



Ata da sessão pública do Colegiado do PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA (PPEQ), realizada em 15/12/2020 para procedimento de defesa da Dissertação de MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA no. 246, linha de pesquisa Processos e Sistemas Químicos, do candidato JOÃO CARLOS FERREIRA LIMA, matrícula 218121911, intitulada Avaliação hidrodinâmica e transferência de massa de uma coluna recheada para o sistema acetona-água. Às 09:00 do citado dia, virtual, foi aberta a sessão pelo presidente da banca examinadora Prof. Dr. LUIZ CARLOS LOBATO DOS SANTOS, Prof. Dra. SILVANA MATTEDI E SILVA, Prof. Dr. LUIZ MARIO NELSON DE GOIS e Prof. Dr. JOSÉ JAILTON MARQUES. Em seguida foram esclarecidos os procedimentos pelo presidente que passou a palavra ao examinado para apresentação do trabalho de Mestrado. Ao final da apresentação, passou-se à arguição por parte da banca, a qual, em seguida, reuniu-se para a elaboração do parecer. No seu retorno, foi lido o parecer final a respeito do trabalho apresentado pelo candidato, tendo a banca examinadora aprovado o trabalho apresentado, sendo esta aprovação um requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre. Em seguida, nada mais havendo a tratar, foi encerrada a sessão pelo presidente da banca, tendo sido, logo a seguir, lavrada a presente ata, abaixo assinada por todos os membros da banca.



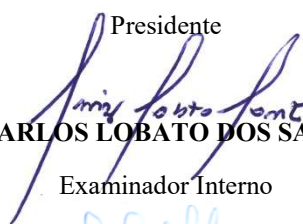
Dr. JOSÉ JAILTON MARQUES, UFS

Examinador Externo à Instituição



Dr. LUIZ MARIO NELSON DE GOIS, UNIFACS

Presidente



Dr. LUIZ CARLOS LOBATO DOS SANTOS, UFBA

Examinador Interno



Dra. SILVANA MATTEDI E SILVA, UFBA

Examinador Interno



JOÃO CARLOS FERREIRA LIMA

Mestrando



FOLHA DE CORREÇÕES

ATA N° 246

Autor: JOÃO CARLOS FERREIRA LIMA

Título: Avaliação hidrodinâmica e transferência de massa de uma coluna recheada para o sistema acetona-água

Banca examinadora:

Prof. JOSÉ JAILTON PEREIRA MARQUES	Examinador Externo à Instituição	_____
Prof. LUIZ MARIO NELSON DE GOIS	Presidente	_____
Prof. LUIZ CARLOS LOBATO DOS SANTOS	Examinador Interno	_____
Prof. SILVANA MATTEDI E SILVA	Examinador Interno	_____

Os itens abaixo deverão ser modificados, conforme sugestão da banca

1. INTRODUÇÃO
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
3. METODOLOGIA
4. RESULTADOS OBTIDOS
5. CONCLUSÕES

COMENTÁRIOS GERAIS:

Declaro, para fins de homologação, que as modificações, sugeridas pela banca examinadora, acima mencionada, foram cumpridas integralmente.

Prof. LUIZ MARIO NELSON DE GOIS

Orientador



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA E TRANSFERÊNCIA DE MASSA
EM UMA COLUNA DE ABSORÇÃO RECHEADA PARA O SISTEMA
ACETONA-ÁGUA

JOÃO CARLOS FERREIRA LIMA

SALVADOR
2020

JOÃO CARLOS FERREIRA LIMA

**AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA E TRANSFERÊNCIA DE MASSA EM UMA
COLUNA DE ABSORÇÃO RECHEADA PARA O SISTEMA ACETONA ÁGUA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal da Bahia, como requisito final à obtenção do título de Mestre sob orientação do Prof. Dr. Luiz Mário Nelson de Góis e coorientação da Profa. Dra. Silvana Mattedi e Silva.

**SALVADOR
2020**

Lima, João Carlos Ferreira

AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA E TRANSFERÊNCIA DE MASSA EM UMA COLUNA DE ABSORÇÃO RECHEADA PARA O SISTEMA ACETONA-ÁGUA

Orientador: Prof. Dr. Luiz Mário Nelson de Góis.

Coorientadora: Profa. Dra. Silvana Mattedi e Silva

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2020.

1. Hidrodinâmica - estudo. 2. Coluna de Absorção. I. Góis, Luiz Mário Nelson de. II. Mattedi, Silvana. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Avaliação hidrodinâmica e transferência de massa em uma coluna de absorção para o sistema acetona água.

TERMO DE APROVAÇÃO

**AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA E TRANSFERÊNCIA DE MASSA EM
UMA COLUNA DE ABSORÇÃO RECHEADA PARA O SISTEMA
ACETONA-ÁGUA**

JOÃO CARLOS FERREIRA LIMA

DISSERTAÇÃO APROVADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA QUÍMICA PELA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, A QUAL TEVE A SEGUINTE
BANCA EXAMINADORA:

Prof^o. Dr^o. Luiz Mário Nelson de Góis

Doutor em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Universidade Federal da Bahia (UFBA)

Prof^a. Dra. Silvana Mattedi e Silva

Doutora em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Universidade Federal da Bahia (UFBA)

Prof^o. Dr^o. José Jailton Marques

Doutor em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Prof^o. Dr^o. Prof^o. Dr^o. Luiz Carlos Lobato dos Santos

Doutor em Engenharia Química, University of Manchester, Inglaterra.
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Salvador, 2020.

AGRADECIMENTOS

A Deus, o maior e melhor Engenheiro do Universo, por tudo, principalmente por ter me dado saúde e essa ótima oportunidade. Aos meus amigos do mundo espiritual, que me auxiliam e me encaminham sempre para o lado do amor e da caridade. À minha família, como não somos nada sem uma base, agradeço pelo amor e nos bons exemplos.

Aos meus Colegas de pós, Fernanda Ganem, Alane Pinto, Isabela Sales, Fabio, Jarlon Costa, Gabriel e Fabio Costa, pela colaboração na realização deste trabalho, pelo apoio, pelas boas risadas... Em especial, agradeço a Jarlon, por estar presente no desenvolvimento das atividades do início ao fim, ajudando nas orientações e até mesmo na ajuda de desenvolvimento de todas as etapas do trabalho.

A minha Co-orientadora Silvana Mattedi, agradeço por tudo que me ensinou, pelo exemplo de ética profissional. Agradeço de coração pelas horas que gastou conversando comigo, me tornando um profissional melhor.

E em principal ao Orientador Luiz Mario, exemplo de profissional.

À Universidade Federal da Bahia, pela formação profissional, à CAPES, pela bolsa de estudo; e a todos os meus mestres professores por toda a disponibilidade.

RESUMO

O presente estudo relaciona dados hidrodinâmicos e análise do comportamento de transferência de massa em uma coluna de absorção gasosa com recheio do tipo anéis de Raschig de vidro. A hidrodinâmica de coluna recheada é entendida como todo comportamento do escoamento das fases no seu interior, tendo as diversas variedades de vazões das fases, velocidade de agitação e até mesmo da geometria do sistema. Dessa forma, o intuito foi estudar a aplicação de coluna de absorção para o tratamento de gases, como compostos orgânicos voláteis, descrevendo as perdas de carga e definições de parâmetros para esta aplicação. No conjunto experimental inicial, as análises foram feitas por um sistema líquido-gás (água-ar), utilizando a correlações com base na literatura para o teste em leito seco, e para o leito molhado a exemplo do método de Prahl (1970), onde foram testados 5 valores de vazão de água na faixa entre 0,72 L/min a 1,41 L/min, enquanto que as vazões de ar, desta etapa, teve como base as mesmas que tinham sido utilizadas nos testes com leito seco, totalizando 45 experimentos. Finalizado o procedimento hidrodinâmico, foi iniciado o processo de transferência de massa, sendo possível encontrar regiões experimentais, a partir da metodologia de superfície de resposta (MSR), utilizado para avaliar os fatores que influenciam na variável resposta da concentração de acetona em água. Para esse segundo grupo experimental, relacionado com transferência de massa, utilizou-se um planejamento estatístico fracionado com mais três repetições no ponto central (PC), totalizando 19 experimentos, contando como parâmetro a vazão da fase leve (Q_d), a vazão da fase pesada (Q_c), temperatura (T) e tempo (t), consideradas variáveis independentes. Com a hidrodinâmica realizada, foram determinadas as condições operacionais ótimas para o sistema, como vazões de entrada da fase líquida e gasosa, e perdas de carga. Três regiões de operação foram encontradas, bem como o ponto crítico de operação, onde ocorre a estabilização da diferença de pressão na coluna. Obtido também o ponto de inundação e o ponto de carga situados entre 3,0 e 4,0 L/min das vazões molares de ar. Por fim, um modelo empírico foi desenvolvido com o intuito de correlacionar a queda de pressão da coluna com os parâmetros operacionais. Com esse modelo, percebeu-se uma diminuição média dos erros de 15%, quando feito comparação de resultados pelo método de Prahl (1970) utilizado. Após o procedimento de transferência de massa, e a realização do planejamento experimental, a MSR trouxe informações fundamentais que ajudaram no entendimento do processo de absorção, como exemplo do perfil significativo da interação das variáveis Q_d e Q_c , apresentando um salto maior, em comparação às outras combinações. Com a MSR estudada foi desenvolvida duas outras equações empíricas, agora objetivada para encontrar valores de concentração de acetona em água e taxa de remoção de acetona. Dessa forma, compilar as informações obtidas pelo estudo hidrodinâmico juntamente com os dados obtidos na transferência de massa, serviu como base de dados comportamental para a coluna, sendo possível assim o desenvolvimento de duas novas equações empíricas, bem como comprovar a eficácia dos métodos de análises expostos na literatura com base na comparação de resultados. Esse estudo trouxe uma oportunidade de continuidade ao projeto de tratamento de gases, como previsto no projeto geral da pesquisa.

ABSTRACT

The present study relates hydrodynamic data and analysis of the mass transfer behavior in a gas absorption column with glass Raschig ring type packing. The hydrodynamics of a packed column is understood as all the behavior of the flow of phases inside it, with the various varieties of phase flow rates, stirring speeds and even the geometry of the system. Thus, the intention was to study the application of absorption column for the treatment of gases, such as volatile organic compounds, describing the pressure drop and parameter definitions for this application. In the initial experimental set, the analyses were made by a liquid-gas system (water-air), using the correlations based on the literature for the dry bed test, and for the wet bed, following the Prahls (1970) method, where 5 values of water flow rate were tested in the range from 0.72 L/min to 1.41 L/min, while the air flow rates, in this step, were based on the same ones that had been used in the dry bed tests, totaling 45 experiments. Once the hydrodynamic procedure was finished, the mass transfer process was started, and it was possible to find experimental regions, from the response surface methodology (RSM), used to evaluate the factors that influence the response variable of acetone concentration in water. For this second experimental group, related to mass transfer, a fractional statistical planning was used with three more repetitions in the central point (CP), totaling 19 experiments, counting as parameters the light phase flow rate (Q_d), the heavy phase flow rate (Q_c), temperature (T) and time (t), considered as independent variables. With the hydrodynamics performed, the optimal operational conditions for the system were determined, such as liquid and gas phase inlet flow rates, and head losses. Three operating regions were found, as well as the critical operating point, where the pressure difference in the column stabilizes. Also obtained were the flood point and the loading point situated between 3.0 and 4.0 L/min of the molar air flow rates. Finally, an empirical model was developed in order to correlate the column pressure drop with the operational parameters. With this model, it was noticed an average decrease of errors of 15%, when comparing results by the method of Prahls (1970) used. After the mass transfer procedure, and carrying out the experimental planning, MSR brought fundamental information that helped in the understanding of the absorption process, as an example of the significant profile of the interaction of the variables Q_d and Q_c , presenting a greater leap, in comparison to the other combinations. With the studied MSR two other empirical equations were developed, now aimed at finding values of acetone concentration in water and acetone removal rate. Thus, compiling the information obtained by the hydrodynamic study along with the data obtained in the mass transfer, served as a behavioral database for the column, thus making it possible to develop two new empirical equations, as well as to prove the effectiveness of the analysis methods exposed in the literature based on the comparison of results. This study brought an opportunity for continuity to the gas treatment project, as planned in the research general project.

SUMÁRIO

<u>1</u>	<u>INTRODUÇÃO</u>	<u>16</u>
<u>2</u>	<u>OBJETIVOS</u>	<u>20</u>
2.1	OBJETIVO GERAL	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
<u>3</u>	<u>REVISÃO DA LITERATURA</u>	<u>22</u>
3.1	OS ASPECTOS TEÓRICOS DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA	22
3.1.1	OPERAÇÕES UNITÁRIAS COM TRANSFERÊNCIA DE MASSA	23
3.1.2	MODELO TEÓRICO PARA TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA INTERFACE GÁS-LÍQUIDO.	23
3.2	ASPECTOS TEÓRICOS DO PROCESSO DE ABSORÇÃO GASOSA	24
3.2.1	COLUNAS DE ABSORÇÃO	25
3.2.1.1	TIPOS DE COLUNA DE ABSORÇÃO	25
3.2.2	COLUNAS DE RECHEIO PARA ABSORÇÃO	27
3.2.2.1	CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO PARA UMA COLUNA DE ABSORÇÃO.	30
3.2.3	COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA DO LADO LÍQUIDO (K_{LA}) PARA COLUNA DE RECHEIO	32
3.3	ASPECTOS HIDRODINÂMICOS DE COLUNAS DE ABSORÇÃO	36
3.3.1	COLUNAS RECHEADAS	36
3.3.1.1	PERDA DE CARGA EM COLUNAS DE RECHEIO	37
3.3.2	MODELAGEM MATEMÁTICA PARA CÁLCULO DE PERDA DE CARGA PARA TORRES DE RECHEIO RANDÔMICO	40
3.3.2.1	MÉTODOS ANALÍTICOS	41
3.3.2.2	MÉTODOS GRÁFICOS (CGQP)	43
<u>4</u>	<u>MATERIAIS E MÉTODOS</u>	<u>47</u>
4.1	O EQUIPAMENTO	47
4.2	PROCEDIMENTO OPERACIONAL	50
4.3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	55
<u>5</u>	<u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	<u>58</u>

5.1	INUNDAÇÃO E PONTOS DE CARGA	58
5.1.1	VAZÕES DE INUNDAÇÃO E DE CARGA	65
5.1.2	ESTUDO DA DIFERENÇA DE PRESSÃO ($\Delta P/z$)	71
5.1.2.1	A DIFERENÇA DE PRESSÃO MEDIDA EXPERIMENTALMENTE E A CALCULADA	71
5.1.2.2	O ESTUDO DO EFEITO DA VAZÃO DE AR (Q_D) NA DIFERENÇA DE PRESSÃO	75
5.1.2.3	ANÁLISE DIMENSIONAL	76
5.2	RESULTADOS REFERENTE AOS COEFICIENTES VOLUMÉTRICOS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA DO LADO LÍQUIDO (K_{LA})	84
5.3	O MÉTODO EMPÍRICO PARA TRANSFERÊNCIA DE MASSA	91
5.3.1	INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA CONCENTRAÇÃO DE ACETONA EM ÁGUA	91
6	CONCLUSÕES	116

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1- TEORIA DA DUPLA RESISTÊNCIA, FONTE: (GREANKOPLIS,1993)	23
FIGURA 2- COLUNA ILUSTRATIVA TIPO “SPRAY”(FONTE: REVELLO,1998)	26
FIGURA 3 – COLUNA ILUSTRATIVA TIPO BOLHA. (FONTE: REVELLO,1998)	26
FIGURA 4- COLUNA NO TIPO PRATO (FONTE: BETAEQ, 2015)	27
FIGURA 5- COLUNA NO TIPO EMPACOTADA (FONTE: REVELLO,1998)	27
FIGURA 6- ILUSTRAÇÃO DO CONTATO ENTRE FASE LEVE E PESADA CONFORME UMA COLUNA RECHEADA POR ANÉIS DE RASCHIG. (FONTE: ADAPTADO DE ECO-EDUCACIONAL, 2015)	28
FIGURA 7- RECHEIOS RANDÔMICOS: (A) ANÉIS DE RASCHIG, (B) SELA INTALOX, (C) ANÉIS DE PALL, (D) ANEL ESPIRALADO CYCLOHELIX, (E) SELA DE BERL, (F) ANEL DE LESSING E (G) ANEL QUARTELADO (CREMASCO, 2002).	29
FIGURA 8 - CORRENTE DE CONTATO NUMA COLUNA DE ABSORÇÃO. – (FONTE: :ADAPTADO DE LEITE ET AL., 2005)	31
FIGURA 9 – GRÁFICO ESQUEMÁTICO DE UMA TORRE ABSORVEDORA –(FONTE: ADAPTADO CHEN, 1964.)	32
FIGURA 10– GRÁFICO ESQUEMÁTICO DE UMA ANÁLISE DEPERDA DE CARGA PARA UMA COLUNA RECHEADA FONTE ADAPTADO DE CALDAS ET AL., 2003; E RAZI ET AL., 2012.	38
FIGURA 11- DETERMINAÇÃO DO PONTO DE CARREGAMENTO E ALAGAMENTO - (FONTE: ADAPTADO DE GUILLERM ET AL.,2016)	39
FIGURA 12- CGQP PARA LEITOS COM RECHEIOS RANDÔMICOS, PROPOSTA POR SHERWOOD, LEVA E ECKERT (SLE) (FONTE: CALDAS ET AL., 2003).	43
FIGURA 13- CGQP PROPOSTA POR NORTON (1977). (FONTE: CALDAS ET AL., 2003)	44
FIGURA 14 COLUNA DE ABSORÇÃO RECHEADA COM ANÉIS DE RASCHIG - FONTE : PRÓPRIO AUTOR	48
FIGURA 15- BANCADA MULTIPRÓSITO – COLUNA DE ABSORÇÃO CONTÍNUA: LÍQUIDO-GÁS – LEITO FIXO COM RECHEIO (1), BOMBA PERISTÁLTICA (2), MANÔMETRO TUBO EM U (3), ROTÂMETRO (4). FONTE : PRÓPRIO AUTOR	48
FIGURA 16 - APARATO EXPERIMENTAL PARA TESTES HIDRODINÂMICOS.	49
FIGURA 17 -ESQUEMA DO APARATO EXPERIMENTAL PARA A TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA COLUNA (ÁGUA / AR + ACETONA)	52
FIGURA 18-- BANCADA– COLUNA DE ABSORÇÃO CONTÍNUA: LÍQUIDO-GÁS – LEITO FIXO COM RECHEIO (1), ROTÂMETRO (2), COLUNA DE ADSORÇÃO COM SÍLICA (3), SATURADOR DE AR (4), PAINEL DO LEITOR DE TEMPERATURA (5), TRANSFORMADOR DE VOLTAGEM (6), BORBULHADOR (7) FONTE : PRÓPRIO AUTOR	53
FIGURA 19 - GRÁFICOS REPRESENTANDO A CURVA EXPERIMENTAL DO TESTE SECO (■), PARA VAZÕES DE AR ADICIONADO AO SISTEMA, DETERMINADO PELA CORRELAÇÃO DE ERGUN, EQUAÇÃO (13).	59

FIGURA 20 - GRÁFICOS REPRESENTANDO A CURVA EXPERIMENTAL DO TESTE SECO (■), PARA VAZÕES DE AR ADICIONADO AO SISTEMA, DETERMINADO PELA CORRELAÇÃO DE ERGUN, EQUAÇÃO 13, ONDE EM CONTÉM A REPOSTA PREVISTA PELO MODELO (_).	60
FIGURA 21 - GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE A CURVA DO TESTE SECO (■), COM AS CURVAS CRIADAS PARA OS TESTES MOLHADOS DETERMINADO PELO MÉTODO PRAHL, PARA ESTUDO DA QUEDA DE PRESSÃO.	62
FIGURA 22 - GRÁFICO DA PERDA DE CARGA VERSUS VAZÃO DE AR PARA DIFERENTES VALORES DE VAZÕES DE ÁGUA	63
FIGURA 23 - VARIAÇÃO DA QUEDA DE PRESSÃO COM A RAZÃO ENTRE AS VAZÕES, Q_C / Q_D	64
FIGURA 24(A) - COMPORTAMENTO DA DIFERENÇA DE PRESSÃO PARA FIXAÇÃO DA VAZÃO DE ÁGUA EM 0,72 L/MIN.	66
FIGURA 25 - AS CURVAS DE CARGA E DE INUNDAÇÃO E AS REGIÕES DE OPERAÇÃO	70
FIGURA 26 - GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE OS VALORES PERDA DE CARGA EXPERIMENTAIS E OS CALCULADOS, PELO MÉTODO PRAHL.	73
FIGURA 27- ERRO RELATIVO AO NÚMERO DE EULER ENTRE OS VALORES EXPERIMENTAIS E CALCULADOS.	80
FIGURA 28 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO COMPORTAMENTO DO K_La COM O AUMENTO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL U_L PARA EQUAÇÃO 4 A 12, EXCETO A 11.	87
FIGURA 29- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO COMPORTAMENTO DO K_La COM O AUMENTO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL U_L PARA EQUAÇÃO 11	88
FIGURA 30- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO COMPORTAMENTO DO K_La COM O AUMENTO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL U_G PARA EQUAÇÃO 14 A 19	90
FIGURA 31 - SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS MOSTRANDO A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ACETONA EM ÁGUA COM COM O TEMPO E A VAZÃO DA FASE DISPERSA FIXADAS NO PONTO CENTRAL EM VALORES CODIFICADOS	99
FIGURA 32 - SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS MOSTRANDO A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ACETONA EM ÁGUA COM O TEMPO E A TEMPERATURA FORAM FIXADOS NO PONTO CENTRAL EM VALORES CODIFICADOS	100
FIGURA 33- SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS MOSTRANDO A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ACETONA EM ÁGUA A VAZÃO DA FASE DISPERSA E A TEMPERATURA FORAM FIXADOS NO PONTO CENTRAL EM VALORES CODIFICADOS	101
FIGURA 34- SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS MOSTRANDO A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ACETONA EM ÁGUA A VAZÃO DA FASE CONTÍNUA E O TEMPO FORAM FIXADOS NO PONTO CENTRAL EM VALORES CODIFICADOS	102
FIGURA 35 - SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS MOSTRANDO A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ACETONA EM ÁGUA A VAZÃO DA FASE CONTÍNUA E A TEMPERATURA FORAM FIXADOS NO PONTO CENTRAL EM VALORES CODIFICADOS.	104

FIGURA 36- SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS MOSTRANDO A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ACETONA EM ÁGUA A VAZÃO DA FASE CONTÍNUA E A VAZÃO DA FASE DISPERSA FORAM FIXADAS NO PONTO CENTRAL EM VALORES CODIFICADOS.	105
FIGURA 37- COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES A CONCENTRAÇÃO DE ACETONA EM ÁGUA EXPERIMENTAIS E OS CALCULADOS PELA EQUAÇÃO 40.	106
FIGURA 38 - GRÁFICO DE PARETO PARA INTERAÇÕES DE PARÂMETROS NA COLUNA DE ABSORÇÃO NA OBTENÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE ACETONA EM ÁGUA.	107
FIGURA 39 - SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS MOSTRANDO A VARIAÇÃO DA REMOÇÃO, ONDE A VAZÃO DA FASE DISPERSA E O TEMPO FORAM FIXADOS NO PONTO CENTRAL	109
FIGURA 40- SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS MOSTRANDO A VARIAÇÃO DA REMOÇÃO, ONDE A VAZÃO DA FASE CONTÍNUA E O TEMPO FORAM FIXADOS NO PONTO CENTRAL	109
FIGURA 41- SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS MOSTRANDO A VARIAÇÃO DA REMOÇÃO PARA VAZÃO DA FASE CONTÍNUA E A VAZÃO DA FASE DISPERSA FIXADAS NO PONTO CENTRAL	110
FIGURA 42- SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS MOSTRANDO A VARIAÇÃO DA REMOÇÃO PARA O TEMPO E A TEMPERATURA FIXADAS NO PONTO CENTRAL EM VALORES CODIFICADOS	111
FIGURA 43- SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS MOSTRANDO A VARIAÇÃO DA REMOÇÃO PARA A VAZÃO DA FASE DISPERSA E A TEMPERATURA FIXADAS NO PONTO CENTRAL	112
FIGURA 44- SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS MOSTRANDO A VARIAÇÃO DA REMOÇÃO PARA A VAZÃO DA FASE DISPERSA E A TEMPERATURA FIXADOS NO PONTO CENTRAL EM VALORES CODIFICADOS	112
FIGURA 45 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE TAXA DE REMOÇÃO ENTRE OS VALORES EXPERIMENTAIS E OS CALCULADOS PELA EQUAÇÃO 41	113
FIGURA 46 - GRÁFICO DE PARETO PARA INTERAÇÕES DE PARÂMETROS NA COLUNA DE ABSORÇÃO NA OBTENÇÃO DE REMOÇÃO ENTRE VALORES DE ENTRADA E SAÍDA DE MASSA DE ACETONA	114

INDICE DE TABELAS

TABELA 1 -FAIXA DE PROPRIEDADES DOS SISTEMAS PARA A NOVA CORRELAÇÃO DIVULGADA POR NORTON (1977) (FONTE: CALDAS ET AL., 2003).	45
TABELA 2 -CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA COLUNA E DO RECHEIO (ANÉIS DE RASCHIG).	47
TABELA 3-DADOS COLETADOS DE ABSORBÂNCIA FRENTE A VALORES DE CONCENTRAÇÃO DE ACETONA EM ÁGUA PREDETERMINADAS.	54
TABELA 4 -VARIÁVEIS INDEPENDENTES E SEUS NÍVEIS (COMBINAÇÕES PARA 4 VARIÁVEIS - FATORIAL COMPLETO + Pc)	56
TABELA 5 - RESULTADOS OBTIDOS COM OS TESTES SECOS	59
TABELA 6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE QUEDA DE PRESSÃO OBTIDOS COM OS TESTES MOLHADOS.	61
TABELA 7 - VAZÕES E QUEDAS DE PRESSÃO PARA OS PONTOS DE CARGA E DE INUNDAÇÃO	70
TABELA 8 -DADOS DE QUEDAS DE PRESSÃO EXPERIMENTAIS $\Delta P/Z$ (PA/M)	71
TABELA 9-DADOS DA QUEDA DE PRESSÃO CALCULADA $\Delta P/Z$ (PA/M) SEGUNDO AS VAZÕES DA FASE LÍQUIDA	72
TABELA 10 -DADOS DE DIFERENÇA DE PRESSÃO $\Delta P/Z$ (PA/M) PARA A MUDANÇA DE VAZÃO DE AR	75
TABELA 11 - PARÂMETROS PARA ANÁLISE DIMENSIONAL.	78
TABELA 12-COMPARAÇÃO DE VALORES DO NÚMERO DE EULER, PARA OS ENSAIOS REALIZADOS.	81
TABELA 13-COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE DIFERENÇA DE PRESSÃO $\Delta P/Z$ (PA/M) EXPERIMENTAL COM EQUAÇÃO EMPÍRICA E MÉTODO DE PRAHL(1970).	83
TABELA 14- VALORES ENCONTRADOS DE $K_L a$ PARA EQUAÇÃO 4 11 E 12 CORRELACIONADA AS VAZÕES SISTÊMICAS.	85
TABELA 15 - VALORES ENCONTRADOS DE $K_L a$ PARA EQUAÇÃO 5, 6, 7, 8, 9 E 10 CORRELACIONADA ÀS VAZÕES SISTÊMICAS	86
TABELA 16- VALORES ENCONTRADOS DE $k_L a$ PARA EQUAÇÃO 14 A 19 CORRELACIONADA ÀS VAZÕES SISTÊMICAS DE AR	89
TABELA 17 MATRIZ DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL COMPOSTO POR VARIÁVEIS INDEPENDENTES (VALORES REAIS E CODIFICADOS) E VARIÁVEL RESPOSTA (CONCENTRAÇÃO DE ACETONA EM ÁGUA (G/G)).	93
TABELA 18 - TABELA COM VALORES DE REMOÇÃO DE ACETONA POR ENSAIO DO PLANEJAMENTO.	94
TABELA 19 - RESULTADOS DOS COEFICIENTES ENCONTRADOS ATRAVÉS DA ESTIMATIVA DOS EFEITOS DA VAZÃO DA FASE DISPERSA (QD), VAZÃO DA FASE CONTÍNUA (QC) , TEMPERATURA (T) E TEMPO (T) E SEUS VALORES DE P.	96
TABELA 20 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DO MODELO PARA A DETERMINAÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE ACETONA EM ÁGUA.	98

NOMENCLATURA**ARÁBICO**

a	área específica de transferência
a_{int}	área interfacial por unidade de volume
a_p	superfície específica
(AUT)	altura de unidade de transferência
D_p	diâmetro da partícula
d_{pe}	diâmetro equivalente do recheio
d_{32}	diâmetro médio de Sauter
F_p	fator de caracterização do recheio
INU	inundação
g	grama
G	vazão de gás
G'	fluxo mássico de gás
k_L	coeficiente parcial de transferência de massa do lado do líquido
k_x	coeficientes individuais de transferência de massa na fase x
K_x	coeficiente global de transferência de massa na fase pesada
k_y	coeficientes individuais de transferência de massa na fase leve
K_y	coeficiente global de transferência de massa na fase leve
L	vazão de líquido
L'	fluxo mássico de líquido
m	constante de Henry
max	máximo
min	minutos
MIN	mínimo
N_A	fluxo molar do componente A
P_{Ai}	pressão parcial do componente A
Q_c	vazão da fase contínua (fase pesada)
Q_d	vazão da fase dispersa (fase leve)
Re	número de Reynolds
t	tempo
T	temperatura
U_{ar}	Vazão de ar

V_d	volume da fase dispersa
V_c	volume efetivo da coluna
x_A	fração molar na fase pesada do componente A
x_{A^*}	fração molar na fase pesada do componente a no equilíbrio
x_{Ai}	concentração soluto a na fase líquida
x_{Ai^*}	fração molar, na fase pesada, do componente a na interface i
y_A	fração molar na fase leve do componente A
y_{A^*}	fração molar na fase leve do componente a no equilíbrio
y_{Ai}	concentração soluto a na fase gasoso
y_{Ai^*}	fração molar, na fase pesada, do componente a na interface i
z	altura efetiva

GREGOS

ρ_l	massa específica do líquido
ρ_g	massa específica do gás
μ, μ_L	viscosidade do líquido
μ_f	viscosidade do fluido
μ_w	viscosidade da água
$\psi - \rho_{H_2O} \rho_l$	(adimensional);
ϵ_l	porosidade do recheio
ν	viscosidade cinemática do líquido
ϵ	fração de vazios no interior da coluna
ϕ_p	porosidade da partícula
v_0	velocidade do fluido
ϕ_d	holdup da fase dispersa

CAPÍTULO 1

Introdução

1 INTRODUÇÃO

A grande demanda de produção industrial acarretada pelo crescimento populacional desmedido ocasionou, quase sempre, um desenvolvimento visando o lucro, ou seja, crescimento econômico, acarretando algumas problemáticas de cunho ambiental. Foram essas atitudes antropológicas que despertou na sociedade científica uma preocupação referente as questões ambientais oriundas dessas atitudes; visto que suas consequências estão tomando dimensões catastróficas, podendo ser observadas, por exemplo, quanto à variação da qualidade do ar (atmosfera), água (hidrosfera) e solo (litosfera) (CARVALHO, 2015).

Aguiar et al., (2002), descreve poluição como qualquer alteração química, biológica ou física, que interfira e modifique o ciclo biológico normal da fauna e flora do meio. A Sociedade Industrial, que se desenvolveu muito rapidamente a partir do último século, não só como os consome recursos naturais, mas sim como os despejam na própria biosfera, sendo, alguns desses, noviços à saúde do reino animal quanto as do vegetal.

No Brasil, o Ministério do Meio Ambiente – Conselho Nacional do Meio Ambiente, na resolução de nº 430 (CONAMA, 2011), dispõe, também, de informações sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes ao meio ambiente, sendo o órgão encarregado de legislar e fiscalizar sobre os temas do meio ambiente no País. Os processos de tratamentos de efluentes têm uma importância elevada, pois nesses processos existe a preocupação de minimizar impactos decorrentes de lançamento de dejetos no meio ambiente. Há dois motivos básicos para uma empresa trabalhar com tratamento de efluente: se fazer cumprir a lei; e ter visibilidade positiva por ser considerada sustentável. Dessa forma muitas empresas nacionais e internacionais estão interessadas em pesquisas que forneçam soluções práticas para um possível tratamento desses efluentes que são os causadores de danos ao Meio Ambiente.

Sarnighausen (2011) cita um exemplo importante quanto às alterações climáticas ocasionadas pela emissão de gases poluentes, como o CO_2 e o CH_4 , responsáveis pelo efeito - estufa, devido ao uso de fontes de energia fóssil como o petróleo e o gás natural. Tais fontes apresentam ainda compostos derivados do enxofre como o H_2S (sulfeto de hidrogênio) que exige o controle da poluição e medidas de segurança e saúde ocupacional.

Um dado interessante, ainda nesse contexto ambiental, é o processo da pirólise da biomassa, que trata da decomposição química da matéria através do calor (GOLDEMBERG, 2009). Por mais que seja um processo já favorável ao meio ambiente, o gás gerado nesse processo tem em sua

composição o CO_2 (dióxido de carbono), CO (monóxido de Carbono) e o SO_2 (dióxido de enxofre) que são considerados gases ácidos (MELLO, 2013; VILELA, 2014), requerendo tratamento antes de ser lançado na atmosfera. Além disso, também é gerado o gás CH_4 (metano) combustível (KOVÁCS & MEGGYES, 2009), passível de recuperação e aproveitamento. Na sua grande maioria a composição constitui principalmente de metano (CH_4) (45 a 65%), dióxido de carbono (CO_2) (35 a 41%), nitrogênio (N_2) (1 a 17%) e oxigênio (O_2) (< 1%), além de conter, em menor quantidade outros compostos orgânicos que dá a característica do cheiro desagradável ao biogás, como o benzeno e tolueno, aldeídos e cetonas, ácidos graxos voláteis, sulfetos e dissulfetos, amônia e aminas.

