área da abertura na base do silo, d_p o diâmetro médio dos grãos, C_b , C_f , k e n constantes medidas experimentalmente, que ajustam a equação para cada dimensão e formato de silo.

A Equação 3, em sua modelagem original, possuía $C_f = 0,236$ e $n = 0,185$. Contudo, esse valores podem variar para melhor se adequar a diferentes escoamentos (FEDLER, 1988). C_f , por exemplo, pode atingir valores próximos a 1,35.

A Equação 4 foi definida também para diversos grãos. Nela, foi introduzido o fator k . Fisicamente, ele representa que é necessária uma abertura com diâmetro maior do que o do grão, para que se inicie o escoamento. Dessa forma, esse valor deveria necessariamente ser maior do que 1. Entretanto, a equação nesse formato descreve o escoamento por uma abertura necessariamente circular. Para outros formatos, foi feita a Equação 5:

$$Q = C_b \rho A' \sqrt{g D_h'} \quad (5)$$

Nessa equação, A' é a área, e D_h' o diâmetro hidráulico da abertura, ambos levando em conta o fator k . Eles podem ser calculados, para uma abertura retangular, utilizando as Equações 6 e 7:

$$A' = (l - k * d_p)(ab - k * d_p) \quad (6)$$

e

$$D_h' = \frac{4(l - k * d_p)(ab - k * d_p)}{2(l + ab - 2 * k * d_p)} \quad (7)$$

Com l sendo a largura da abertura e ab o comprimento.

O valor de C_b foi originalmente fixado em 0,58. Entretanto, variando as propriedades do grão, esse valor pode atingir até 0,65 (NEDDERMAN, 1992).

Comparando as Equações 3 e 5, é possível observar a importância do termo k de Beverloo. Para a equação de Fowler e Glastonbury (F & G), qualquer valor de D_h maior do que zero se traduz em um escoamento. Isso seria irreal pois um grão não poderia passar por uma abertura de diâmetro inferior ao seu próprio. Além disso, para aberturas maiores que o diâmetro do grão, ainda há a possibilidade da formação de uma barreira ou “arco” que impede o escoamento (AMBROSE et al., 2016; KULWIEC, 1985; NEDDERMAN, 1992). Dessa forma, um valor de k maior que 1 seria o mais adequado.

Paralelamente aos estudos descritos anteriormente, diversos outros pesquisadores desenvolveram equações empíricas para o escoamento de materiais granulares. Contudo, os

descritos neste trabalho são sempre utilizados como base para esses desenvolvimentos. Outros modelos mais recentes tentaram melhorar ou abordar o fenômeno por outros métodos.

Mankoc et al. (2007) propuseram a utilização de um fator de correção, ao se utilizar a equação de Beverloo. Em seus experimentos, ao utilizar os mesmos coeficientes encontrados no trabalho de 1961, foi obtida uma ligeira divergência entre os dados previstos e medidos. Para estreitar essa diferença, foi incluído um fator exponencial que diminui com o aumento do diâmetro da abertura por onde passam os grãos. Seu modelo é conforme a Equação 8:

$$Q = C' \times \left(1 - \frac{1}{2} e^{-b(R-1)}\right) \times (R - 1)^{2,5} \quad (8)$$

Na equação de Mankoc, os valores de g e ρ estão presentes na constante C' . b é a constante de Mankoc, e seu valor é de 0,051. R é igual a $\frac{D_h}{d_p}$. É válido notar que para esse modelo, há escoamento somente para valores de D_h maiores ou iguais a d_p .

Em 1992, a Sociedade Americana de Engenheiros Agrônomos e Biológicos (ASABE) publicou a norma ASAE D274.1. Nela, são definidos padrões para o cálculo da vazão de diversos tipos de grãos por orifícios.

$$Q = C_0 A D_h^{n'} \quad (9)$$

A Equação 9 é o modelo fornecido pela norma. Nela, C_0 é uma constante dependente do tipo de grão e da inclinação da abertura por onde passam os grãos. Suas unidades dependem do valor do coeficiente n' , que depende dos mesmos fatores que C_0 . A é a área do orifício, e D_h seu diâmetro hidráulico. Nas condições estabelecidas pela norma, n' é obrigatoriamente um valor entre 0,5 e 1. C_0 assume valores entre 0,015 e 0,090 $\text{m}^3/\text{cm}^{(n'+2)}\text{h}$, dependendo do tipo de grão. Para o trigo, a norma estabeleceu $C_0 = 0,050$ para o trigo escoando por recipientes horizontais, e $C_0 = 0,038$ para o escoamento pro um orifício vertical (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS, 1992).

Os modelos descritos foram obtidos empiricamente. Gregory e Fedler (1987) desenvolveram equações baseadas em métodos analíticos para tentar entender o escoamento de grãos. Para escoamentos laminares, foi proposta a Equação 10:

$$Q = \frac{\pi}{16} \frac{g\rho^2}{k'} D_o^3 \quad (10)$$

D_o é o diâmetro da abertura por onde passam os grãos, e k' é o coeficiente que representa a força de arrasto que os grãos sofrem. O fator é dependente do coeficiente de atrito, da rugosidade e do formato do grão, entretando, o coeficiente pode ser aproximado por meio da Equação 11, desenvolvida empiricamente (FEDLER; GREGORY, 1989).

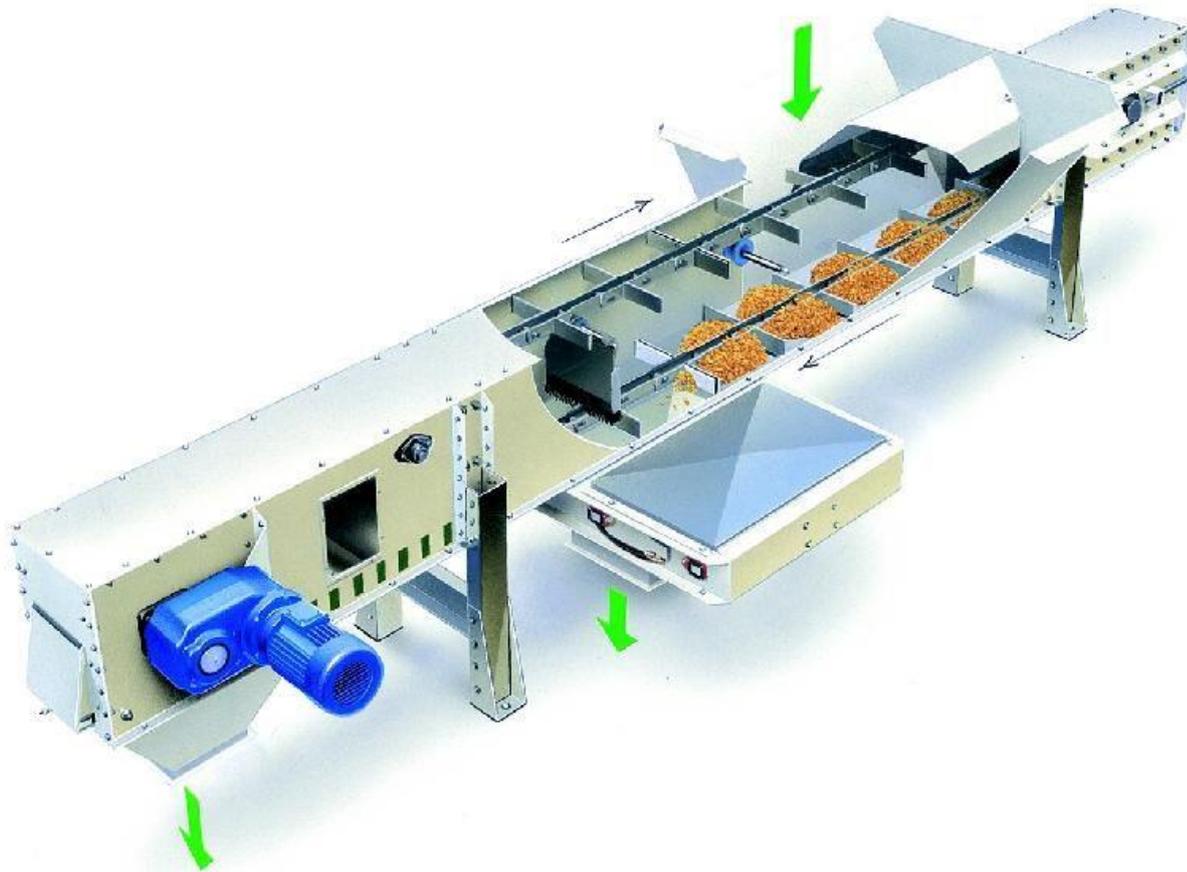
$$k' = 36(f(T_{SR}) + 1,5L_m) \quad (11)$$

O fator $f(T_{SR})$ depende da rugosidade da superfície do grão, sendo 0,2 para superfícies rugosas e 0,3 para lisas. L_m é o comprimento mínimo dos grãos. Nessas condições, k' é expresso em g/cm²s. Para o trigo estudado, utilizando a Equação 11 e considerando o trigo como um grão de superfície lisa, é esperado um valor de $k' = 25,92$ g/cm²s, ou 259,2 kg/m²s. Contudo, o coeficiente pode atingir valores entre 100 e 400 kg/m²s normalmente (FEDLER, 1988).

2.3 Transportador *Redler*

O *redler* é um equipamento de transporte de grãos por arrasto. A máquina consiste de uma tubulação retangular fechada, que possui uma corrente com pás, que arrasta os grãos no fundo do transportador, de uma ponta a outra. Seu formato pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Transportador *Redler*



Fonte: <http://www.fabricadoprojeto.com.br/2013/03/serie-transportadores-redler-ou-transportador-de-corrente/> (2018)

Uma das vantagens desse transportador é a fácil aferição de sua vazão. Isso por conta de ela ter poucas variações, assumindo uma alimentação regular, e ela poder ser verificada visualmente pela porta de inspeção, conforme exibido na Figura 1.

A medição de sua vazão pode ser feita através da Equação 12:

$$Q = \rho l h_m V \quad (12)$$

Sendo: ρ a densidade aparente dos grãos, l a largura da tubulação do transportador, h_m a altura da massa de grãos transportada, medida a partir da base do transportador e V a velocidade linear da corrente que arrasta os grãos. V pode ser obtido a

partir da rotação do motor que aciona o equipamento e do diâmetro da engrenagem que transmite o movimento à corrente, conforme a Equação 13.

$$V = \frac{\pi d N}{60} \quad (13)$$

Nesta, d representa o diâmetro da engrenagem e n a rotação do acionamento, em rpm. Se d é representado em metros, o V será obtido em m/s. Dessa forma, utilizando as outras variáveis no sistema internacional, será obtida uma vazão em kg/s (KULWIEC, 1985).

3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

A transilagem é o processo de transferência de grãos de um silo para outro. Seu principal objetivo é a realocação de produto de um depósito de recepção para um intermediário, este sendo predecessor do processo produtivo, ou não sendo alcançado pelas linhas transportadoras de recepção de matéria prima .

Neste trabalho, os objetos de estudo são equipamentos de transporte presentes em uma das linhas de transilagem de uma indústria local produtora de farinha de trigo. Esse sistema é responsável pela movimentação de trigo proveniente de 6 dos 27 silos do moinho, e leva os grãos da base dos depósitos até o topo do prédio industrial, e em seguida, até outras unidades de armazenagem.

O fator de escolha desta linha em específico foi sua forma construtiva. As tubulações de saída dos seis silos possuem as mesmas dimensões e inclinações, enquanto os outros silos, por serem mais antigos, já sofreram diversas realocações em suas linhas de transporte, não tendo a uniformidade necessária para o estudo.

3.1 Silos

Os grãos se encontram inicialmente armazenados em silos cilíndricos de concreto com 44,6 metros de altura e 9,4 metros de diâmetro. A abertura em seus fundos possui 40 centímetros de diâmetro. Em sua base, eles possuem um afunilamento com inclinação de 50 graus medidos a partir da vertical. Cada silo poderá acomodar somente um tipo de trigo por vez, devido às diferenças entre suas características, somente sendo feitas misturas no processo produtivo.

A liberação da passagem dos grãos é feita através de uma válvula gaveta retangular horizontal com acionamento pneumático, cuja abertura pode ser total ou nula. Ela está posicionada abaixo da abertura circular de 40 cm de diâmetro. O controle de vazão é realizado também por uma válvula gaveta, porém esta é inclinada e possui ajuste manual.

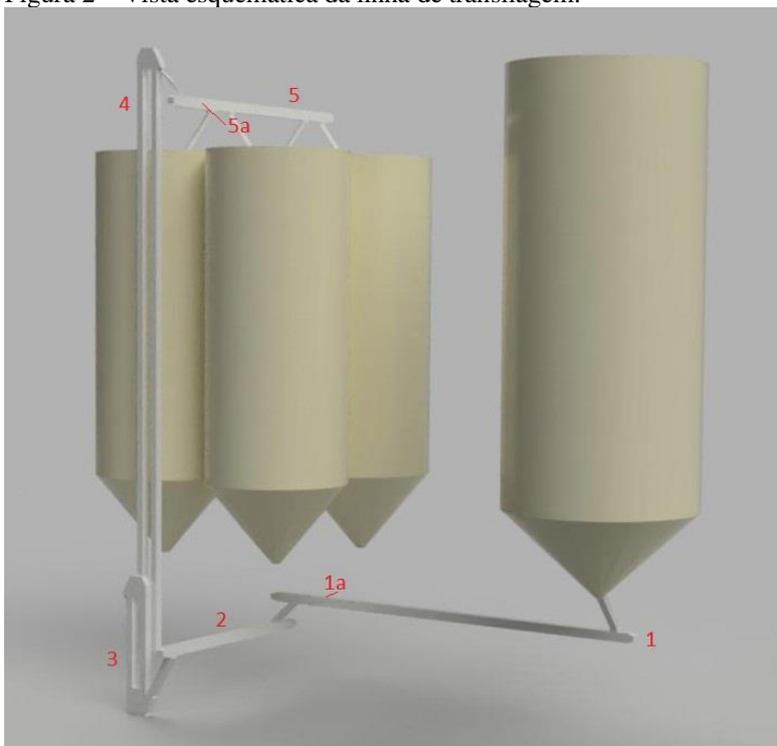
As gavetas de controle de vazão estão instaladas nas tubulações que ligam as saídas dos silos ao primeiro transportador Redler. Os trechos possuem inclinação de 35 graus medidos a partir da vertical. Eles são retangulares e não têm variações consideráveis em suas

dimensões, tendo largura de 35 cm e altura de 38 cm, sendo que a abertura máxima da gaveta manual é de 35 cm.

3.2 Linha de transilagem

No processo estudado são utilizados dois tipos de transportadores industriais: Transportadores de correntes, ou *redlers*, e elevadores de canecas. Conforme a Figura 2:

Figura 2 – Vista esquemática da linha de transilagem.



Item	Descrição
1	Redler C-1122
1a	Redler C-1122: Janela de Inspeção
2	Redler T2
3	Elevador E4
4	Elevador E3
5	Redler T4
5a	Redler T4: Janela de Inspeção

Fonte: elaborado pelo autor.

Após sair de um dos depósitos, o trigo se dirige ao primeiro transportador. Os seis silos estudados iniciam o descarregamento através 2 *redlers* paralelos, C-1122 e C-1123, de mesmas dimensões, velocidades de corrente e vazão nominal. Cada um dos transportadores é responsável por 3 silos.

As máquinas C-1122 e C-1123 têm capacidade nominal de 200 toneladas de trigo por hora. Elas levam o trigo a outro *redler*, de TAG T2 e capacidade de 180 t/h, que dirige o trigo aos elevadores.

O primeiro elevador de canecas é denominado E4, e sua capacidade nominal é de 150 t/h. Cabe a ele transferir o trigo para um nível superior, onde ele abastece o próximo

elevador da linha, o E3. Possuindo também 150 t/h de capacidade nominal, este é responsável por elevar o trigo em 50 metros, para o topo do prédio, onde está o último equipamento desta linha de transilagem.

Por fim, o trigo atinge o *redler* T4, que está posicionado de forma a poder abastecer diversos silos predecessores do processo produtivo. O trigo proveniente do elevador E3 é despejado na máquina, que transporta os grãos até o silo desejado. O depósito escolhido se encontrará com uma válvula gaveta aberta entre a base do transportador e seu topo, de forma que os grãos cairão no silo ao passar por ela. A capacidade nominal do T4 também é de 150 t/h.

Todos os equipamentos funcionam em condição de carga máxima. Consequentemente, ao se medir uma vazão passando pelo C-1122 ou C-1123, caso o resultado se mostre inferior a 200 t/h, é possível considerar que o volume de trigo que passa na linha é definido somente pela abertura da válvula gaveta manual.

Para medições de vazão no *redler* T4, a condição descrita anteriormente também será verdade. Neste caso, devido a capacidade inferior de carga dos elevadores e *redler* final. Caso a abertura da comporta seja suficiente para que sejam despejadas entre 150 e 200 t/h de grãos, haverá um entupimento na linha na base do elevador E4. Isso causará uma parada automática dos transportadores.

Visto o risco de interrupção do processo, evita-se abrir demais a gaveta de controle de fluxo, tentando manter a vazão sempre inferior a 150 t/h. Como esse valor é inferior à capacidade nominal de todos os transportadores, é possível assumir que não houve acúmulos na linha, e que todo o trigo proveniente do silo atingiu o *redler* final, gerando uma medição de vazão confiável.

4 METODOLOGIA

A coleta dos dados para o experimento ocorreu em três etapas. A primeira no laboratório da indústria de farinha, onde foram coletadas propriedades do trigo que seriam relevantes para o estudo do escoamento. A segunda aconteceu dentro da planta industrial, para validar o que foi proposto por Janssen (1895), de que a menos que o silo estivesse próximo a esvaziar-se, não haveria influência do seu nível de preenchimento sobre a vazão. Na última, ainda dentro da indústria, foi verificada a influência da abertura da comporta sobre a vazão.

4.1 Análise laboratorial

Conforme é descrito pela Equação 4, influenciam no escoamento a densidade aparente do trigo (ρ) e o diâmetro médio do grão (d_p). Essas duas propriedades são recorrentes dentro dos diversos modelos estudados, de forma que não houve necessidade de levantar outras, como rugosidade ou coeficiente de atrito.

4.1.1 Densidade aparente

Esse dado é crucial para o processo produtivo da farinha, e por isso, já havia sido coletado pela equipe de controle de qualidade, para diversas sessões do navio que transportara o trigo. Sendo assim, ela foi disponibilizada para esta pesquisa.

A densidade aparente do trigo foi medida através do preenchimento de um recipiente cilíndrico padrão de um litro. Ele foi abastecido por meio de um funil que imita a queda dos grãos dentro de um silo, até que fosse ultrapassada a capacidade máxima do recipiente, formando um cone de grãos em seu topo. O excedente de produto foi removido com uma guilhotina, para garantir um volume exato. O trigo foi então pesado em uma balança, cuja tara havia sido ajustada previamente para descontar a massa do recipiente.

O procedimento anterior foi repetido para amostras coletadas durante múltiplos estágios da recepção do grão pela empresa. Isso foi feito para se obter um valor médio realista da propriedade, e que considerasse quaisquer desvios dentro do carregamento recebido.

4.1.2 Diâmetro médio dos grãos

O diâmetro médio de um grão de trigo não é utilizado no processo produtivo. Conseqüentemente, foi necessário fazer o levantamento desta informação.

Novamente no laboratório, utilizou-se uma das amostras coletadas pelo Controle de Qualidade, foi primeiramente preenchido um recipiente graduado com água até atingir a marca de 2 ml. Em seguida, foram adicionados grãos de trigo um a um no recipiente, até que a graduação do nível de água atingisse 5 ml. Ao se atingir o nível desejado, a quantidade de grãos foi contada, e a diferença de 3 ml no volume foi dividida por essa quantidade. O resultado obtido foi tomado como o volume esférico do grão. Através da equação do volume de uma esfera, foi obtido o valor do diâmetro médio do grão (d_p).

4.2 Influência da altura da coluna de trigo

O objetivo deste procedimento foi validar o efeito Jansen para o procedimento seguinte. Isso foi necessário para que se pudesse garantir que os resultados obtidos na próxima etapa, até que fosse atingido o final do silo, não teriam como variável a quantidade de trigo dentro do silo.

Nesta fase, a vazão foi medida nos *redlers* gêmeos C-1122 e C-1123 (Ponto 1a da Figura 2), devido a sua baixa oscilação da massa de trigo, que simplificava as aferições.

Para este experimento, todos os valores registrados foram obtidos para uma mesma abertura nominal da comporta, de 166 mm, medida de sua base de encaixe até sua ponta superior. Conseqüentemente, quantidade de trigo no silo foi considerada como única variável do processo. Por segurança, este valor foi reconferido e reajustado a cada coleta de dados.

Inicialmente, após o começo da transilagem, verificou-se a altura da massa de trigo nos visores do *redler* em uso no momento, em ambos os lados do equipamento. Isso foi feito em consequência da direção do abastecimento de trigo, que se dá de maneira transversal ao sentido da tubulação do transportador. Essa característica fez com que ele transportasse uma maior quantidade de grãos em um de seus lados. A altura da massa de trigo no *redler* foi então obtida a partir da média aritmética das duas medições. Em seguida, essa altura foi convertida em vazão, utilizando a Equação 12.

Após a aferição no transportador, foi verificada a altura da coluna de trigo no silo que estava sendo descarregado. Isso foi feito com o uso de uma trena de 50 metros, que foi posicionada no topo do silo em uso, centralizada, e sua ponta foi descida até tocar a massa de grãos. O valor medido foi então subtraído da altura total do silo, de forma que o resultado encontrado foi catalogado como a altura do trigo armazenado no silo naquele momento.

As medições foram realizadas ao longo de vários dias. Para um mesmo período de transilagem, houve um intervalo de 20 a 40 minutos entre cada coleta de dados. Foram coletadas informações para diversas condições de preenchimento do silo, tendo sido iniciados os registros quando o silo estava quase cheio, e concluídos em um momento próximo ao esvaziamento do depósito de grãos.

4.3 Abertura da comporta

Nesta etapa, foi verificada a influência da magnitude da abertura da comporta de saída do silo sobre sua consequente vazão de esvaziamento.

Primeiramente, ao início de uma transilagem, foi verificada junto à produção a altura da coluna de trigo, de forma a evitar a obtenção de dados com divergência, caso o silo estivesse quase vazio. Em seguida, foi então medida a distância entre a ponta superior da comporta e a base onde ela se encaixa, sua abertura nominal.

Após catalogar a medição anterior, seguiu-se ao *redler* T4 (Ponto 5a da Figura 2), onde a altura da massa de grãos sendo transportada foi medida.

O *redler* T4 foi escolhido devido à altura mínima de seu visor de inspeção, que é inferior à dos outros equipamentos da linha, possibilitando uma gama maior de vazões a serem medidas.

A medição da altura de trigo no equipamento se deu da seguinte forma:

Foi posicionada uma trena, de maneira vertical, ao lado do visor do *redler*, com seu zero alinhado a base interna do equipamento, conforme mostra a Figura 3.

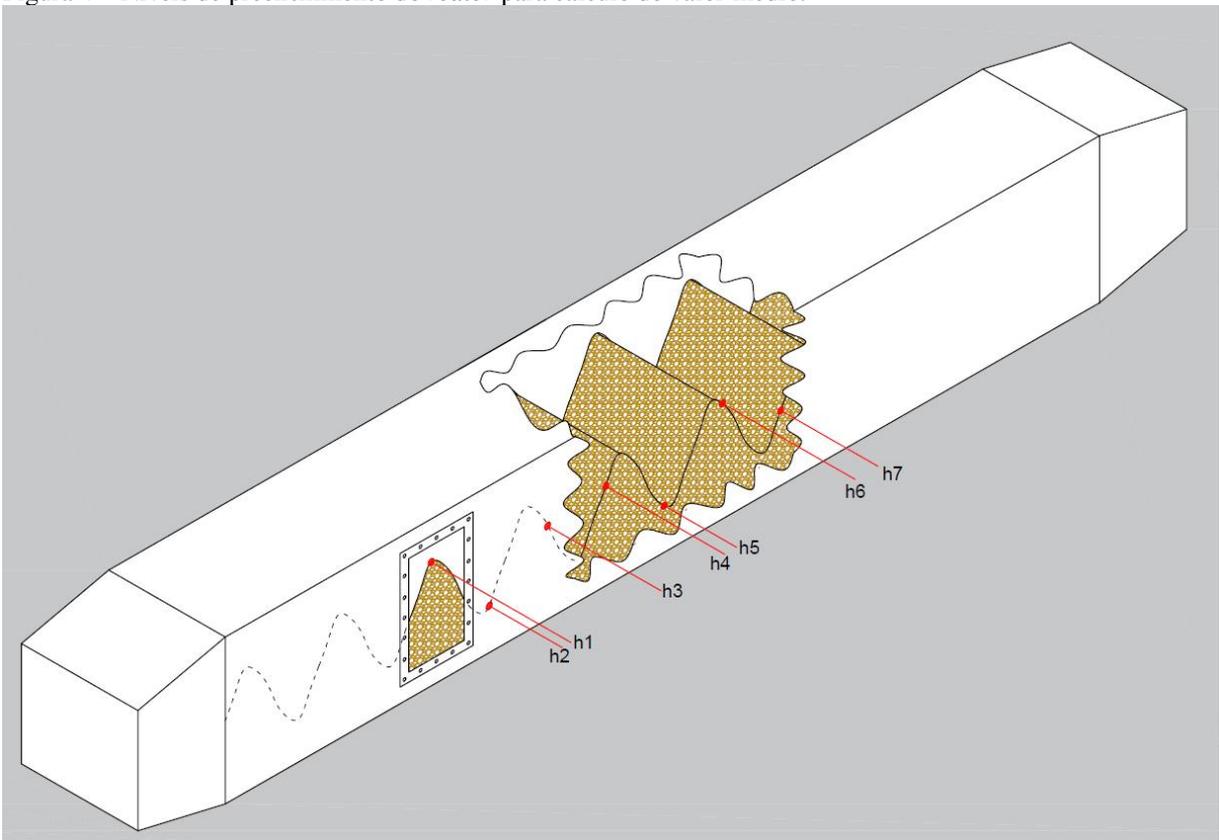
Figura 3 – Janela de Inspeção do Redler T4 e Posicionamento da Trena.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para cada medição de abertura da comporta, foi feita uma gravação em câmera lenta com duração de 15 segundos do visor do *redler* T4. Essa gravação foi posteriormente transferida para um computador, onde foram registrados dez pontos (um quadro do vídeo para cada 1,5 segundos de filmagem).

Figura 4 – Níveis de preenchimento do *redler* para cálculo do valor médio.



Fonte: elaborado pelo autor.