Não só no âmbito ambiental, mas quanto a questão diretamente relacionada a saúde humana, quando compostos sejam ele orgânicos ou não, influenciam no bem estar humano, há aí uma problemática a ser tratada. Os compostos orgânicos voláteis (COV), por exemplo, são liberados na atmosfera a partir de processos industriais, levando à poluição atmosférica e representando perigos para os seres humanos (CHIU et al., 2013; HU et al., 2015a). E segundo Hu et al., 2015b, houve um aumento de preocupações do público sobre a qualidade do ar, por conta de problemas de saúde ocasionados por esses compostos, sendo necessário eficaz tecnologias de controle. Em síntese, um COV é facilmente vaporizado nas condições de temperatura e pressão ambiente relativamente comuns no ar.

Compostos orgânicos voláteis são gerados por indústrias de energia, veículos motorizados, utilização de solventes e indústrias químicas e de alimentos, além de fontes naturais como as florestas. Para a saúde humana existem dois principais impactos: sua toxicidade e a sua possibilidade de combinação com óxidos de nitrogênio, formando ozônio. Considerados poluentes perigosos do ar, estão associados ao câncer, bem como de causar problemas neurológicos e de desenvolvimento (HWA et al., 2002 e JEMAL et al., 2011). Segundo Coelho (2014), alguns exemplos de COV's mais frequentemente identificados e as suas respectivas fontes: hidrocarbonetos alifáticos (octano, decano, n-decano, hexano, i-decano) oriundo de tintas, adesivos, gasolina, fontes de combustão, fotocopiadoras com processo líquido, carpetes, linóleo, componentes de calafetagem; a acetona, bastante encontrada em tintas, revestimentos, acabamentos, solvente de tintas, diluidor, calafetagem; os solventes clorados, exemplo dos artigos de limpeza ou de proteção de tapeçaria e carpetes, tintas, solvente de tintas, solventes, fluido de correção, roupas limpas a seco entre outros.

Observando-se essas problemáticas, tanto para os COV's, quanto para os gases ácidos oriundos de processos industriais, alguns métodos de redução de emissões gasosas são implantados. Bastante conhecido na Engenharia Química, a absorção é uma operação eficaz para a redução dessas emissões em diferentes plantas de processos químicos. Dessa forma, nessa pesquisa há o intuito

de estudar parâmetros de uma coluna não conhecida, o qual fornecerá princípios básicos para a operação em trabalhos posteriores do projeto, onde pontos desconhecidos de processos serão encontrados, como a estimativa de perda de carga para as diferentes vazões (líquido-gás) utilizando equações existentes da literatura para estimar esses valores, bem como desenvolver um equação empírica que corresponda diretamente a coluna em estudo, facilitando futuros trabalhos. A metodologia de superfície de resposta foi escolhida para se obter uma outra equação empírica para a coluna, essa com base na transferência de massa, vinculando melhores combinações do sistema operacional para o tratamento dos efluente.

CAPÍTULO 2

Objetivos

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar parâmetros e o comportamento hidrodinâmico de uma coluna de absorção recheada com anéis de Raschig, bem como avaliar o comportamento do processo de absorção, utilizando-se água para absorção de acetona de uma mistura gasosa Ar-CH₃(CO)CH₃ (acetona), através da variação de parâmetros hidrodinâmicos na coluna.

2.2 Objetivos Específicos

- Aplicar correlações e modelos encontrados na literatura para obter parâmetros necessários no intuito de estudar a hidrodinâmica da coluna;
- Identificar na literatura expressões existentes para o cálculo do coeficiente convectivo de transferência de massa do lado do líquido, K_{La} , objetivando estimar o comportamento do parâmetro e comparar com os resultados numéricos encontradas em outros trabalhos;
- Obter os parâmetros para o estudo da transferência de massa para a absorção de acetona em água na coluna de absorção recheada.

CAPÍTULO 3

Revisão da Literatura

3 REVISÃO DA LITERATURA

Esta revisão bibliográfica refere-se aos temas envolvidos em toda a pesquisa e divide-se em duas partes principais: o estudo quanto ao fenômeno de contato entre fases no processo de transferência de massa, e seu contexto em uma coluna de absorção para desenvolvimento prático de um estudo hidrodinâmico em colunas absorção.

3.1 Os aspectos teóricos da transferência de massa

Os aspectos teóricos da transferência de massa têm extrema importância em vários processos, sendo que a transferência de massa é considerada a base de inúmeros processos de separação existentes. À migração de um ou mais componentes entre as fases é o que sintetiza esse fenômeno. Dinâmica dessa transferência está relacionada com o potencial químico das espécies em estudo, que definirá o mecanismo desse processo (CHISTI, 2007). Por Incropera (2014), a transferência de massa é quando a massa está em trânsito, como um resultado de uma diferença de concentrações de uma espécie em mistura. No entanto, há duas vertentes no processo de transferência de massa, que devem ser abordadas. O mecanismo relacionado à difusão molecular e o mecanismo convectivo, ou seja, transferência de massa molecular (TMM) e o transporte de massa por convecção (TMC). A TMC, quando analisado uma mistura de comportamento de fases imiscíveis, e fases parcialmente miscíveis, por exemplo, ocorrendo à transferência de massa por causa da dinâmica do movimento ou do sistema, que depende tanto das características dinâmicas dos componentes migrar quanto suas propriedades de transporte (superfície de um fluido em movimento). E o TMM, definido quando houver dois ou mais compostos moleculares nas diferentes composições relativas, analisando pontualmente o sistema, e assim um processo natural acontece, no sentido de amenizar as desigualdades das composições, no intuito de chegar ao equilíbrio do sistema, independentemente de qualquer convecção no sistema (CHISTI, 2007).

O processo de transferência de massa convectivo, ainda se subdivide em dois outros ramos: o considerado natural e o forçado. Convecção natural, quando a transferência ocorre por diferenças de densidade, e a Convecção Forçada, provocada por um dispositivo externo.

3.1.1 Operações Unitárias com Transferência de Massa

As operações unitárias com transferência de massa e o seu conceito de separação por corrente de contato, são realizados também para o tratamento de efluentes (COSTA 2016; DEZOTTI 2008). A engenharia química, partindo desses princípios, utiliza a transferência de massa, conceituada anteriormente, como a base de uma separação por corrente de contato para tratar determinados efluentes. Exemplificando essas operações unitárias, temos a destilação, a extração, a adsorção e a absorção, que em seu contexto, são utilizadas, também, para esses tratamentos (BARSAL,2005; COSTA 2016; CASTRO 2009; DEZOTTI 2008; ROSU *et al.*, 2007).

3.1.2 Modelo teórico para transferência de massa na interface gás-líquido.

O modelo teórico para transferência de massa na interface gás-líquido é observado usando a clássica teoria da dupla resistência, como pode ser visto na Figura 1, sugerindo que as duas fases estejam em equilíbrio na interface, o que induz a não existência da resistência na interface e que toda transferência de massa ocorra nas duas camadas finas nos dois lados da interface (MADDOX *et al.*, 1996).

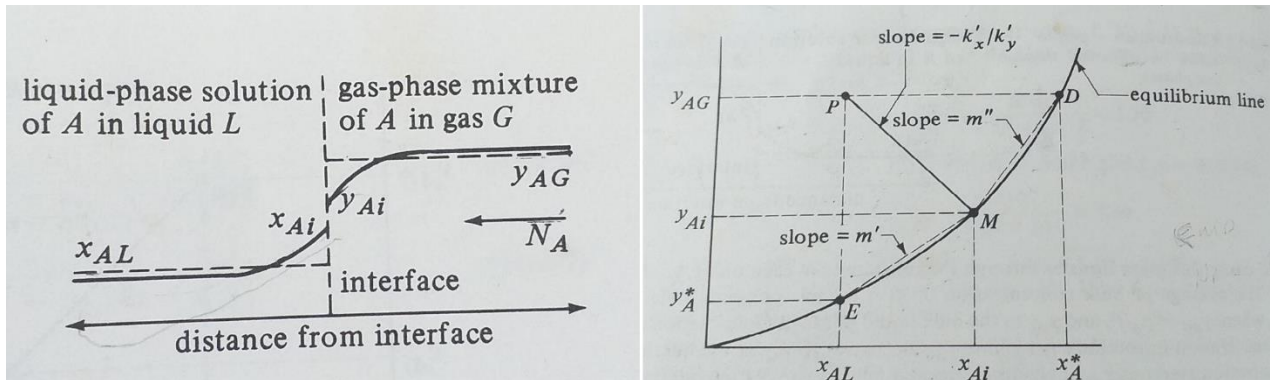


Figura 1- Teoria da dupla resistência, Fonte: (GREANKOPLIS,1993)

A teoria das duas películas para a transferência de massa foi proposta por Lewis e Whitman (1924) e é até então o modelo mais aceito para modelagem comportamental entre o sistema líquido/gás. O modelo sugere que as duas fases, líquida e gasosa, entram em contato, o lado do gás gera uma resistência, e do lado da fase líquida outra resistência, formando uma interface, região que apresenta a camada limite entre elas, chamada também de filme. Suas resistências dependem do tamanho do filme que, por sua vez, dependente da alta ou baixa vazão volumétrica sistêmica (FARIAS, 2015).

Segundo Whitman (1923), a velocidade de transferência de massa é diretamente influenciada pela hidrodinâmica da turbulência interfacial e da coalescência de redispersão das bolhas. A teoria pressupõe a presença de três etapas fundamentais: o componente A no seio gasoso (y_{AG}), se encaminha até a interface, ilustrado na Figura 1, logo após há a transferência de massa de soluto através da interface gás/líquido (y_{Ai} e x_{Ai}), por fim, a massa do soluto é transferida até o seio da fase líquida (x_{AL}).

Segundo Pinto e Prazeres (2008) e Kraakman *et al.* (2011), o coeficiente volumétrico de transferência de massa do lado líquido K_{LA} , se refere simplesmente ao produto entre o coeficiente parcial de transferência de massa do lado do líquido (K_L), com a área específica de transferência (a), ou seja, $K_{LA} = K_L \cdot a$, diferindo do K_L por não haver uma área específica de estudo da troca de massa. Para Kraakman *et al.* (2011), alguns fatores influenciam diretamente no K_{LA} , e não são poucos, como por exemplo a velocidade de contato, o sistema de aeração, tipo de impulsor, temperatura, pressão sistêmica, propriedades físicas e reologias das fases

3.2 Aspectos teóricos do processo de absorção gasosa

O entendimento dos aspectos teóricos do processo de absorção gasosa é compreendido quando se estuda o processo unitário em questão com maior detalhamento. Dessa forma, tem-se a absorção como um dos processos de transferência de massa a qual moléculas de um fluido gasoso, são transferidas de forma seletiva, sendo um ou mais componentes do gás a fim de obter uma solução destes em um líquido. No processo de absorção, as moléculas do gás da sua fase são transferidas para a fase líquida, sendo o processo inverso, ou seja, da fase líquida para a gasosa, a dessorção, também conhecida como “stripping”.

Os processos de absorção podem ser subdivididos em dois grupos, o da absorção por monocomponentes, onde apenas um único componente passa pelo processo de absorção, e a absorção por multicomponentes, onde mais de uma substância passa pelo processo. Um ponto importante a ser considerado para o processo de absorção é o equilíbrio entre as fases de estudo (gás/líquido) A rapidez com o qual o processo de absorção se desenvolve, dependerá de como o componente gasoso interage com o líquido absorvente de contato, e esse depende do desvio do equilíbrio entre as fases. Portanto, é necessário considerar as características do equilíbrio dos componentes de estudo. Atingindo o equilíbrio não há mais transferência de massa efetiva (TREYBAL, 1980).

Convenientemente, os processos de absorção podem ser unicamente físicos ou aqueles nos quais ocorrem reações químicas. A absorção com reação é normalmente utilizado para quem deseja

a remoção completa de um soluto a partir de uma mistura gasosa, e a reação entre o soluto absorvido e o líquido absorvente na fase líquida reduz a pressão parcial de equilíbrio deste soluto, a força motriz por sua vez aumenta (MCCABE *et al.*, 2005). Considerando o projeto operacional, o principal requisito é a capacidade de promover o contato de maneira mais íntima entre as fases, o que acarretará diretamente na eficiência do processo absorptivo (COULSON *et al.*, 1991).

Leite *et al.*(2005), em sua pesquisa realizada sobre a absorção química de dióxido de nitrogênio (NO_2), descreve o processo como fundamental nas indústrias para recuperação e obtenção de compostos com alto valor agregado, igualmente para minimização de poluentes em atmosferas contaminadas. Os autores ainda falam da importância desse processo para a recuperação de produtos gasosos diluídos, como no caso da amônia (NH_3) nele contida e o de dióxido de enxofre (SO_2), em solventes como mono e dietanolamina.

3.2.1 Colunas de absorção

Segundo Treybal (1980), uma coluna de absorção tem como objetivo principal um contato intenso entre as fases do sistema, com o propósito que ocorra uma difusão do componente presente na fase do gás. Nesse processo de absorção são estabelecidas colunas verticais (torres) cilíndricas, cuja configuração interna pode variar, sendo: recheios (randômicos ou estruturados) ou pratos. A principal diferença de desempenho entre as colunas de pratos e as de recheio está relacionada com a hidrodinâmica das fases líquida e gás (KHOL, 1997).

3.2.1.1 Tipos de coluna de absorção

Os tipos de contatos recorrentes em uma coluna de absorção coincidem com os de colunas de destilação, podendo variar entre recheios ou bandejas, conhecidos também como pratos. Muitos são os tipos de colunas para a realização desse processo de separação, tendo como mais relevantes as colunas tipo “spray”, colunas de bolhas, de pratos e as empacotadas. O que define a escolha destas é o comportamento dos componentes a serem separados, quanto à sua solubilidade, bem como da resistência à transferência de massa caracterizada pela fase.

No modelo “spray” a fase pesada (líquida) é alimentada na coluna em forma de gotas muito finas, pulverizadas, chegando ao fundo da coluna pela ação gravitacional, em contracorrente com a fase leve (gás), como ilustrado na Figura 2.



Figura 2– Coluna ilustrativa tipo “spray”(Fonte: REVELLO,1998)

A escolha desse perfil de contato é frequentemente usada nos casos de gases altamente solúveis, e sua resistência na fase gasosa fornece o controle da velocidade de transferência de massa.

Diferente do modelo “spray” citado anteriormente, o funcionamento tem o princípio oposto, neste caso o gás é disperso no interior do líquido, em forma de bolhas, ilustrado na Figura 3

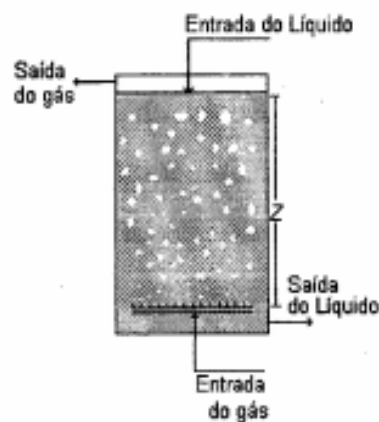


Figura 3 – Coluna ilustrativa tipo bolha. (Fonte: REVELLO,1998)

E a transferência de massa é justamente ocorrida na formação destas bolhas, onde o contato de troca dependerá do tamanho das bolhas e da velocidade do contato.

As colunas tipo pratos (vide ilustração na Figura 4) são as que mantêm maior tempo de contato entre a fase líquida e a gasosa. Segundo Froment *et al.* (1990), em comparação às colunas recheadas, são as mais utilizadas no processo de absorção química, devido ao elevado tempo de contato entre as fases, e o grande coeficiente e transferência de massa.

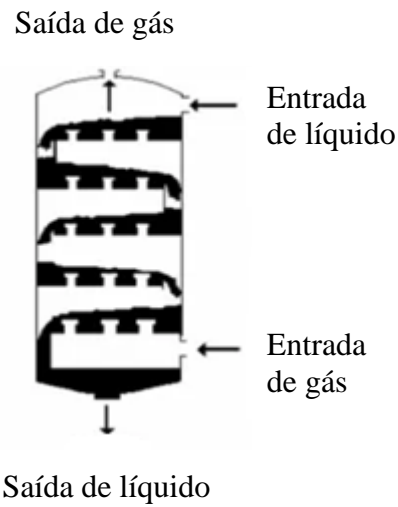


Figura 4- Coluna no tipo Prato (Fonte: BETAEQ, 2015)

Coluna do tipo empacotada, vide Figura 5, fornece uma grande área superficial, a qual são utilizados diversos tipos de recheio, a depender do objetivo do processo.

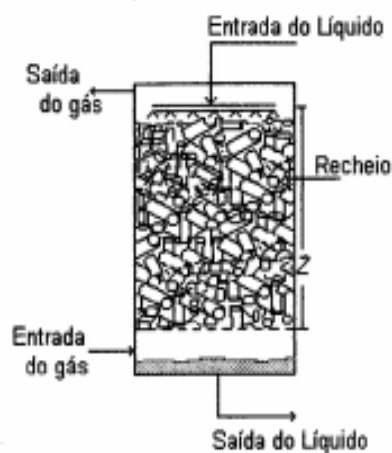


Figura 5- Coluna no tipo empacotada (Fonte: REVELLO,1998)

3.2.2 Colunas de recheio para absorção

Nas colunas de absorção recheadas ocorre um aumento da superfície de contato, onde a fase líquida é distribuída de forma uniforme no topo, fluindo através do leito recheado, proporcionando um aumento na área de contato entre as fases e intensificando a transferência de massa, conforme ilustra a Figura 6.

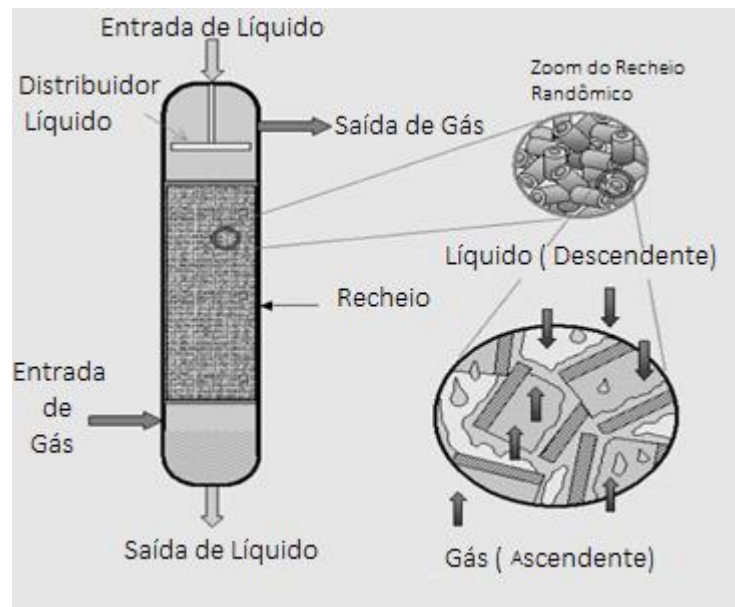


Figura 6- Ilustração do contato entre fase leve e pesada conforme uma coluna recheada por anéis de Raschig. (Fonte: adaptado de ECO-EDUCACIONAL, 2015)

Na Figura 6 está o detalhamento do funcionamento operacional. A parte superior da coluna é composta por uma entrada de líquido onde passa pelo distribuidor e uma saída de gás. Logo em seguida, na parte central, fica alocado o recheio, neste caso os anéis de *Raschig*. Na amplificação da própria ilustração, há o detalhamento do contato entre as duas fases, onde se percebe a ascendência da fase leve, e a descendência da fase pesada, aumentando o contato entre as fases. Por fim deste contato há mais uma saída, a de líquido, e a entrada da fase leve na parte inferior da coluna.

Segundo Foust *et al.* (1982), há vantagens para o uso de uma coluna recheada. Como vantagens, são elas:

- efeitos de formação de canais ou retromisturação;
- contem menor queda de pressão no gás;
- e as colunas recheadas de menor diâmetro são, comumente mais baratas do que as colunas de mesma dimensão em pratos.

Para se determinar as condições favoráveis para a escolha de uma coluna recheada, no caso de uma operação unitária absorptiva, devem ser observados os seguintes pontos:

1 – Se o diâmetro for menor que 0,6m, como o custo para a utilização de pratos não é barato, a escolha para o uso do recheio é menos custosa;

- 2–Se em um projeto houver pretensão de utilização de ácidos e alguns outros materiais corrosivos, as colunas recheadas fornecem maior controle da corrosão;
- 3- Por haver menor grau de agitação entre o líquido e o gás, caso o processo de estudo obter como resultado não desejado a tendência de formação de espuma, a coluna recheada é recomendada, fornecendo melhor controle;
- 4 - o *holdup* líquido pode ser bastante baixo em colunas recheadas, traduzindo uma vantagem quando o líquido é termicamente sensível (FOUST *et al.*, 1982 e PERRY,1997).

Já segundo Cremasco (2002) a escolha dos recheios, passa por características fundamentais, tais como:

- ✓ Devem ser quimicamente inertes;
- ✓ Baixa retenção líquida;
- ✓ Baixo custo;
- ✓ Grande área superficial molhada por unidade de volume para o contato das fases;
- ✓ Resistência mecânica e à corrosão;
- ✓ Grande volume de vazios, porosidade, propiciando altas vazões das fases e menor perda de carga.

Os recheios mais utilizados são os anéis de Raschig, anéis de Pall, os anéis de Ballast, as selas Intalox e o Intalox Metal Tower Packing (IMTP), podendo ser dispostos randomicamente, ou de forma estruturada (CREMASCO, 2002). A Figura 7 ilustra alguns recheios supracitados.

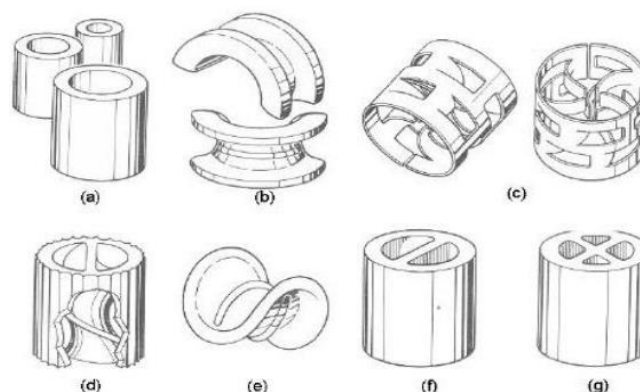


Figura 7- Recheios randômicos: (a) Anéis de Raschig, (b) Sela Intalox, (c) Anéis de Pall, (d) Anel espiralado Cyclohelix, (e) Sela de Berl, (f) Anel de Lessing e (g) Anel quartelado (CREMASCO, 2002).

Quando não estão alocados randomicamente, os recheios são montados de forma ordenada podendo o projetista determinar caminhos preferências para os escoamentos das fases. Mas existe uma exceção para alguns recheios randômicos, podendo ser classificado no outro grupo, como no caso dos anéis de Raschig que contêm diâmetros menores que 75 mm. Eles podem ser considerados estruturados, também, pela possibilidade de serem empilhados verticalmente, possibilitando mais eficiência de separação e menor perda de carga (CREMASCO, 2002).

A eficiência de separação, a perda de carga e a capacidade dos recheios são funções diretamente relacionadas às áreas superficiais desses anéis, e da porosidade do recheio. Dessa forma, os anéis de Raschig e anéis de Pall tem a área específica e a porosidade equivalentes, porém com comportamentos diferentes (JIE *et al.*, 2000). Segundo Treybal (1980), uma peça do recheio deve ser menor que 1/8 do diâmetro da coluna, devido ao risco de má distribuição do líquido.

Murrieta *et al.* (2004), utilizou dois tipos de recheios, os anéis de Raschig e as selas de Berl. Nesse trabalho foi possível determinar os coeficientes de transferência de massa nas diferentes operações realizadas. Já nos trabalhos de Souza (2012) e Lima (2009), sobre a produção de etanol anidro, foi comprovado que as colunas recheadas são mais facilmente construídas e montadas, orientando-nos a aplicação desses em separações binárias.

3.2.2.1 Condições de operação para uma coluna de absorção.

Para a estimativa de condições de operação de uma coluna de absorção, é necessário considerações possíveis do contato de troca de massa entre as fases de estudo. Temos que para o balanço de material apenas o componente absorvido é inserido no cálculo, mesmo provindo de uma mistura com outros gases inertes no solvente, que também acabem não sendo transferida para a fase gasosa do sistema. Tomando-se como base de cálculo a Figura 8, tem-se:

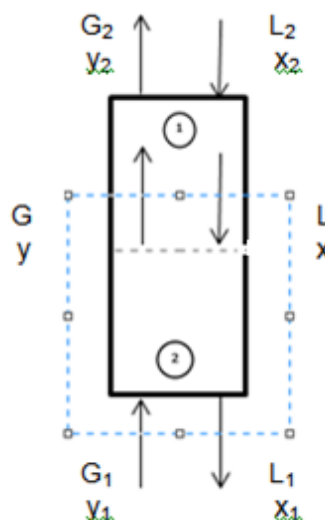


Figura 8 - Corrente de contato numa coluna de absorção. – (Fonte: :Adaptado de LEITE *et al.*, 2005)

Na Figura 8 constam as correntes relacionadas a uma coluna de absorção para o contato em contracorrente de um gás (fase leve) e um líquido (fase pesada), com o número 2 indicando o fundo da coluna e 1 como topo da coluna. Dessa forma, o balanço global da transferência de massa e o balanço por componentes são estabelecidos, conforme demonstrado nas Equações (1),(2) e (3) (LEITE *et al.*,2005)

Balanço global:

$$L_2 + G_1 = L_1 + G_2 \quad (1)$$

Onde L e G são vazões molares das correntes de operação.

Balanço global com componentes, para soluto A

$$L_2 x_{A2} + G_1 y_{A1} = L_1 x_{A1} + G_2 y_{A2} \quad (2)$$

$$y_{A1} = \frac{L_1}{G_1} x_{A1} + \frac{(G_2 y_{A2} - L_2 x_{A2})}{G_1} \quad (3)$$

Os fluxos molares para o componente A, citados no balanço supracitado, são oriundos do produto dos parâmetros G_y e L_x , com grandeza dada em $\text{kmol/m}^2 \cdot \text{s}$, em qualquer ponto da coluna. A transferência de massa na coluna é contínua, ou seja, à medida que se movem ao longo da coluna, o componente de estudo está sendo permanentemente transferido da fase leve para fase pesada. Por consequência, a diminuição da concentração do componente na fase gasosa é esperada até a chegada ao topo da coluna. Tomando como referência a Figura 8, tem-se que $G_1 > G > G_2$ e $y_1 > y > y_2$, ao mesmo tempo que o comportamento inverso se espera na fase pesada, aumentando a concentração do soluto na fase líquida, sendo $L_1 > L > L_2$ e $x_1 > x > x_2$.

Em sistemas diluídos, o teor do soluto é relativamente pequeno, podendo-se assumir que: $G = G_1 = G_2 = \text{constante}$ e $L = L_1 = L_2 = \text{constante}$. Daí, a linha de equilíbrio de solubilidade é uma reta, representada pela lei de Henry como: $y = m \cdot x$, onde m é a constante da lei de Henry (CHEN, 1964; LEITE *et al.*, 2005).

Existe uma diferença gráfica na identificação do tipo de processo que está sendo tratado perante uma coluna de absorção. Quando nos deparamos com um gráfico de dados onde a reta de operação se localiza na parte superior da curva de equilíbrio, trata-se de uma torre absorvedora. Caso a linha de operação se localize abaixo da linha da curva de equilíbrio chamamos de torre retificadora. A Figura 9 ilustra o comportamento de uma absorvedora

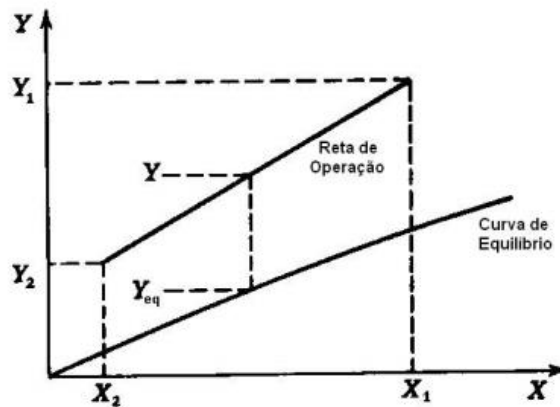


Figura 9 – Gráfico esquemático de uma torre absorvedora –(Fonte: adaptado CHEN, 1964.)

Outra observação a ser abordada é quanto a linha de operação. Para a linha ser uma reta, deve-se trabalhar somente com bases em razão molar. Caso seja utilizado em fração molar ou em pressão parcial a linha de operação será uma curva.

3.2.3 Coeficiente volumétrico de transferência de massa do lado líquido (K_La) para coluna de recheio

O K_La é obtido através do estudo da transferência de massa, que é fundamental em qualquer processo reacional seja ele bifásico ou trifásico. Apresentam-se como uma etapa essencial na estimativa de fluxos de absorção ou da velocidade global da reação. Segundo Alvarez-Cuenca, Bayer, Bergougnou (1980) e Midoux (1984), as técnicas físicas se dividem em duas categorias: estacionária e dinâmica. A estacionária, não envolvendo reação química, consiste em determinar K_La a partir de medidas de absorção de gás em um líquido. Já as dinâmicas são mais fáceis de serem realizadas, fornecendo valores mais exatos e confiáveis.

O processo de modelagem, é também importante, por que muitas vezes pode tornar-se crítica a aplicação, o que impedirá o uso do método de *scale-up* do processo, sendo que esses estudos são realizados inicialmente em bancada (HASSAN *et al.*, 2012).

No trabalho de Rahbar (2005), onde foi feita a modelagem de uma coluna recheada com anéis de Raschig com a coluna de 0,43 m de diâmetro e 3 m de altura de recheio, foram estimados os valores de $K_L a$ através da Equação (4).

$$k_L a = 0,152. \left(\frac{(U_{l_0} + U_{l_N})}{2A} \right)^{0,82} \quad (4)$$

Onde:

U_{l_0} e U_{l_N} são destinados a fase líquidas de entrada e saída respectivamente, sendo velocidade superficial da área específica de troca;

A área de troca de massa da coluna

Já Murrieta *et al.* (2004), foram utilizados recheios randômicos, do tipo, Intalox 2T, Intalox 1T, cujos coeficientes podem ser encontrados nas Equações (5) e (6)

$$k_L a_{1T} = 1,596. (Ul)^{0,875} \quad (5)$$

$$k_L a_{2T} = 0,873. (Ul)^{0,816} \quad (6)$$

Onde U_l , sendo a velocidade superficial já contando com as áreas específicas de troca de massa do ensaio realizado para o lado líquido.

Segundo Koch-Glitsch (2010), esses dois materiais se diferenciam pelo tamanho da sua área superficial, tendo o “1T” $310 \text{ m}^2/\text{m}^3$ e o “2T” $215 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Ele ainda relata mais 4 modelos de Intalox, o 5T, 4T, 3T e o 1,5T, todas se diferenciando pela área superficial.

Quando foi utilizado anéis de metal, Murrieta *et al.* (2004), obtiveram os valores de $K_L a$ através das Equações (7) e (8)

$$k_L a_{1T} = 0,392. (Ul)^{0,6} \quad (7)$$

$$k_L a_{2T} = 0,258. (Ul)^{0,6} \quad (8)$$

Onde U_1 , sendo a velocidade superficial já contando com as áreas específicas de troca de massa do ensaio realizado para o lado líquido.

A principal diferença entre as equações é o fato dos coeficientes terem sido encontrados empiricamente pela mudança de material do recheio, que também estavam relacionados com área superficial.

Na pesquisa feita por Laso *et al.* (1995), foi usado o mesmo equipamento de Murrieta *et al.*, (2004), citado anteriormente, para estudar outros tipos de recheios, os chamados Mellapak 250y e 500y. A diferença entre os materiais está na área superficial de contato, onde M250y está relacionado a $250 \text{ m}^2/\text{m}^3$ e M500y para $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Koch-Glitsch, 2010). Essa coluna possuía um diâmetro interno de 4,26 m com altura de 3 m. As equações obtidas por estes autores foram as seguintes:

$$k_L a^{M500y} = 0,713. (U_1)^{0,71} \quad (9)$$

$$k_L a^{M250y} = 0,574. (U_1)^{0,62} \quad (10)$$

Onde U_1 , sendo a velocidade superficial já contando com as áreas específicas de troca de massa do ensaio realizado.

No trabalho de Sahay *et al.*(1997), desenvolvido para o estudo do efeito da área interfacial foi utilizada uma coluna recheada com anéis de Raschig (coluna com 86 cm de altura e 61 cm de recheio), para a qual cita valem as Equações (11) e (12).

$$\frac{k_L a}{D} = 120. \left(\frac{U_1}{\mu_L}\right)^{0,75} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D}\right)^{0,5} \quad (11)$$

$$k_L a = 0,0172. (U_1)^{0,806} \quad (12)$$

Onde U_1 , sendo a velocidade superficial já contando com as áreas específicas de troca de massa do ensaio realizado para o lado líquido ; μ_L viscosidade , ρ_L a massa específica , D diâmetro da coluna.

Da mesma forma que existe uma dependência do K_La com a velocidade superficial na fase líquida, há a dependência com a velocidade do gás (U_g). Segundo Melo (2017), o coeficiente volumétrico de transferência de massa, K_La , é correlacionado com a velocidade do gás U_g , conforme a Equação 13.

$$k_La = a. (U_g)^b \quad (13)$$

Onde a e b são constantes que variam dependendo da natureza do meio do líquido usado.

Esse tipo de correlação foi observado por vários autores, a exemplo de:

i) Deckwer; Burckart e Zoll (1974) (Equação 14):

$$k_La = 0,0269. (U_g)^{0,82} \quad (14)$$

ii) Shah; Godbole e Deckwer (1982) (Equação 15):

$$k_La = 0,476. (U_g)^{0,82} \quad (15)$$

iii) Zharadnik *et al.* (1982) (Equação 16):

$$k_La = 0,75. (U_g)^{0,85} \quad (16)$$

iv) Sada *et al.* (1985) (Equação 17):

$$k_La = 0,014. (U_g)^{0,86} \quad (17)$$

Onde U_g , sendo a velocidade superficial já contando com as áreas específicas de troca de massa do ensaio realizado para o lado gasoso.