Aferiu-se então a altura de trigo nivelada pela régua em cada um dos quadros, obtendo-se preenchimentos variados, conforme exibido na Figura 4. A altura média da massa de trigo que passava no *redler* T4, para a abertura da comporta medida anteriormente, foi então obtida calculando-se a média aritmética dos dez valores medidos nos quadros. Novamente, a partir de cada valor de altura aferido, foi obtida a vazão transportada pelo *redler* utilizando a Equação 12.

Devido à impossibilidade de visualizar a base interna do *redler* através do visor, é possível que algumas aferições tenham sofrido influência do método de medição. No equipamento utilizado para as aferições, o nível da massa de trigo sofre rápidas oscilações. O procedimento de filmagem em câmera lenta e aferição de diversos pontos visou obter uma média confiável para altura da massa de grãos. Entretanto, se em um dos quadros utilizados para a medição, o nível mínimo da massa de trigo fosse inferior ao nível mínimo do visor, o valor computado seria maior do que o real. Conseqüentemente, esse ponto influenciaria a média calculada, fornecendo um valor final maior do que o real. Para este possível erro, quanto menor a quantidade de trigo no *redler*, maior a divergência do valor médio para a realidade.

4.4 Cálculos e Análise dos Dados

Os dados amostrais foram computados por meio de planilha eletrônica. O estudo da adequação dos dados aos modelos de equação foi feito por meio do software MatLab, da MathWorks. Nele, foram importados os dados da planilha, e feitas as regressões dos dados por meio do módulo *Curve Fitting Toolbox*, que forneceu o preenchimento básico dos gráficos, os coeficientes da regressão, e parâmetros de ajuste como o R^2 . Os gráficos gerados pelo módulo foram editados e padronizados dentro do próprio MatLab.

Para definição da relação entre a abertura e a vazão, foram escolhidos 5 modelos matemáticos da literatura que descrevem o comportamento do esvaziamento de um silo. Através do MatLab, foram feitas múltiplas regressões das amostras coletadas, associadas ao formato das equações desses modelos. Essas regressões tiveram suas características analisadas em relação a literatura, e comparadas entre si. Foram levantadas então quais melhor se aproximaram do que foi medido.

5 RESULTADOS

Neste capítulo, foi validada a equação de Janssen (Equação 1), ou seja, a não influência da altura da coluna de trigo no silo na magnitude da vazão. Em seguida, foram calibradas equações para o escoamento de trigo, de acordo com os modelos estudados na Seção 2.2. Posteriormente, foi feita a comparação desses modelos, com o objetivo de encontrar qual deles atendeu com mais proximidade os valores medidos experimentalmente.

Para todas as equações estudadas, foram utilizados como base os valores de densidade aparente (ρ) e diâmetro médio do grão (d_p) obtidos por meio dos experimentos realizados conforme a Seção 4.1. Dessa forma, $d_p = 3,85 \text{ mm}$ e $\rho = 817,13 \text{ kg/m}^3$. Valores estes que estão próximos aos encontrados na literatura (BHISE et al., 2014; CHANG; CONVERSE, 1987; KIBAR, 2016; KULWIEC, 1985).

5.1 Influência da altura da coluna de trigo

Com o objetivo de avaliar os efeitos da variação da altura da coluna de trigo sobre a vazão de esvaziamento de um silo, foram coletados dados conforme descrito na Seção 4.2. Os valores medidos são apresentados na Tabela 1.

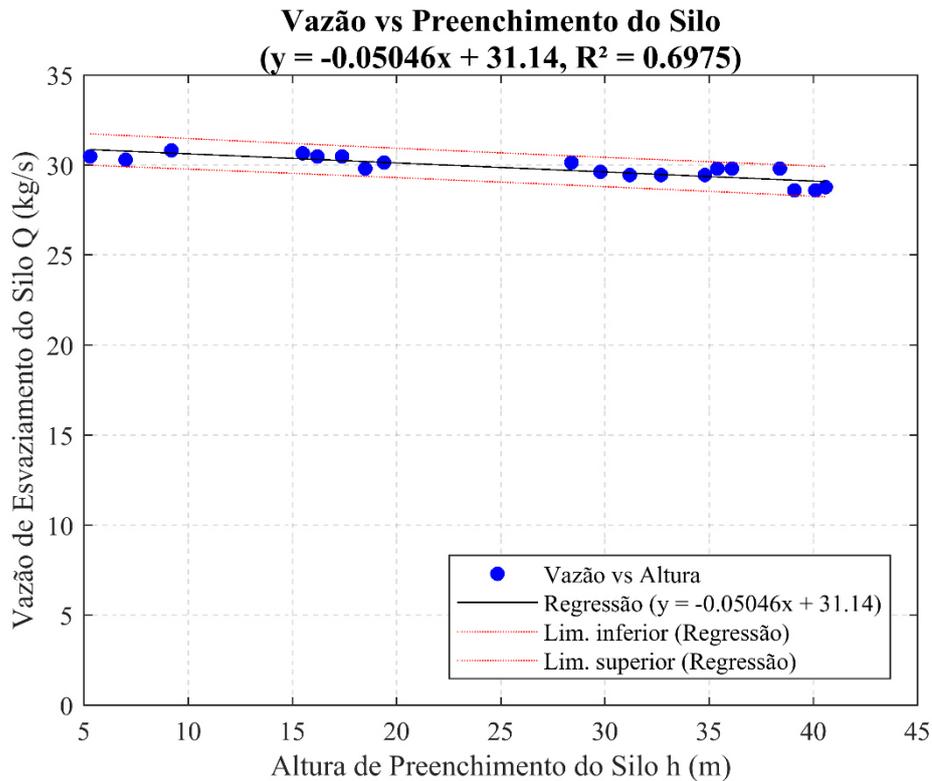
Tabela 1 - Medições de Vazão de Esvaziamento de Trigo para Diferentes Níveis de Preenchimento do Silo

Preenchimento do Silo (m)	Vazão Mássica (kg/s)
40,6	28,78
40,1	28,61
39,1	28,61
38,4	29,80
36,1	29,80
35,4	29,80
34,8	29,46
32,7	29,46
31,2	29,46
29,8	29,63
28,4	30,14
19,4	30,14
18,5	29,80
17,4	30,48
16,2	30,48
15,5	30,65
9,2	30,82
7	30,31
5,3	30,48
Média	29,83
Desvio Padrão	0,66
Desvio Padrão Percentual	2,22%

Fonte: elaborada pelo autor.

Como mostra a Tabela 1, os valores de vazão medidos com o silo quase totalmente preenchido até quando estava quase vazio pouco variaram (BEVERLOO et al., 1961; DURAN, 2000; JANSSEN, 1895; NEDDERMAN, 1992), tendo um desvio padrão percentual de 2,22%. Outra abordagem tomada para validar a não influência do preenchimento do silo sobre a vazão foi a regressão linear dos dados da Tabela 1, conforme exibido na Figura 5.

Figura 5 - Vazão de Esvaziamento vs Altura da Coluna de Trigo no Silo.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 5 reforçou a hipótese proposta anteriormente, dado que, ao converter os dados experimentais em uma reta equivalente, o coeficiente angular obtido para ela ficou em uma faixa entre -0.06613 e -0.03479 , com 95% de confiabilidade. Esses valores, quando comparados ao termo independente e aos valores de vazão medidos, são próximos de zero. Isso indica que a reta encontrada tende a um valor constante, mesmo quando variado o valor de x .

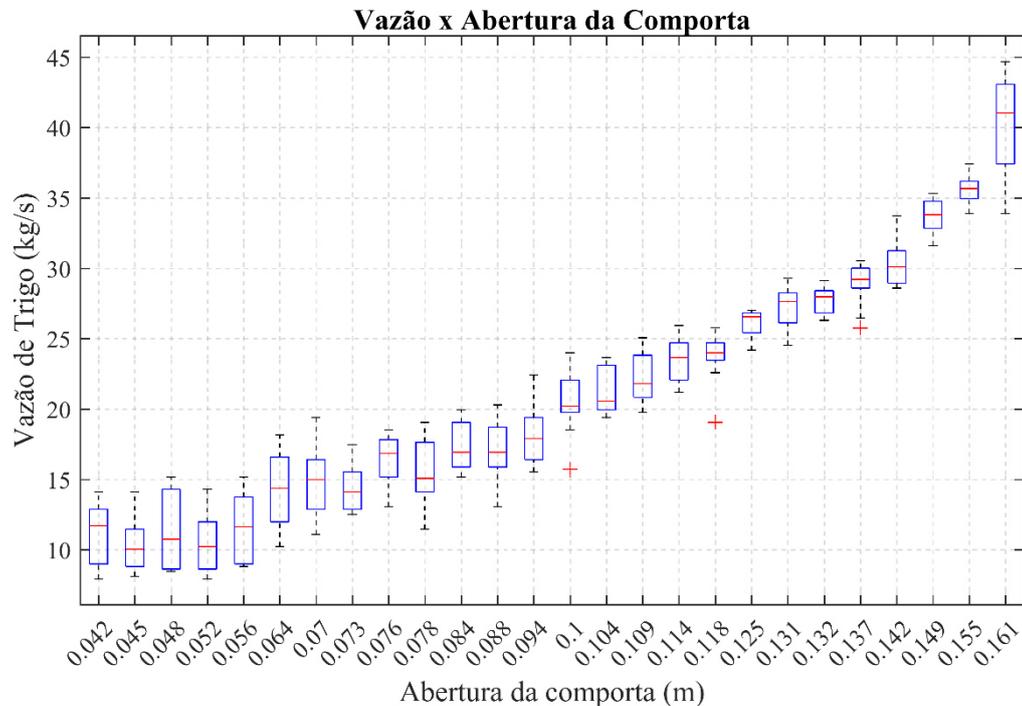
O baixo desvio padrão do conjunto amostral aliado aos resultados extraídos de sua regressão linear se mostraram em acordo com o que foi proposto pela literatura e, posteriormente, considerado na elaboração dos modelos matemáticos para o escoamento de grãos.

Dessa forma, para a válida utilização desses modelos, foi considerado no restante dos resultados que, para a amplitude de valores estudados, a variação da altura da coluna de grãos no silo não gerou influência considerável sobre a vazão.

5.2 Relação entre vazão e abertura da comporta

Os dados obtidos, variando-se a abertura da comporta do silo, estão exibidos na Figura 6.

Figura 6 - Vazão de Esvaziamento vs Abertura da Comporta do Silo.



Fonte: elaborado pelo autor.

Foi possível notar, na Figura 6, que há proporcionalidade entre a abertura e a vazão. A partir disso, foi necessário avaliar qual modelo melhor se encaixou com o comportamento apresentado pelas amostras. Paralelamente, foi necessário também verificar o nível de confiabilidade das amostras. Esta ação foi importante, pois a presença de dados inconsistentes na amostra poderia causar uma divergência entre os experimentos e a literatura.

A checagem dos dados mencionada no parágrafo anterior teve por objetivo verificar se algum dado sofreu influência das dimensões do visor, conforme levantado na Seção 4.4. Caso tenha havido essa influência, os dados de vazão provenientes das menores aberturas da comporta tenderão a se apresentar com valores maiores do que o que realmente estava escoando. Isso, de uma maneira que quanto menor a vazão, maior a divergência para com a realidade, pois um percentual maior da massa de grãos estaria “escondido” pelo visor.

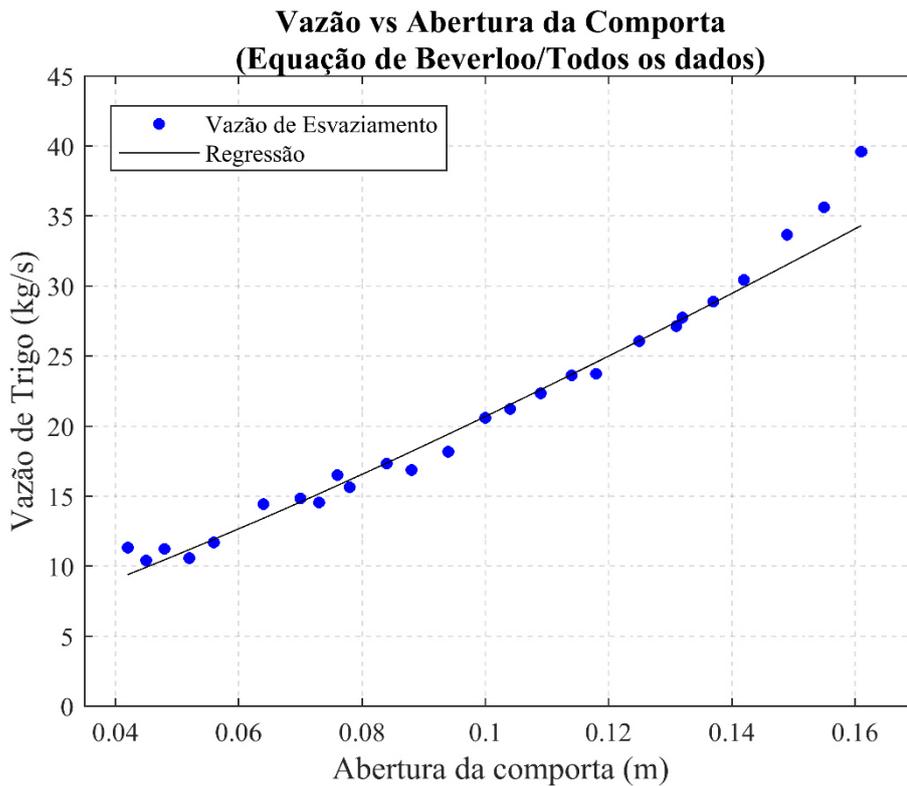
Os modelos utilizados foram escolhidos visando à variedade de categorias. Os dois primeiros foram empíricos, amplamente aplicados e utilizados como base para trabalhos mais recentes, o terceiro foi uma proposta mais recente para melhoria do modelo de Beverloo,

o quarto foi proveniente de uma norma técnica para o cálculo do escoamento de grãos e o quinto, o único dos modelos de formulação completamente teórica.

5.2.1 Modelo de Beverloo et al. (1961)

Inicialmente, foi avaliada a equação obtida através da regressão não linear dos dados da Figura 6, para um formato equivalente ao da Equação 5.

Figura 7 - Vazão de Esvaziamento vs Abertura da Comporta do Silo. Modelo: Beverloo.



Fonte: elaborado pelo autor.

A regressão exibida na Figura 7 obteve os coeficientes apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparativo entre os Coeficientes Obtidos pela Regressão e a Literatura (Beverloo)

Coeficientes	Figura 7	Literatura
C_b	0.2759	0.58-0.64
k	-8.9013	≥ 1.0
R^2	0.9867	---

Fonte: elaborado pelo autor.

Mesmo fornecendo um R^2 elevado, a regressão utilizando todos os pontos do conjunto amostral forneceu coeficientes que divergem dos encontrados para esse modelo em

trabalhos anteriores. Particularmente, o aparecimento de um k negativo indicou uma possível inconformidade dentre as amostras.

Para identificar dados que podem ter afetado negativamente o estudo, foram feitas partições do conjunto amostral, com subsequentes regressões. Assim, cada conjunto foi analisado individualmente por sua proximidade com a literatura, para a então definição de qual subseção seria a mais confiável para este modelo.

Os dados foram divididos conforme a Tabela 3:

Tabela 3 - Esquema de Partições para Estudo de Confiabilidade dos Dados

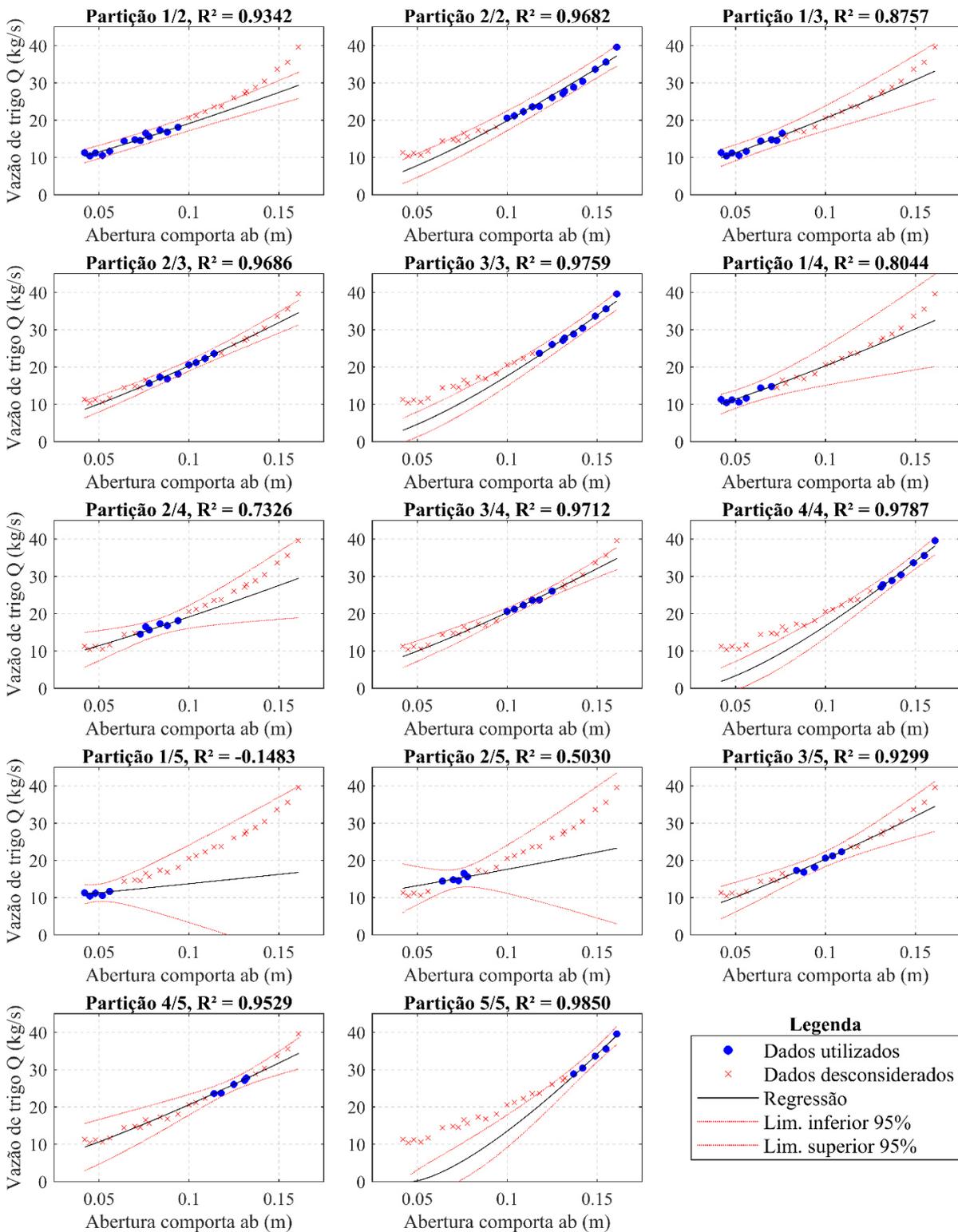
Partição	1/2 (bot1/2)		2/2 (top1/2)		
Quantidade de Pontos	13		13		
Partição	1/3 (bot1/3)	2/3 (mid1/3)		3/3 (top1/3)	
Quantidade de Pontos	9	8		9	
Partição	1/4 (bot1/4)	2/4 (bmid1/4)	3/4 (tmid1/4)	4/4 (top1/4)	
Quantidade de Pontos	7	6	6	7	
Partição	1/5 (bot1/5)	2/5 (bmid1/5)	3/5 (mid1/5)	4/5 (tmid1/5)	5/5 (top1/5)
Quantidade de Pontos	5	5	6	5	5

Fonte: elaborado pelo autor.

O arranjo da Tabela 3 foi escolhido priorizando uma divisão de quantidade de pontos por partições a mais uniforme possível. Também foi levado em conta que, obedecendo a primeira regra, os grupos deveriam ter a maior quantidade de pontos em suas partições mais externas. Dessa forma, foi possível gerar grupos que possuíssem combinações variadas de pontos. Conseqüentemente, foi possível observar se a presença de um ou dois pontos específicos influencia um grupo positiva ou negativamente.

Foram gerados um total 14 gráficos parciais para o modelo a partir das partições. O conjunto destes gráficos é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Comparativo de regressões para cada partição dos dados estudada. Modelo utilizado: Beverloo



Fonte: elaborado pelo autor.

Ao se analisar a Figura 8, é possível notar que as partições provenientes de pontos com a uma maior abertura da comporta forneceram valores de R^2 mais elevados. Isso reforça a hipótese proposta anteriormente de que haveria uma possível inconformidade no conjunto amostral, já que, se todos os pontos estivessem conformes, os valores de R^2 seriam, pelo menos, próximos.

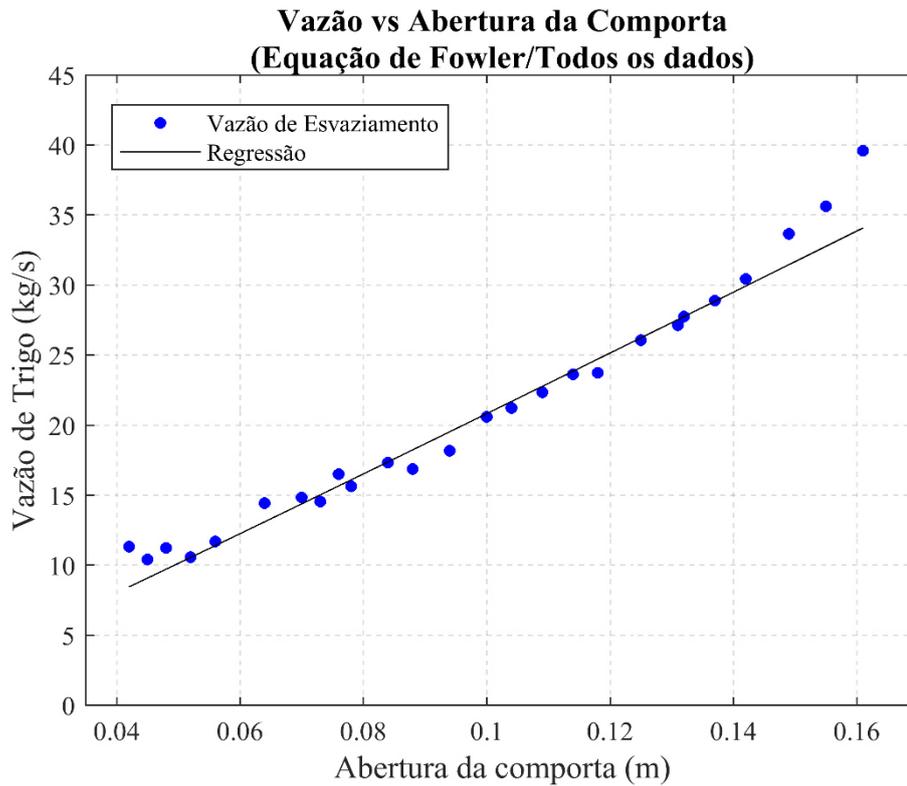
Deste modelo, destacaram-se as partições 3/3, 4/4 e 5/5. É interessante observar que estas se encontram em ordem crescente de R^2 , e, que o grupo 3/3 possui quase os mesmos pontos da união dos grupos 4/5 e 5/5. Contudo, o ajustamento do grupo 4/5 é de 0,9529, contra 0,9759 do 3/3. Isso mostra que possivelmente a inclusão dos pontos mais baixos na partição 3/3 a influenciou negativamente. Essa avaliação também pode ser feita agrupando outras sessões de dados, fornecendo um resultado similar.

Apesar das análises realizadas, ainda não é possível definir dentre as sessões, se alguma atendeu completamente os critérios de convergência, visto que além do coeficiente de determinação, também é necessário avaliar os coeficientes obtidos para a equação. Essa avaliação foi feita em conjunto com os outros modelos, e será tratada na Seção 5.2.6.

5.2.2 Modelo de Fowler e Glastonbury (1959)

O procedimento adotado nesta seção foi o mesmo da anterior. Isso ocorreu pelo fato da regressão do modelo ter apresentado comportamento similar ao de Beverloo. Esta semelhança consiste na convergência de uma equação contendo todos os dados, com o não atendimento dos limites estabelecidos pela literatura para os coeficientes. Os resultados são exibidos na Figura 9 e Tabela 4.

Figura 9 - Vazão de Esvaziamento vs Abertura da Comporta do Silo. Modelo: Fowler e Glastonbury.



Fonte: elaborado pelo autor.

A regressão exibida na Figura 9 obteve os seguintes coeficientes:

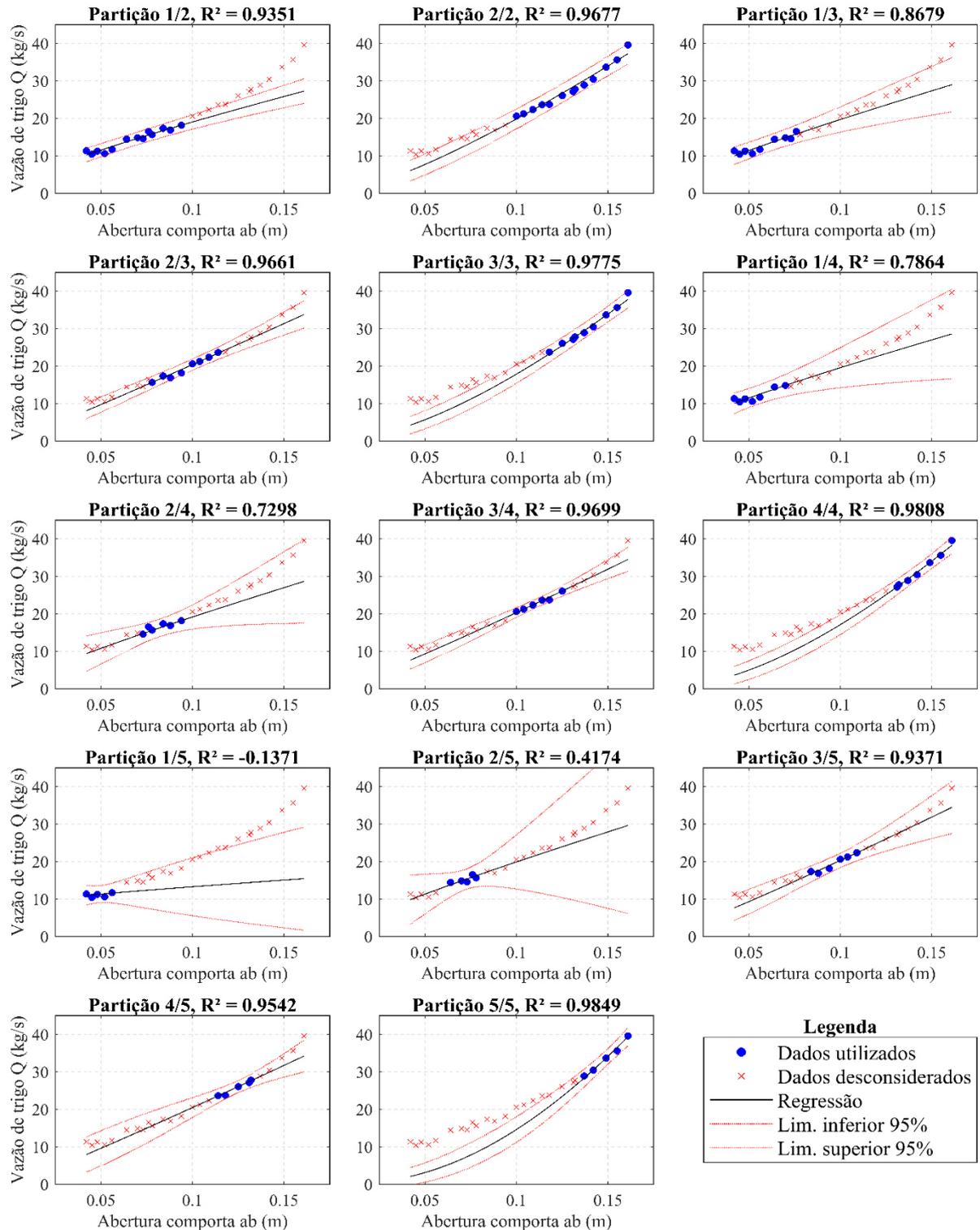
Tabela 4 - Comparativo entre os Coeficientes Obtidos pela Regressão e a Literatura (Fowler e Glastonbury)

Coeficientes	Figura 9	Literatura
C_f	2,2282	0,2-1,35
n	-0,4532	0,1-1,0
R^2	0.9958	---

Fonte: elaborado pelo autor.