Todas as equações foram desenvolvidas para colunas de bolhas e foram citadas no trabalho de Melo (2017), que apresentou ainda a equação de Perez *et al.* (2006) (Equação 18).

$$k_L a = 0,082. (U_g)^{0,35} \quad (18)$$

Deckwer *et al.*, (1993) estudando as ferramentas aprimoradas para projeto de reator de coluna de bolha e aumento de escala expos o Equação 19, com a restrição de U_g entre 0 e 0,3 m/s.

$$k_L a = 0,32. (U_g)^{0,7} \quad (19)$$

Uma observação entre os dois grupos de correlações apresentadas (as que envolvem a dependência do U_l e do U_g) é que, segundo Burckhard e Deckwer (1976), experimentalmente, foi mostrado que o efeito da velocidade líquida é desprezível sobre o $K_L a$.

3.3 Aspectos hidrodinâmicos de colunas de absorção

Já existem pesquisas que envolvem aspectos teóricos do estudo hidrodinâmico para colunas de absorção, as quais trazem muita informação para os diferentes tipos de colunas, bem como modelos semi-teóricos ou relações totalmente empíricas. Alguns parâmetros, como holdup, perda carga, ponto de carga, são função de muitas variáveis, tais como velocidade das fases, características dos fluidos e até mesmo as condições operacionais (HEYMES *et al.*, 2006; RIERA *et al.*, 2014; SWYAMY *et al.*, 2015).

3.3.1 Colunas recheadas

Entende-se como hidrodinâmica de colunas recheadas todo comportamento do escoamento das fases no seu interior, tendo as diversas variações de vazões das fases, velocidade de agitação e até mesmo da geometria do sistema. Nas pesquisas realizadas por Mello (2013) e Bianchini (2018), todos envolvendo coluna recheada, houve a necessidade prévia de um estudo hidrodinâmico para continuidade de suas pesquisas.

Segundo Bianchini (2018), no processo haverá sempre uma das fases na sua forma dispersa sob a forma de gotas, chamada de fase dispersa, e a outra denominada fase contínua, com o intuito de aumentar a superfície de contato entre elas, favorecendo o fluxo interfacial das espécies. Essas fases escoam normalmente em contracorrente com velocidades variáveis ao longo da coluna. Assim, os parâmetros normalmente utilizados para caracterizar a hidrodinâmica em colunas de absorção gás/líquido são: diâmetro e distribuição de diâmetro das gotas, fração volumétrica (ou *holdup* da fase dispersa), velocidade das fases líquidas e o ponto de inundação (*flooding point*). Para se

aperfeiçoar uma coluna de recheio para absorção de gás é necessário compreender esses parâmetros hidrodinâmicos (BIANCHINI,2018).

3.3.1.1 Perda de carga em colunas de recheio

A queda de pressão, segundo Heyouni *et al.* (2002), é o parâmetro mais importante no critério de configuração para uma coluna recheada, já que quantifica a dispersão das fases, sendo decisivo na eficiência do sistema. Sua dependência se resume em quatro fatores: a velocidade da fase líquida e gasosa, tipo do fluido e tipo de recheio. Outra justificativa pra ser considerado um dos pontos mais importantes é o fato de o líquido ser injetado no topo da coluna e, pela ação da força gravitacional, escoar de forma descendente. Sendo assim, no topo da coluna a pressão deve ser menor que na base. Como o escoamento descendente do líquido ocupa os mesmos canais que o escoamento ascendente de gás (que geralmente tem o comportamento turbulento), a queda de pressão é uma função das duas vazões. O que corresponde a análise da queda de pressão é o estudo com base do ΔP .

Segundo Kister (1992), a queda de pressão em colunas de recheio randômico, por exemplo, é muitas vezes maior que em colunas de recheio estruturada, para as mesmas vazões de fluido, e afirma que essa queda de pressão se dá inteiramente pelas perdas por atrito através dos vazios nos recheios (porosidade).

A perda de carga é uma função das vazões das fases, em virtude do comportamento descendente da fase pesada ocupar os mesmos canais que o escoamento ascendente do gás. É uma medida da perda de energia mecânica durante o transporte de um fluido (ZAKERI *et al.*,2012). Ou seja, o escoamento interno em tubulações sofre forte influência das paredes, ocasionando dissipação de energia devido a esse atrito. Essa dissipação de energia provoca uma diminuição da pressão total do fluido ao longo do escoamento, e a esse fenômeno é dado o nome de perda de carga. Quaisquer acessórios instalados em tubulações resultam nesse fenômeno de perda de carga, conhecido também de redução de pressão, que ocorre em qualquer tipo de escoamento (RIGATTO *et al.*, 2015).

Os comportamentos de colunas com recheios randômicos são analisados através de gráficos onde são relacionadas a perda de carga e a vazão da fase gasosa. A Figura 10 mostra curvas para sistemas monofásicos (sistema seco) e os bifásicos.

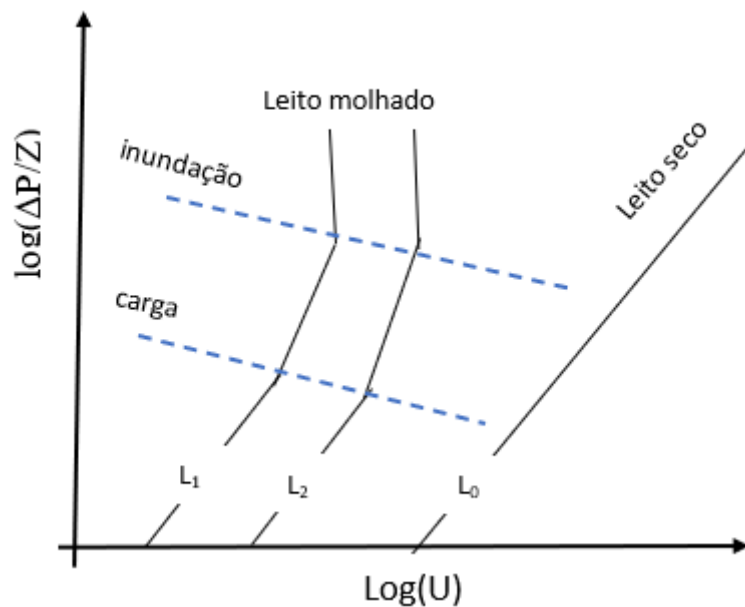


Figura 10– Gráfico esquemático de uma análise de perda de carga para uma coluna recheada. Fonte Adaptado de CALDAS *et al.*, 2003; e RAZI *et al.*, 2012.

Segundo Bianchini (2018) um dos primeiros passos para construção gráfica de análise comportamental é a determinação dos pontos de linha denominada L_0 . Tal curva é construída a partir de dados experimentais de vazão de ar e da diferença de pressão ocasionada pela variação dessa vazão, para um estudo com o recheio seco, onde a inclinação indica o escoamento turbulento. Se o recheio é molhado por uma certa quantidade de líquido, a porosidade diminui e a variação da perda de carga é tal como nas curvas L_1 e L_2 da Figura 10.

Para baixas vazões de gás observa-se que a inclinação da reta é a mesma da curva L_0 , mesmo com uma maior perda de carga é considerada maior. O “*loading point*” ou ponto de carga é, portanto, o ponto onde a primeira reta tracejada é indicada, conforme mostrado na Figura 10, ou seja, quando ocorre o aumento da velocidade do gás, modificando assim inclinação da reta. O fenômeno acontece com o gás começando a impedir o escoamento do líquido, se acumulando ao longo da torre e promovendo a retenção de líquido, que por sua vez aumenta rapidamente com a vazão de gás.

Ainda sobre a Figura 10, segundo Bianchini (2018), há uma outra modificação na inclinação da mesma curva devido a um aumento na vazão de gás, definindo agora o “*flooding point*” ou ponto de inundação, que é representado pela segunda reta. A partir desse ponto o líquido se acumula no fundo da torre, havendo a formação de espuma e arraste de líquido pelo gás efluente. Para esse fenômeno dá-se nome de inundação.

No estudo realizado por Guillerm (2016), referente à absorção do tolueno no óleo de silicone, foi feito também um levantamento hidrodinâmico através de uma coluna de recheio com anéis de

Raschig. Nesse trabalho o autor cita três regimes hidrodinâmicos que podem ser observados em uma coluna de absorção, ou seja, o que se localiza abaixo do ponto de carregamento (regime 1), o de carregamento, o situado na zona de carregamento (regime 2) e o da zona de inundação (regime 3). No primeiro regime observa-se que não há interação perceptível entre gás e líquido, e a queda de pressão. No regime 2, ou seja, na zona de carregamento (*zone loading*) acontece o aumento da queda de pressão, devido à rápida acumulação de líquido no volume vazio (a pressão é proporcional a uma taxa de fluxo de gás) já no regime 3, ou na zona de inundação, ocorre onde a mudança na queda de pressão bastante elevada, com apenas uma ligeira mudança na vazão do gás. Os 3 regimes observados por Guillerm (2016) são também mostrados na Figura 11.

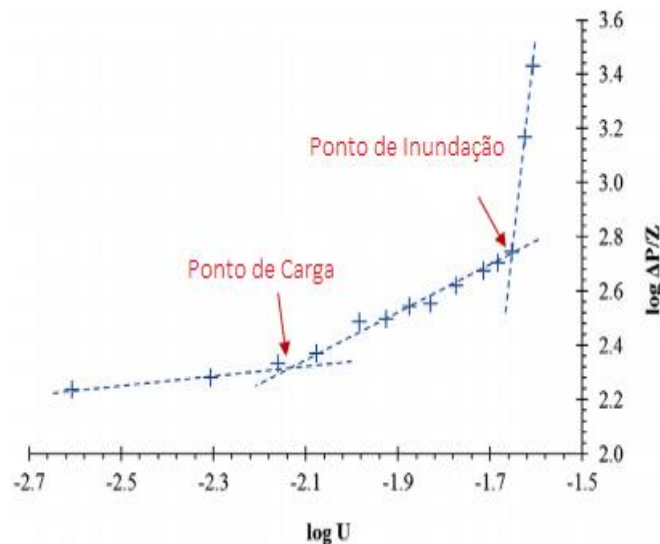


Figura 11- Determinação do ponto de carregamento e alagamento - (Fonte: adaptado de Guillerm *et al.*,2016)

Na Figura 11, os dois pontos descritos, o *flooding point* e o *loading point*, são apontados pelas setas vermelhas, sendo o primeiro ponto o ponto de carregamento e o segundo o ponto de inundação da coluna recheada. Importante salientar que sua análise hidrodinâmica foi realizada com o sistema água/ar.

Liu (2014), dentro do estudo hidrodinâmico de sua pesquisa, traz também informações importantes contra inundações das colunas. Liu (2014) fez um estudo para desenvolvimento de um novo modelo de correlação para predição de velocidade de inundação, a qual relata sobre as torres que são utilizadas nas indústrias química de refino de petróleo. Em seu trabalho os autores apresentaram uma breve discussão sobre a capacidade que uma coluna inundada tem de interromper uma linha de produção, e afetar a operação normal de todo um sistema de produção, bem como traz

a nomenclatura dos pontos que são determinantes para a identificação da inundação, através da determinação da velocidade de ponto de inundação. Essa velocidade acaba se tornando o limite operacional da maioria das torres absorvedoras. E é justamente por questões operacionais que o número de trabalhos desenvolvidos para serem feitos modelos de predições fenomenológicas da inundação torna-se cada vez mais estudado nos últimos anos.

3.3.2 Modelagem matemática para cálculo de perda de carga para torres de recheio randômico

Para o cálculo de perda de carga para torres de recheio randômicos são necessários meios que forneçam informações úteis para extrair esses parâmetros. Segundo Ribeiro (2005); Minucelli (2004); e Caldas *et al.* (2003), geralmente os métodos utilizados para a determinação da perda de carga em colunas de recheio são classificados como testes a seco e testes molhados. No primeiro, apenas a fase gasosa é introduzida na coluna, enquanto que no segundo as duas fases, líquida e gasosa, são introduzidas simultaneamente. O caso dos testes a seco os principais métodos utilizados envolvem as de Ergun (1952) e o Método de Treybal (1980).

A correlação de Ergun (1952) é utilizada para recheios com partículas esféricas, apresenta um comportamento linear e é baseada no gráfico mostrado na Figura 10. A correlação deste autor corresponde à Equação (20):

$$\frac{\Delta P}{z} \cdot \frac{d_{pe} \rho_G \varepsilon^3}{(1-\varepsilon) G'^2} = \frac{150(1-\varepsilon)}{Re} + \frac{7}{4} \quad (20)$$

Onde, ΔP queda de pressão; Z comprimento do leito; G' o fluxo mássico de gás; ρ_G é a massa específica do fluido; d_{pe} diâmetro equivalente do recheio; ε fração de vazio; Re número de Reynolds.

Para o caso de partículas não esféricas, segundo Ergun tem-se a Equação (21):

$$\frac{\Delta P}{z} = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu_f}{\phi_p^2 \varepsilon^3 D_p^2} v_0 + \frac{7(1-\varepsilon) \rho_f}{4 \phi^2 \varepsilon^3 D_p} v_0^2 \quad (21)$$

Sendo, ΔP queda de pressão; Z comprimento do leito; ρ_f é a massa específica do fluido; D_p diâmetro da partícula; ε fração de vazio e ϕ esfericidade.

O outro método também voltado para leitos secos é o Método de Treybal (1980), onde a queda de pressão é medida conforme a Equação (22).

$$\frac{\Delta P}{Z} = C_D \frac{G'^2}{\rho_G} \quad (22)$$

Onde, ΔP queda de pressão; Z comprimento do leito; G' o fluxo mássico de gás; ρ_G é a massa específica do fluido e C_D valor tabelado descrito pelo método.

Já para os testes molhados, ou que envolvem o escoamento simultâneo das duas fases, segundo Botta (2015), existem dois grupos de métodos para se calcular a perda de carga em torres de recheios randômicos. Em seu trabalho são apresentados os métodos analíticos, destinados a procedimentos em leitos molhados, onde estão presentes os métodos de Leva (1953), Prahil (1970) e Niranjan (1983), que são complementares aos métodos de Ergun (1952) e o de Treybal (1980), no intuito da realização de comparações de comportamentos gráficos, como mostrada na Figura 10. O segundo grupo é sintetizado nos métodos gráficos pela correlação generalizada para a queda de pressão (CGQP).

3.3.2.1 Métodos Analíticos

Os métodos de Leva (1953), Prahil (1970), Nijranjan (1983), por apresentarem procedimentos compatíveis com dados e materiais existentes no aparato experimental dessa pesquisa.

Para o método de Leva (1953), Equação (23)

$$\frac{\Delta P}{Z} = \alpha 10^{\beta} \frac{L G'^2}{\rho_G} \quad (23)$$

Onde, ΔP queda de pressão; Z comprimento do leito; α, β são constantes válidas para sistemas gás-água, que foram atualizadas e ampliadas por Eckert (1958).

Para o método de Prahil (1970), Equação (24)

$$\frac{\Delta P}{z} = \frac{Y_n}{1 - Y_m} \quad (24)$$

Onde, $\Delta P/Z$ a queda de pressão (mmH₂O/m); Y – Ordenada da CGQP) ; e X – Abcissa da CGQP (proposta por SHERWOOD, LEVA e ECKERT- apud McCabe *et al*, 1993) ; sendo, $m = 35 X + 3$; $n = 1116 X + 500$.

E para o método de Niranjana (1983), Equação (25)

$$\frac{\Delta P}{z} = \frac{f G'^2}{6 \rho_G} \left(\frac{a_p}{\varepsilon_0^3} \right) \quad (25)$$

Este método, Equação (25), depende do cálculo de holdup total ($h_{l\ total}$) e a correlação elaborada por Takahashi, Equação 26, permite a determinação desse parâmetro (CALDAS *et al.*, 2003).

$$h_{l\ total} = \left[1,53 \cdot 10^{-4} + 2,9 \cdot 10^{-5} \varepsilon Re_L^{0,66} \left(\frac{\mu_L}{\mu_w} \right)^{0,75} \right] d_p^{-1,2} \quad (26)$$

Onde h_l representa o holdup (retenção de líquido da fase dispersa) total da coluna, a_p é a superfície específica do recheio; $\varepsilon_0 = \varepsilon - \Phi t$, porosidade de operação (adimensional); ε a porosidade do recheio seco ; $\Delta P/Z$ a queda de pressão específica (Pa/m); e f o coeficiente de atrito específico para a Equação (25), no valor de 3,76 para anéis de Raschig.

Alguns dos parâmetros citados no decorrer deste capítulo, como inundação, perda de carga, são pontos cruciais para estudo completo dentro do processo de separação de mistura. Quando trabalhado com coluna de extração, destilação e absorção, envolve troca de massa, há sempre um estudo prévio hidrodinâmico para o entendimento do comportamento da coluna e seus limites. A importância desses métodos está no caráter de comparação e de comportamento dos valores encontrados em um determinado estudo frente a valores e estimativas já fundamentadas por vários pesquisadores. Leva(1953); Niranjana (1983); Prahl(1970), e Treybal(1980), destacam-se como os mais conhecidos e com um elevado número de estudos nesta área.

3.3.2.2 Métodos Gráficos (CGQP)

Quando a metodologia de análise para um escoamento bifásico gás/líquido é feita graficamente, a queda de pressão e o diâmetro da coluna normalmente são estimados através de gráficos da Correlação Generalizada para Queda de Pressão (CGQP).

Estes métodos gráficos apresentam geralmente respostas bastante satisfatórias (Botta, 2015) principalmente quando situados na região dinâmica da coluna. Porém segundo Caldas *et al.*, 2003, existem alguns contrapontos nesta correlação que devem ser levados em conta. Segundo Caldas (2003), às interpolações entre as linhas do gráfico podem conter erros elevados que, por ser generalizadas, podem levar a resultados imprecisos.

Entretanto, segundo Botta (2015), a CGQP proposta por Sherwood, Leva e Eckert (SLE) é ultimamente a correlação mais utilizada como padrão para a predição de quedas de pressão em leitos. Um dos exemplos de gráfico de CGQP proposto por SLE está representado na Figura 12.

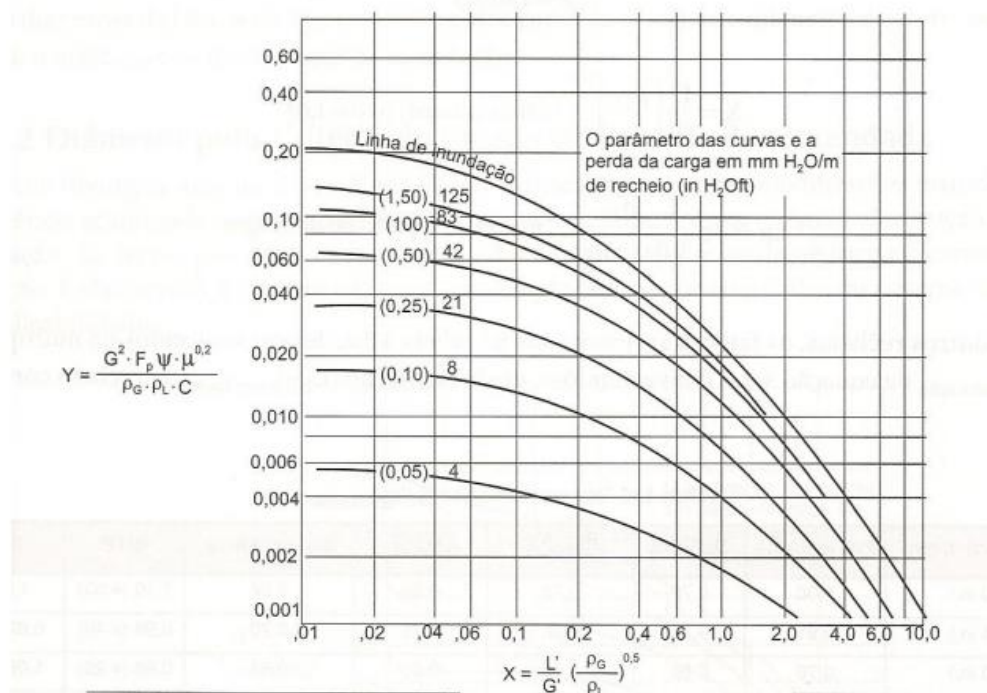


Figura 12- CGQP para leitos com recheios randômicos, proposta por SHERWOOD, LEVA E ECKERT (SLE) (FONTE: CALDAS *et al.*, 2003).

Onde L' - representa o Fluxo mássico de líquido; G' é o Fluxo mássico de gás; ρ_L é a Massa específica do líquido ; ρ_G é a Massa específica do gás ; F_p é o Fator de caracterização do recheio; μ é a Viscosidade do líquido ; $\psi = \rho_{H_2O}/\rho_L$; $C = 2,994$ (constante fornecida pelo autor do método).

Uma nova versão da CGQP de Sherwood, Leva e Eckert, foi proposta por Norton (1977). A versão deste autor é mostrada através da Figura 13.

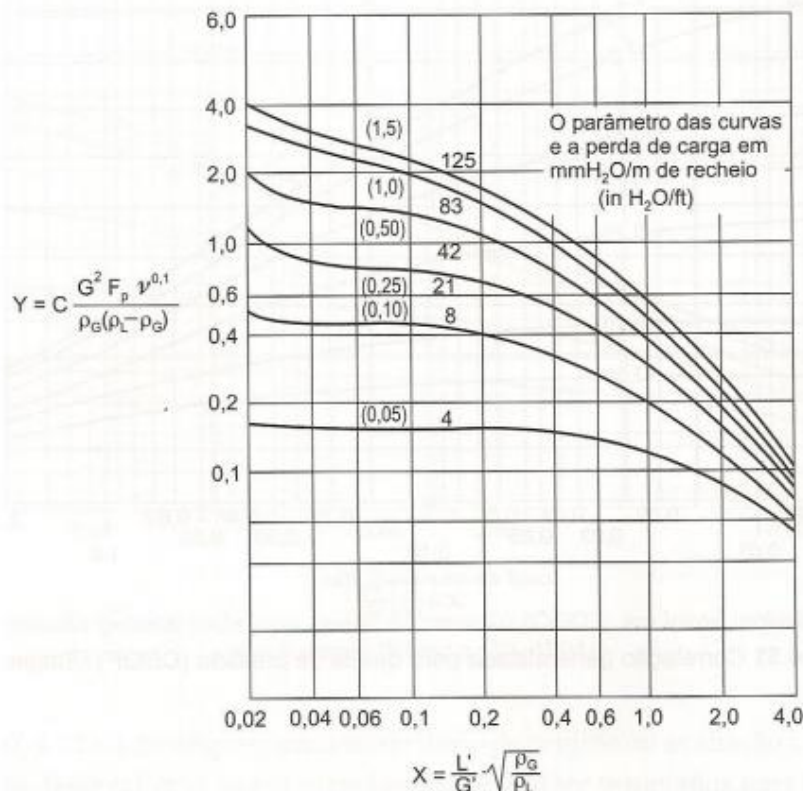


Figura 13- CGQP proposta por Norton (1977). (Fonte: CALDAS *et al.*, 2003)

Onde: L' é o Fluxo mássico de líquido; G' é o Fluxo mássico de gás; ρ_L é a Massa específica do líquido; ρ_G é a Massa específica do gás; F_p é o Fator de caracterização do recheio, ν é a Viscosidade cinemática do líquido; $C = 10,764$ (constante fornecida pelo autor do método).

Segundo Caldas *et al.*(2003) a correlação proposta por Norton (1977) foi testada para uma ampla faixa de propriedades de vários sistemas, o que aumentou sensivelmente a sua faixa de aplicabilidade. As faixas de aplicabilidade testadas no modelo de Norton são descritas na Tabela 1.

Propriedades	Valor mínimo	Valor máximo
Pressão (kPa)	1,3	3200
Massa específica do gás (kg/m ³)	0,057	83
Massa Molecular	2	338
Massa específica do líquido (kg/m ³)	353	1830
Viscosidade (mPa.s)	0,07	18
Tensão superficial (mN/m)	7	72

Tabela 1 -Faixa de propriedades dos sistemas para a nova correlação divulgada por Norton (1977) (Fonte: CALDAS *et al.*, 2003).

CAPÍTULO 4

Materiais e Métodos

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada toda a parte experimental utilizada para a obtenção dos resultados tanto da perda de carga quanto do coeficiente de transferência de massa. Para isso, foi feito primeiramente um estudo do comportamento hidrodinâmico da coluna e posteriormente uma análise de transferência de massa através de um planejamento experimental envolvendo todas as variáveis que influenciam no processo.

Portanto, no presente capítulo primeiramente apresenta-se a coluna de absorção utilizada nos experimentos, os procedimentos para os testes hidrodinâmicos realizados, o planejamento experimental e, por último, todos os ensaios realizados

4.1 O equipamento

Os testes hidrodinâmicos e os testes de transferência de massa foram conduzidos em uma coluna de absorção com recheio, preenchida com anéis de *Raschig* de vidro. As características da coluna utilizada são apresentadas na Tabela 2, enquanto que na Figura 14 é mostrada uma imagem da coluna.

Tabela 2 -Características geométricas da coluna e do recheio (anéis de Raschig).

Parâmetro	Valor
Comprimento da coluna (m)	1,0
Diâmetro interno da coluna (m)	0,07
Altura de recheio – anéis de <i>Raschig</i> (m)	0,79
Diâmetro interno dos anéis (mm)	6,18 ± 0,03
Diâmetro externo dos anéis (mm)	8,02 ± 0,02
Comprimento dos anéis (mm)	9,53 ± 0,28
Fração de vazios (ϵ)	0,73
Área superficial unitária dos anéis (m ²)	0,07046
Volume unitário dos anéis (m ³)	0,000016
Área superficial específica dos anéis (m ² /m ³)	440*

*Valor assumido para o anel de Raschig de vidro, segundo dados obtidos de referência de Caldas *et al.*, 2003



Figura 14 Coluna de absorção recheada com anéis de Raschig - Fonte : Próprio autor

Na Figura 15 é mostrada a imagem de toda a montagem experimental utilizada nos ensaios hidrodinâmicos.



Figura 15- Bancada multiprósito – Coluna de absorção contínua: líquido-gás – leito fixo com recheio (1), bomba peristáltica (2), manômetro tubo em U (3), rotâmetro (4). Fonte : Próprio autor

Na Figura 15 encontra-se em “1” a coluna de absorção contínua recheada por anéis de Raschig; “2” a bomba peristáltica utilizada na alimentação da fase pesada (água); “3” o manômetro em U para medição de pressão interna do sistema; “4” é mostrado o rotâmetro para o controle da vazão de ar injetado na coluna. Um esquema desses ensaios hidrodinâmicos, pode ser observado na Figura 16.

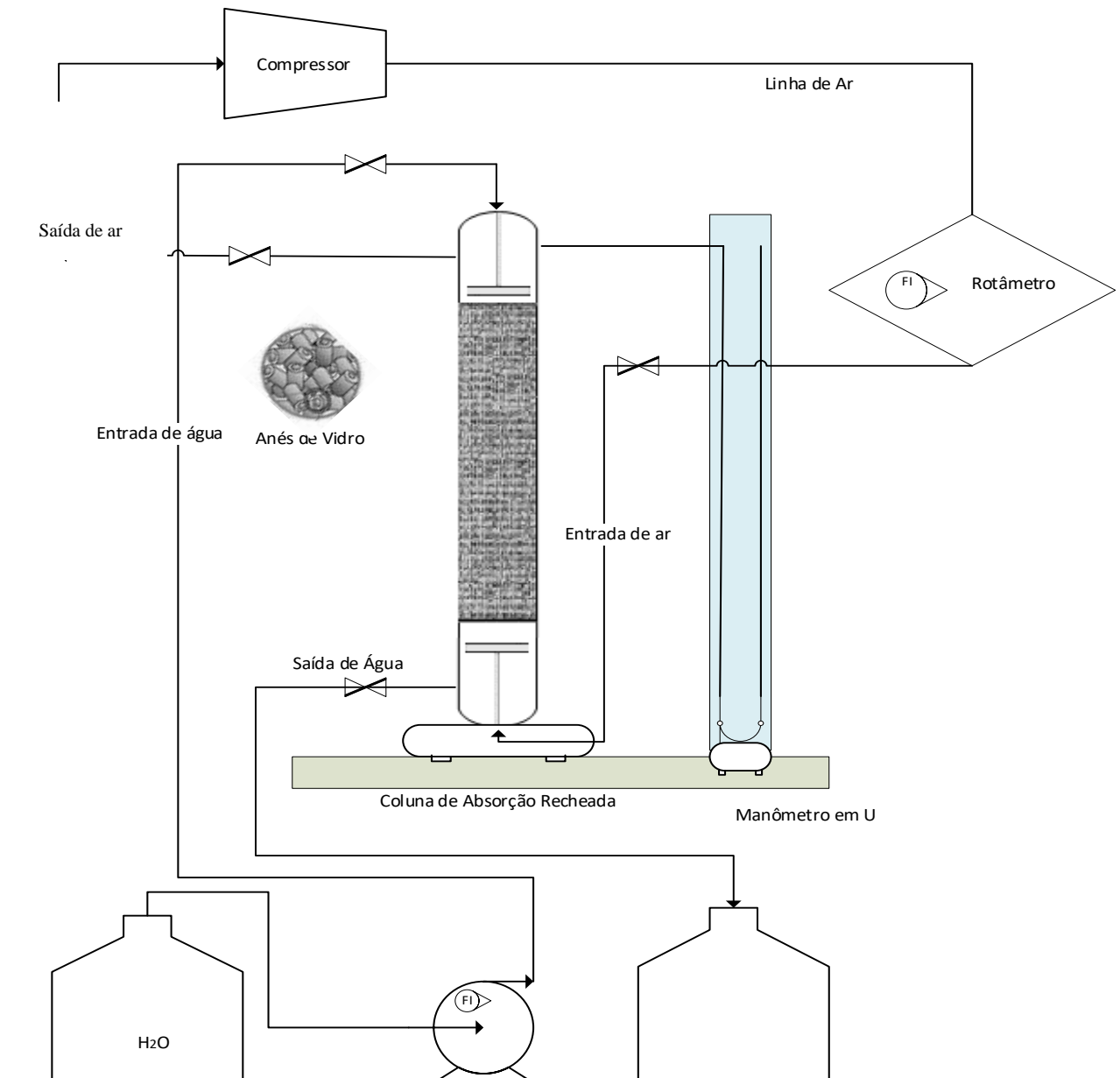


Figura 16 - Aparato Experimental para testes hidrodinâmicos.

4.2 Procedimento operacional

Os procedimentos experimentais utilizados no presente trabalho foram divididos em dois grupos: o primeiro relacionado ao estudo da hidrodinâmica da coluna e o segundo para a transferência de massa.

No primeiro grupo de experimentos foi feita a caracterização do funcionamento da coluna, com testes com leito seco e com leito molhado, ou seja, com e sem a presença de água na coluna. Nos testes com leito seco foram tomadas as vazões de ar (Q_d), medidas no rotâmetro e as respectivas diferenças de pressão. Já nos testes com leito molhado a coluna era primeiramente alimentada com água até ser atingido o estado estacionário. Em seguida variava-se a vazão de ar, na mesma proporção que os testes em leito seco, identificando visualmente a diferença de pressão e os pontos de inundação da coluna.

Com relação aos testes com leito seco, a dinâmica de realização foi feita em triplicata, tendo sido tomados os valores de vazões de ar e das diferenças de pressão. Os dados de diferença de pressão (sistema e pressão atmosférica), foram tomados em mm/H₂O através do manômetro em U instalado no sistema, enquanto que as vazões pelo rotâmetro. O manômetro e o rotâmetro estão representados pelos números 3 e 4 na Figura 15. Nos experimentos com leito a seco foram feitos 18 testes com as vazões variando entre os níveis de 0,6 a 15 L/min.

Já para os testes com leito molhado, de início, foi necessária a elaboração de uma curva de calibração para a vazão de água que era alimentada na coluna pela bomba, já que a vazão indicada na bomba era ajustada com a velocidade de rotação do rotor. Os pontos foram tomados todos em triplicata, obtendo-se uma equação com uma boa precisão ($R^2 = 0,9966$). A correlação para a calibração da bomba está descrita pela Equação (26):

$$y = 0,0277x - 0,2514 \quad (26)$$

onde que, x corresponde ao valor da vazão indicada na bomba para cada velocidade de rotação do rotor da bomba (RPM) e y corresponde ao valor da vazão calculada de água em L/min.

Feita a calibração da bomba, os experimentos com leito molhado foram realizados da mesma forma que foi feito no leito seco, onde se coletava os dados de diferenças de pressão, com o manômetro em U, só que, nesses experimentos, houve também a leitura do nível de água retida pela coluna após atingir o estado estacionário. Diferentemente do teste seco, nestes testes mantinha-se um valor fixo de vazão de água (Q_C), variavam-se as vazões de ar e mediam-se as diferenças de pressão através do manômetro em U que é mostrado na Figura 15 para essa vazão fixa de líquido.

Essas variações na vazão de ar obedeceram à mesma proporção realizada no teste seco. Foram testados 5 valores de vazão de água na faixa entre 0,72 L/min a 1,41 L/min, enquanto que as vazões de ar eram as mesmas que tinham sido utilizadas nos testes com leite seco.

Em todos os experimentos foram realizados os testes de estabilização do fluxo na coluna. Nestes testes, uma vazão era fornecida (sem injeção de ar) e se aguardava o estado estacionário do sistema, o que era percebido com a visualização do nível de solução. Não apresentando variação, assim identificava -se uma vazão possível para o estudo.

Uma outra etapa foi realizada para estudo da transferência de massa. Nesta etapa, já haviam sido realizados os testes hidrodinâmicos, e alguns parâmetros ajudaram na continuidade do estudo. Na Figura 16 encontra-se esquematizado um esquema da bancada citada na imagem na Figura 17, sendo que, para o estudo de transferência de massa, foram adicionados outros equipamentos descritos na imagem.