Vale notar que o coeficiente de determinação (R^2) para este modelo foi de 0,9958, que é um valor mais alto que o obtido para o modelo de Beverloo. Contudo, o não atendimento dos valores dos coeficientes tornou inviável a utilização do modelo contendo todos os dados. Conseqüentemente, foram feitas partições do conjunto amostral e regressões individuais dessas partições, conforme feito para o modelo de Beverloo. O agrupamento utilizado foi o mesmo exibido na Tabela 3.

Figura 10 – Comparativo de regressões para cada partição dos dados estudada. Modelo utilizado: Fowler e Glastonbury



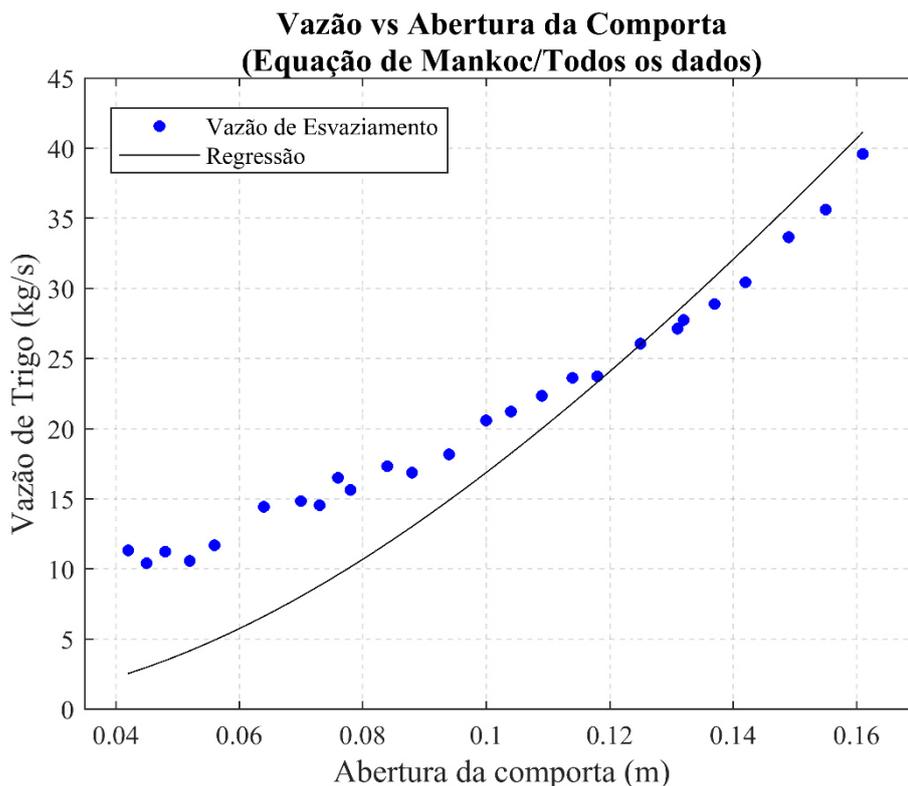
Fonte: elaborado pelo autor.

Observou-se que, novamente, os grupos de dados mais a direita do gráfico apresentaram coeficiente de determinação mais elevado que os pontos a esquerda. Além disso, analisando o gráfico da partição 1/5, tanto na figura Figura 8 quanto na Figura 10 foi visto que o R^2 apresentou um valor negativo. Isso é uma inconformidade, visto que o R^2 tem que ser um valor positivo. Leva-se então a crer que para essa partição, nenhuma das duas equações possui um formato capaz de reproduzir adequadamente o comportamento dos dados. Assim sendo, essa sessão das medições não seguiu o comportamento observado pela literatura para o escoamento de grãos.

5.2.3 Modelo de Mankoc et al. (2007)

Seguindo o padrão realizado nas seções anteriores, foi obtido o gráfico da Figura 11.

Figura 11 - Vazão de Esvaziamento vs Abertura da Comporta do Silo. Modelo: Mankoc.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os coeficientes para a equação obtida através da regressão apresentada na Figura 11 são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparativo entre os Coeficientes Obtidos pela Regressão e a Literatura (Equação de Mankoc)

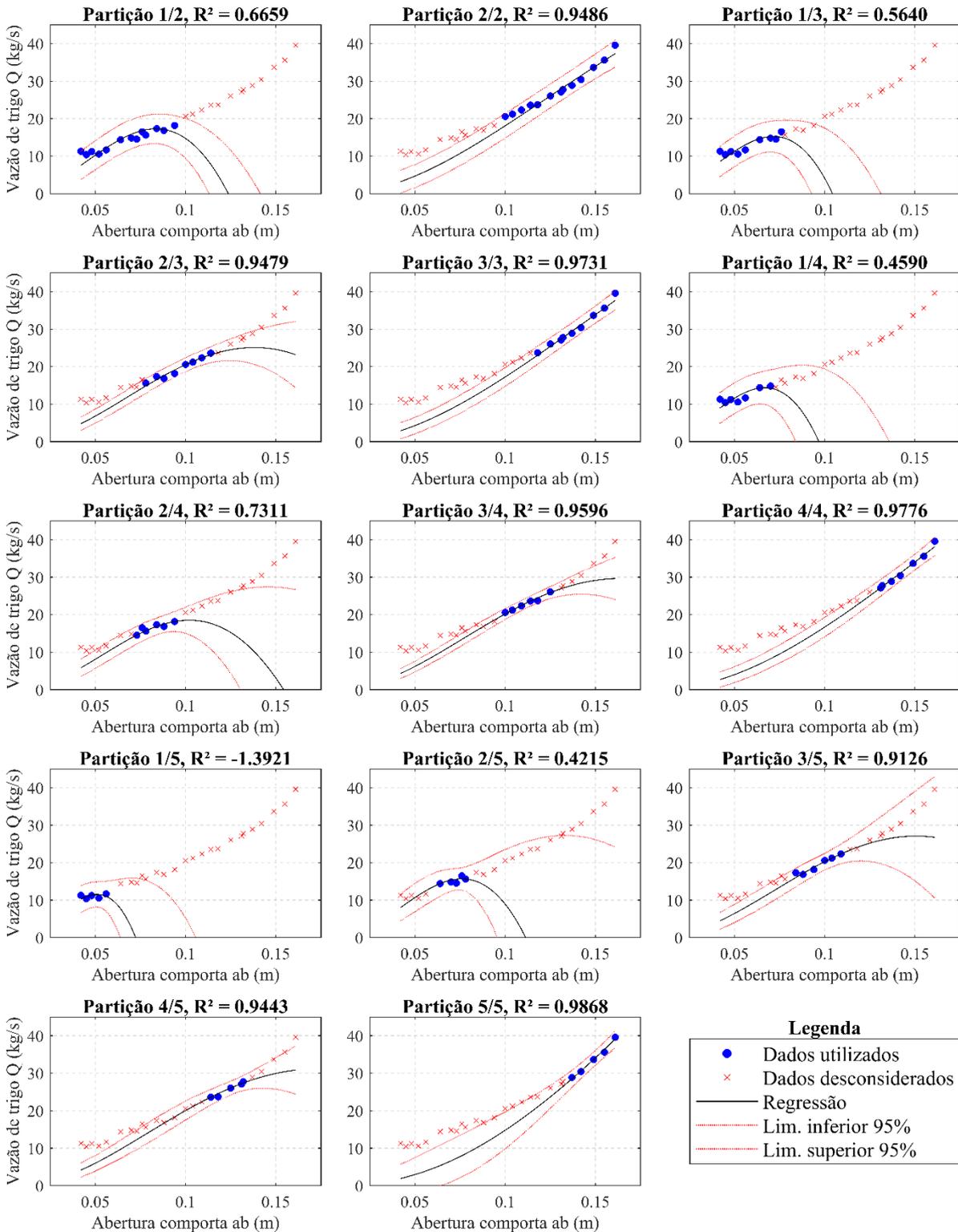
Coeficientes	Figura 11	Literatura
C'	$1,735 \times 10^{-3}$	1480-1640
b	0.9725	0,051
R^2	0.6408	---

Fonte: elaborado pelo autor.

Notou-se que, para esta regressão, o formato da curva representou bem o comportamento dos últimos 8 pontos medidos, de forma que no seguinte particionamento, o modelo atenderia bem esse conjunto. Entretanto o coeficiente C' divergiu exageradamente do esperado. Ao mesmo tempo, o coeficiente b , mesmo sendo positivo, apresentou um intervalo de confiança bastante elevado (-2.558×10^{-7} , 2.558×10^7), representando a baixa influência do coeficiente na regressão. Ao tentar igualar o valor de b ao estabelecido pela literatura, foi obtido um intervalo de confiança mais preciso (-0.1657 , 0.2677). Contudo, houve uma redução no valor do R^2 para 0.577, e não houve uma melhoria considerável no valor de C' , que continuou muito pequeno em relação a literatura.

Para verificar se os problemas anteriores foram influência de uma sessão específica dos dados experimentais, for feito novamente o particionamento da amostra, conforme a Tabela 3, já apresentada na Seção 5.2.1.

Figura 12 – Comparativo de regressões para cada partição dos dados estudada. Modelo utilizado: Mankoc.



Fonte: elaborado pelo autor.

Foi observado inicialmente que o modelo não atendeu de maneira aceitável as partições mais baixas e as intermediárias. Isso porque o formato dessas curvas atendeu

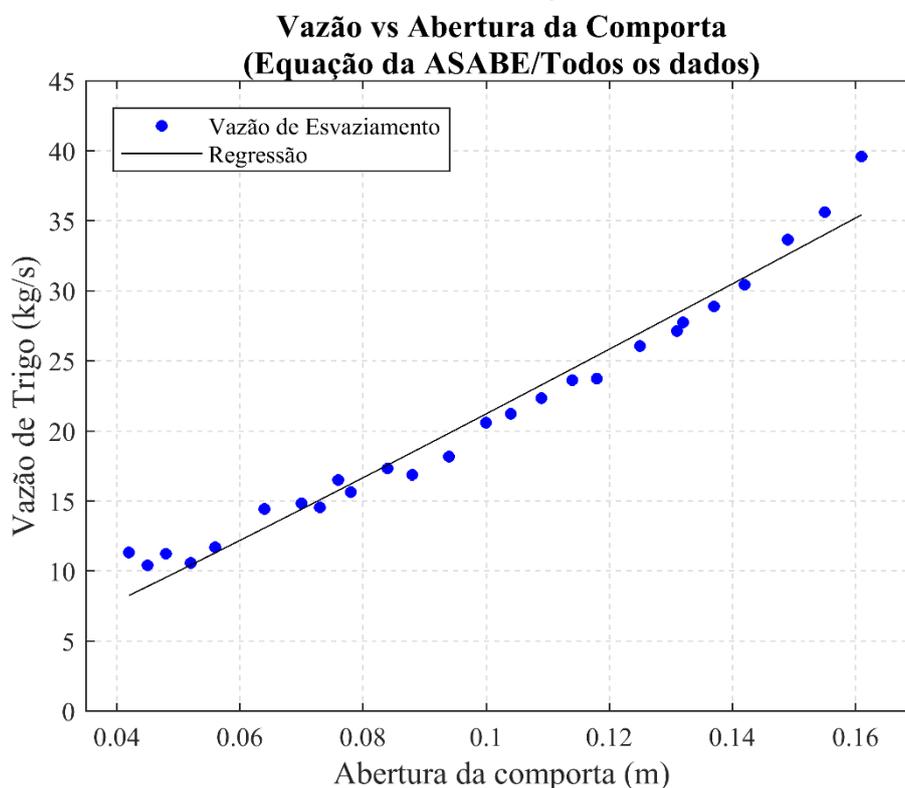
somente os pontos da sua respectiva partição. Para valores maiores do que os presentes nas partições, a regressão tomou formas fisicamente incompatíveis com o esperado do escoamento, já que não faria sentido uma redução na vazão de trigo mediante um aumento na abertura da comporta.

Assim, foi fornecido um formato de equação aceitável somente em 4 dos 14 gráficos desse modelo (2/2, 3/3, 4/4 e 5/5). Para a partição 5/5, especificamente, o R^2 de 0,9868 ficou em um patamar elevado dentro deste modelo, e em relação aos anteriores. Contudo, será observado na Seção 5.2.6 que os coeficientes para ela também foram bastante divergentes da literatura.

5.2.4 Modelo da ASABE (1992)

Seguindo o padrão das seções anteriores, foi feita a regressão de todo o grupo amostral, e comparados os resultados obtidos com o proposto pela literatura.

Figura 13 - Vazão de Esvaziamento vs Abertura da Comporta do Silo. Modelo: ASABE.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os coeficientes para a equação obtida através da regressão apresentada na Figura 13 são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparativo entre os Coeficientes Obtidos pela Regressão e a Literatura (Equação da ASABE)

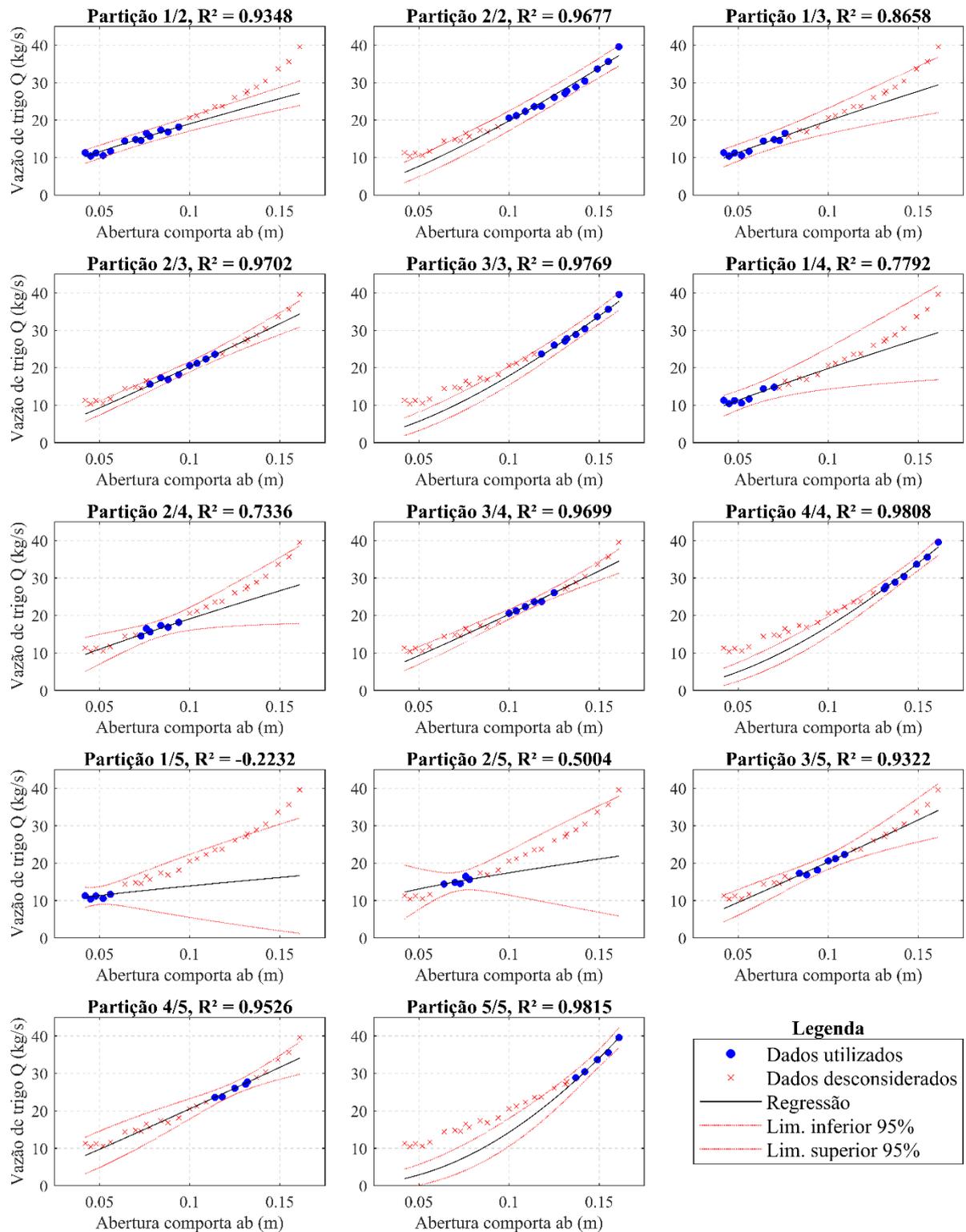
Coeficientes	Figura 13	Literatura
C_0	737,6	1134,9-11349
n'	0,1053	0,5-1,0
R^2	0,9683	---

Fonte: elaborado pelo autor.

É interessante observar que, de acordo com os dois primeiros modelos apresentados, a curva de regressão levando em conta todos os dados, visualmente atendeu melhor os dados intermediários e provenientes de uma abertura da comporta menor. Esses mesmos pontos foram os que, ao ser feita a partição, mais divergiram da literatura e obtiveram os menores valores de R^2 .

Como, mais uma vez, a regressão do agrupamento de todos os pontos não produziu coeficientes similares aos da literatura, foram feitas as partições dos dados e suas regressões individuais para este modelo. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 14.

Figura 14 – Comparativo de regressões para cada partição dos dados estudada. Modelo utilizado: ASABE.



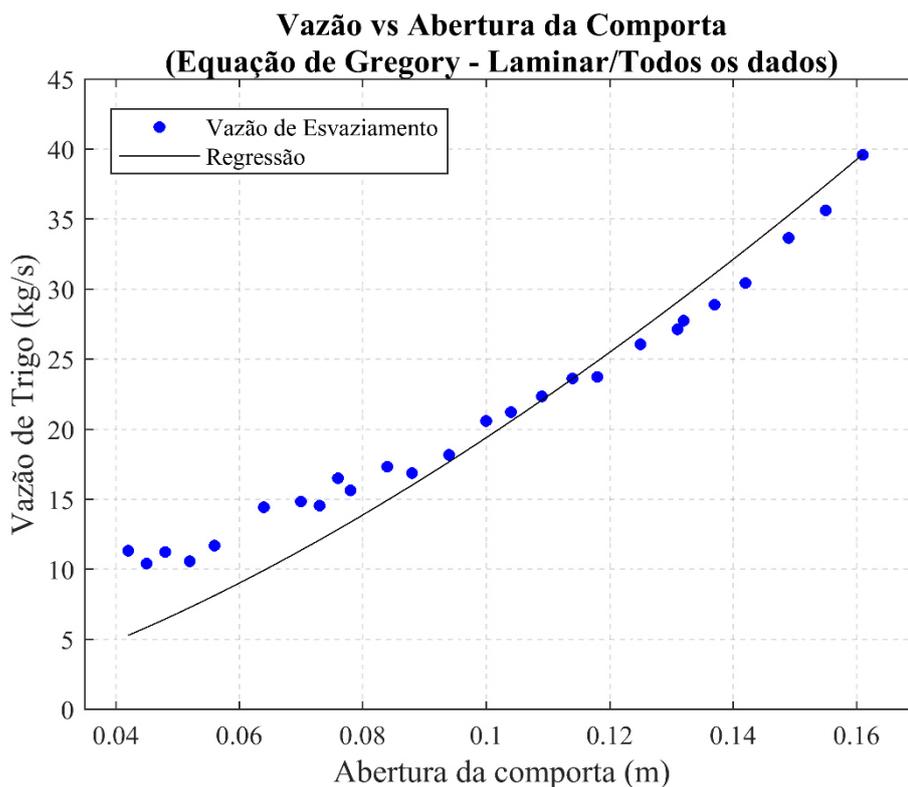
Fonte: elaborado pelo autor.

As partições desse modelo seguiram o comportamento dos anteriores. Neste ponto, tornou-se aparentemente repetitiva a contínua exibição do modelo contendo todos os dados, e em seguida suas partições, visto que os gráficos não variam muito visualmente. Por outro lado, conforme dito na Seção 5.2.1, ainda há de se comparar os coeficientes obtidos individualmente para cada partição. Isso será mais conveniente após a apresentação de todos os modelos.

5.2.5 Modelo de Gregory e Fedler (1987) para Escoamento Laminar

Continuando a exibição individual dos resultados para cada modelo, a regressão seguindo o modelo de Gregory e Fedler, para escoamentos laminares, é apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Vazão de Esvaziamento vs Abertura da Comporta do Silo. Modelo: Gregory e Fedler Laminar.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os coeficientes obtidos para a regressão da Figura 15 estão exibidos na Tabela 7.

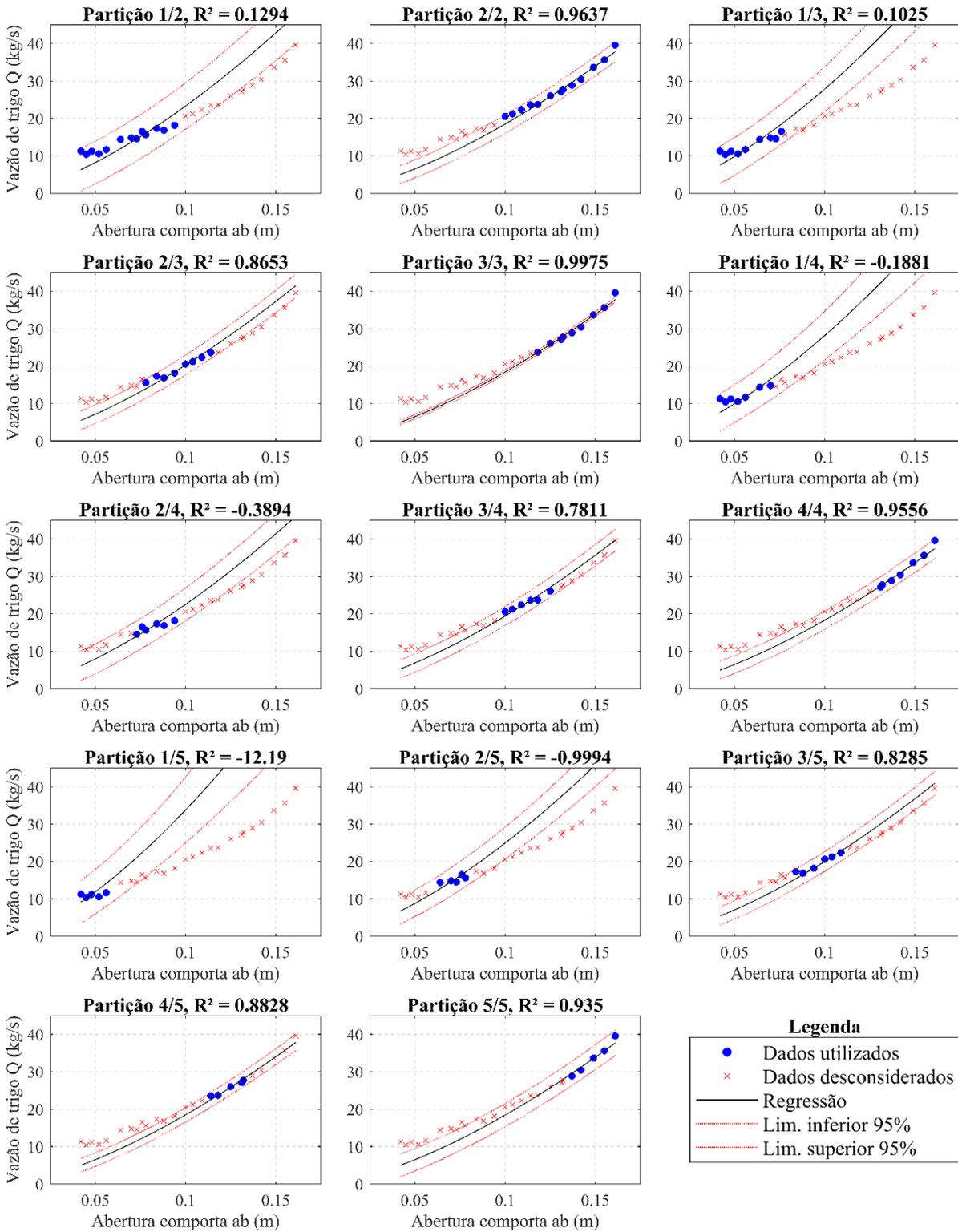
Tabela 7 - Comparativo entre os Coeficientes Obtidos pela Regressão e a Literatura (Gregory e Fedler Laminar)

Coeficientes	Figura 15	Literatura
k'	623,72	100-400
R^2	0,8857	---

Fonte: elaborado pelo autor.

Ao contrário da maioria dos modelos descritos anteriormente, a equação de Gregory e Fedler para escoamentos laminares chegou bem perto de valores aceitáveis já na regressão da amostra completa. Dessa forma, seguindo o padrão estabelecido pelas seções anteriores, e com o objetivo de encontrar uma seção com resultados com melhor ajuste, foi feita novamente a partição dos dados. Os resultados podem ser vistos na Figura 16.

Figura 16 – Comparativo de regressões para cada partição dos dados estudada. Modelo utilizado: Gregory e Fedler Laminar.



Fonte: elaborado pelo autor.