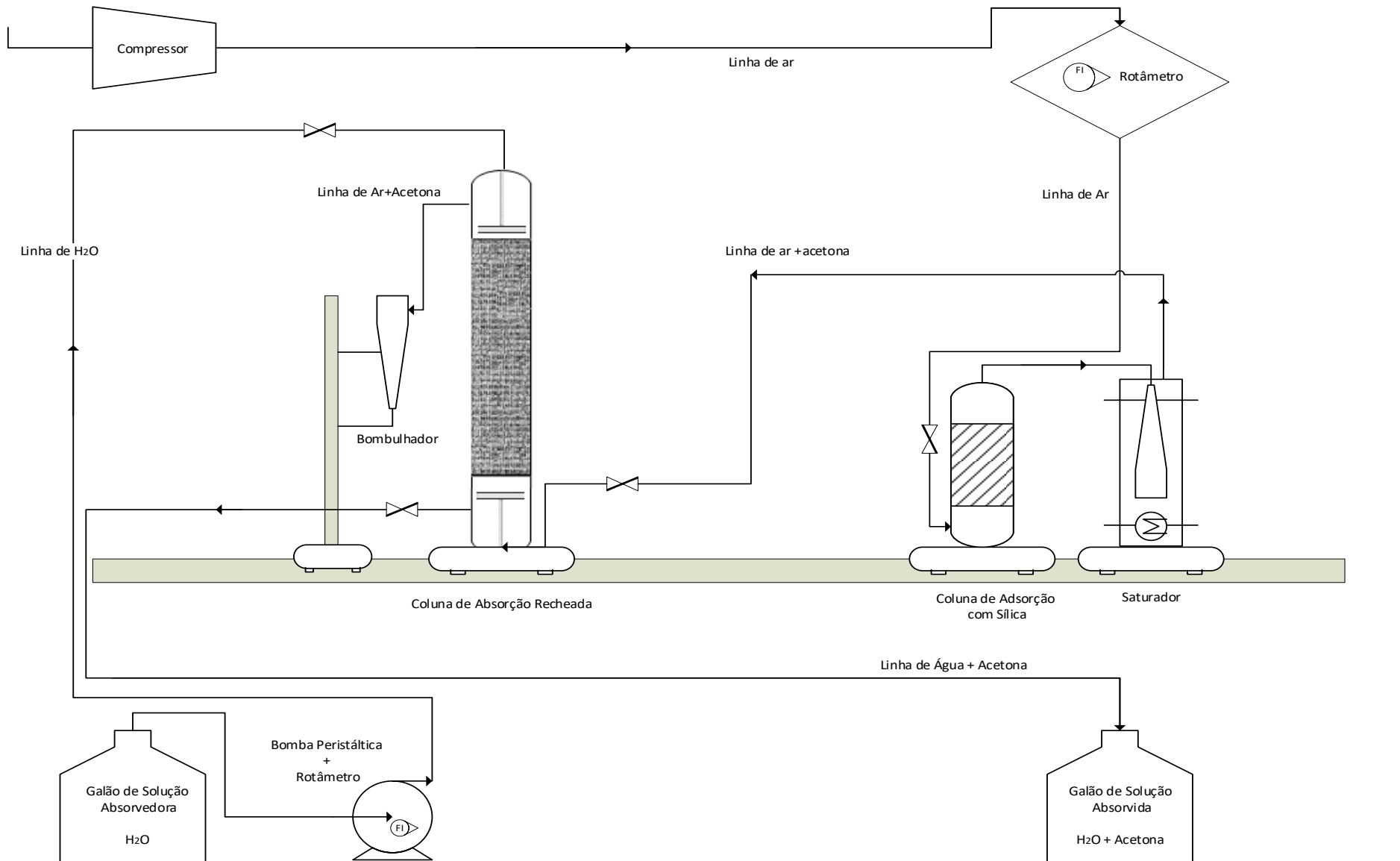


Figura 17 -Esquema do aparato experimental para a transferência de massa na coluna (água / ar + acetona)

Diferentemente da Figura 15, à Figura 18 apresentada aqui, foram adicionados alguns equipamentos diferentes a que auxiliaram na etapa do estudo de transferência de massa, que havia anteriormente, como exemplo do transformador de voltagem (6) utilizado para o controle da temperatura do banho do saturador.



Figura 18-- Bancada-- Coluna de absorção contínua: líquido-gás – leito fixo com recheio (1), rotâmetro (2), coluna de adsorção com sílica (3), saturador de ar (4), painel do leitor de temperatura (5), transformador de voltagem (6), borbulhador (7) Fonte : Próprio autor

A instalação do aparato experimental, da Figura 18, está esquematizada na Figura 17. Nela pode-se identificar o caminho de cada linha de operação. Observando a Figura 17, há duas linhas principais: a linha de gás que, num certo momento, passa a conter ar + acetona, e uma outra linha de solução absorvedora, composta pela fase pesada (água). Essas linhas entram em contato em contracorrente no procedimento experimental na coluna de absorção gasosa recheada.

No início da linha da fase pesada, como pode ser visto na Figura 17, onde está alocado o recipiente de solução absorvedora, a água, era succionada pela bomba peristáltica, alimentando a coluna pela sua parte superior, numa vazão pré-determinada. Já para início da fase leve o ar atmosférico comprimido, juntamente com a acetona, passava por um rotâmetro e é alimentado na coluna pela parte inferior. Deve-se salientar que, antes da alimentação do ar na coluna ele passava primeiramente por uma coluna de adsorção física (3) contendo sílica para diminuição da sua umidade. Em seguida essa corrente é injetada em um saturador (4) com acetona para, posteriormente, ser alimentado na parte inferior da coluna (1).

As amostras foram retiradas pelo topo da coluna, através de um borbulhador (7), e seringas acopladas na base da coluna e no ponto central, sendo três amostras de solução, água e acetona absorvida, para cada ensaio realizado, respeitando o planejamento experimental que será descrito posteriormente. As determinações das concentrações de acetona na alimentação da coluna foram realizadas por meio de espectrofotometria de absorção molecular na região do ultravioleta, utilizando-se o comprimento de onda de 272 nm.

No espectrofotômetro foi realizado de início uma varredura para a determinação de comprimento de onda analítico da acetona em solução aquosa. Essa varredura foi realizada em diferentes concentrações, chegando-se ao comprimento de onda de 272 nm, valor coerente com o do trabalho de Amatuzi (1999), que utilizou 300 nm para o sistema acetona - água, em concentrações de 0 a 2,0 mol%.

A curva de calibração teve como pontos de concentração e absorvância os pontos descritos na Tabela 3.

Tabela 3-Dados coletados de absorvância frente a valores de concentração de acetona em água predeterminadas.

Concentração de acetona em água (g/g)	Absorbância (A)
0	0
0,001	0,307
0,002	0,635
0,003	0,935
0,004	1,295
0,005	1,520
0,006	1,890

O dado obtido dessa análise para construção da curva de calibração gerou um gráfico do comportamento linear para a identificação a determinação da concentração acetona em água com coeficiente de correlação de $R^2 = 0,9985$, com uma expressão para conversão de dados mostrado na Equação 27. Na qual, A corresponde ao valor da Absorbância e Ca corresponde ao valor da concentração em (g/g) de acetona em água.

$$A = 312,71(Ca) + 0,0021 \quad (27)$$

Na realização dos ensaios de transferência de massa, baseado no planejamento experimental, o primeiro passo era sempre a pesagem da quantidade de acetona, em grama, numa balança analítica

do líquido a ser adicionado ao saturador, no início de cada ensaio. O era identificar a quantidade de massa que era transferido ao sistema, por diferença da massa inicial e final a cada processo realizado. Com o recipiente já isolado, para evitar a evaporação e por consequência perda de massa de acetona, dava-se a partida. As amostras eram analisadas obtendo respostas de concentração de acetona numa quantidade específica de volume de água.

A massa de acetona em ar era transferida para o sistema conforme mudanças de vazões da fase dispersa.

Para o planejamento experimental foram escolhidas as vazões de 2 e 4 L/min, para a fase dispersa, e as vazões de 1,13 L/min, e 1,41 L/min para fase contínua. Sendo adicionada ao estudo outras duas variáveis para identificar o quanto eles são significantes no estudo, sendo elas o tempo com dois valores: 1 min e 10 min; e a temperatura do banho do saturador de acetona: 25 °C e 62 °C.

Sendo assim, o estudo da transferência de massa realizado no presente trabalho consistiu na análise do fator de recuperação, a partir dos dados obtidos no estudo hidrodinâmico, respeitando os melhores parâmetros de perda de carga e inundação da coluna. Utilizando a água como solvente e a acetona como soluto de interesse, a massa de acetona transferida para o sistema dependia exclusivamente da temperatura do saturador e da vazão de ar, que, por sua vez, estava diretamente em contato com a massa inicial de acetona no saturador.

Ainda sobre o segundo grupo de experimentos, como pode ser observado na descrição, um planejamento experimental foi elaborado com base na utilização da metodologia de superfície de resposta. O objetivo foi obter um ponto ótimo e o estudo dos parâmetros que influenciam no processo em questão. O planejamento experimental será descrito no próximo item.

4.3 Planejamento experimental

O planejamento experimental utilizado no presente trabalho foi baseado no DCC (Delineamento Composto Central) com três repetições no ponto central (PC) e mais 16 ensaios, totalizando 19 experimentos. As variáveis independentes foram: a vazão da fase leve (Q_d), a vazão da fase pesada (Q_c), a temperatura (T) e o tempo (t). A Tabela 4 mostra as variáveis independentes (fatores) e os níveis dos fatores utilizados no planejamento.

Tabela 4 - Variáveis independentes e seus níveis (combinações para 4 variáveis - Fatorial Completo + Pc)

Variáveis Independentes (Fatores)	Nível do Fator		
	-1	0	+1
Vazão da fase dispersa, Q_d (L/min)	2	3	4
Vazão da fase contínua, Q_c (L/min)	1,13	1,27	1,41
Temperatura, T (°C)	25	43,5	62
Tempo, t (min)	1	5,5	10

Onde os níveis -1, 0 e +1 correspondem aos valores codificados do menor nível, ponto central e maior nível do fator, respectivamente.

Com um pacote computacional estatístico foi realizado o teste ANOVA (análise de variância), método utilizado para calcular os efeitos de cada um dos fatores (variáveis independentes) sobre a resposta (variável dependente), para um nível de confiança de 95%. Ou seja, para se comparar 3 ou mais grupos independentes avaliados por uma mesma variável dependente e quantitativa, a qual possua distribuição normal dos dados, faz-se necessária a realização deste teste.

Para nível de significância igual a 5% foi utilizada a regressão múltipla. Os níveis das variáveis independentes foram escolhidos com base em testes preliminares realizados na fase do estudo hidrodinâmico da coluna.

CAPÍTULO 5
Resultados e Discussões

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são abordados os resultados dos estudos levantados e sua relevância frente à hidrodinâmica e à transferência de massa da coluna de absorção recheada com anéis de Raschig. Os resultados obtidos são divididos em dois grupos. No primeiro grupo são apresentados os resultados da hidrodinâmica, enquanto que no segundo grupo os da transferência de massa.

Os resultados do primeiro grupo foram obtidos com base nos testes de perda de carga, com a identificação de pontos de carregamento e inundação, e os cálculo de K_{La} , sendo estes últimos apresentados em forma gráfica, com base em correlações existentes na literatura, indicando o modelo que mais se adequou ao sistema proposto. Já para a transferência de massa, os resultados foram obtidos respeitando-se os dados encontrados no estudo hidrodinâmico desenvolvido com o sistema água (fase contínua) e ar + acetona (fase dispersa), além de uma análise dimensional da coluna envolvendo os parâmetros de operação e geometria da coluna.

5.1 Inundação e pontos de carga

Os resultados referentes à inundação e aos pontos de carga são de grande importância no estudo da hidrodinâmica das absorvedoras, pois, a partir dessa análise, pode-se obter os limites de operação da coluna. Ou seja, para que o sistema opere de forma estável, os valores das variáveis operacionais devem estar dentro de certas faixas, com valores coerentes para o processo de absorção. Já a influência da variação da queda de pressão e dos pontos de inundação da coluna de absorção na maioria dos recheios randômicos, é uma função das vazões de gás e de líquido, considerando o comportamento descendente do líquido (fase pesada) ocupando os mesmos canais de escoamento ascendente do gás (fase leve).

Observando-se o item 3.3.2 sobre as correlações de testes de perda de carga encontradas na literatura, nota-se que, dentre eles, 5 métodos são os mais citados, a saber: Ergun (1952), Treybal (1980), Leva (1953), Prahl (1969) e Niranjana (1983). Em função das semelhanças da coluna do presente trabalho com as dos autores citados, o método Ergun (1952) foi o único escolhido para teste em leito seco e o método de Prahl (1969), para comparações de dados com o estudo na adição de solução aquosa, ou em leito molhado.

Os resultados para os testes com leito seco estão apresentados na Tabela 5, onde são mostrados os valores das vazões e das respectivas quedas de pressão que foram medidas. De forma gráfica, nas Figuras 19 e 20, esses resultados foram analisados relacionando-se as vazões de ar com a perda de carga na coluna, em escala logarítmica, segundo a correlação de Ergun (1952).

Tabela 5 - Resultados obtidos com os testes secos

Q _a (L/min)	ΔP/Z (Pa/m)	Q _a (L/min)	ΔP/Z (Pa/m)
1,2	117,9	8,0	663,9
1,8	192,4	9,0	704,3
2,5	260,6	10,0	775,6
3,0	294,7	11,0	837,7
3,6	328,9	12,0	881,1
4,0	353,7	13,0	912,1
5,0	465,4	14,0	971,1
6,0	539,8	15,0	1039,3
7,0	595,7		

Para os resultados referentes aos testes em leito seco, ou sem nenhuma injeção de água no sistema, pode-se identificar na Figura 19 uma curva que indica o comportamento turbulento para maioria das velocidades do gás.

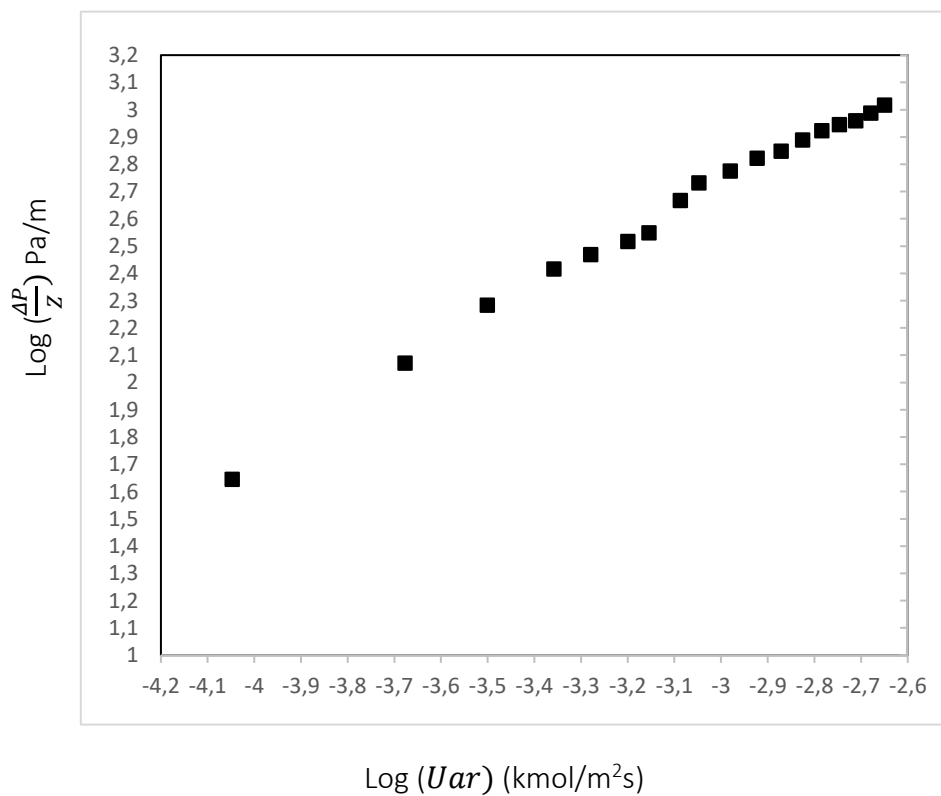


Figura 19 - Gráficos representando a curva experimental do teste seco (■), para vazões de ar adicionado ao sistema, determinado pela correlação de Ergun, Equação (13).

Na Figura 20 associam-se as respostas previstas pelo modelo de Ergun juntamente com dados experimentais, enquanto a Figura 19 apresenta somente os valores experimentais.

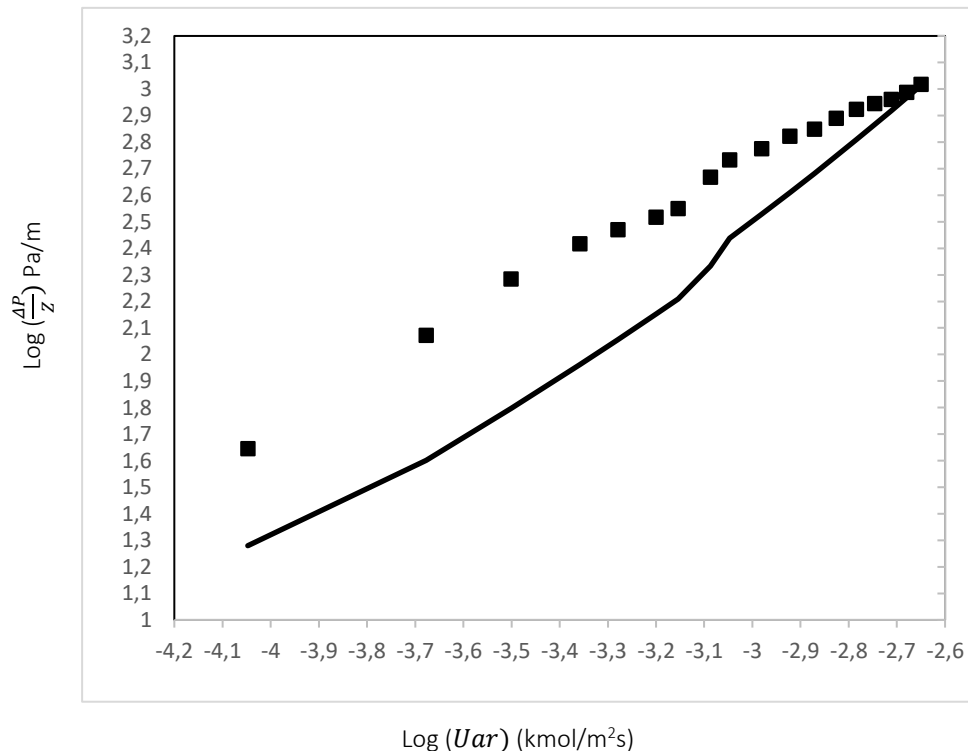


Figura 20 -Gráficos representando a curva experimental do teste seco (■), para vazões de ar adicionado ao sistema, determinado pela correlação de Ergun, Equação 13, onde em contém a resposta prevista pelo modelo (___).

Continuando a análise da Figura 19 e 20 para o leito seco, verifica-se um comportamento quase que linear de ambos, comprovando assim a previsão do método de Ergun, onde indica a linearidade deste tipo de curva. Deve-se salientar que o comportamento linear está de acordo com o comportamento apresentado no gráfico da Figura 10 apresentado por Caldas *et al.*, 2003; Razi *et al.*, 2012.

A diferença gráfica do modelo para o resultado experimental se dá também por questões físicas do sistema, como algum vazamento de ar não identificado, oscilação desta vazão, não dispersão ideal dessa corrente, ou até mesmo como possíveis erros associados a coleta de dados, já que esses dados dependiam de uma resposta visual do manômetro em U, pertencente ao sistema experimental.

Para os testes envolvendo os ensaios com a adição de solução aquosa no sistema, ou os testes em colunas molhadas, para diferentes vazões de água, foi assumindo o Método de Prah (1970), com auxílio da CGQP proposta por Sherwood, Leva e Eckert (SLE), como principal método de análises dos resultados, já que o método de Niranjani (1983) não se adequou aos dados dando

resultados incoerentes aos esperados. Os resultados são ilustrados na Figura 21 referentes a 5 vazões de água: 0,72 L/min; 0,86 L/min; 1,13 L/min; 1,27 L/min e 1,41 L/min. Deve-se salientar que as 5 vazões de água foram associadas com as vazões de ar de entrada na coluna, respeitando as mesmas vazões realizadas pelo teste a seco. Na Tabela 6 estão ilustrados os valores obtidos nesses ensaios.

Tabela 6 Resultados experimentais de Queda de Pressão obtidos com os testes molhados.

Q_d (L/min)	Q_c (L/min)	$\Delta P/Z$ (Pa/m)	Q_d (L/min)	Q_c (L/min)	$\Delta P/Z$ (Pa/m)
1,2	0,72	235,79	3,6	0,72	663,94
	0,86	297,84		0,86	595,68
	1,13	521,22		1,13	980,39
	1,27	304,05		1,27	918,34
	1,41	459,17		1,41	769,42
1,8	0,72	297,84	4,0	0,72	843,88
	0,86	335,07		0,86	831,47
	1,13	595,68		1,13	1154,13
	1,27	359,89		1,27	1203,77
	1,41	515,02		1,41	806,65
2,5	0,72	335,07	5,0	0,72	1042,4
	0,86	397,12		0,86	Inundação/arraste
	1,13	694,96		1,13	1526,4
	1,27	446,76		1,27	Inundação/arraste
	1,41	558,45		1,41	1141,7
3,0	0,72	558,45	6,0	0,72	1265,8
	0,86	508,81		0,86	Inundação/arraste
	1,13	831,47		1,13	Inundação/arraste
	1,27	744,60		1,27	Inundação/arraste
	1,41	620,50		1,41	Inundação/arraste

A seguir, o gráfico da Figura 21 mostra os resultados obtidos para os testes na coluna com leite molhado de forma gráfica com base da Figura 10.

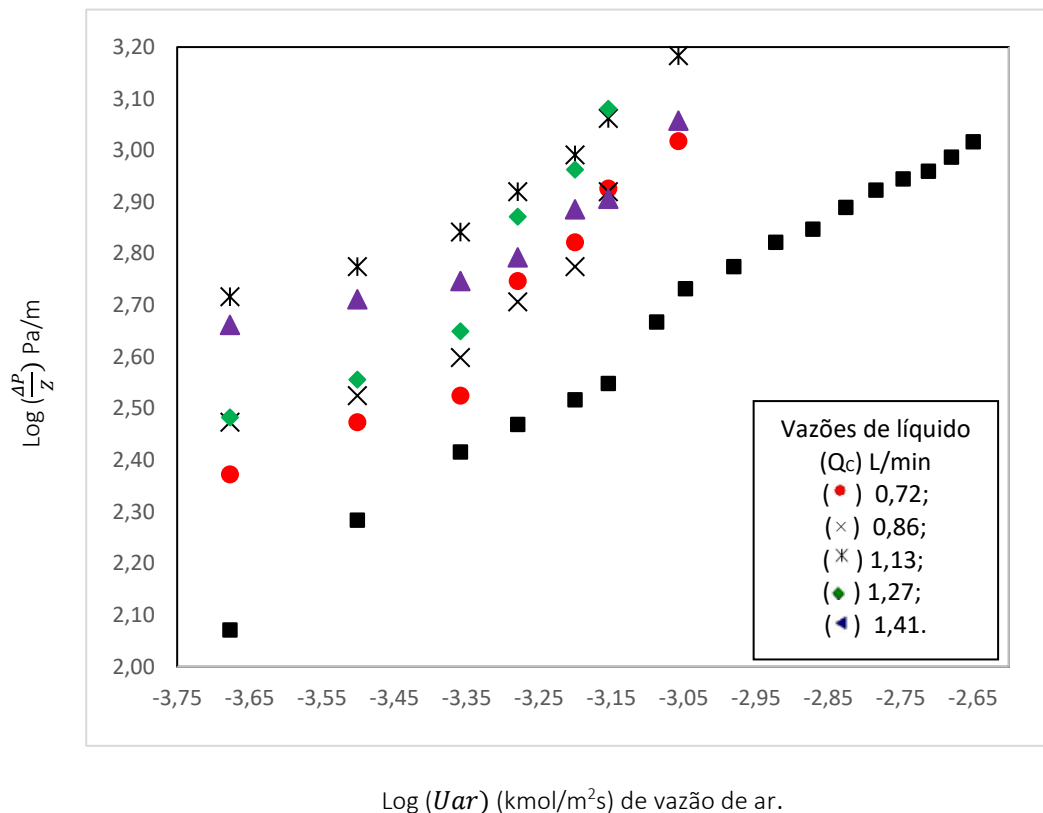


Figura 21- Gráfico comparativo entre a curva do teste seco (■), com as curvas criadas para os testes molhados determinado pelo método Prahl, para estudo da queda de pressão.

Na Figura 21 são apresentados os 5 conjuntos de pontos para os testes de coluna com leito molhado que estão na parte superior do gráfico, utilizando-se o Método de Prahl (1970), com auxílio da CGQP proposta por Sherwood, Leva e Eckert (SLE). Na parte inferior é apresentada também a curva obtida para os testes realizados na coluna com leito seco utilizando o modelo de Ergun (1952). Na Figura 21, destaca-se a curva com maior quantidade de pontos (teste seco), onde são correlacionados a vazão de ar com a queda de pressão do sistema.

Os pontos com cores diversas (teste molhados), localizados acima da curva do teste seco, correlacionam, as mesmas vazões utilizadas no primeiro ensaio, sendo que a disparidade dos testes está na presença de solução aquosa no sistema, o que faz deslocar as curvas para a parte superior do gráfico.

Analisando-se os dados mostrados nas Figuras 19 e 20, observa-se que as curvas obtidas também estão semelhantes às do gráfico da Figura 10, apresentado por Caldas *et al.*(2003); Razi *et al.*(2012), o que comprova a eficiência do modelo também para colunas com leito molhado. Além disso, os dados apresentados mostram uma disparidade entre o número de pontos da curva para o

leito seco e a correspondente ao leito molhado. Nos testes com leito seco são apresentados um total de 18 pontos, que representam 18 mudanças de vazão de ar (U), enquanto que, para leito molhado o número de dados de vazão de ar diminuiu para no máximo 8, variando entre 1,2 a 6,0 L/min. Esse intervalo é justificado pelos próprios limites da coluna, devido principalmente aos pontos de inundação, conteúdo este que será discutido com maior detalhamento posteriormente.

Ainda na análise da Figura 21, para o teste em leito molhado, com baixas vazões de ar, foi observada uma maior perda de carga, sendo a inclinação da curva obtida de forma similar à curva do teste em leito seco. Nessa região, indicada na parte inferior do gráfico, observou-se inclusive um gotejamento contínuo do líquido através do recheio, e sem retenções. Esse efeito é devido ao aumento da velocidade do gás, que faz com que a inclinação da curva varie, aumentando mais rapidamente a perda de carga, definindo um ponto do processo chamado *loading point*. Segundo Nobrega (2007) é a partir deste ponto que o gás começa a impedir o escoamento do líquido, se acumulando em alguns pontos da coluna.

Quando analisados os valores da queda de pressão (ΔP) versus vazão de ar (Q_d) para diferentes valores de vazões de água, sem a utilização da escala logarítmica, foi possível encontrar o gráfico da Figura 22.

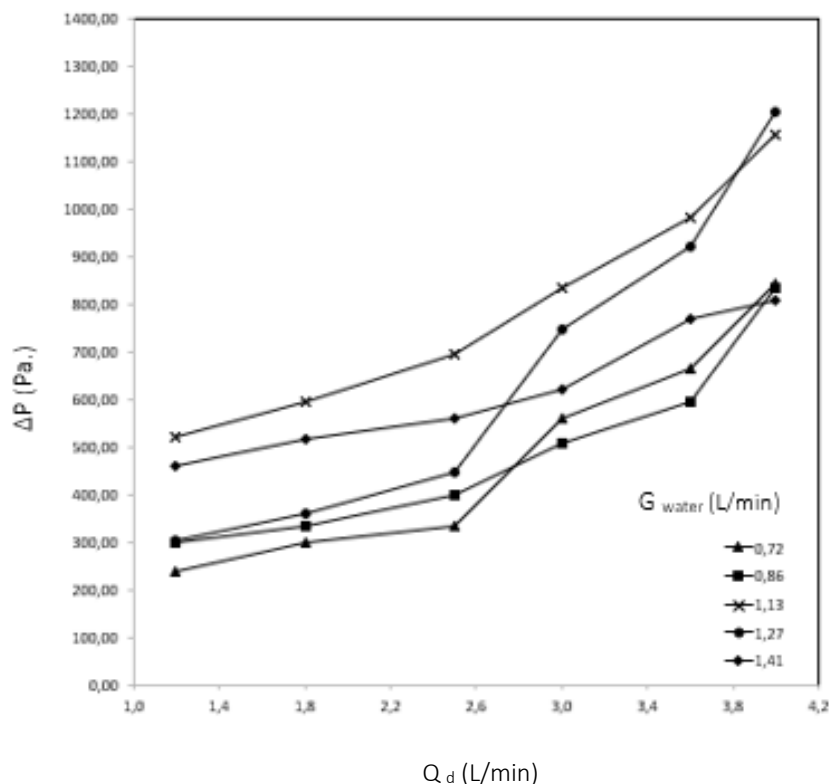


Figura 22 - Gráfico da perda de carga versus vazão de ar para diferentes valores de vazões de água

Na Figura 22 é observado que em todas as curvas acontece um crescimento da queda de pressão com a vazão de ar. Esse comportamento é justificado tendo em vista que com um maior volume de gás na alimentação, maior deve ser a pressão na base da coluna provocando uma maior queda de pressão na coluna. Este fenômeno é ainda mais acentuado com o aumento da vazão de água. Em outras palavras, vazões de água mais elevadas irão dificultar ainda mais a passagem da corrente gasosa pela coluna.

Conforme mostrado na Figura 22, em geral as curvas com vazões de água mais elevadas mostraram-se com valores de queda de pressão maiores que aquelas com baixas vazões.

Ainda na perspectiva da análise comportamental do efeito da vazão e da queda de pressão, outra avaliação foi feita, envolvendo a queda de pressão e a razão entre as duas vazões, Q_c / Q_d . O gráfico obtido é mostrado através da Figura 23.

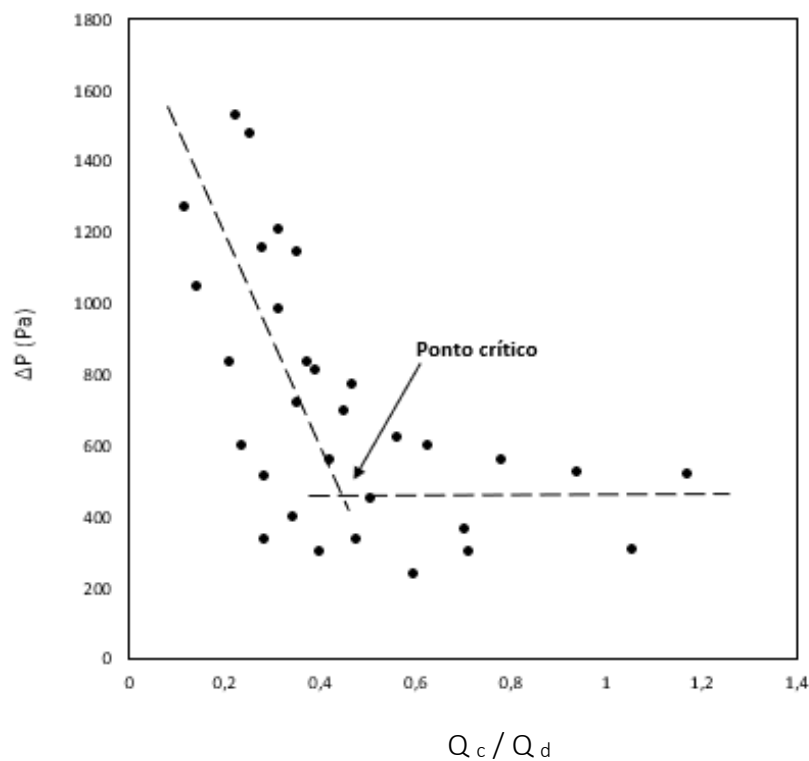


Figura 23 - Variação da queda de Pressão com a razão entre as vazões, Q_c / Q_d

De acordo com a Figura 23, pode ser observada a concorrência de duas retas, a primeira delas aproximando-se do comportamento de uma reta descendente e a outra reta paralela ao eixo das abscissas. Verifica-se que a queda de pressão decresce com o aumento da razão entre as fases até ser atingido um ponto em que o valor de ΔP permanece constante. Ao ponto obtido do cruzamento das duas retas dá-se o nome de “ponto crítico” e é considerado como sendo o ponto cujo

valor de Q_c / Q_d indica o início da faixa de estabilidade da queda de pressão na coluna. É importante observar este ponto já que é a partir dele que a queda de pressão na coluna tende a se aproximar de uma constante, favorecendo a um maior contato entre as duas fases na coluna, elevando os níveis de transferência de massa do processo.

5.1.1 Vazões de inundação e de carga

A inundação é um fenômeno que ocorre na maioria dos equipamentos de separação líquido-líquido ou líquido vapor, principalmente quando ocorre o contato em contracorrente. No processo uma das correntes impede a passagem da outra, fazendo com que o tempo de residência das fases na coluna seja reduzido, diminuindo consequentemente a transferência de massa entre as fases. Sendo assim, torna-se de grande importância a determinação da relação correta entre as vazões que são introduzidas na coluna, para que o processo de inundação seja evitado.

No caso das absorvedoras as vazões de inundação podem ser obtidas através da determinação de pontos críticos nos gráficos de perda de carga. Os pontos críticos aparecem quando ocorrem mudanças na inclinação das curvas formadas nos gráficos. Estes pontos geralmente são dois, o primeiro é o ponto de carga enquanto que o segundo, o ponto de inundação.

Segundo Nobrega (2007); Heymes *et al.*(2006), a segunda variação na inclinação da curva (*flooding point*), ocorre devido à formação de uma camada de líquido com formação de espuma que irá provocar o arraste do líquido pelo ar, sendo o mesmo fenômeno observado também para a primeira variação da inclinação da reta, conhecida como ponto de carga (*loading point*).