Em geral, os valores de R^2 atingidos seguiram o mesmo comportamento dos modelos anteriores, no quesito em que partições mais à direita foram melhores que as mais à esquerda. Contudo, a regressão 3/3 deste modelo atingiu uma convergência melhor que todas as anteriores, sugerindo uma possível seção de dados que possa ser considerada “mais adequada”. Para este modelo, houve também uma divergência de comportamento com relação aos anteriores. Ele foi o único em que o conjunto 5/5 não apresentou o maior R^2 dentre as partições.

Tendo analisado os 5 modelos quanto à qualidade de suas regressões parciais, resta compará-los quanto aos coeficientes encontrados.

5.2.6 Comparativo dos Modelos

Foram analisados 5 modelos para o escoamento do trigo, cada um com suas particularidades. Para definir qual deles melhor atendeu o escoamento medido neste trabalho, foram agrupados todos os valores de R^2 , todos os valores dos coeficientes obtidos, e então feita a triagem de qual mais se adequou.

O comparativo dos coeficientes de determinação está exibido na Tabela 8.

Tabela 8 - Comparativo entre os Coeficientes de Determinação Obtidos por Cada Partição e Cada Modelo.

Partição	Beverloo ET AL	Fowler e Glastonbury	Mankoc	ASABE	Gregory e Fedler
Geral	0,9969	0,9958	<u>0,5808</u>	0,9683	0,8857
bot 1/2	0,9342	0,9351	<u>0,6659</u>	0,9348	<u>0,1294</u>
top 1/2	0,9682	0,9677	0,9486	0,9677	0,9637
bot 1/3	0,8757	0,8679	<u>0,5640</u>	0,8658	<u>0,1025</u>
mid 1/3	0,9686	0,9661	0,9479	0,9702	0,8653
top 1/3	0,9759	0,9775	0,9731	0,9769	0,9975
bot 1/4	0,8044	0,7864	<u>0,4590</u>	0,7792	<u>-0,1881</u>
bmid 1/4	0,7326	0,7298	0,7311	0,7336	<u>-0,3894</u>
tmid 1/4	0,9712	0,9699	0,9596	0,9699	0,7811
top 1/4	0,9787	0,9808	0,9776	0,9808	0,9556
bot 1/5	<u>-0,1483</u>	<u>-0,1371</u>	<u>-0,1392</u>	<u>-0,2232</u>	<u>-12,1900</u>
bmid 1/5	<u>0,5030</u>	<u>0,4174</u>	<u>0,4215</u>	<u>0,5004</u>	<u>-0,9994</u>
mid 1/5	0,9299	0,9371	0,9126	0,9322	0,8285
tmid 1/5	0,9529	0,9542	0,9443	0,9526	0,8828
top 1/5	0,9850	0,9849	0,9868	0,9815	0,9350

Sublinhado: $R^2 < 0,7000$

Fonte: elaborado pelo autor.

Com o objetivo de analisar somente os dados de maior adequação aos modelos, arbitrou-se um R^2 mínimo de 0,7000. Foram então selecionados quais estudos foram satisfatórios para representar o escoamento. Também foi notado que, salvo uma, todas as sessões desconsideradas foram de partições “Bot” e “Bmid”. Isso evidencia o que foi proposto na Seção 4.3, de que parte dos dados pode ter sido influenciada pelo tamanho do visor do *redler* em que foi feita a aferição.

Foram comparados também os coeficientes obtidos individualmente com o proposto pela literatura, e elaborada a Tabela 9.

Tabela 9 - Comparativo entre os Coeficientes das Equações Obtidos por Cada Partição e Cada Modelo.

Modelo	Beverloo ET AL		Fowler e Glastonbury		Mankoc		ASABE		Gregory E Fedler
	C_b	k	C_f	n	C'	b	C_o	n'	k'
Literatura	0,58- 0,63	$\geq 1,5$	0,225- 1,250	0,1- 1,0	1484- 1637	0,0- 1,0	0,025- 0,075	0,5-1,0	100-400
Geral	0,36	-8,14	2,214	-0,452	1,732 E-03	9,725 E-01	0,200	0,105	624
bot 1/5	0,03	-69,35	50,643	-1,418	2,970 E-02	-2,298 E-02	1,805	-0,850	358
bot 1/4	0,30	-12,04	6,868	-0,774	2,027 E-02	-1,805 E-02	0,473	-0,233	429
bot 1/3	0,31	-11,07	6,415	-0,754	1,853 E-02	-1,701 E-02	0,473	-0,233	434
bot 1/2	0,23	-16,15	8,228	-0,831	1,511 E-02	-1,491 E-02	0,607	-0,339	519
bmid 1/5	0,09	-41,51	5,727	-0,721	1,573 E-02	-1,578 E-02	1,537	-0,709	486
bmid 1/4	0,24	-15,71	5,940	-0,742	1,080 E-02	-1,269 E-02	0,473	-0,247	537
mid 1/3	0,38	-7,07	1,921	-0,419	8,219 E-03	-1,007 E-02	0,170	0,149	596
mid 1/5	0,38	-7,15	1,464	-0,347	7,590 E-03	-9,462 E-03	0,187	0,115	604
tmid 1/4	0,39	-6,57	1,460	-0,346	7,149 E-03	-8,907 E-03	0,167	0,155	623
tmid 1/5	0,36	-8,49	1,773	-0,396	6,905 E-03	-8,617 E-03	0,203	0,088	654
top 1/2	0,53	-1,04	0,488	-0,056	4,870 E-03	-5,391 E-03	0,074	0,444	654
top 1/3	0,69	4,53	0,124	0,287	4,317 E-03	-4,186 E-03	0,027	0,778	656
top 1/4	0,78	6,61	0,066	0,445	3,894 E-03	-2,875 E-03	0,016	0,945	661
top 1/5	1,08	12,09	0,008	0,977	2,196 E-03	1,225 E-02	0,003	1,552	656

Sublinhado: Coeficiente atendeu critérios da literatura.

Fonte: elaborado pelo autor.

Mais uma vez, foi possível excluir a maioria das partições, por não atenderem os critérios estabelecidos pela literatura. Ao observar a Tabela 9, foi possível estabelecer que somente duas partições atenderiam o critério de ambos os seus coeficientes: as partições top 1/3 segundo o modelo da ASABE e a bot 1/5 segundo o modelo de Gregory e Fedler. Contudo, já se pôde excluir da lista de partições aceitáveis esta última, pois seu R^2 foi de -

12,19, o que mostrou a impossibilidade do modelo de reproduzir a partição de maneira confiável.

A análise do parágrafo anterior levaria a crer que a tomada da partição top 1/3 da ASABE seria a mais adequada, por ter atendido a literatura, e atingido um R^2 de 0,9769. Mas antes de chegar a essa conclusão, foi constatado que seria prudente estender alguns dos limites de tolerância da literatura para os coeficientes. O motivo disso seria a forma construtiva da saída do silo. Todos os modelos avaliados foram construídos através de estudos utilizando silos cilíndricos com bases chatas ou cônicas, com um furo centralizado. Neste trabalho, foi inserida uma variável a mais, a tubulação de saída do silo.

O atrito com as paredes da tubulação e o acúmulo interno pode gerar uma resistência adicional ao escoamento, que não é considerada nos modelos. Essa resistência pode ter se apresentado nos resultados como parcela dos coeficientes das equações, como por exemplo no k' de Gregory e Fedler. Este fator nada mais é do que o arrasto de resistência ao escoamento do grão. Ou seja, se levada em conta a tubulação, poderia ser esperado um valor maior do que 400 para essa constante.

Por outro lado, fatores como o k de Beverloo e o n de Fowler diferentes da literatura não poderiam ser tolerados, se menores que zero. Isso porque, nesse caso, estariam apresentando inconsistências físicas. Para a equação de Beverloo, o k negativo pode ser entendido como o escoamento do trigo por uma abertura maior do que a disponível para sua passagem. Já o n de Fowler, caso negativo, representaria uma relação entre a vazão e o diâmetro da abertura com o expoente do diâmetro inferior a 2,5, indo de encontro a todos os outros estudos avaliados.

Para o C' de Mankoc, mesmo aumentando a tolerância sobre os dados, não seria possível considerar suas partições, pois os coeficientes divergiram excessivamente do esperado. Para o n' da ASABE, foi considerado o intervalo original, por se tratar de um valor tabelado em norma como critério base para o modelo. Já para C_0 , do mesmo modelo, foi admitida uma tolerância maior, pelo fato da norma apresentar outros valores do coeficiente para outras formas construtivas da saída de grãos, ao contrário do n' .

Dessa forma, excluindo as partições cujos coeficientes foram rejeitados da Tabela 9, e os que forneceram um R^2 menor que 0,7000 foi obtida a Tabela 10.

Tabela 10 - Comparativo entre os Coeficientes das Equações Obtidos por Cada Partição e Cada Modelo, Após Exclusão de Dados com Qualidade Inferior.

Modelo	Beverloo ET AL		Fowler e Glastonbury		Mankoc		ASABE		Gregory E Fedler
	C_b	k	C_f	n	C'	b	C_o	n'	k'
Literatura	0,58-0,63	$\geq 1,5$	0,225-1,250	0,1-1,0	1484-1637	0,0-1,0	0,025-0,075	0,5-1,0	100-400
Geral									624
mid 1/3									596
mid 1/5									604
tmid 1/4									623
tmid 1/5									654
top 1/2									654
top 1/3	0,69	<u>4,53</u>	0,124	<u>0,287</u>			<u>0,027</u>	<u>0,778</u>	656
top 1/4	0,78	<u>6,61</u>	0,066	<u>0,445</u>			0,016	<u>0,945</u>	661
top 1/5	1,08	<u>12,09</u>	0,008	<u>0,977</u>					656

Sublinhado: Coeficiente atendeu critérios da literatura.

Fonte: elaborado pelo autor.

A primeira observação extraída da Tabela 10 é de que nenhuma partição “bot” ou “bmid” foi considerada aceitável. Não sendo levada em conta a regressão “Geral”, foram verificados quais pontos não apareceram em nenhuma das partições presentes na tabela. Foi encontrado que todos os pontos abaixo dos presentes na abertura “mid 1/3” foram desconsiderados.

A exclusão desses 9 pontos validou o que havia sido proposto anteriormente. Uma sessão dos dados de menor vazão sofreu influência do ambiente de medição. Devido a limitações do equipamento onde ela foi medida, os pontos com menor abertura da comporta forneceram vazões com valores maiores do que a realidade. Conseqüentemente, os modelos para escoamento de grãos utilizados não foram capazes de descrever seu comportamento da forma correta. Assim, foram utilizados os modelos para obter equações para intervalos contendo somente os 17 pontos com maior vazão obtida.

De todas as 75 regressões, foram extraídas 17 curvas, que chegaram mais próximas do comportamento do escoamento, sendo que, somente uma desse conjunto atingiu valores esperados pela literatura em ambos os coeficientes, a partição top 1/3, do modelo da ASABE.

Contudo, assumindo um tolerância mais abrangente, conforme anteriormente, foram considerados aceitáveis todos os dados da Tabela 10. E dessa forma, eles foram ranqueados conforme exibido na Tabela 11, com base nos seus coeficientes de determinação.

Tabela 11 – Ranking de Partições com Base em seu R^2

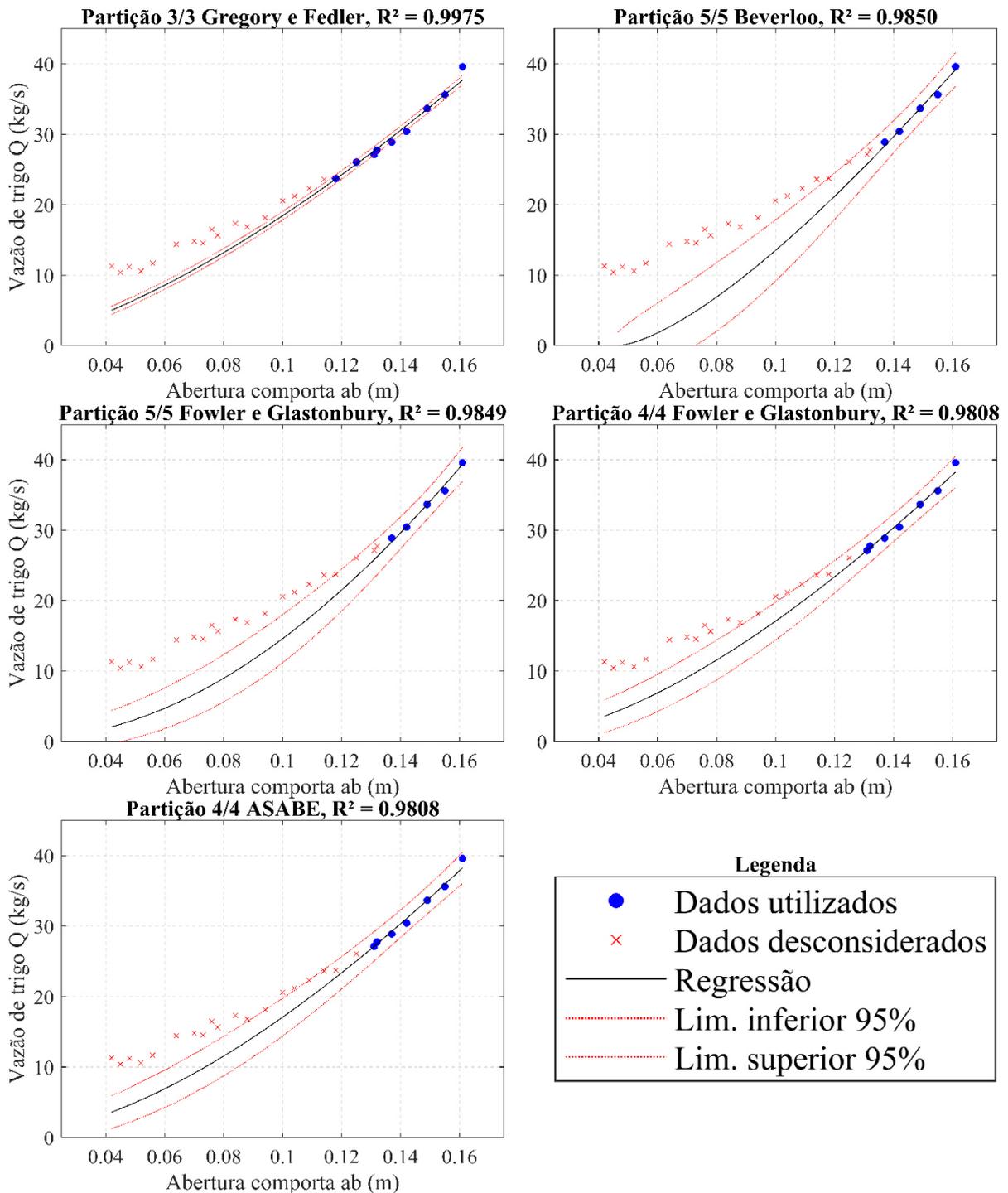
Colocação	Partição	R^2
1	Top 1/3 Gregory e Fedler	0,9975
2	Top 1/5 Beverloo	0,9850
3	Top 1/5 Fowler e Glastonbury	0,9848
4	Top 1/4 Fowler e Glastonbury	0,9808
5	Top 1/4 ASABE	0,9808
6	Top 1/4 Beverloo	0,9787
7	Top 1/3 Fowler e Glastonbury	0,9775
8	Top 1/3 ASABE	0,9769
9	Top 1/3 Beverloo	0,9759
10	Top 1/2 Gregory e Fedler	0,9637
11	Top 1/4 Gregory e Fedler	0,9556
12	Top 1/5 Gregory e Fedler	0,9350
13	Geral Gregory e Fedler	0,8857
14	Tmid 1/5 Gregory e Fedler	0,8828
15	Mid 1/3 Gregory e Fedler	0,8653
16	Mid 1/5 Gregory e Fedler	0,8285
17	Tmid 1/4 Gregory e Fedler	0,7811

Fonte: elaborado pelo autor.

5.2.7 Escolha do Modelo

Para a escolha de qual modelo melhor atenderia aos dados experimentais, e por consequência, qual parte dos dados seria desconsiderada, foi feita uma análise mais detalhada das melhores partições da Tabela 11. Suas 5 melhores regressões, utilizando o critério R^2 , foram expostas na Figura 17.

Figura 17 – Comparativo das 5 regressões com melhor R^2 obtido.



Fonte: elaborado pelo autor.

A primeira observação extraída da Figura 17 é de que, dentre as 5, a que atingiu limites de tolerância mais estreitos foi a proveniente do modelo de Gregory e Fedler. Por outro lado, também foi observado que somente as partições 5/5 forneceram uma curva que tocasse o ponto de maior abertura, que foi de 0,16 m. Ao mesmo tempo, essas partições

desconsideraram os 4 pontos mais baixos da partição 3/3, tendo intervalos de aplicação reduzidos. Na verdade, foi possível notar na Figura 17 que quanto mais pontos na partição, mais distante a curva fica do ponto mais elevado.

Baseado no que foi exposto no parágrafo anterior, foi necessário escolher qual característica priorizar: a quantidade de pontos, ou o atendimento ao ponto mais à direita do gráfico. Para isso, foi proposta a seguinte abordagem: foram calculadas as diferenças para o ponto mais à direita, entre a vazão medida e a vazão prevista pela curva. Caso o erro obtido fosse aceitável, seria escolhido o modelo proveniente de uma partição com mais dados. Os resultados estão expostos na Tabela 12.

Tabela 12 – Diferença entre valores medidos e calculados para o ponto de abertura mais alta da comporta.

Partição	Calculado	Medido	Diferença Percentual	Diferença (kg/s)	Diferença (ton/h)
Top 1/3 Gregory e Fedler	37,71	39,59	4,77%	1,89	6,80
Top 1/4 Fowler e Glastonbury	38,28	39,59	3,32%	1,31	4,73
Top 1/4 ASABE	38,28	39,59	3,32%	1,31	4,73

Fonte: elaborado pelo autor.

A princípio, se observada na escala percentual, a diferença obtida para as 3 partições parece pequena. Entretanto, exibindo essa diferença em ton/h, foi entendido que não se poderia utilizar esses modelos efetivamente. Isso porque, caso utilizada a equação prevista por eles para aplicar a carga de vazão nominal da linha, seria necessário abrir a comporta mais do que foi aberto durante o experimento. Nessas condições se estaria assumindo o risco de enviar para a linha uma vazão de trigo maior do que a capacidade de alguns dos equipamentos dela, e conseqüentemente, gerar entupimentos.

Para a utilização dos equipamentos em condições de baixa carga, por outro lado, seria importante a utilização de um modelo diferente, com maior adequação ao intervalo de dados mais à esquerda no gráfico. Com isso em mente, seria interessante avaliar a utilização de mais de um modelo, para intervalos diferentes de vazão. A Tabela 13 mostra a relação entre os modelos Top 1/3 de Gregory e Fedler e Top 1/5 de Beverloo com os dados medidos, e entre si.

Tabela 13 – Diferença entre valores obtidos para as partições de Beverloo 5/5 e de Gregory e Fedler 3/3 e os dados experimentais.

Abertura da Comporta (m)	Vazão medida (kg/s)	Vazão Beverloo 5/5 (kg/s)	Diferença entre vazão medida e Calculada (Beverloo)	Vazão G & F 3/3 (kg/s)	Diferença entre vazão medida e Calculada (G & F)
0,118	23,736	20,409	14,01%	23,659	0,33%
0,125	26,067	23,265	10,75%	25,795	1,04%
0,131	27,144	25,782	5,02%	27,674	1,95%
0,132	27,763	26,208	5,60%	27,992	0,83%
0,137	28,893	28,360	1,84%	29,597	2,44%
0,142	30,447	30,550	0,34%	31,232	2,58%
0,149	33,679	33,678	0,00%	33,570	0,32%
0,155	36,622	36,411	0,57%	35,618	2,74%
0,161	39,594	39,190	1,02%	37,706	4,77%

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 13 foi notado que nas aberturas de 118 a 132 mm (pontos desconsiderados para a partição de Beverloo), o modelo de Gregory e Fedler se aproximou bastante dos dados experimentais. A partir de 137 mm, todos os pontos foram melhor atendidos pela partição de Beverloo.

Dessa forma, foi proposta a seguinte aplicação para os pontos englobados pela partição Top 1/3: Para os 9 pontos, os 5 correspondentes a abertura maior deverão utilizar a equação conforme dito por Beverloo, e os 4 menores a proposta por Gregory e Fedler.

Dessa forma, restam os demais intervalos com os dados não presentes na partição Top 1/3. Das regressões presentes na Tabela 11, somente as 5 últimas possuem pontos nesse intervalo. Esses pontos correspondem a partição Mid 1/3, já que conforme apresentado na Tabela 10, todos as sessões “Bot” e “Bmid” foram desconsideradas.

Dentre as 5 partições mencionadas no parágrafo anterior, descarta-se inicialmente a partição “Geral” de Gregory e Fedler, pois, dado que os pontos mais baixos do gráfico foram desconsiderados, não seria coerente utilizar uma partição que toma esses valores como corretos.

Dessa forma restam 2 partições “Mid” e 2 “Tmid” de Gregory e Fedler. A Tmid 1/5 de Gregory e Fedler possui, como exibido na Tabela 3, somente 1 ponto coincidente com a Mid 1/3, não sendo uma boa partição para tentar representar esse intervalo. Dentre as 3 partições restantes, a que atende mais dados no intervalo, e atingiu maior R^2 , foi a própria Mid 1/3 de Gregory e Fedler. Consequentemente, sua regressão foi escolhida para atender esse intervalo de dados.

Convertendo as partições em faixas de aplicação para suas regressões foram obtidas as seguintes relações:

Para vazões desejadas maiores ou iguais a 28,3 kg/s:

$$Q = 1,08 \rho A' \sqrt{g D_h'} \quad (14)$$

Sendo:

$$A' = (0,350 - 12,09 * d_p)(ab - 12,09 * d_p) \quad (15)$$

e

$$D_h' = \frac{4(0,350 - 12,09 * d_p)(ab - 12,09 * d_p)}{2(0,350 + ab - 2 * 12,09 * d_p)} \quad (16)$$

Já para vazões desejadas entre 23,68 e 28,3 kg/s:

$$Q = \frac{\pi}{16} \frac{g \rho^2}{656} \left(\sqrt{\frac{4 * 0,350 * ab}{\pi i}} \right)^3 \quad (17)$$

E para vazões entre 16,51 e 23,68 kg/s:

$$Q = \frac{\pi}{16} \frac{g \rho^2}{596} \left(\sqrt{\frac{4 * 0,350 * ab}{\pi i}} \right)^3 \quad (18)$$

Assim, foi possível realacionar valores de abertura da comporta e vazões resultantes. Para as faixas atendidas por equações do modelo de Gregory e Fedler, é possível obter uma abertura em função da vazão desejada com certa facilidade. Contudo, devido à

complexidade da equação de Beverloo, para fazer o mesmo procedimento para sua faixa, é necessária a utilização de métodos iterativos.

6 CONCLUSÃO

Dos cinco modelos estudados, foram definidas 3 faixas de aplicação, contemplando vazões 16,50 a 39,60 kg/s, a partir das equações que mais se adequaram aos dados medidos. O fator de ajuste R^2 mínimo para os modelos foi de 0,8653, para os pontos de vazão mais baixa.

O valor máximo medido equivale a 142,6 t/h, que é 95% da capacidade nominal da linha. Dessa forma seria possível extrapolar ainda a última faixa até uma vazão de 40,5 kg/s, que equivale a 97% da capacidade nominal da linha, sem grandes riscos de entupimento.

A presença da tubulação abaixo do silo e os limites de medição do visor do *redler* se mostraram como dificuldades no processo de adequação dos dados. A tubulação gerando uma provável influência sobre o arrasto no escoamento, o que justificaria alguns coeficientes com valores diferentes das faixas definidas pela literatura. E o visor gerando influência sobre as medições de vazão, de forma que parte dos dados coletados foi desconsiderada.

Para trabalhos futuros, poderia ser definida uma função sigmoide para unificar os três modelos, incluindo um fator dependente da abertura da comporta, que regulasse o nível de influência de cada equação, de acordo com suas faixas de aplicação.

7 REFERÊNCIAS

AMBROSE, R. K.; JAN, S.; SILIVERU, K. A review on flow characterization methods for cereal grain-based powders. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 2, p. 359–364, 2016.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **ASAE D274.1: Flow of Grain and Seeds Through Orifices**. R2017. ed. [s.l.] American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1992.

BEVERLOO, W. A.; LENIGER, H. A.; VELDE, J. VAN DE. The Flow of Granular Solids Through Orifices. **Chemical Engineering Science**, 1961.

BHISE, S. R.; KAUR, A.; MANIKANTAN, M. R. Moisture Dependent Physical Properties of Wheat Grain (PBW 621). **International Journal of Engineering Practical Research**, v. 3, n. 2, p. 40, 2014.

BUCKLIN, R. et al. **Grain Storage Systems Design**. [s.l: s.n.].

CHANG, C. S.; CONVERSE, H. H. Flow Rates of Wheat and Sorghum through Horizontal Orifices. p. 300–304, 1987.

DURAN, J. **Sands, Powders, and Grains**. [s.l: s.n.].

FEDLER, C. B. Mathematical models describing the flow of granular material. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 11, n. 1959, p. 510–513, 1988.

FEDLER, C. B.; GREGORY, J. M. Material Property Effects on Granular Flow Through Orifices. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. January 1989, p. 263–266, 1989.

FOWLER, R. T.; GLASTONBURY, J. R. The flow of granular solids through orifices. **Chemical Engineering Science**, 1959.

GREGORY, J. M.; FEDLER, C. B. Equation Describing Granular Flow Through Circular Orifices. **Transactions of the ASABE**, v. 30, n. 2, p. 529–532, 1987.

JANSSEN, H. A. Versuche über Getreidedruck in Silozellen. **Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure**, v. 39, n. 35, p. 1045–1049, 1895.

KIBAR, H. Determining the Functional Characteristics of Wheat and Corn Grains Depending on Storage Time and Temperature. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 40, n. 4, p. 749–759, 2016.

KULWIEC, R. A. **Materials Handling Handbook**. [s.l: s.n.].

MANKOC, C. et al. The flow rate of granular materials through an orifice. **Granular Matter**, v. 9, n. 6, p. 407–414, 2007.

NEDDERMAN, R. M. et al. The flow of granular materials-I. Discharge rates from hoppers. **Chemical Engineering Science**, v. 37, n. 11, p. 1597–1609, 1982.

NEDDERMAN, R. M. **Statics and kinematics of granular materials**. Cambridge: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1992. v. 1

SPERL, M. Experiments on corn pressure in silo cells - Translation and comment of Janssen's paper from 1895. **Granular Matter**, v. 8, n. 2, p. 59–65, 2006.