No presente trabalho, assim como realizado no trabalho de Guillerm *et al.*(2016), foram apresentados os 3 regimes para os ensaios realizados, ou seja, a zona antes do ponto de carga, a zona entre o ponto de carga e o de inundação, e a zona após o ponto de inundação. Esses pontos são identificados através dos gráficos das Figuras 24 (a), (b), (c), (d) e (e), que se trata de uma derivação do gráfico da Figura 21, mostrada no item anterior.

Em cada figura são apresentados gráficos da perda de carga em função da vazão de ar para cada vazão de água específica, utilizada nos experimentos com leito molhado. Além das curvas com leito molhado, para efeito de comparação, também foi representada a curva com leito seco.

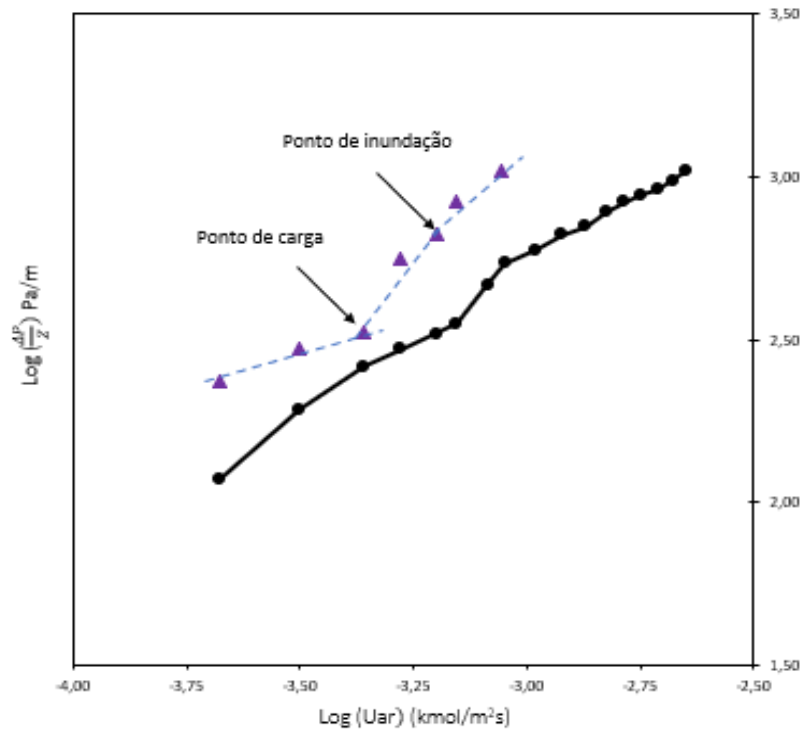


Figura 24(a) - Comportamento da diferença de pressão para fixação da vazão de água em 0,72 L/min.

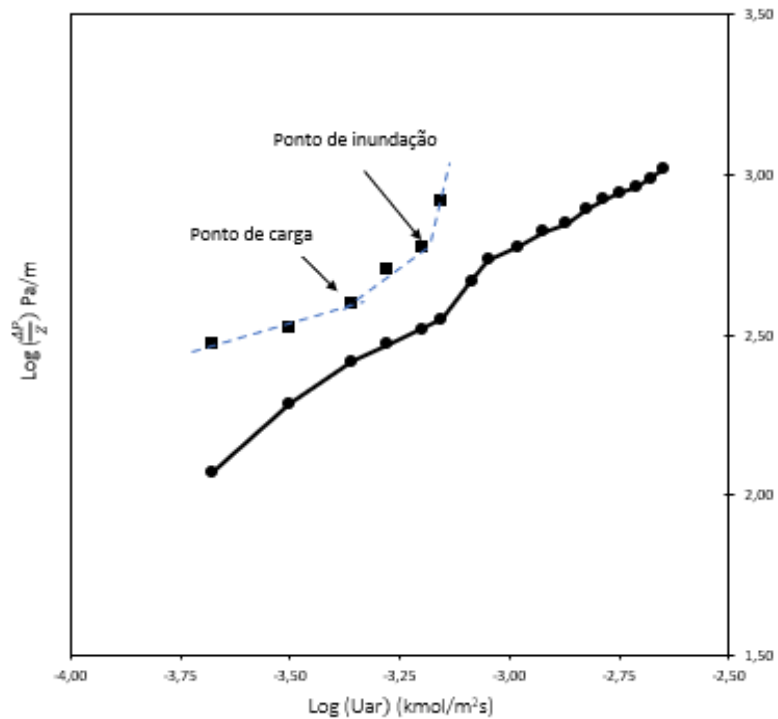


Figura 24 (b) - Comportamento da diferença de pressão para fixação da vazão de água em 0,86 L/min.

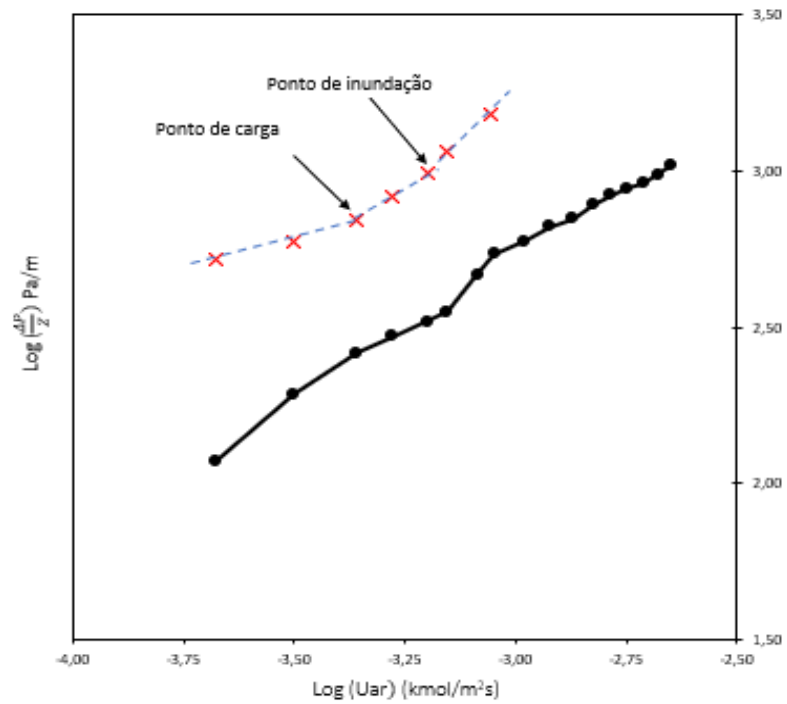


Figura 24(c) - Comportamento da diferença de pressão para fixação da vazão de água em 1,13 L/min.

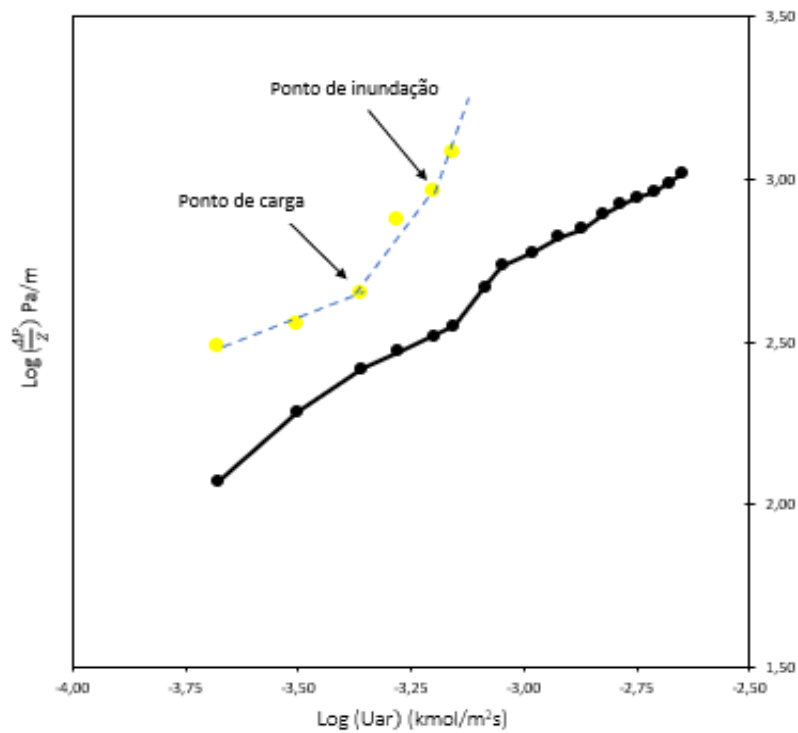


Figura 24 (d) - Comportamento da diferença de pressão para fixação da vazão de água em 1,27 L/min.

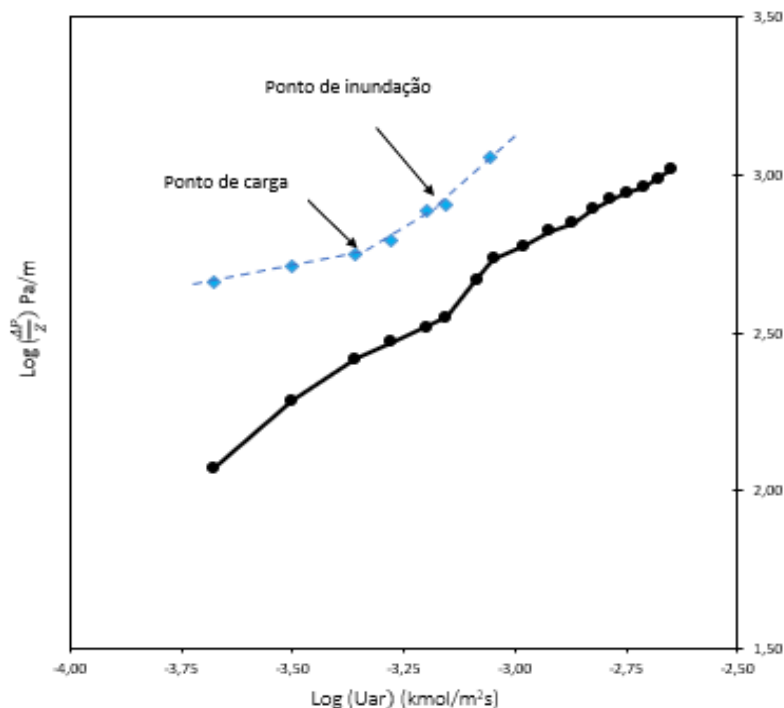


Figura 24 (e) - Comportamento da diferença de pressão para fixação da vazão de água em 1,41 L/min.

Através dos pontos marcados nos gráficos é possível a identificação da mudança de inclinação com a variação da vazão de ar nos testes com leito molhado e os correspondentes pontos de carga (*loading point*) e de inundação (*flooding point*). Uma observação a ser levantada para esses resultados diz respeito à diferença entre a quantidade de pontos tomados com leito molhado e com leito seco. Isso ocorreu devido à limitação das vazões de ar quando se utiliza anéis de Raschig em absorvedoras. Daí ter ocorrido uma redução no número de pontos nos experimentos com leito molhado.

Em todos os gráficos há uma tendência de mudança de inclinação da reta, respeitando a marca de -3,15 para o $\log(U_{ar})$ que, no caso, corresponde a uma vazão de ar de 4,0 L/min. Entretanto, analisando-se a Figura 24 (d), observa-se que só foi possível a coleta de 5 pontos experimentais, e o ponto de inundação não pôde ser encontrado graficamente, pois, mesmo realizando testes em diferentes momentos, a coluna não suportava a vazão de ar para o próximo ponto, o que, experimentalmente, impossibilitou essa determinação exata do ponto de inundação. Assim é possível que esse ponto esteja muito próximo à área de carregamento.

Analisando-se todos os gráficos, com a exceção do gráfico da Figura 24(d), já que ele se comportou de forma atípica aos demais, verifica-se que, em todos eles, o ponto de inundação, está situado entre os valores logarítmicos de -3,28 até -3,15, o que representa entre as vazões molares de ar entre 3,0 e 4,0 L/min, em todos os testes.

Um outro detalhe importante diz respeito ao comportamento da curva apresentada na Figura 24 (a), onde se utiliza a vazão de água de 0,72 L/min. Neste gráfico, observa-se que a curva se encontra mais próxima da curva do teste para leito seco, ocasionando uma variação acentuada a partir ponto de carga em comparação com outros gráficos, pois as forças de arraste nessas condições não se mostram equivalentes no contato das fases em contracorrente, modificando assim o comportamento gráfico mais abruptamente, devido a retenção líquida no sistema.

Conforme verificado no gráfico da Figura 24 (a), a inclinação da curva formada é bem mais acentuada quando comparada com as das outras curvas, ou seja, isso quer dizer que uma maior perda de carga ocorre com menores vazões de água. Este fenômeno já era esperado devido à forte retenção de líquido (*holdup*) provocada pelo arraste de ar, que impede o escoamento da fase líquida (NOBREGA, 2007).

Comparando-se os três gráficos das vazões de água de 1,13; 1,27 e 1,41 L/min, Figuras 24 (c), (d) e (e), respectivamente, com os gráficos das vazões de 0,72 e 0,86 L/min, Figuras 22 (a) e (b), percebe-se um comportamento similar numa mesma área gráfica, entre os valores logarítmicos de -3,28 até -3,15 de vazão de ar, podendo ser identificado uma primeira mudança de inclinação da reta, no entanto de uma forma menos abrupta quando comparado com menores vazões de água.

Como já relatado, as vazões de 0,72 e 0,86 L/min podem ser consideradas baixas vazões frente a realidade da unidade de estudo onde foi determinando um *loading point* apresentando uma maior retenção líquida e conseqüentemente uma maior perda de carga.

Na avaliação da perda de carga na coluna, as vazões utilizadas mostraram-se todas com valores abaixo das vazões de inundação ou do ponto de inundação, o que pode ser determinado com a mudança da inclinação da reta, já mostrada nos gráficos anteriores. Entretanto, deve-se salientar também que o ponto da inundação era visualizado no próprio teste experimental, já que ocorria um borbulhamento na parte superior da coluna causado devido à retenção do líquido pela fase gasosa. O que corrobora perfeitamente com as respostas gráficas apresentadas.

Ainda sobre os 5 gráficos apresentados verifica-se que é perfeitamente possível se determinar os pontos de inundação e de carga da coluna também observando-se o comportamento das curvas obtidas, através do modelo de Bianchini (2018). De acordo com os valores obtidos dos gráficos, as vazões carga e de inundação encontradas são descritas na Tabela 7.

Tabela 7 - Vazões e Quedas de Pressão para os pontos de carga e de inundação

Pontos de Carga			Pontos de Inundação		
Q_d (L/min)	Q_c (L/min)	$\Delta P/z$ (Pa/m)	Q_d (L/min)	Q_c (L/min)	$\Delta P/z$ (Pa/m)
3	0,72	558,5	4	0,72	843,9
	0,86	508,8		0,86	831,5
	1,13	831,5		1,13	1154,1
	1,27	558,5		1,27	1203,8
	1,41	769,4		1,41	1141,7

Conforme verificado nos dados apresentados na Tabela 7 observa-se primeiramente que todos os pontos encontrados foram para vazões de gás de 3,0L/min para os pontos de carga e de 4,0 L/min para os de inundação. Logo, identificados os pontos de carga e de inundação pode-se construir um gráfico com os valores de $\Delta P/z$ em função da vazão de água encontrados, gerando assim duas curvas distintas, uma para os pontos de carga e outra para os pontos de inundação, conforme mostrado no gráfico da Figura 25.

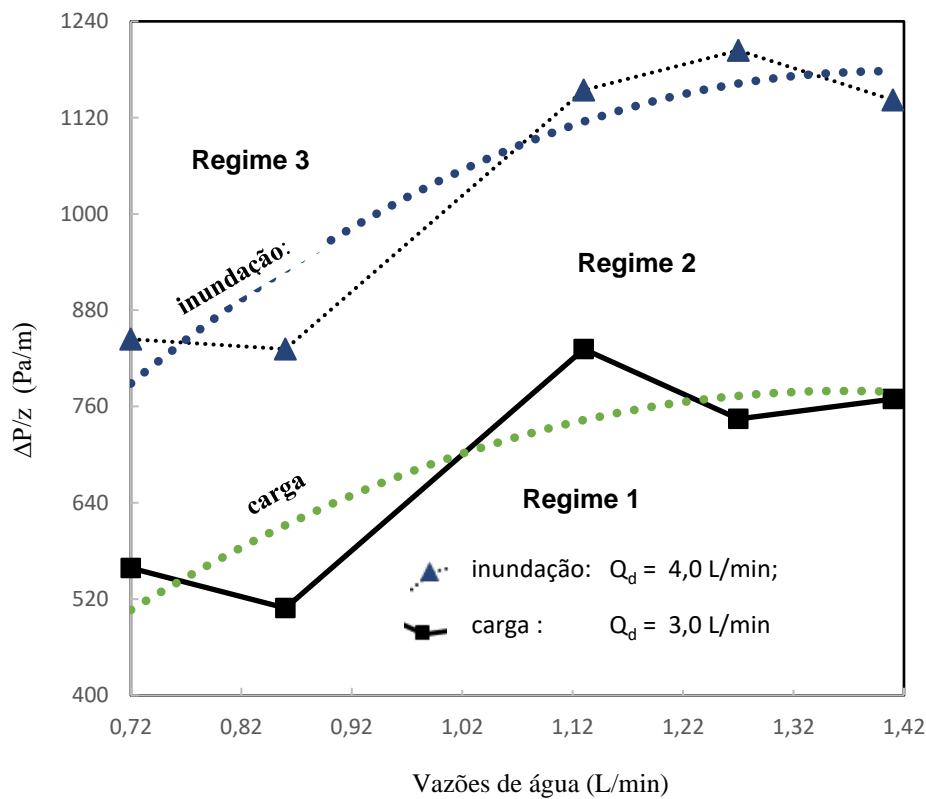


Figura 25 - As curvas de carga e de inundação e as regiões de operação

No gráfico da Figura 25 são formadas três regiões de operação da coluna. A região 1, localizada abaixo da linha de carga, a região 2, na faixa situada entre a linha de carga e a linha de inundação e a região 3, situada acima da curva de inundação. Ou seja, abaixo da linha de carga as duas fases se contatam por todo o comprimento da coluna. Na região 2 inicia-se o processo em que a fase gasosa começa a impedir a descida da corrente líquida. E na região 3, acima da curva de inundação, quando acontece o arraste do líquido pela fase gasosa no topo da coluna.

Por efeitos fenomenológicos, a região 1 é a mais indicada para a operação das absorvedoras, isso devido ao escoamento contínuo das duas fases, líquida e de gás, por todo o comprimento da coluna o que favorece o processo de transferência de massa entre as fases. Já para as operações com vazões situadas na região 2, geralmente acontece acúmulo de líquido na coluna, ocasionado pelo início do impedimento do escoamento da corrente líquida pela corrente gasosa. Para região 3, acima da curva de inundação, é justamente quando acontece o arraste de líquido pela corrente gasosa e, portanto, a região onde não se deve operar a coluna.

5.1.2 Estudo da diferença de pressão ($\Delta P/z$)

5.1.2.1 A diferença de pressão medida experimentalmente e a calculada

As quedas de pressão experimentais estão apresentadas na Tabela 8, onde são mostradas todas as vazões de ar e água utilizadas no presente trabalho. Os valores destacados em negrito são valores de diferença de pressão entre as vazões do ponto de carregamento e o ponto de inundação, 3,0 e 4,0 L/min, respectivamente, como foi discutido no item anterior.

Tabela 8 -Dados de quedas de pressão experimentais $\Delta P/z$ (Pa/m)

Qd (L/min)	Queda de pressão experimental (Pa/m)				
	Vazão de água (L/min)				
	0,72	0,86	1,13	1,27	1,41
1,2	235,8	297,8	521,2	304,0	515,0
1,8	297,8	335,1	595,7	359,9	558,5
2,5	335,1	397,1	695,0	446,8	620,5
3	558,5	508,8	831,5	744,6	769,4
3,6	663,9	595,7	980,4	918,3	806,7
4	843,9	831,5	1154,1	1203,8	1141,7
5	1042,4	INU	1526,4	1476,8	INU
6	1265,8	INU	INU	INU	INU
7	INU	INU	INU	INU	INU

INU - Inundação

Dados de queda de pressão obtidos nos experimentos também foram comparados com os calculados através do método de Prahl (1970) (Equação 24) exposta no item 3.3.2 – rerepresentado logo abaixo, com auxílio do método gráfico CGQP.

$$\frac{\Delta P}{z} = \frac{Y_n}{1 - Y_m} \quad (24)$$

Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 9

Tabela 9-Dados da queda de pressão calculada $\Delta P/z$ (Pa/m) segundo as vazões da fase líquida

Q _d (L/min)	Queda de pressão calculada (Pa/m)				
	Q _c (L/min)				
	0,72	0,86	1,13	1,27	1,41
1,2	195,1	464,2	724,9	721,7	698,9
1,8	273,1	405	681,4	797,6	665,3
2,5	263,4	564,3	658,6	768,6	647,5
3	390,8	464,4	758,1	756,6	746,3
3,6	741,8	549	748	746,8	634
4	764,1	643	743,1	742	1114
5	1025,0	INU	734,3	733,4	INU
6	1200,7	INU	INU	INU	INU
7	INU	INU	INU	INU	INU

Uma comparação entre os valores das quedas de pressão experimentais e calculado através da Equação (24), permite a determinação do erro entre os pontos, o que pode ser observado através do gráfico da Figura 26.

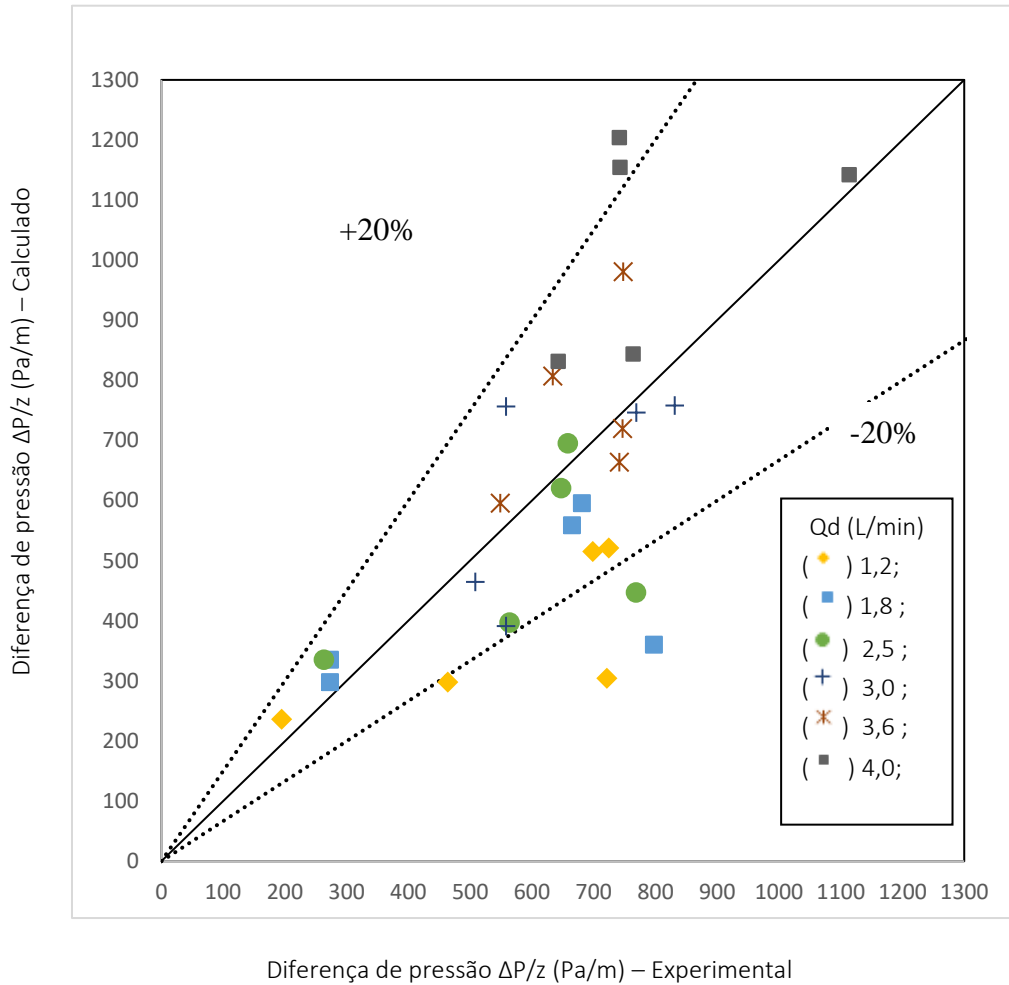


Figura 26 - Gráfico comparativo entre os valores perda de carga experimentais e os calculados, pelo método Prahl.

Na Figura 26 estão apresentados os pontos comparativos entre os valores encontrados experimentalmente para a perda de carga e os calculados pelo método de Prahl (1969). Num total de 5 pontos para cada grupo de vazão de ar estudado. Pontos que aparecem em ordem crescente das vazões de água testadas na pesquisa, ou seja, de 0,72 até 1,41 L/min.

Fazendo-se uma comparação de alguns dados encontrados na Tabela 8 e na Tabela 9, juntamente com a análise comparativa da Figura 22, para valores de diferença de pressão em Pa/m, verifica-se que o teste para a maior vazão (1,41 L/min) de água (último ponto no gráfico de cada vazão de ar estudada), os menores erros associados às vazões de ar estão na combinação desta vazão, com vazões de ar entre 2,5 e 3,0 L/min, apresentando erros pequenos, de 4,35 e 3%, respectivamente. Ou seja, quando correlacionado uma maior vazão de água com vazões mediana de ar, os valores experimentais se adequam ao método de Prahl.

Para a identificação das melhores vazões a serem utilizadas na coluna, foram feitas análises de erro nos dados coletados com as respostas calculadas, no intuito de obter valores de $\Delta P/z$ (Pa/m)

preditos pelo método Prahl. A ideia foi entender conjuntamente quais vazões de ar e de água associados apresentariam menores erros.

As vazões de água de 1,13 e 1,41 L/min na combinação com a vazão de ar no valor de 2,5 L/min, obteve-se erros menores de 6%, sendo 1,13 L/min com erro de 5,24% e a vazão de 1,41L/min, com 4,35%. Ou seja, na combinação dessas vazões líquidas vazões líquidas com a vazão de ar no valor de 2,5L/min, será possível uma predição de valores de queda de pressão pelo método de Prahl com erros consideravelmente pequenos.

A vazão de fase leve de 3,6 L/min, foi a que em conjunto apresentou menores erros associados, apresentando um erro de 14%. Diferentemente da vazão 1,2 L/min, com mais de 50% dos seus valores considerados inconsistentes com o experimental. Assim a vazão de ar inicialmente citada (3,6 L/min) quando combinado com valores de 1,27 L/min da fase pesada, apresentou um erro de 3,75% do que foi fornecido pelo método.

A vazão de água em 1,27 L/min, apresenta um maior nos erros médios calculados, mas individualmente nessas vazões, a combinação denota um erro baixo. Em outras palavras a vazão líquida de 1,27 L/min não se adequou ao método de Prahl. Nesta faixa, mesmo fazendo testes em triplicada, foi identificado que no procedimento de comparação após realização de tratamento de dados, os erros foram elevados, onde não se indica a utilização dessa coluna nesse ponto de vazão, tirando essa exceção citada de combinação com vazão de ar de 3,6 L/min.

De forma geral, nessa análise de dados, uma conclusão na comparação dos dados com o gráfico da Figura 26, está a presença de menor erro para a vazão de ar de 3,6 L/min, graficamente apresente-se próximo a linha da bissetriz (quanto mais próximo da bissetriz, menor o erro associado), e de todos os valores presente, são os que mais estão centralizados. Foi realizado o somatório de erros de todos os grupos e feito uma média individualmente por grupo de vazões de ar, e como esperado o menor erro médio foi justamente o da vazão citada, com 14% de erro médio total para esse conjunto de ensaio.

A vazão que apresentou maior erro associado, foi a de 0,72 L/min de ar, e a justificativa se dá justamente pela instabilidade sistêmica, apresentando muita retenção líquida no início do processo, já que essa vazão de ar é inferior às outras, dando oportunidade da coluna reter mais líquido, apresentando erros mais elevados.

Já com relação aos pontos de inundação (INU) percebe-se que elas aconteceram entre as vazões de ar de 5,0 a 7,0 L/min para quase todos os pontos de vazão de líquido. Isso se deve ao fato de que se atingiu os limites da própria coluna. Nesse ponto, a coluna já passou pela sua zona de carregamento e está no ponto de inundação, que aqui foi identificado como o da vazão de líquida de 4,0 L/min. Fenomenologicamente, a quantidade de ar que é injetada sobe com uma força muito

elevada para a coluna, fazendo com que a quantidade de fase líquida, não consiga escoar, fazendo o caminho contrário. Ou seja, impossibilita a troca de massa entre as fases, já que para isso seria necessário o contato entre elas dentro da coluna.

Outro detalhe, não menos importante, está relacionado ao volume de solução no sistema. Se observado na Tabela 8, com menor vazão de água para o sistema (vazão de 0,72 L/min), a coluna conseguiu suportar a entrada de vazão de ar de até 6 L/min, sendo o único cenário a apresentar esse comportamento. A justificativa está também relacionada aos limites de coluna. Quando injetada uma menor quantidade de solução aquosa no sistema a pressão interna do sistema era também menor. Dessa forma, quando se injetava mais volume de ar para o sistema, a pressão limite para a coluna inundar seria alcançada quando o valor vazão da fase leve fosse 6 L/min, sendo que o volume para a vazão de 0,72 L/min era o mesmo.

5.1.2.2 O estudo do efeito da vazão de ar (Q_d) na diferença de pressão

Para um estudo da diferença de pressão na mudança de vazão de ar, uma análise geral das variações de $\Delta P/z$ (Pa/m) foi realizada. A dinâmica dessa etapa foi relacionada na identificação do salto do número de $\Delta P/z$ na variação da vazão de ar, ou seja, quando era feita a mudança de vazão de ar para o sistema, ocorria um acréscimo no valor de $\Delta P/z$, e esse valor foi identificado ponto a ponto. Na Tabela 10 são mostrados os dados obtidos.

Tabela 10 -Dados de diferença de pressão $\Delta P/z$ (Pa/m) para a mudança de vazão de ar

Mudança de Vazão do ar (L/min)	Experimental				
	Vazão de água (Q_c) (L/min)				
	0,72	0,86	1,13	1,27	1,41
1,2 –1,8	62,0	37,3	74,5	55,9	43,5
1,8 –2,5	37,3	62,0	99,3	86,9	62,0
2,5 –3,0	223,4	111,7	136,5	297,8	148,9
3,0 –3,6	105,4	86,9	148,9	173,7	37,3
3,6 –4,0	180,0	235,8	173,7	285,5	335,0
4,0 –5,0	198,5	INU	372,3	273	INU
5,0 –6,0	INU	INU	INU	INU	INU
6,0 –7,0	INU	INU	INU	INU	INU

O conjunto de dados expostos na Tabela 10, na primeira coluna da tabela, nomeada de ‘mudança de vazão de ar (L/min)’, estão alocadas as faixas de valores de vazões de ar. Para cada variação de vazão, foi anotado o respectivo incremento de perda de carga.

Para melhor entendimento, tem-se o exemplo da passagem de ar entre as vazões de 2,5 para 3,0 L/min, no ensaio de 0,72 L/min de vazão de água, apresentando um aumento de volume de ar no sistema, e por consequência um salto de 223,4 Pa/m. Ou seja, verificando a Tabela 9, onde na combinação de 2,5 L/min de ar e 0,72 L/min de água o valor dos dados de diferença de pressão era de 335,1 Pa/m, quando passado para a vazão de ar de 3,0 L/min de ar, o valor de 223,4 Pa/m foi adicionado a esse valor anterior, tornando o valor atual de 558,5 Pa/m.

Sendo assim, é possível observar o conjunto de pontos mais críticos para uma mudança de vazão de ar. Na corrente líquida de 1,27 L/min, por exemplo, apresenta um salto consideravelmente elevado em comparação com outros pontos analisados, chegando a um valor de 285,5 Pa/m, considerando que a mudança de vazão de ar foi de somente 0,4 L/min do ponto de 3,6 até 4,0 L/min da vazão de ar. Corroborando com discussões realizadas anteriormente, quando foi apresentado que o valor de 4,0 L/min de ar foi exposto como o ponto de inundação da coluna, pois é um salto muito alto em relação aos outros.

Fazendo a análise geral da tabela, e não somente o de 1,27 L/min, também foram identificados valores maiores de salto de diferença de pressão $\Delta P/z$ para essa vazão de ar entre 3,6 e 4,0 L/min, Como exemplo de 335,0 Pa/m para o sistema de vazão de água de 1,41 L/min, ou seja, também com pouco aumento no volume de ar no sistema, acarretou um salto elevado de pressão.

Para a passagem de corrente entre 3,0 a 3,6 L/min de ar, havendo assim mudança de 0,6 L/min de ar, o comportamento de variação de pressão não foi a mesma do exemplo anterior, apresentando valores menores.

Com essa Tabela 10 é possível uma estimativa de perdas de carga quando for necessário a mudança de vazão de ar. Como pode ser observado, os pontos mais críticos e elevados para o aumento da perda de carga estão alocados entre a vazão 2,5 até 4,0 L/min de vazão de ar. Mesma área identificada como área referente a zona de carga.

5.1.2.3 Análise dimensional

A análise dimensional, segundo Osgood (2008), é comumente utilizada na engenharia para prever características condicionais de um escoamento, compressibilidade ou incompressibilidade e até mesmo consequências dos efeitos viscosos das substâncias em um sistema de estudo. A metodologia para obtenção desses coeficientes se dá pela dedução com base no Teorema Pi de Buckingham, e esse foi o método trabalhado para se determinar esses números adimensionais.

No Teorema Pi de Buckingham, determina-se um grupo de propriedades, assim uma função genérica corresponderá a essas variáveis. Todas são visualizadas como um parâmetro qualquer X

contido em uma função f , juntamente a outras propriedades contidas na função (BLÖSCHL, 1994). Logo, para n parâmetros:

$$f(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (29)$$

Os parâmetros dimensionais são transformados em parâmetros adimensionais Π , em uma quantidade definida por $n - m$, sendo m é o número mínimo de dimensões independentes associadas, chamados de parâmetros repetentes (YÜKÇÜ *et al.*, 2012). Cabe a ressalva que o $n - m$ mostra a quantidade de parâmetros adimensionais necessários. Onde m está relacionado a quantidade numérica dos diferentes sistemas de dimensões primárias existente no sistema, a exemplo dos MLt , e FLt . A combinação entres os parâmetros restantes do domínio de f formam Π , definido formalmente por:

$$F(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-m}) = 0 \quad (30)$$

Em que cada Π pode deduzir-se um conjunto de propriedades de uma função, como para Π_1 e F_1 :

$$\Pi_1 = F_1(\Pi_1, \dots, \Pi_{n-m}) \quad (31)$$

Por mais que seja considerada simples a etapa das escolhas dos grupos Π , essa exige um conhecimento prévio das propriedades físicas e geométricas do seu sistema. O caminho mais seguro se dá na escolha de todas as propriedades que de uma forma efetiva influenciam experimentalmente.

A análise dimensional do presente trabalho objetiva a determinação de uma equação empírica que correlaciona a perda de carga na coluna de absorção recheada com anéis de Raschig, com base dos parâmetros operacionais.

A queda de pressão com base nos dados que já foram estudados depende do diâmetro da coluna, das velocidades das fases dispersa e contínua e das propriedades físicas dos sistemas líquidos, além das características da coluna, como altura e do diâmetro interno. Na Tabela 11 estão apresentados os parâmetros dimensionais envolvido no sistema de estudo.

Tabela 11 - Parâmetros para análise dimensional.

Parâmetro	Símbolo	Dimensão	Unidade
Velocidade superficial da fase leve	u_d	$[L t^{-1}]$	m/s
Velocidade superficial da fase pesada	u_c	$[L t^{-1}]$	m/s
Viscosidade da fase leve	μ_d	$[M L^{-1} t^{-1}]$	kg/ms
Viscosidade da pesada	μ_c	$[M L^{-1} t^{-1}]$	kg/ms
Massa específica da fase leve	ρ_d	$[M L^{-3}]$	kg/m ³
Massa específica da fase pesada	ρ_c	$[M L^{-3}]$	kg/m ³
Comprimento da coluna	Z	$[L]$	m
Diâmetro da coluna	D	$[L]$	m
Aceleração da gravidade	G	$[L t^{-2}]$	m/s ²
Pressão	ΔP	$[M t^{-2} L^{-1}]$	kg/ms ²

Por observação, percebe-se que os parâmetros repetentes são escolhidos pela generalização das dimensões primárias presentes. Eles podem ser representados por três dimensões primárias em M , L e t . Assim tem-se o $n = 10$ para o número total de parâmetros e $m = 3$ dimensões primárias existentes, totalizando um número de Π de Buckingham a ser determinado. Portanto $n - m = 7$.

A perda de carga foi considerada o parâmetro objetivo e caracterizado de Π_1 , dessa forma:

$$\Pi_1 = F(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8) \quad (32)$$

Ao combinar os parâmetros repetentes massa específica ρ_c , a viscosidade μ_c , e a velocidade superficial u_c todas para a fase contínua, com os remanescentes, adquire-se para Π_1 e ΔP :

$$\Pi_1 = \Delta P \cdot (\rho_c^a \cdot \mu_c^b \cdot u_c^c) = 0 \quad (33)$$

$$\Pi_1 = (M \cdot L^{-1} \cdot t^{-2}) (M \cdot L^{-3})^a \cdot (M \cdot L^{-1} \cdot t^{-1})^b \cdot (L \cdot t^{-1})^c = M^0 \cdot L^0 \cdot t^0 \quad (34)$$

O procedimento metodológico apresentado e utilizado para determinação do número de Euler, foi o mesmo para os demais grupos Π . Dessa forma, os grupos adimensionais obtidos foram:

$$\frac{\Delta P}{\rho_c \cdot u_c^2} = F\left(\frac{u_d}{u_c}, \frac{\mu_d}{\mu_c}, \frac{\rho_d}{\rho_c}, \frac{u_c \cdot g}{\rho_c \cdot u_c^3}, \frac{u_c \cdot \rho_c \cdot Z}{\mu_c}, \frac{u_c \cdot \rho_c \cdot D}{\mu_c}\right)$$

Inicialmente baseados nos parâmetros correlacionados ao lado contínuo do estudo (fase pesada, ou seja, o líquido), as primeiras tentativas de encontrar uma equação empírica foi realizada com base nestes grupos, e o mesmo processo foi feito para o lado da fase dispersa (gasosa),

considerando como grupos repetentes a massa específica ρ_d , a viscosidade μ_d , e a velocidade superficial u_d . Ou seja, onde havia um parâmetro referência 'c' relacionado a fase contínua, foram obtidos parâmetros com predominância 'd' de fase dispersa. Esses grupos estão alocados abaixo:

$$\frac{\Delta P}{\rho_d u_d^2} = F_2 \left(\frac{u_c}{u_d}, \frac{\mu_c}{\mu_d}, \frac{\rho_c}{\rho_d}, \frac{u_d g}{\rho_d u_d^3}, \frac{u_d \rho_d z}{\mu_d}, \frac{u_d \rho_d D}{\mu_d} \right)$$

Esse procedimento foi realizado para verificação das correlações dos parâmetros sem dar preferência a um lado dos fluidos, sendo que os dois são considerados importantes para o sistema.

Após o método ter sido desenvolvido, foi necessário encontrar uma função que correspondesse com realidade, usando a base nos dados encontrados no experimento.

Uma tabela fornecida por Çengel *et al.* (2015), fornece orientações para a manipulação dos Π 's que resultam do método das variáveis repetidas, para adequações na função a ser desenvolvida. Uma das possibilidades de manipulação utilizada foi a formação de um produto (quociente) de qualquer Π com qualquer outro Π do problema para substituir um dos Π 's, bem como o da possibilidade de multiplicar um Π por uma constante adimensional.

A equação que mais representa os ensaios realizados na coluna de absorção gasosa recheada com anéis de Raschig está apresentada na Equação 28.

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho_c u_c^2} = 4,1105 \cdot \left(\frac{u_d}{u_c}\right)^{0,8317} \cdot \left(\frac{\mu_c g}{\rho_c u_c^3}\right)^{0,891} \cdot \left(\frac{Re_d}{Re_c}\right)^{0,3195} \quad (28)$$

Onde u_d e u_c são velocidade superficial da fase leve e pesada, respectivamente. Os números de Reynolds significantes para a obtenção podem ser calculados pelas Equações 29 e 30.

$$Re_d = \frac{u_d \rho_d D}{\mu_d} \quad (29)$$

$$Re_c = \frac{u_c \rho_c D}{\mu_c} \quad (30)$$

sendo ρ_d e ρ_c são as massas específicas da fase leve e pesada, μ_d e μ_c são as viscosidades da fase leve e pesada, e D o diâmetro da coluna de absorção.

A Figura 27 mostra uma comparação entre valores experimentais do número de Euler obtidas no presente trabalho com os valores calculados pela Equação 28.

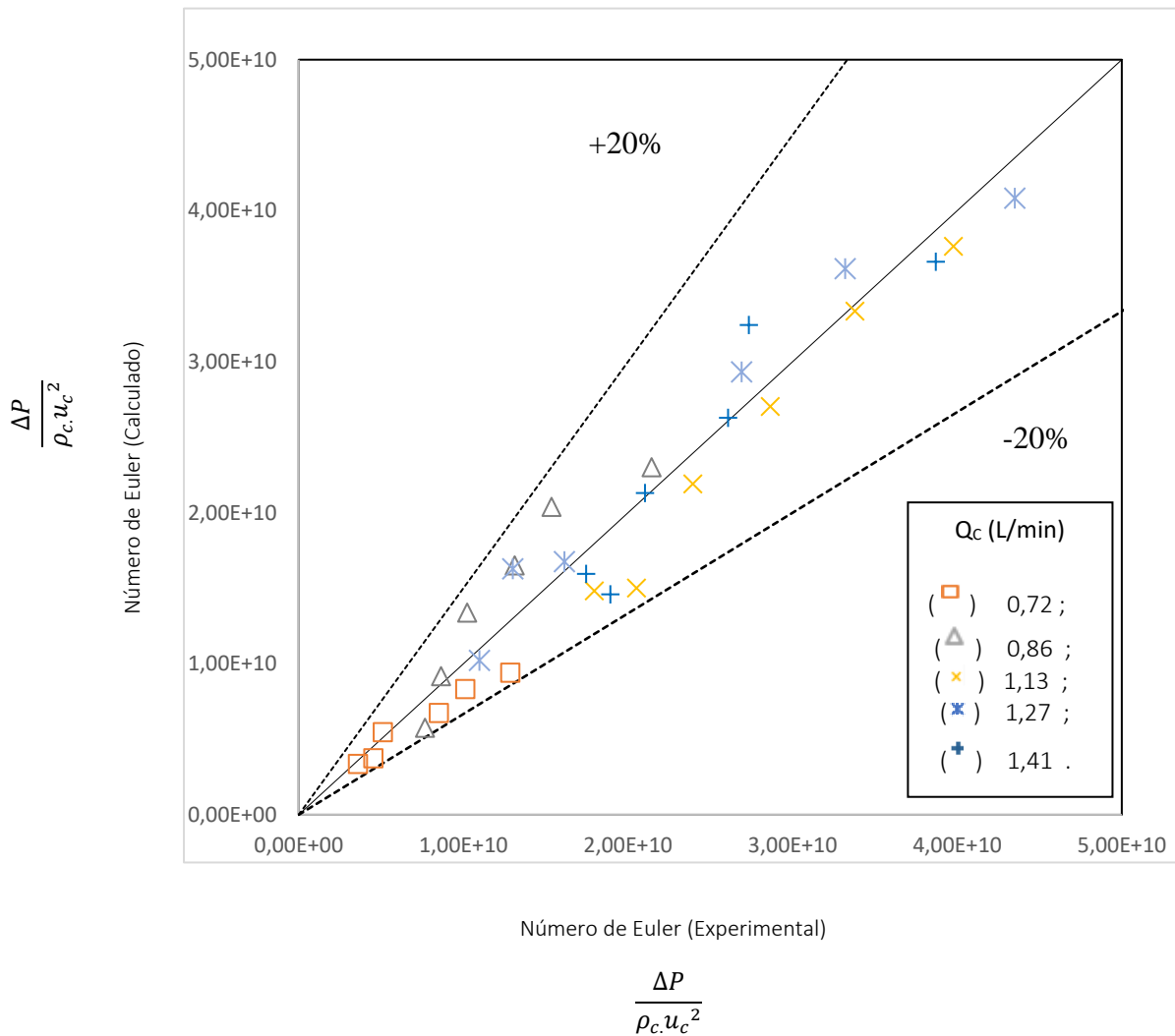


Figura 27- Erro relativo ao número de Euler entre os valores Experimentais e Calculados.

Obs.: todas as vazões líquidas estão correlacionadas com vazões de ar entre os valores de 1,2 a 4 L/min, formando cada 6 pontos para cada ensaio.

A Tabela 12 mostra a comparação geral entre os valores experimentais e os valores calculados.

Tabela 12-Comparação de valores do Número de Euler, para os ensaios realizados.

Vazão de Líquido L/min	Euler Experimental (x 10 ⁻⁹)	Euler Calculado (x 10 ⁻⁹)	Erro
Vazão de ar a 1,2 L/min			
0,72	3,6	3,4	0,064
0,86	7,7	5,8	0,25
1,13	18,0	14,8	0,177
1,27	11,0	10,2	0,072
1,41	17,5	16,0	0,085
Vazão de ar a 1,8 L/min			
0,72	4,54	3,75	0,17
0,86	8,64	91,8	0,06
1,13	20,5	15,0	0,27
1,27	13,0	16,3	0,25
1,41	18,9	14,6	0,23
Vazão de ar a 2,5 L/min			
0,72	5,11	5,48	0,07
0,86	10,2	13,4	0,31
1,13	23,9	21,9	0,08
1,27	16,1	16,8	0,04
1,41	21,0	21,3	0,01
Vazão de ar a 3,0 L/min			
0,72	8,51	6,76	0,21
0,86	13,1	16,5	0,26
1,13	28,7	27,0	0,05
1,27	26,9	29,3	0,09
1,41	26,1	26,3	0,01
Vazão de ar a 3,6 L/min			
0,72	10,1	8,33	0,17
0,86	15,4	20,4	0,33
1,13	33,8	33,4	0,02
1,27	33,2	36,2	0,09
1,41	27,3	32,4	0,18
Vazão de ar a 4,0 L/min			
0,72	12,9	9,41	0,27
0,86	21,4	23,0	0,07
1,13	39,8	37,7	0,05
1,27	43,5	40,8	0,06
1,41	38,7	36,6	0,05
Média	19,3	19,1	0,136

O número de Euler foi escolhido para essa parte do estudo por ser um número adimensional utilizado para descrever as perdas que um fluido em movimento sofre, e como foram abordadas as perdas de carga durante a pesquisa, esse ponto não poderia deixar de ser discutido.

O valor médio dos erros foi de 13,6 %, sendo o valor mínimo correspondente à combinação de vazões de 3,0 de ar em L/min com 1,41 L/min de líquido, com valor inferior a 1%. Em contrapartida, o ensaio que apresentou o maior erro foi o correspondente às vazões de 3,6 L/min de ar com 0,86 L/min de líquido, atingindo 32,7%.

De uma forma geral, com o resultado, a Equação 28 está descrevendo bem todo o aparato, principalmente quando analisado os erros de forma individuais. Em algumas equações desenvolvidas e apresentada na literatura, como exemplo da Equação de Niranjana (1983) descreve que o erro esperado para sua equação seria de 30%. E nesse trabalho, o erro médio total de todo experimento, utilizando a Equação 28 dentro da faixa trabalhada nessa pesquisa, o erro está em torno de 13%.

De forma complementar ao estudo, considerando que o número de Euler encontrado permite o cálculo da perda de carga em Pa, foi realizada uma comparação entre os resultados calculados pelo método de Prahla (Equação 24) com os obtidos pelo procedimento de adimensionalização (Equação 28). Na Tabela 13 estão alocados os valores obtidos de forma experimental, pelo método de Prahla e pela Equação 28 desenvolvida pelo autor.

Tabela 13-Comparação entre valores de diferença de pressão $\Delta P/z$ (Pa/m) experimental com equação empírica e método de Prah(1970).

Vazão Líquida (Q _c)	Vazão de ar (Q _d)	Experimenta 1	Autor (Eq.28)	Método Prah (Eq.24)	Erro do Experimenta 1 ao Autor	Erro do Experimenta 1 ao Método Prah
L/min	L/min	Pa/m	Pa/m	Pa/m		
0,72	1,2	235,8	220,7	195,1	0,06	0,17
	1,8	297,8	246,3	273,1	0,17	0,08
	2,5	335,1	359,5	263,4	0,07	0,21
	3	558,5	443,4	390,8	0,21	0,30
	3,6	663,9	546,9	741,8	0,18	0,12
	4	843,9	617,4	764,1	0,27	0,09
0,86	1,2	297,8	223,2	464,2	0,25	0,56
	1,8	335,1	356,0	405,0	0,06	0,21
	2,5	397,1	519,5	564,3	0,31	0,42
	3	508,8	640,8	464,4	0,26	0,09
	3,6	595,7	790,4	549,0	0,33	0,08
	4	831,5	892,3	643,0	0,07	0,23
1,13	1,2	521,2	430,1	724,9	0,17	0,39
	1,8	595,7	436,0	681,4	0,27	0,14
	2,5	695,0	636,3	658,6	0,08	0,05
	3	831,5	784,8	758,1	0,06	0,09
	3,6	980,4	968,0	748,0	0,01	0,24
	4	1154,1	1092,8	743,1	0,05	0,36
1,27	1,2	304,0	282,7	721,7	0,07	1,37
	1,8	359,9	450,7	797,6	0,25	1,22
	2,5	446,8	464,2	768,6	0,04	0,72
	3	744,6	811,4	756,6	0,09	0,02
	3,6	918,3	1000,8	746,8	0,09	0,19
	4	1203,8	1129,8	742,0	0,06	0,38
1,41	1,2	515,0	470,9	698,9	0,09	0,36
	1,8	558,5	431,0	665,3	0,23	0,19
	2,5	620,50	629,0	647,5	0,01	0,04
	3	769,40	775,8	746,3	0,01	0,03
	3,6	806,70	956,9	634,0	0,19	0,21
	4	1141,70	1080,3	1114,0	0,05	0,02
Média					0,136	0,286

Analisando a Tabela 13, é possível encontrar erros entre os valores experimentais de queda de pressão com a resposta fornecida tanto pelo método de Prah quanto pela equação desenvolvida na pesquisa. Foi observado uma diminuição percentual desses erros após a aplicação da nova equação, ou seja, na utilização da equação desenvolvida através da adimensionalização de

parâmetros, a minimização dos erros foi de 15% dos valores calculados. Dessa forma, pode concluir que houve um melhor ajuste dos dados, comprovando que a equação conseguiu descrever melhor a diferença de pressão do aparato experimental estudado do que o método de Prahl.

Por outro lado, já foi discutido que o método Prahl havia apresentado melhores resultados quando comparado com outros métodos encontrados na literatura, como por exemplo o método de Niranjani, porém como a Equação 28 teve base nos próprios dados obtidos da coluna, era de se esperar que essa equação produzisse melhor correlação.

Na tabela 13, a exemplo da comparação dos valores de erros, o maior erro apresentado pelo método Prahl foi de 137% para o ensaio com 1,27 L/min de líquido com 1,2 L/min de ar, enquanto o ajuste dos dados desse mesmo ensaio, agora para Equação 28, foi de apenas 7%, onde ficou claro que a equação encontrada é útil, exibindo melhor ajuste

5.2 Resultados referente aos coeficientes volumétricos de transferência de massa do lado líquido (K_{La})

Os resultados referentes aos coeficientes volumétricos de transferência de massa do lado líquido (K_{La}), foram obtidos através das 9 correlações da literatura para velocidade superficiais líquidas, adotadas para vários tipos de recheio. Das nove equações somente três delas foram obtidas para anéis randômicos do mesmo tipo de recheio aqui trabalhado. Ainda assim, as outras seis foram testadas, sendo desconsideradas as dimensões dos aparatos experimentais das pesquisas encontradas, com o intuito de mera comparação entre elas.

A escolha dessas equações foi realizada pela similaridade de fórmulas localizadas pelos seus autores, com anéis randômicos e de Rashing. Logo, as equações que foram utilizadas para a determinação do coeficiente K_{La} , no primeiro momento do estudo, foram as Equações (4), (11) e (12) já descritas no capítulo 3 no item 3.2.3, sendo que a Equação (4) desenvolvida por Rahbar (2005), a (11) e a (12) por Norman (1961), a saber:

$$K_{La} = 0,152 \cdot \left(\frac{(U_{l0} + U_{lN})}{2A} \right)^{0,82} \quad (4)$$

$$\frac{K_{La}}{D} = 120 \cdot \left(\frac{Ul}{\mu_L} \right)^{0,75} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D} \right)^{0,5} \quad (11)$$

$$K_{La} = 0,0172 \cdot (Ul)^{0,806} \quad (12)$$

Essas três equações foram escolhidas para iniciar o estudo por serem desenvolvidas com base em dados de um aparato experimental com recheio do tipo anéis de Raschig.

Os resultados obtidos para K_{La} , usando-se os três modelos, são descritos na Tabela 14.

Tabela 14- Valores encontrados de K_{La} para Equação 4 11 e 12 correlacionada as vazões sistêmicas.

		Vazão de água (L/min)				
		0,72	0,86	1,13	1,27	1,41
K_{La} (1/s)	Eq. 4	2,78E-04	6,77E-05	4,17E-05	3,50E-05	3,18E-05
	Eq.11	5,23E-02	2,00E-02	1,79E-02	1,76E-02	1,80E-02
	Eq.12	1,54E-04	1,61E-05	1,44E-05	1,41E-05	1,45E-05

Para fins comparativos e para identificação de uma possível variação de comportamento gráfico, outras correlações foram escolhidas para o estudo. Essas equações foram desenvolvidas sem nenhuma similaridade física entre os recheios, ou do próprio aparato experimental. Elas foram expostas no item 3.2.3 e são chamadas de Equação 5, 6, 7, 8, 9 e 10. Tais equações estão reapresentas a seguir: a Equação 5 para o recheio Intalox 1T, a Equação 6 para o recheio Intalox 2T, a Equação 7 e 8 com anéis de metal desenvolvidos por Murrieta *et al.*(2004).

$$K_L a^{1T} = 1,596. (UL)^{0,875} \quad (5)$$

$$K_L a^{1T} = 0,873. (UL)^{0,816} \quad (6)$$

$$K_L a^{1T} = 0,392. (UL)^{0,6} \quad (7)$$

$$K_L a^{2T} = 0,258. (UL)^{0,6} \quad (8)$$

e as Equações 9 e 10 com material Mellapak 250y e o 500y, respectivamente, e elaboradas por Laso *et al.* (1995).

$$K_L a^{M500y} = 0,713. (UL)^{0,71} \quad (9)$$

$$K_L a^{M250y} = 0,574. (UL)^{0,62} \quad (10)$$

Assim, o mesmo procedimento foi realizado para as equações não correspondentes ao mesmo tipo e material do recheio usado no presente estudo (equações de 5 a 10). Os resultados obtidos para K_{La} usando os modelos citados estão compilados na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores encontrados de K_{La} para Equação 5, 6, 7, 8, 9 e 10 correlacionada às vazões sistêmicas

		Vazão de água (L/min)				
		0,72	0,86	1,13	1,27	1,41
K_{La} (1/s)	Eq. 5	1,05E-03	8,25E-04	7,27E-04	6,77E-04	6,43E-04
	Eq. 6	9,38E-04	7,52E-04	6,68E-04	6,26E-04	5,96E-04
	Eq. 7	2,57E-03	2,19E-03	2,00E-03	1,91E-03	1,84E-03
	Eq. 8	1,69E-03	1,44E-03	1,32E-03	1,26E-03	1,21E-03
	Eq. 9	1,86E-03	1,54E-03	1,39E-03	1,31E-03	1,26E-03
	Eq. 10	3,19E-03	2,69E-03	2,46E-03	2,34E-03	2,26E-03

Com os respectivos valores de K_{La} obtidos, foi possível a elaboração gráfica da relação com os valores de U_L . As Figuras 28 e 29 apresentam os resultados obtidos, sendo a Figura 28 correlacionada com a Equação 4 a 12, com exceção da Equação 11, representada na Figura 29, por apresentar valores maiores de K_{La} .

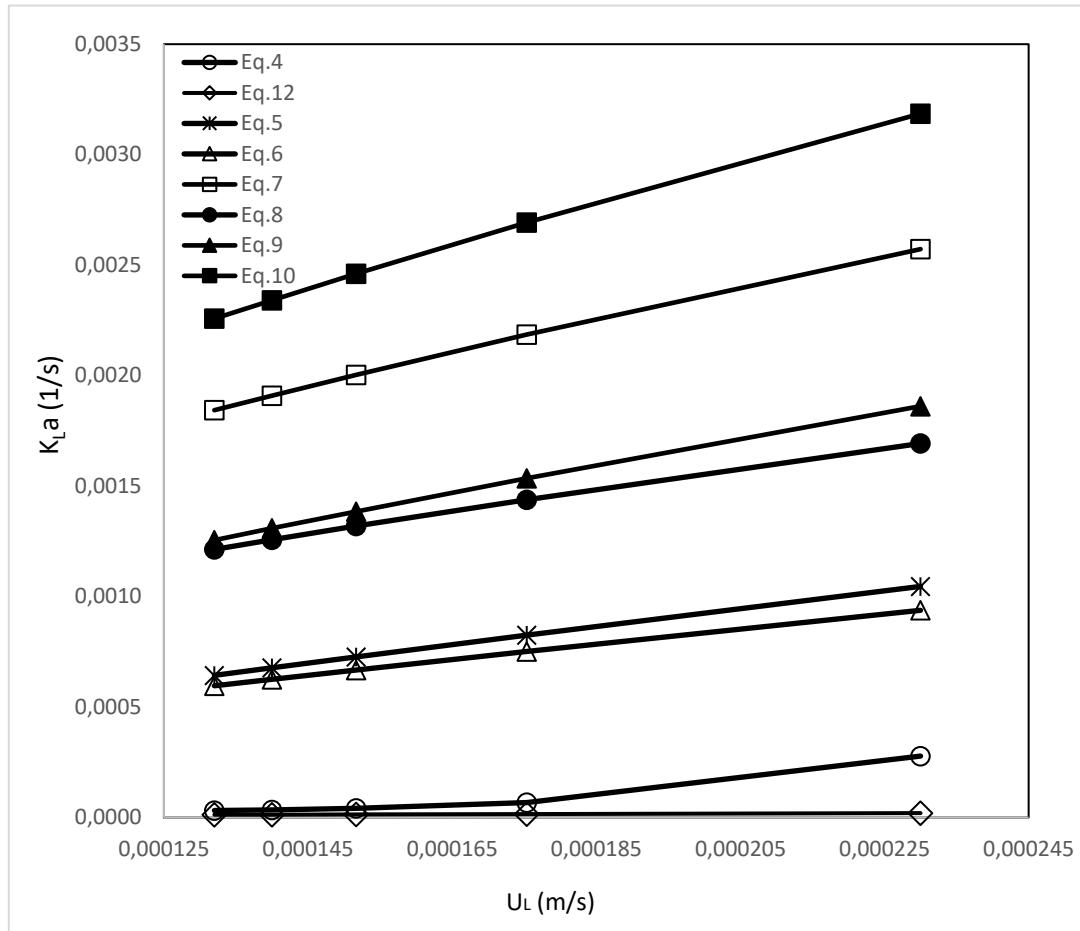


Figura 28 - Representação gráfica do comportamento do $K_L a$ com o aumento da velocidade superficial U_L para Equação 4 a 12, exceto a 11.

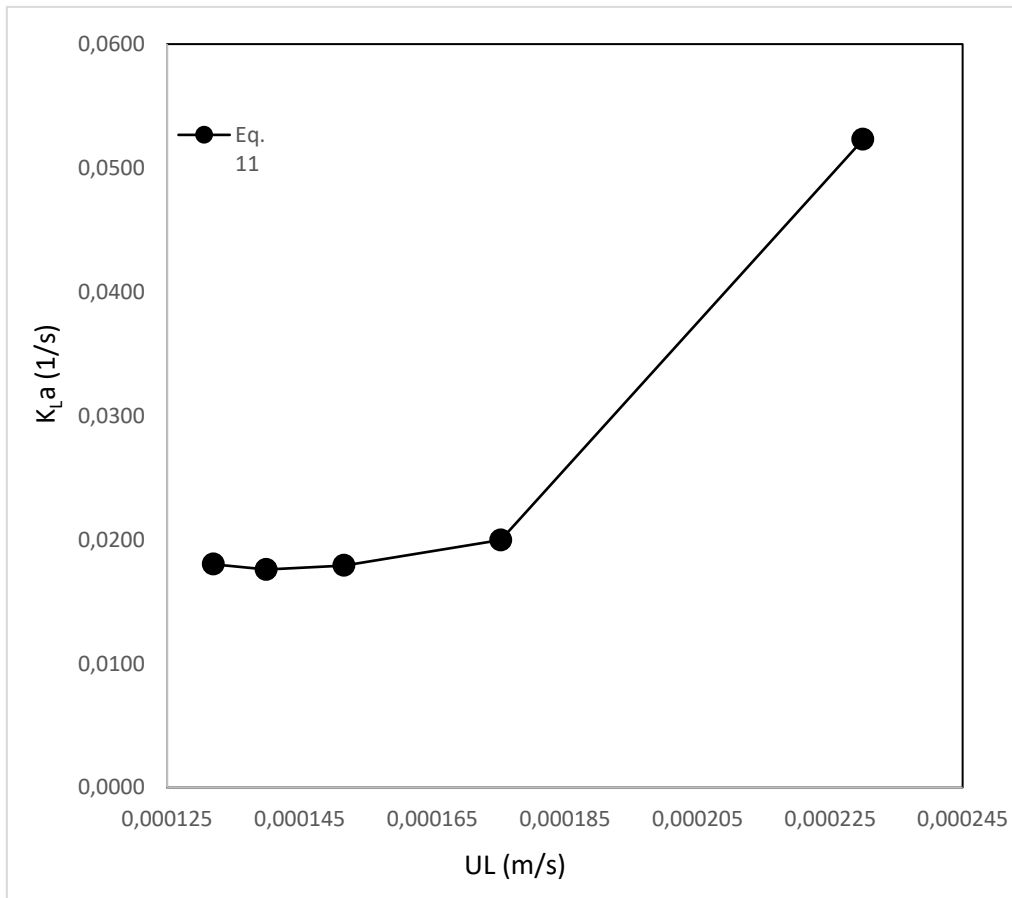


Figura 29- Representação gráfica do comportamento do K_La com o aumento da velocidade superficial U_L para Equação 11

Para as correlações sob a influência do efeito da variação da velocidade superficial do gás (U_g), foram encontradas seis, que foram apresentadas no item 3.2.3, a saber:

Deckwer; Burckart e Zoll (1974) na Equação (14),

$$k_L a = 0,0269 \cdot (U_g)^{0,82} \quad (14)$$

Shah; Godbole e Deckwer (1982) na Equação (15),

$$k_L a = 0,476 \cdot (U_g)^{0,82} \quad (15)$$

Zharadnik *et al.* (1982) na Equação (16),

$$k_L a = 0,75 \cdot (U_g)^{0,85} \quad (16)$$

Sada *et al.* (1985) na Equação (17),

$$k_L a = 0,014. (Ug)^{0,86} \quad (17)$$

Com todas elas citadas no trabalho de Melo (2017) na que apresentou uma a Equação (18).

$$k_L a = 0,082. (Ug)^{0,35} \quad (18)$$

Deckwer *et al.*(1993) na Equação 19, com a restrição de Ug entre 0 e 0,3 m/s.

$$k_L a = 0,32. (Ug)^{0,7} \quad (19)$$

O mesmo procedimento foi realizado para as equações agora que correlaciona as vazões de gás das equações de 14 a 19. Os resultados obtidos para K_{La} usando os modelos, são descritos na Tabela 16 mostrada a seguir.

Tabela 16- Valores encontrados de k_{La} para Equação 14 a 19 correlacionada às vazões sistêmicas de ar

	Vazão de ar (Qd) (L/min)						
	1,2	1,8	2,5	3	3,6	4	5
Eq.14	3,89E-04	5,42E-04	7,09E-04	8,24E-04	9,57E-04	1,04E-03	1,25E-03
Eq.15	6,38E-03	8,89E-03	1,16E-02	1,35E-02	1,57E-02	1,71E-02	2,06E-02
Eq.16	8,58E-03	1,21E-02	1,60E-02	1,87E-02	2,18E-02	2,39E-02	2,89E-02
Eq.17	1,52E-04	2,15E-04	2,86E-04	3,34E-04	3,91E-04	4,28E-04	5,19E-04
Eq.18	1,30E-02	1,50E-02	1,68E-02	1,79E-02	1,91E-02	1,98E-02	2,14E-02
Eq.19	8,06E-03	1,07E-02	1,35E-02	1,53E-02	1,74E-02	1,87E-02	2,19E-02

Na Figuras 30 estão apresentados os comportamentos do K_{La} com o aumento da velocidade superficial do gás, com base dos resultados obtidos na Tabela 16.

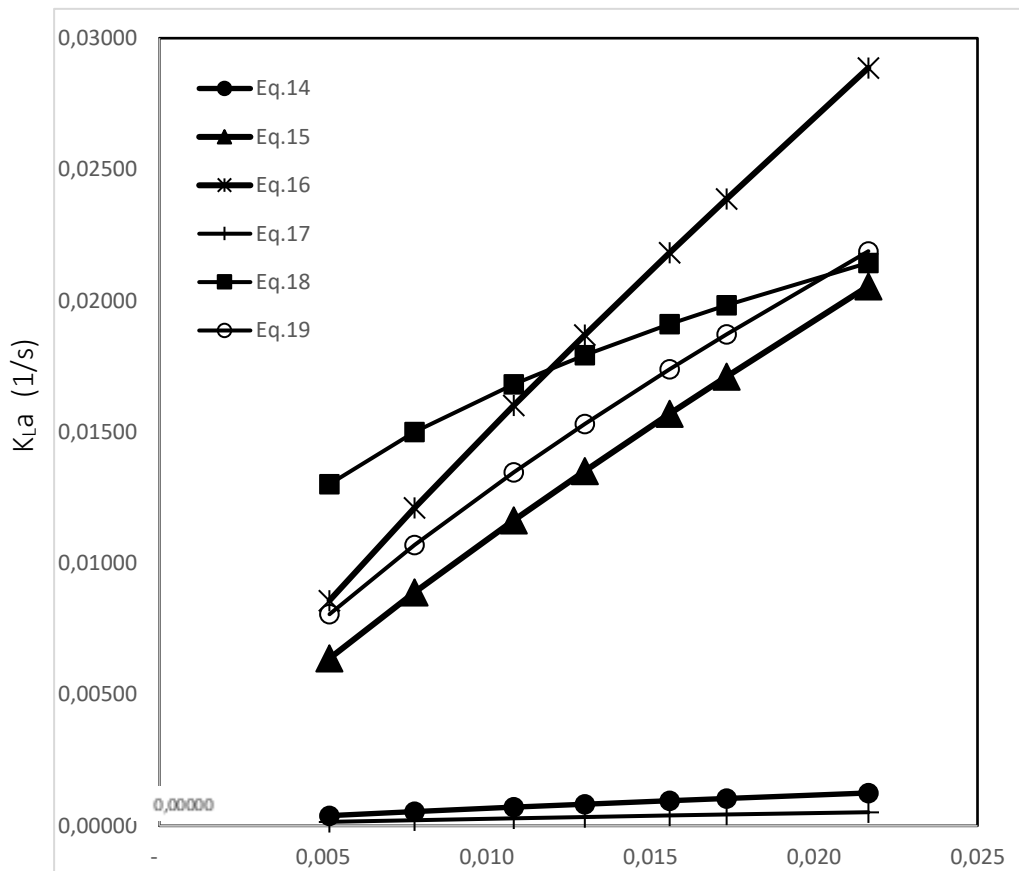


Figura 30- Representação gráfica do comportamento do K_{La} com o aumento da velocidade superficial U_g para Equação 14 a 19

Analisando todos os gráficos (Figuras 28, 29 e 30), é notório que a tendência do K_{La} com o aumento da velocidade na fase líquida ou gasosa induz o aumento de seu valor numérico. De todas as correlações encontradas, todas razoavelmente atenderam e descreveram esse aumento no seu valor quando aumentava a vazão de ar no sistema, o que deve-se principalmente ao aumento da área interfacial Gás/Líquido, devido ao aumento da retenção gasosa e da redução do tamanho das bolhas de gás (KANTARCI, 2005). No entanto, essa conclusão não caracteriza uma boa representação do real comportamento do K_{La} no sistema

Quando foi feito esse levantamento de correlações de K_{La} da literatura, o objetivo foi encontrar algumas equações e compará-las entre si para estimar um comportamento do K_{La} para a coluna, mesmo não sendo apresentada dados experimentais desses resultados. Com base nos trabalhos de Burckhard e Deckwer (1976); Melo(2017); Akita e Yoshida (1973) Deckwer *et al.* (1974); Zahradnik *et al.* (1982); Mandal *et al.*(2003), analisando-se a similaridade da aparelhagem utilizada, bem como dos contatos entre as fases, foi identificado que para sistemas de tratamento de correntes gasosas onde os compostos orgânicos voláteis são estudados, os valores de K_{La} estão

representados na casa da terceira casa decimal. Ou seja, valores menores de K_{LA} , com a quarta casa decimal (0,0001), não representaria suficientemente a coluna e seu contato, já que existem correlações inversas entre o K_{LA} e a altura de unidade de transferência, fornecendo nesse caso uma altura de unidade de transferência elevada, extrapolando a realidade do aparato experimental, sendo descartadas como boas para representação (MURRIETA *et al.* (2004); LEE *et al.* (1989)). Ademais, valores de K_{LA} acima da segunda casa decimal (0,01) implicaria no contrário. Desse modo, conclui-se, com base nesses trabalhos que, para o mesmo perfil de contato entre as fases, a resposta esperada para valores de K_{LA} estaria na ordem de grandeza da terceira casa decimal (0,001), ou seja, o que foi observando na Figura 28, onde todas as equações, de alguma forma poderiam representar o estudo.

5.3 O método empírico para transferência de massa

Nesta segunda parte dos resultados serão abordados pontos importantes da transferência de massa do estudo. Neste último processo foi utilizado um planejamento experimental para avaliar os fatores que mais influenciam na variável resposta (concentração de acetona em água, C_a (g/g) na saída da coluna e a taxa de remoção de acetona no sistema (R%)). A partir desse planejamento foi possível definir faixas mais adequadas para que houvesse uma resposta mais satisfatória de absorção, maximizando a transferência de massa.

5.3.1 Influência dos parâmetros na concentração de acetona em água, para C_a e R%

Neste item foram levantadas as influências dos parâmetros na concentração de acetona em água. Com base no experimento composto central utilizado nesse processo, sendo útil para avaliar os fatores que influenciam na variável resposta, a concentração de acetona em água (C_a) e a taxa de remoção de acetona no sistema (R%).

Os valores escolhidos para o planejamento experimental tiveram por base os resultados encontrados na fase de testes hidrodinâmicos, principalmente quando analisadas as vazões da fase dispersa e as vazões da fase contínua.

O tempo foi adicionado ao sistema, assim, foi identificado através do teste hidrodinâmico que a coluna trabalha normalmente no intervalo de 1 min até 10 min, devido a estabilização da altura de solução. A temperatura foi adicionada como parâmetro, para se entender como funcionaria a vazão de mistura ar + acetona na sua temperatura ambiente, e no seu ponto de ebulição que tem o valor de 62 °C.

Nesse contexto, foram analisadas as influências da vazão da fase dispersa, vazão da fase contínua, da temperatura e do tempo na concentração, essas consideradas como variáveis de entrada. A Tabela 17 apresenta a matriz experimental com as variáveis codificadas e não codificadas juntamente com as variáveis respostas do planejamento experimental realizado para o entendimento desses fatores nessa variável resposta para a concentração de acetona em água (Ca).

Tabela 17 Matriz do planejamento experimental composto por variáveis independentes (valores reais e codificados) e variável resposta (concentração de acetona em água (g/g)).

Ensaio	Temperatura, T (°C)		Vazão da fase contínua, Q _c (L/min)		Vazão da fase dispersa, Q _d (L/min)		Tempo, t (min)		Concentração de Acetona em água, Ca (g/g) x 10 ³
	Valor Codificado	Valor Não Codificado	Valor Codificado	Valor Não Codificado	Valor Codificado	Valor Não Codificado	Valor Codificado	Valor Não Codificado	
1	-1	25,0	-1	1,13	-1	2,00	-1	1,0	2,74
2	1	62,0	-1	1,13	-1	2,00	-1	1,0	1,71
3	-1	25,0	1	1,41	-1	2,00	-1	1,0	3,18
4	1	62,0	1	1,41	-1	2,00	-1	1,0	3,14
5	-1	25,0	-1	1,13	1	4,00	-1	1,0	3,39
6	1	62,0	-1	1,13	1	4,00	-1	1,0	3,54
7	-1	25,0	1	1,41	1	4,00	-1	1,0	5,89
8	1	62,0	1	1,41	1	4,00	-1	1,0	3,91
9	-1	25,0	-1	1,13	-1	2,00	1	10,0	2,79
10	1	62,0	-1	1,13	-1	2,00	1	10,0	1,84
11	-1	25,0	1	1,41	-1	2,00	1	10,0	3,71
12	1	62,0	1	1,41	-1	2,00	1	10,0	2,98
13	-1	25,0	-1	1,13	1	4,00	1	10,0	3,69
14	1	62,0	-1	1,13	1	4,00	1	10,0	3,50
15	-1	25,0	1	1,41	1	4,00	1	10,0	4,68
16	1	62,0	1	1,41	1	4,00	1	10,0	3,84
17	0	43,5	0	1,27	0	3,00	0	5,5	3,09
18	0	43,5	0	1,27	0	3,00	0	5,5	3,10
19	0	43,5	0	1,27	0	3,00	0	5,5	3,43

Observando-se a Tabela 17, a variável resposta dependeu somente das combinações dos parâmetros informados pelo planejamento. No entanto, para fins comparativos das respostas obtidas pelo método, na Tabela 18 estão apresentados os valores de remoção da acetona da corrente gasosa pela solução absorvedora.

Tabela 18 - Tabela com valores de remoção de acetona por ensaio do planejamento e valores da variável resposta para a taxa de remoção de acetona no sistema (R%).

Ensaio	% Acetona no Ar na Entrada	% Acetona na Água na Saída	C/Co R% (Quantidade de Remoção)
1	0,0107	0,0027	25,68%
2	0,0113	0,0017	15,10%
3	0,0085	0,0032	37,23%
4	0,0110	0,0031	28,56%
5	0,0063	0,0034	54,09%
6	0,0142	0,0035	24,96%
7	0,0071	0,0059	83,01%
8	0,0069	0,0039	56,62%
9	0,0102	0,0028	27,34%
10	0,0110	0,0018	16,69%
11	0,0100	0,0037	37,03%
12	0,0105	0,0030	28,46%
13	0,0057	0,0037	64,83%
14	0,0059	0,0035	59,12%
15	0,0057	0,0047	82,06%
16	0,0060	0,0038	64,37%
17	0,0077	0,0031	40,32%
18	0,0078	0,0031	39,92%
19	0,0083	0,0034	41,50%

Conforme os dados apresentados nas Tabelas 17 e 18, a concentração de acetona em água corresponde a uma maior absorção quando há a combinação de 3 variáveis nos seus níveis mais altos, representado pelo código (+1), o que ocorreu no ensaio 7, que resultou na concentração de $5,89 \times 10^{-3}$ g/g de acetona em água, com uma absorção de 83,01% .

Em comparação ao ensaio 8, o valor de concentração de acetona em água representa uma diferença considerável quando analisado em conjunto com o ensaio 2, apresentando $1,71 \times 10^{-3}$ g/g, tendo somente o valor de 15,01% de remoção, entendendo-se que, para as vazões Q_d e Q_c nos seus mais baixos níveis (-1), há a entrega de valores menores em g/g, quando feitas combinações de vazões a baixo nível.

Essa disparidade entre os resultados dos ensaios 2 e 7 é explicada pela maior inserção de energia no sistema no ensaio 7, com níveis (+1) para as vazões do sistema, que ocasiona uma maior dispersão da fase em forma de gotas menores e, com isso, o aumento da fração de retenção líquida, dando oportunidade de maior contato entre as fases, ocasionando maior absorção, o que está em concordância com Hokmabadi *et al.* (2009), que afirmam que o aumento da intensidade induz a uma maior tensão de cisalhamento e à intensa fragmentação das gotas, o que leva a uma diminuição no número de gotas no interior da coluna e, conseqüentemente, maiores valores de retenção da fase dispersa.

Já Asadollahzadeh *et al.* (2012) relatam quanto ao aumento da fase dispersa. Segundo tais autores, o número de gotas no sistema causa uma diminuição da velocidade relativa entre as duas fases em contracorrente, ocorrendo assim o aumento dos valores de retenção da fase dispersa e, por conseqüência, aumentando o tempo de contato entre elas, o que concorda com os resultados apresentados na Tabela 17.

Logo, altas vazões da fase dispersa, assim como da fase contínua, indicam um acréscimo na retenção, levando a considerar que esses dois fatores são extremamente significativos para o processo em questão. Com a Tabela 18, pôde ser percebido que na grande maioria dos ensaios que envolviam maior temperatura no saturador da acetona, maior era quantidade de massa transportada.

De forma análoga, era de se esperar que a capacidade de absorção pela água fosse maior devido à maior dispersão gasosa da acetona, porém observados resultados de concentração de acetona em água, mesmo considerado variações pequenas, essas concentrações para níveis mais altos de temperatura no saturador, se apresentaram com menores resultados.

Ainda para a concentração de acetona foram calculados, com base no estudo da influência dos parâmetros, os coeficientes de regressão. Esses coeficientes estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados dos coeficientes encontrados através da estimativa dos efeitos da vazão da fase dispersa (Qd), vazão da fase contínua (Qc), temperatura (T) e Tempo (t) e seus valores de p.

Termo	Coefficiente x 10³	p – valor x 100
Constante	3,377	0,0168
Qc	5,080	0,8709
Qd	6,470	0,5400
T	-0,102	16,4963
T	-0,031	58,4948
T*Qc	0,150	8,8042
T*Qd	0,241	3,6955
T*t	-0,236	3,8568
Qc*Qd	0,016	76,849
Qc*t	-0,084	21,9586
Qd*t	-0,097	17,8319
T*Qc*Qd	-0,002	97,3348
T*Qd*t	-0,205	5,0214
T*Qc*t	-0,158	7,9956
Qc*Qd*t	-0,110	14,7725

De acordo com Troendle (2008), ANOVA ou análise de variância é um método para testar a igualdade de três ou mais médias populacionais, baseado na análise das variâncias amostrais. O valor de p presente na Tabela 19 está relacionado à probabilidade de ser algo puramente ao acaso. Ou seja, se o valor p estiver abaixo de 0,05, é bastante provável que qualquer diferença entre os grupos seja uma diferença real e não algo que aconteceu ao acaso, sendo que para o valor de p, esse valor de 0,05 significa que existe apenas 5% de chance de seu resultado ser uma casualidade. Valores menores de p significam maior confiabilidade em seu teste. Esses efeitos estatisticamente são considerados significativos. Os demais efeitos apresentando valores de $p > 0,05$, sendo considerados não significativos.

Essa afirmativa é inclusive também descrita por Dharma *et al.* (2016), que relatam que o nível descritivo, ou probabilidade de significância (p), indica a probabilidade de erro e significância dos coeficientes de regressão, ou seja, o valor p avalia a significância estatística do modelo em relação aos dados experimentais.

Sendo assim, analisando-se os dados apresentados na Tabela 19, considerando os efeitos significativos, ou seja, valores de p menores com 0,05, tem-se em destaque a vazão da fase contínua (Qc), a vazão da fase dispersa (Qd) e o efeito de algumas interações, consideradas lineares, sem análises das combinações. O que expõe a temperatura (T) e o tempo (t) como não significativos quando analisados individualmente.

Ainda analisando-se a Tabela 19, agora destacando as interações entres os efeitos, as combinações entre a temperatura e da vazão da fase dispersa (T^*Q_d) e o da temperatura com o do tempo (T^*t), apresentaram valores de p também menores que 0,05 caracterizando a significância dessas combinações. Uma observação que deve ser posta em destaque é a interação da temperatura com a vazão da fase dispersa e o tempo ($T^*Q_d^*t$), pois seu valor p apresentou -se com o valor de 0,050214, ou seja, muito próximo ao valor limite para ser considerado significativo. Justamente por esse motivo, e conhecendo o sistema operacional, entende-se a sua importância, mesmo apresentando seu coeficiente com comportamento de efeito negativo no valor de $-0,205 \times 10^{-3}$.

A partir dos valores dos coeficientes mostrados na Tabela 19, percebe-se que efeito linear da vazão da fase dispersa e da vazão da fase contínua, são os efeitos que mais tem significância, em valores absolutos. O efeito positivo mostra que ao aumentar os valores desses fatores, do menor nível para o de maior nível, deve ocorrer um aumento no valor de concentração de acetona em água (variável resposta).

Observando-se os coeficientes presentes na Tabela 19, determinadas pela regressão realizada pelo método, verifica-se que alguns se comportaram de forma positiva e outras com efeitos negativos, dependendo do tipo de interação analisada. Como exemplo encontra-se a interação positiva a combinação entre a temperatura e vazão da fase dispersa (T^*Q_d) no valor de coeficiente de $0,241 \times 10^{-3}$, e de efeito negativo a combinação entre a temperatura com o tempo (T^*t) no valor de $-0,236 \times 10^{-3}$.

Como o objetivo do processo é a absorção de acetona em água, e a coluna forneceu algumas combinações onde apresentou coeficiente que dificultam esse processo de absorção com seus efeitos negativos, quando foram comparadas as interações com combinações duplas foi possível a conclusão da interação mais influente no processo, que cabe ao efeito positivo, foi o da temperatura com a vazão da fase dispersa, com valor absoluto maior que o efeito da interação da temperatura com o tempo.

Por outro lado, com relação aos efeitos da variação da temperatura e do tempo, estes, quando associados, se comportaram de forma negativa, o que indica que a variação no seu valor, poderá diminuir o valor de concentração de acetona em água. Porém, como se apresentou significativo pelos resultados de p valor, devem ser considerados na equação de regressão gerada.

Observando-se os coeficientes presentes na Tabela 19, determinadas pela regressão realizada pelo método, verifica-se que alguns se comportaram de forma positiva e outras com efeitos negativos, dependendo do tipo de interação analisada. Como exemplo encontra-se a interação positiva a combinação entre a temperatura e vazão da fase dispersa (T^*Q_d) no valor de coeficiente

de $0,241 \times 10^{-3}$, e de efeito negativo a combinação entre a temperatura com o tempo (T^*t) no valor de $-0,236 \times 10^{-3}$.

Como o objetivo do processo é a absorção de acetona em água, e a coluna forneceu algumas combinações onde apresentou coeficiente que dificultam esse processo de absorção com seus efeitos negativos, quando foram comparadas as interações com combinações duplas foi possível a conclusão da interação mais influente no processo, que cabe ao efeito positivo, foi o da temperatura com a vazão da fase dispersa, com valor absoluto maior que o efeito da interação da temperatura com o tempo.

Por outro lado, com relação aos efeitos da variação da temperatura e do tempo, estes, quando associados, se comportaram de forma negativa, o que indica que a variação no seu valor, poderá diminuir o valor de concentração de acetona em água. Porém, como se apresentou significativo pelos resultados de p valor, devem ser considerados na equação de regressão gerada.

A Tabela 20 mostra os valores obtidos para a análise de variância (ANOVA), onde se pode verificar, a partir do teste de Fisher (F), a adequabilidade do modelo elaborado. Essa análise permite avaliar a importância dos fatores comparando as médias das variáveis de resposta em diferentes níveis de fatores.

Tabela 20 - Análise de variância para avaliação estatística do modelo para a determinação de concentração de acetona em água.

Fonte de Variação	Soma dos quadrados $\times (10^5)$	Graus de liberdade	Média quadrática	F calculado	F tabelado
Regressão	1,47	14	7,35763E-06	41,23494	5,873346
Resíduo	0,00	4	1,78432E-07		
Falta de ajuste	0,00	2	0,000000		
Erro puro	0,00	2	0,000000	3,8995	19
Total	1,50	18			
R²			0,976		

Os termos apresentados na Tabela 20 mostram variáveis utilizadas em um teste de adequação conhecido como teste de Fisher, que, segundo Bardu (2011) F trata-se de um teste que mede as razões das variâncias do estudo. De acordo com Rodrigues e Lemma (2005) e Simonelli *et al.* (2019), o teste de Fisher (F) define a existência da regressão linear, ou seja, a probabilidade de parâmetros analisados serem independentes. Já Barros Neto *et al.* (2010) afirmam que o valor de F calculado (41,23494) deve ser de quatro a cinco vezes maior que o F tabelado (5,873346) para que

o modelo gerado seja preditivo. De acordo com os dados, observa-se que F calculado foi sete vezes maior que o F tabelado, confirmando a adequação do modelo. Ainda sobre os valores da ANOVA (Tabela 20), o valor do coeficiente de determinação (R^2) do modelo de regressão foi 0,976 indicando um bom ajuste do modelo, e que apenas 2,4% das variações não podem ser explicadas.

A Equação 40 descreve o modelo codificado gerado para o nível de confiança de 95%.

$$Ca = 3,37 \times 10^{-3} + 5,1 \times 10^{-4} (Qc) + 65 \times 10^{-4} (Qd) + 2,4 \times 10^{-4} (T \cdot Qd) - 2,3 \times 10^{-4} (T \cdot t) - 1,6 \times 10^{-4} (T \cdot Qc \cdot Qd) \quad (40)$$

Ainda sobre a influências dos parâmetros, foram traçados gráficos com base na metodologia de superfície de resposta (MSR) utilizando somente as variáveis significativas do processo. Segundo Hoffmann (2011), este tipo de gráfico permite a análise da região de máximo e de mínimo da variável resposta do sistema.

As Figuras 31 a 36 mostram as superfícies de respostas para os experimentos com as influências dos parâmetros na concentração de acetona na saída da coluna. No primeiro gráfico é mostrada a interação da temperatura e da vazão da fase contínua, sendo mantida fixadas no ponto central a vazão da fase dispersa (Qd) e o tempo (t). Este gráfico está presente na Figura 31.

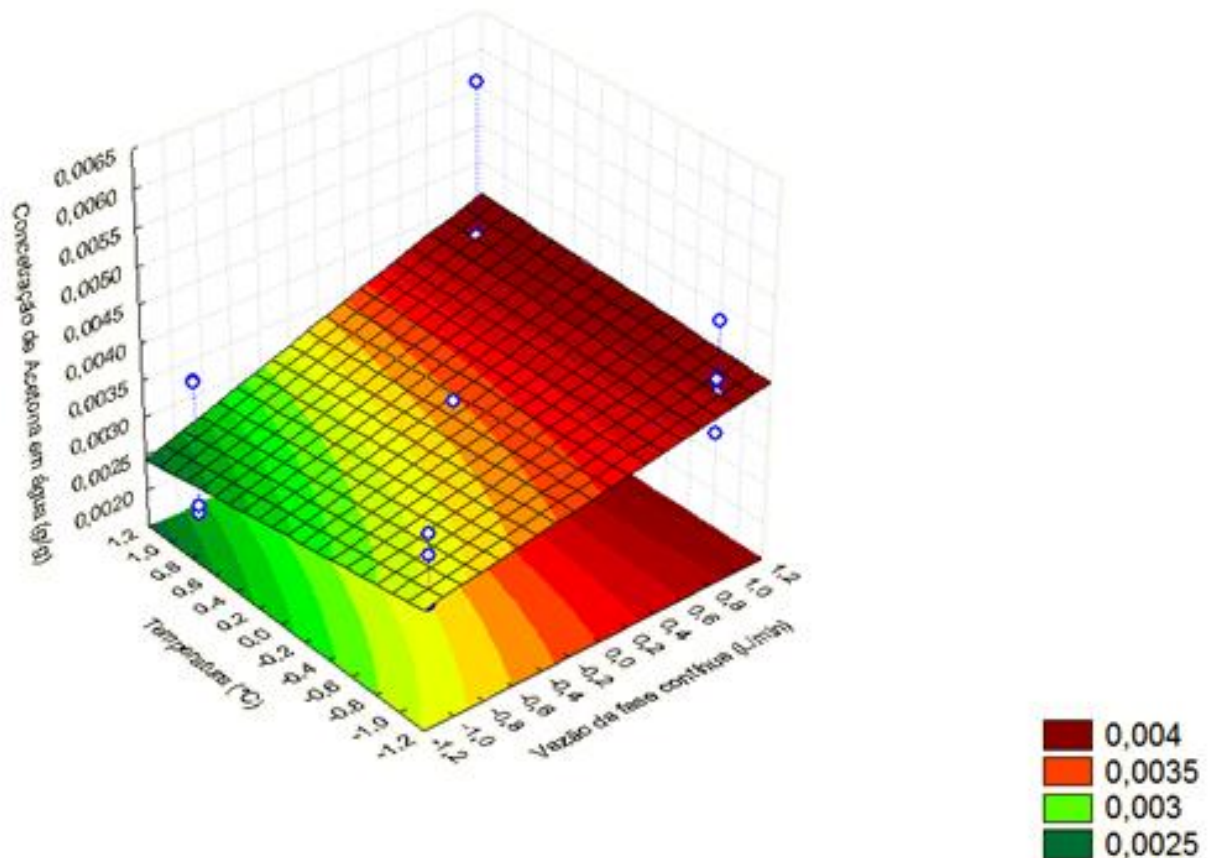


Figura 31 - Superfícies de respostas mostrando a variação da concentração de acetona em água com o tempo e a vazão da fase dispersa fixadas no ponto central em valores codificados

Observa-se, considerando que o tempo e a vazão da fase dispersa estão fixadas no ponto central para valores codificados, que o comportamento interativo da temperatura com a vazão da fase contínua não apresentou resultados significativos para a obtenção de maiores valores de concentração de acetona em água, observado pela pequena variação do valor mínimo de concentração obtida no valor de 0,0025 g/g e valor máximo de 0,004 g/g. Confirmando a não interação efetiva entre os dois fatores, o que já era esperado pelo próprio autor, de modo que a mudança de temperatura estava ligada diretamente ao saturador de ar, ou seja, vinculado à vazão da fase dispersa e não à vazão da fase contínua.

Na Figura 32 é mostrada a interação da vazão da fase contínua e da vazão da fase dispersa, sendo mantidos fixos no ponto central o tempo(t) e a temperatura(T).

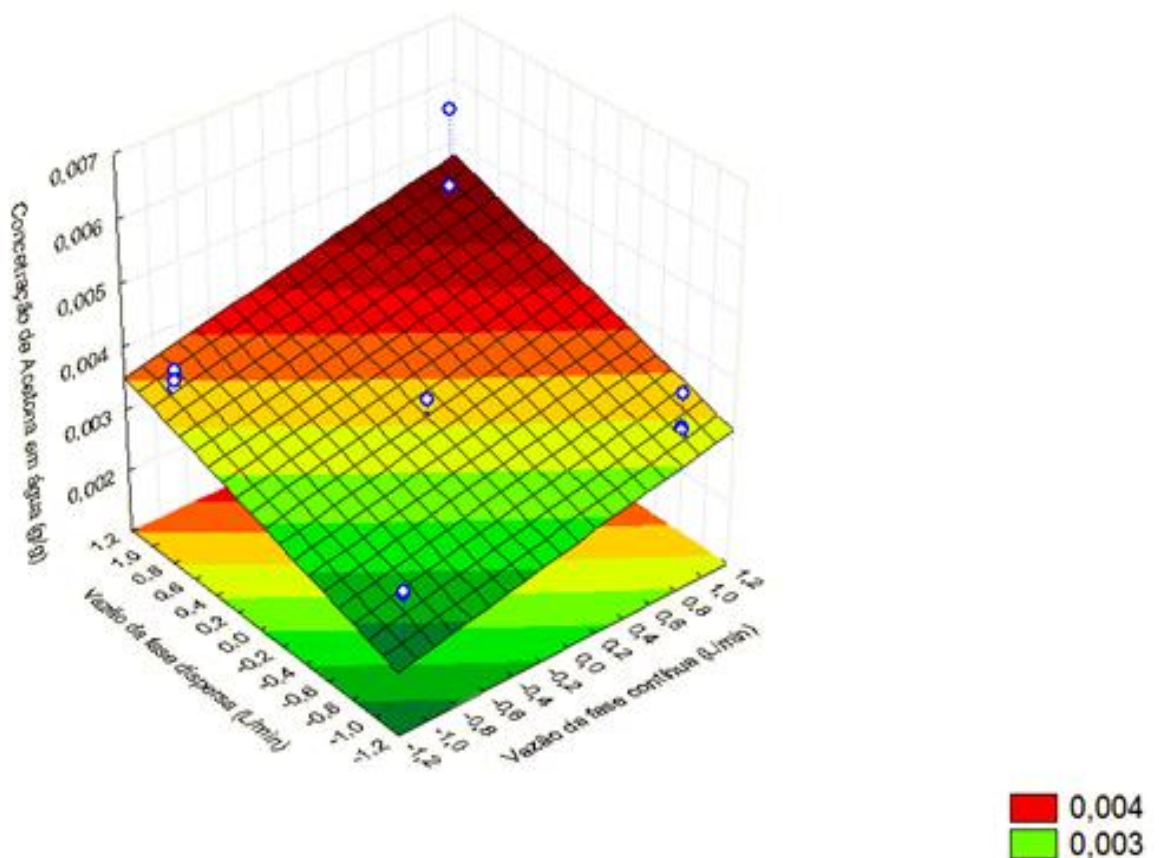


Figura 32 - Superfícies de respostas mostrando a variação da concentração de acetona em água com o tempo e a temperatura foram fixados no ponto central em valores codificados

No gráfico da Figura 32, tem-se a interação que maior apresentou significância para a obtenção de concentração de acetona em água, de modo geral. Nele se identifica que a interação entre as vazões da fase dispersa e contínua apresentou um salto maior de valores de concentração, saindo do valor de 0,002 g/g para aproximadamente 0,005 g/g, o que pode ser explicado pela interação das fases.

Quando ambas variáveis foram testadas em seus níveis mais altos (+1), houve um maior contato delas na coluna em contracorrente, tornando o sistema mais turbulento ocasionando uma maior troca de massa entre as fases. Observando-se a Tabela 18, na combinação dos seus níveis mais altos (+1) para vazões, quando combinados, foram identificados maiores valores de concentração coletada, presentes nos ensaios 7, 8, 15 e 16.

Na Figura 33 é mostrada a interação da vazão da fase contínua com o tempo, sendo mantidas fixadas no ponto central a vazão da fase dispersa (Qd) e a temperatura (T).

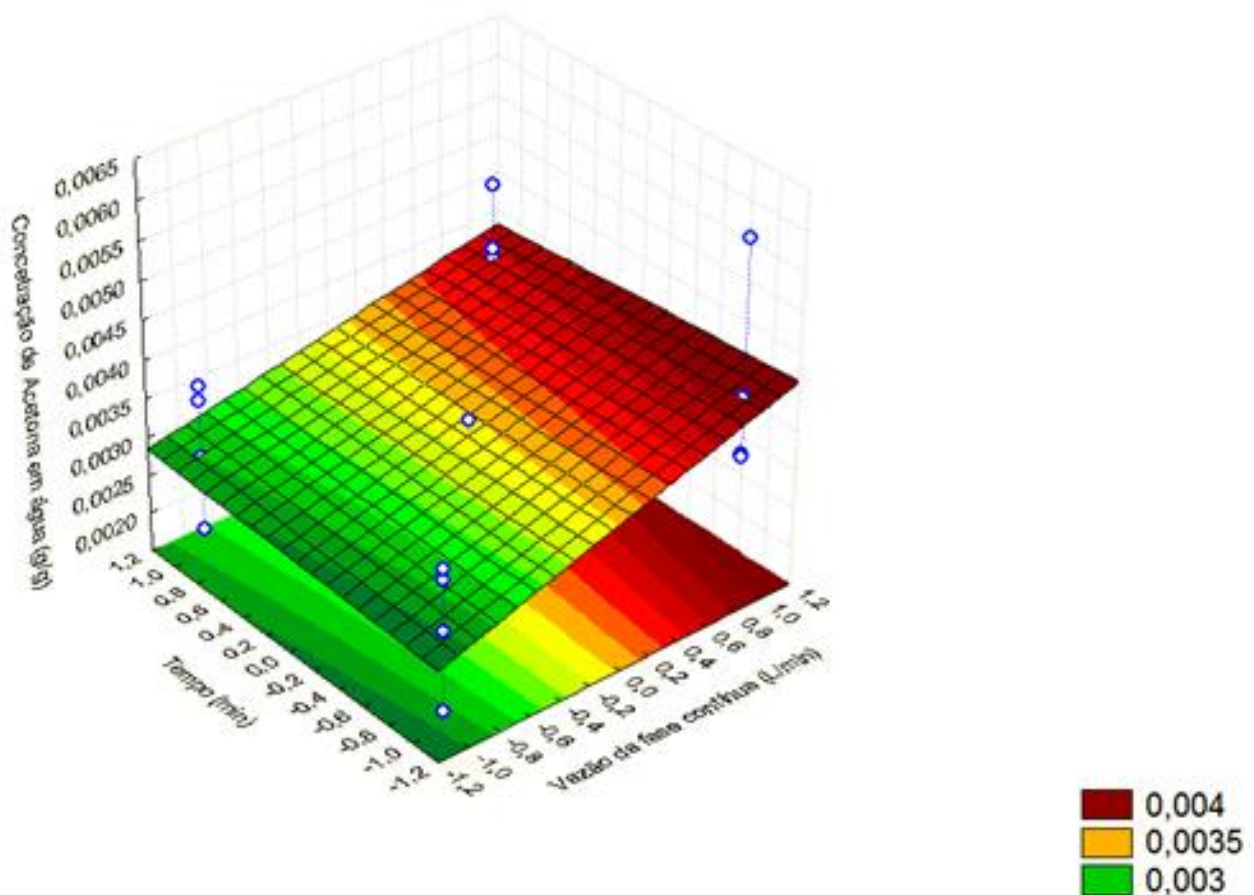


Figura 33- Superfícies de respostas mostrando a variação da concentração de acetona em água a vazão da fase dispersa e a temperatura foram fixados no ponto central em valores codificados

Na Figura 33 percebe-se que o tempo exibe um caráter não tão importante no estudo, pelo que é observado, quando estudado com a vazão da fase contínua, ele se mostrou como não contribuinte efetivo para a troca de massa. Ou seja, a troca de massa considerando o tempo para o menor nível (-1) ou para o maior nível (+1), apresentou valores similares quanto ao resultado de concentração.

Na Figura 34 é mostrada a interação da vazão da fase dispersa com a temperatura, sendo mantidas fixas no ponto central a vazão da fase contínua e o tempo.

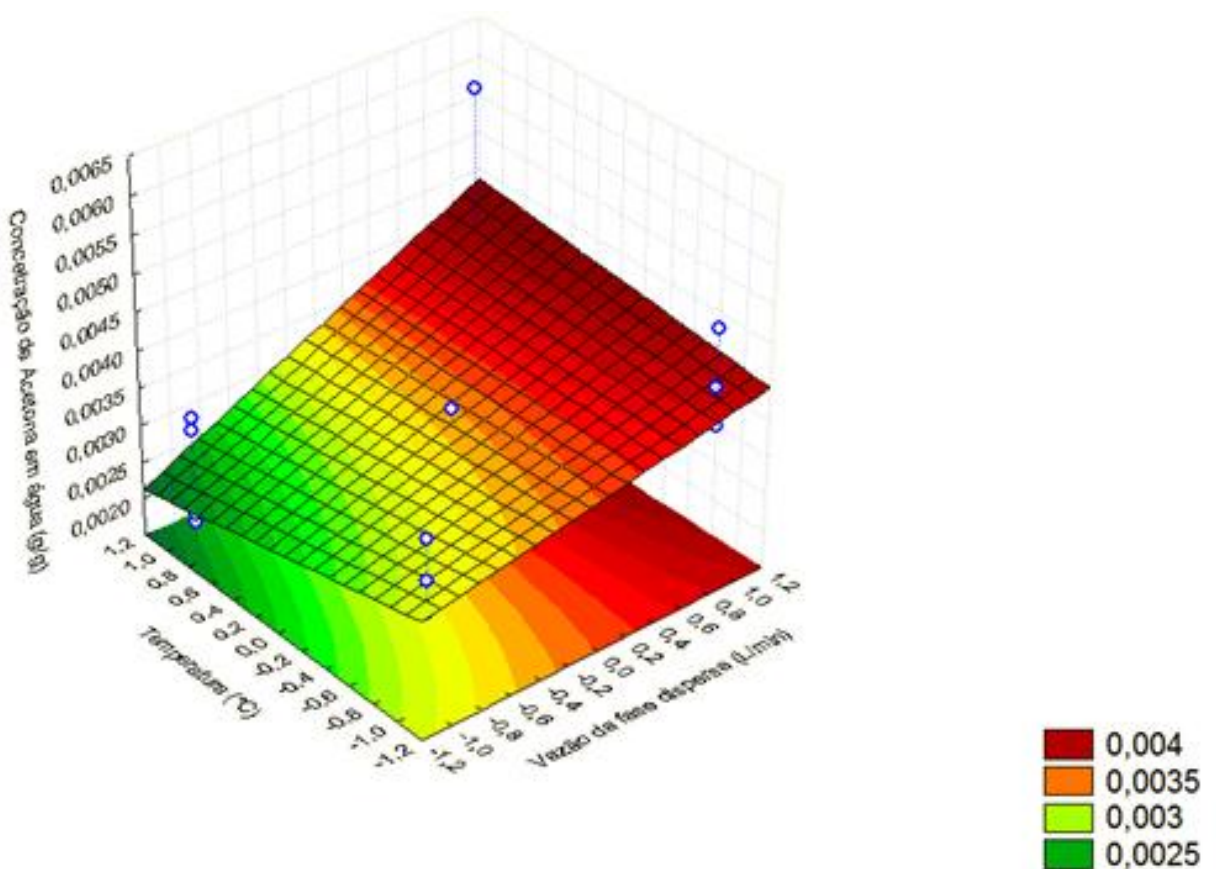


Figura 34- Superfícies de respostas mostrando a variação da concentração de acetona em água a vazão da fase contínua e o tempo foram fixados no ponto central em valores codificados

No gráfico da Figura 34, percebe-se que a combinação de uma maior temperatura no estudo vinculada com uma maior vazão da fase dispersa, a troca de massa não se apresentou diferente de forma geral as outras combinações de variáveis. Quando trabalhado em temperatura no maior nível (+1), com baixas vazões da fase dispersa (-1), há uma tendência do teor de absorção da acetona pela água seja menor. Ela apresenta o mesmo comportamento que se observou no gráfico da Figura 31.

Uma justificativa para esse comportamento, está descrita no trabalho de Nesser e Taqueda (2008), afirmando que a absorção da acetona pela água tem um melhor comportamento quando

utilizado temperaturas menores como as que foram utilizadas nessa pesquisa. Importante ressaltar, que nos testes realizados por Nesser e Taqueda (2008), foram utilizados fluxo de água fria. Entretanto, nos ensaios do planejamento experimental desta pesquisa, foram feitas a elevações da temperatura do fluxo gasoso, explorando até seu ponto de ebulição (62 °C para acetona), enquanto, para a fase líquida, foi mantida temperatura. A ideia foi identificar o comportamento da absorção com essa mudança de temperatura somente do fluxo gasoso, algo não testado por Nesser e Taqueda (2008).

Dessa forma, observando-se novamente os resultados da Tabela 18 e 19 para concentração de acetona em água, e contextualizando como resultado da Figura 31 e 34, quanto mais massa de acetona era lançado ao sistema, devido ao aumento de temperatura no gás, menos era a capacidade de absorção da água. A volatilidade da mistura gasosa aumentou, e ainda assim em contato com a água, que se manteve em temperatura ambiente (25 °C), não se obteve respostas muito distantes para concentração de acetona em água, pelo contrário, algumas até menores.

Comparando alguns resultados da Tabela 18, considerando os pares de ensaios onde só havia a mudança de temperatura de um para o outro, pode-se observar que, na maioria deles, a resposta de concentração de acetona em água era um pouco menor quando se elevava a temperatura. Como exemplo tem-se os ensaios 1 e 2, sendo o primeiro com 25 e o segundo com 62° C no saturador, com $2,74 \times 10^{-3}$ e $1,71 \times 10^{-3}$ g/g como resposta da absorção, respectivamente.

Na Figura 35 é mostrada a interação da vazão da fase dispersa com o tempo, sendo mantidas fixadas no ponto central a vazão da fase contínua (Q_c) e a temperatura(T).

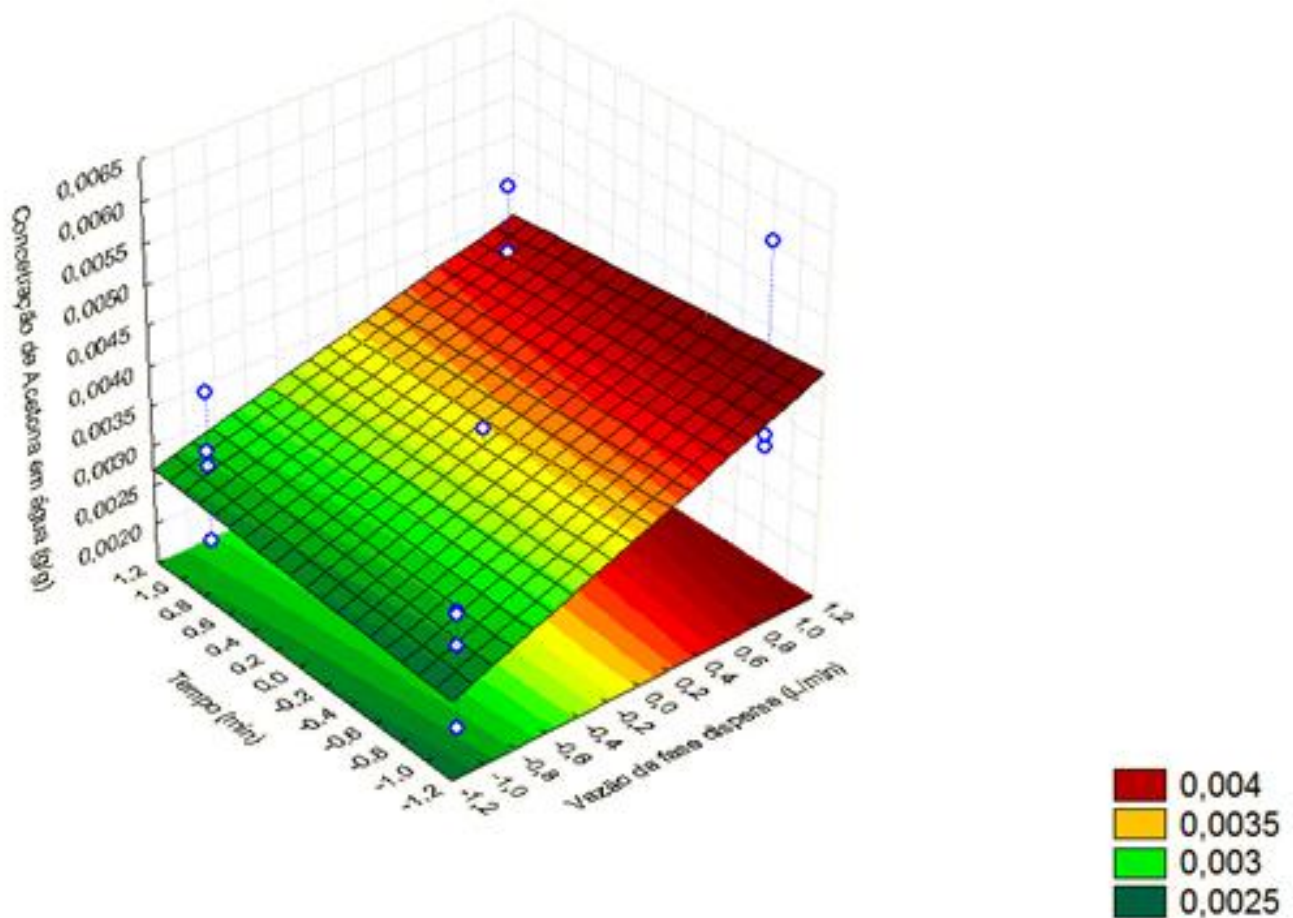


Figura 35 - Superfícies de respostas mostrando a variação da concentração de acetona em água a vazão da fase contínua e a temperatura foram fixados no ponto central em valores codificados.

No gráfico da Figura 35, pode ser feita uma comparação imediata com a Figura 33, pois ambas estão relacionadas com o tempo em um dos seus eixos, e os comportamentos gráficos são equivalentes, mesmo uma sendo relacionada à vazão da fase dispersa e outra à fase contínua. O tempo só trará melhor resposta para a absorção, quando o parâmetro de vazão estiver em altos níveis (+1) para o sistema de operação.

Na Figura 36 é mostrada a interação da temperatura com o tempo, sendo mantida fixadas no ponto central a vazão da fase contínua (Q_c) e a vazão da fase dispersa (Q_d).

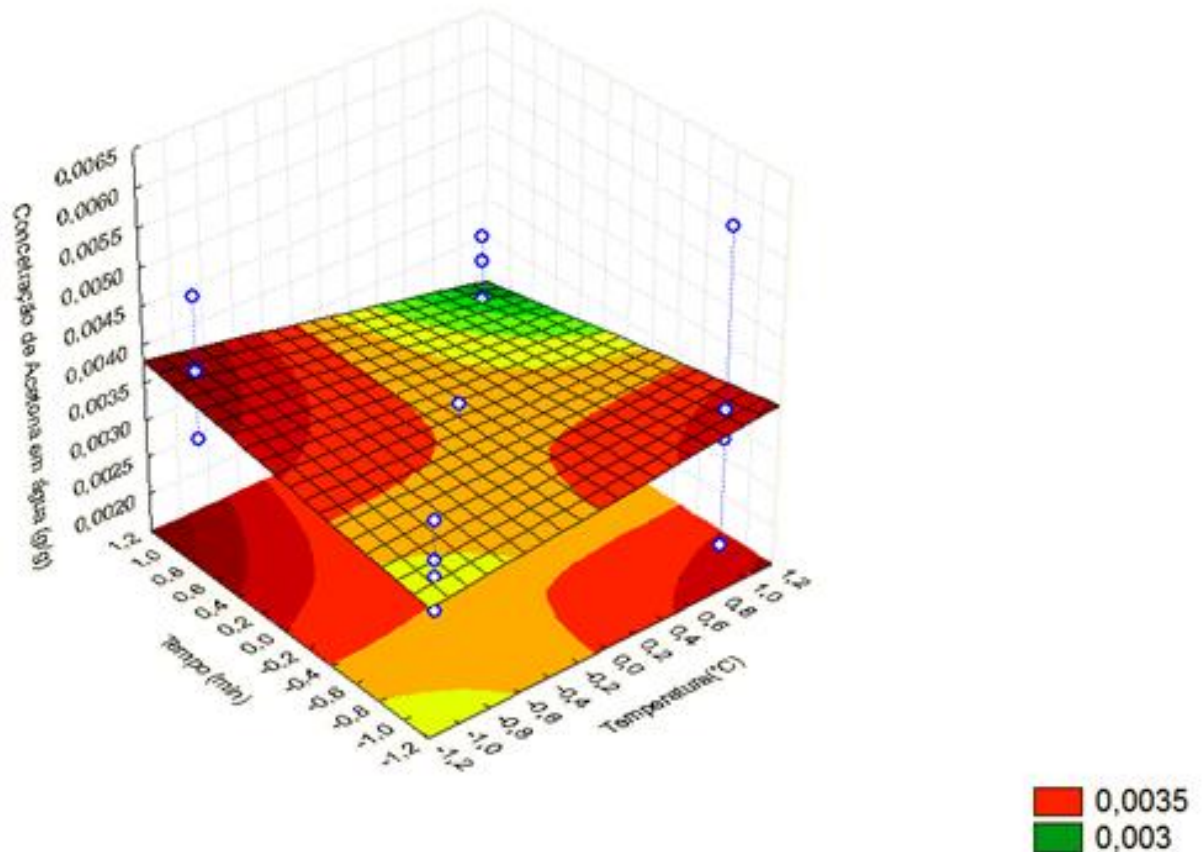


Figura 36- Superfícies de respostas mostrando a variação da concentração de acetona em água a vazão da fase contínua e a vazão da fase dispersa foram fixadas no ponto central em valores codificados.

Já para Figura 36, a interação tempo e temperatura, graficamente mostra quando a operação for realizada com o tempo e a temperatura em seus altos níveis (+1) a resposta para a concentração de acetona em água não apresentará eficiente em comparação ao estudo das interações de outros fatores, mostrando uma interação negativa, como já mostrado na Tabela 20.

Segundo Calado & Montgomery (2003), um aspecto importante sobre as superfícies de resposta e as curvas de níveis é que quando as linhas que compõem esses gráficos não apresentam curvaturas, pode-se concluir que não há efeito de interação entre as variáveis escolhidas para os eixos. Assim, no caso do presente trabalho, três dos seis gráficos apresentados contém curvaturas acentuadas, sendo consideradas relevantes para o estudo.

O comparativo dos valores de concentração de acetona em água entre as respostas calculadas pela correlação empírica proposta e as previstas pela Equação 40 podem ser observadas na Figura 37.

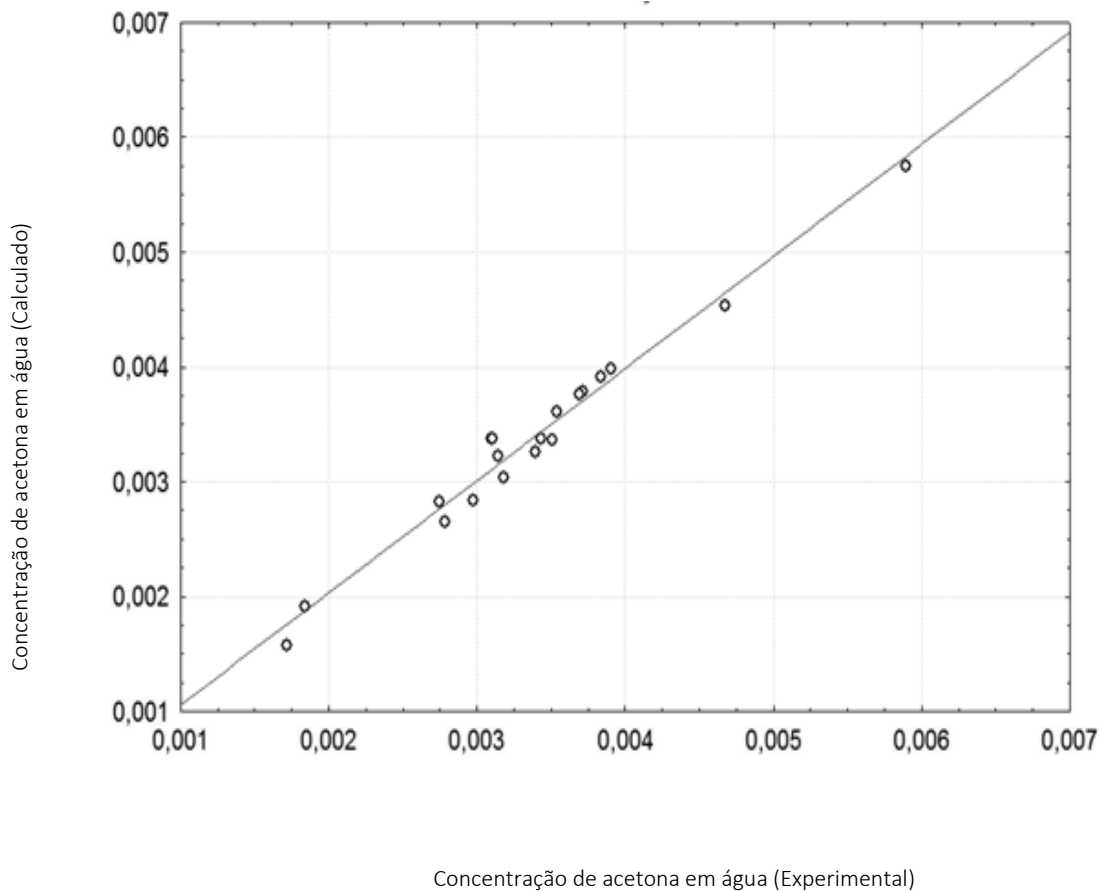


Figura 37- Comparação entre os valores a concentração de acetona em água experimentais e os calculados pela equação 40.

Com base nessa consistência do modelo estatístico, a análise dos resultados das influências dos parâmetros pôde ser realizada.

Após a determinação das variáveis significativas para o processo, um gráfico de Pareto (Figura 38) foi construído, onde foi possível se determinar a ordem das variáveis significativas que mais impactam na variável resposta.

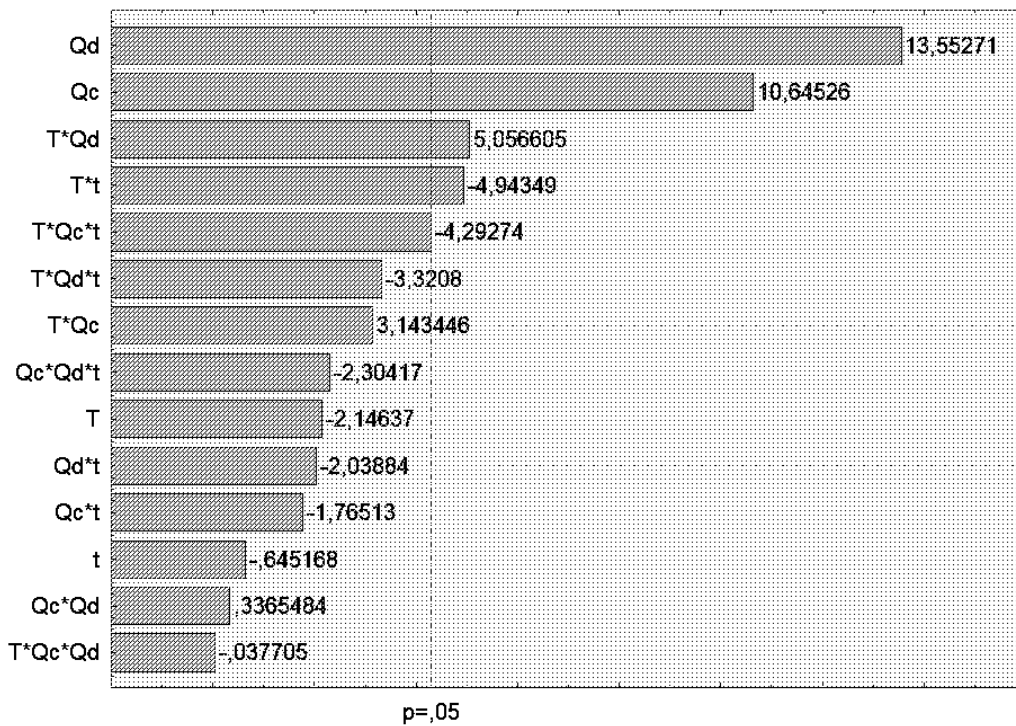


Figura 38 - Gráfico de Pareto para interações de parâmetros na coluna de absorção na obtenção de concentração de acetona em água.

Observa-se na Figura 38, que a vazão da fase dispersa (Qd), bem como a vazão da fase contínua (Qc) são as duas variáveis que têm mais relevância, seguida pela interação da temperatura com a vazão da fase dispersa (T*Qd). Outras interações se apresentam no gráfico como significantes, porém contribuindo negativamente para obtenção da variável resposta.

Para os valores de taxa de remoção (R%), também foram calculados com base no estudo da influência dos parâmetros. Esses coeficientes estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados dos coeficientes encontrados através da estimativa dos efeitos da vazão da fase dispersa (Qd), vazão da fase contínua (Qc), temperatura (T) e Tempo (t) e seus valores de p, para variável resposta R%

Termo	Coefficiente x 10²	p – valor x 100
Constante	43,52	0,0001
T	-7,34	0,0981
Qc	8,10	0,0672
Qd	17,06	0,0036
T	3,42	1,5754
T*Qc	-0,33	71,8470
T*Qd	-2,53	4,0671
T*t	2,01	7,6833
Qc*Qd	2,29	5,4255
Qc*t	-2,60	3,7288
Qd*t	3,05	2,2891
T*Qc*Qd	-0,83	38,4673
T*Qd*t	-0,91	34,3884
T*Qc*t	2,01	7,7204
Qc*Qd*t	-2,16	6,3523

Analisando-se os dados apresentados na Tabela 21, considerando os efeitos significativos para interações lineares, tem-se em destaque a vazão da fase contínua (Qc), a vazão da fase dispersa (Qd) o efeito de e a temperatura(T) e o tempo (t) como não significativos quando analisados individualmente. Ou seja, todos apresentam significância ao estudo.

Os valores da ANOVA realizada nessa etapa, o valor do coeficiente de determinação (R^2) do modelo de regressão foi 0,994 indicando um melhor ajuste do modelo, e que apenas 0,6% das variações não podem ser explicadas.

A Equação 41 descreve o modelo codificado gerado para o nível de confiança de 95%.

$$R\% = 43,52 \times 10^{-2} - 7,34 \times 10^{-2} (Qc) + 8,10 \times 10^{-2} (Qd) + 17,06 \times 10^{-2} (t) + 3,42 \times 10^{-2} (T \cdot Qc) - 2,60 \times 10^{-2} (Qc \cdot t) + 3,05 \times 10^{-2} (Qd \cdot t)$$

As Figuras 39 a 44 mostram as superfícies de respostas para os experimentos com as influências dos parâmetros na concentração de acetona na saída da coluna.

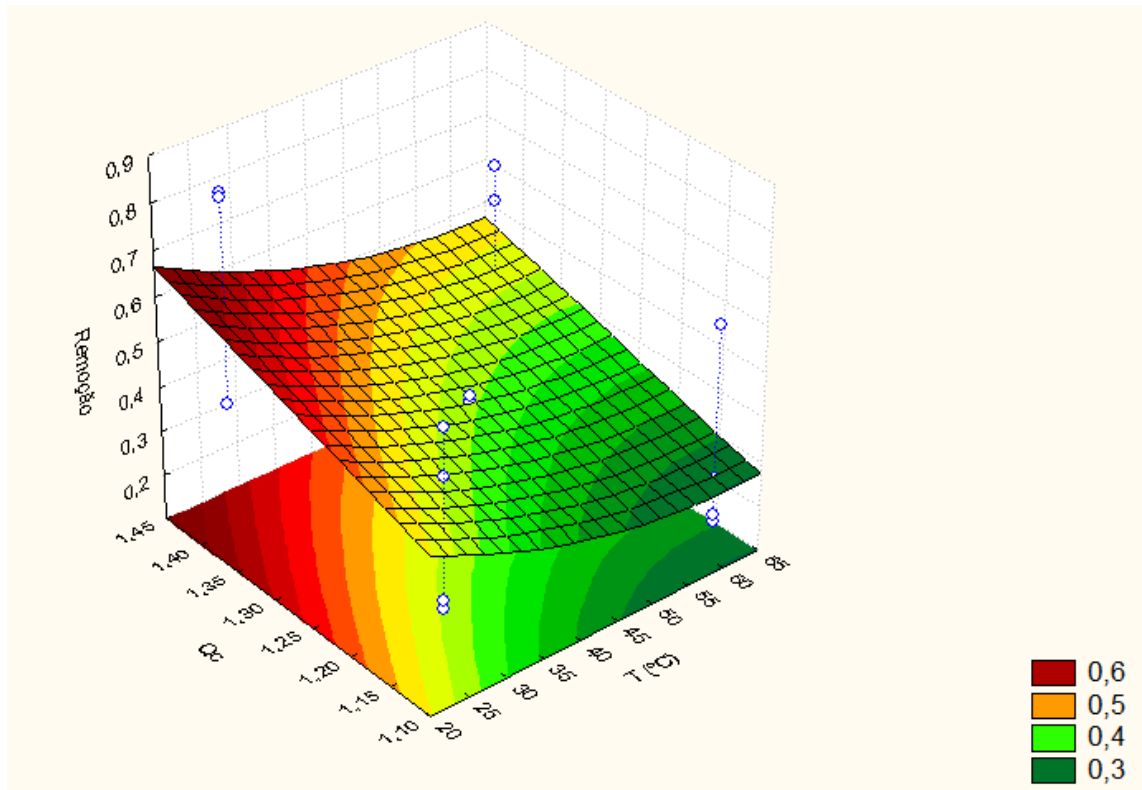


Figura 39 - Superfícies de respostas mostrando a variação da remoção, onde a vazão da fase dispersa e o tempo foram fixados no ponto central

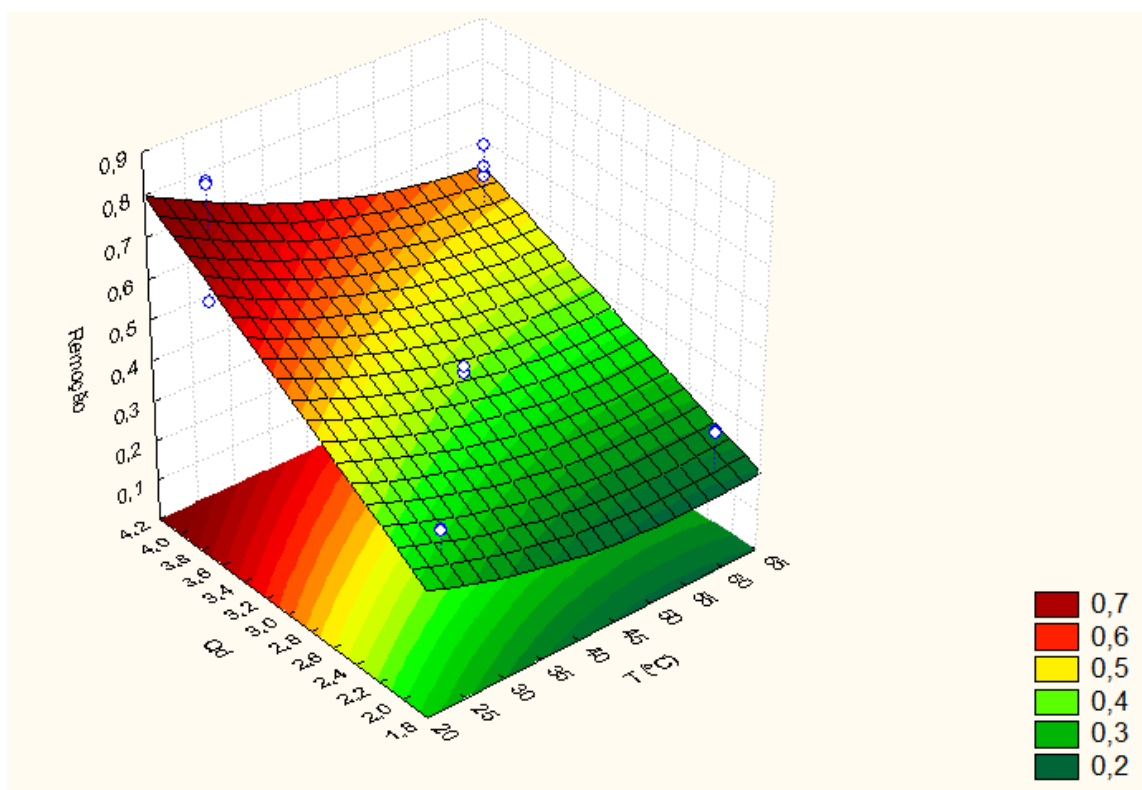


Figura 40- Superfícies de respostas mostrando a variação da remoção, onde a vazão da fase contínua e o tempo foram fixados no ponto central

A interpretação gráfica das Figuras 39 e 40, assim como exposto na Figura 34 do estudo das concentrações de acetona em água, quanto menor a temperatura e maior o valor da vazão das fases, a resposta da variável dependente tende a se elevar. No entanto, é possível perceber que a curva da superfície de resposta foi mais ascendente nesse estudo.

Na Figura 41 é mostrada a interação da temperatura com o tempo, sendo mantidas fixadas no ponto central a vazão da fase contínua (Q_c) e a vazão da fase dispersa (Q_d).

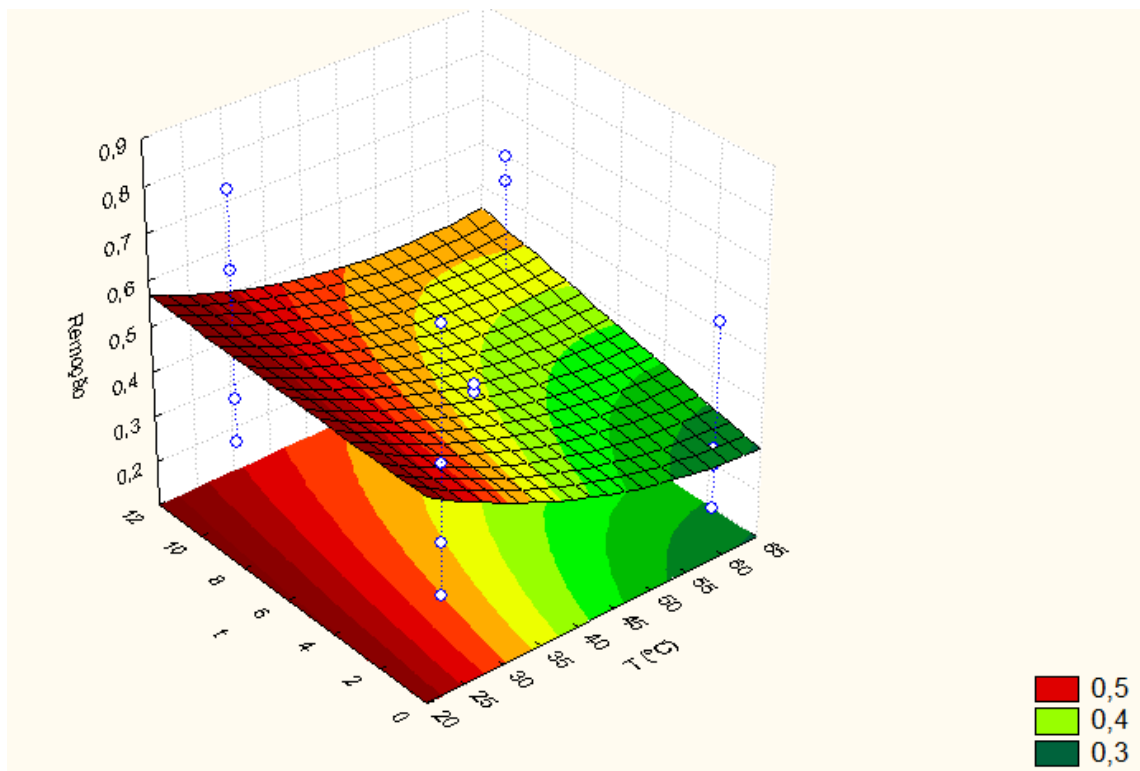


Figura 41- Superfícies de respostas mostrando a variação da remoção para vazão da fase contínua e a vazão da fase dispersa fixadas no ponto central

Diferentemente da Figura 36, onde não apresentou tanta variação no estudo dessas interações, aqui, na Figura 41, entende-se que quanto maior o tempo de contato entre as fases, e menor temperatura, a resposta para remoção se apresentou próximos aos 60%.

Na Figura 42 é mostrada a interação da vazão da fase contínua e da vazão da fase dispersa, sendo mantidos fixos no ponto central o tempo (t) e a temperatura (T).

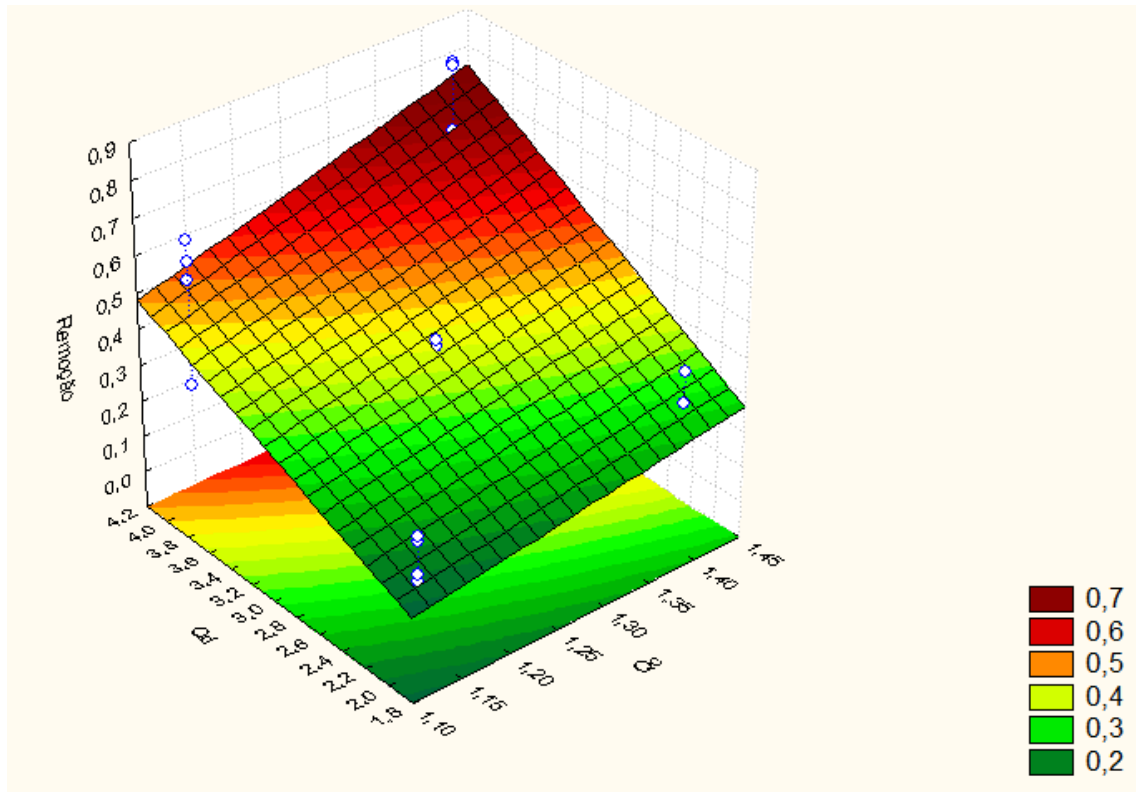


Figura 42- Superfícies de respostas mostrando a variação da remoção para o tempo e a temperatura fixadas no ponto central em valores codificados

No estudo das remoções, a interação mostrada na Figura 42, assim como na Figura 32, se mostrou como a interação que maior apresentou significância. Ou seja, agora para a remoção(R%), quanto maior o valor de Q_c e Q_d , maior será o valor da remoção, aumentando a eficiência do sistema.

Na Figura 43 é mostrada a interação da vazão da fase contínua com o tempo, sendo mantidas fixadas no ponto central a vazão da fase dispersa (Q_d) e a temperatura (T).

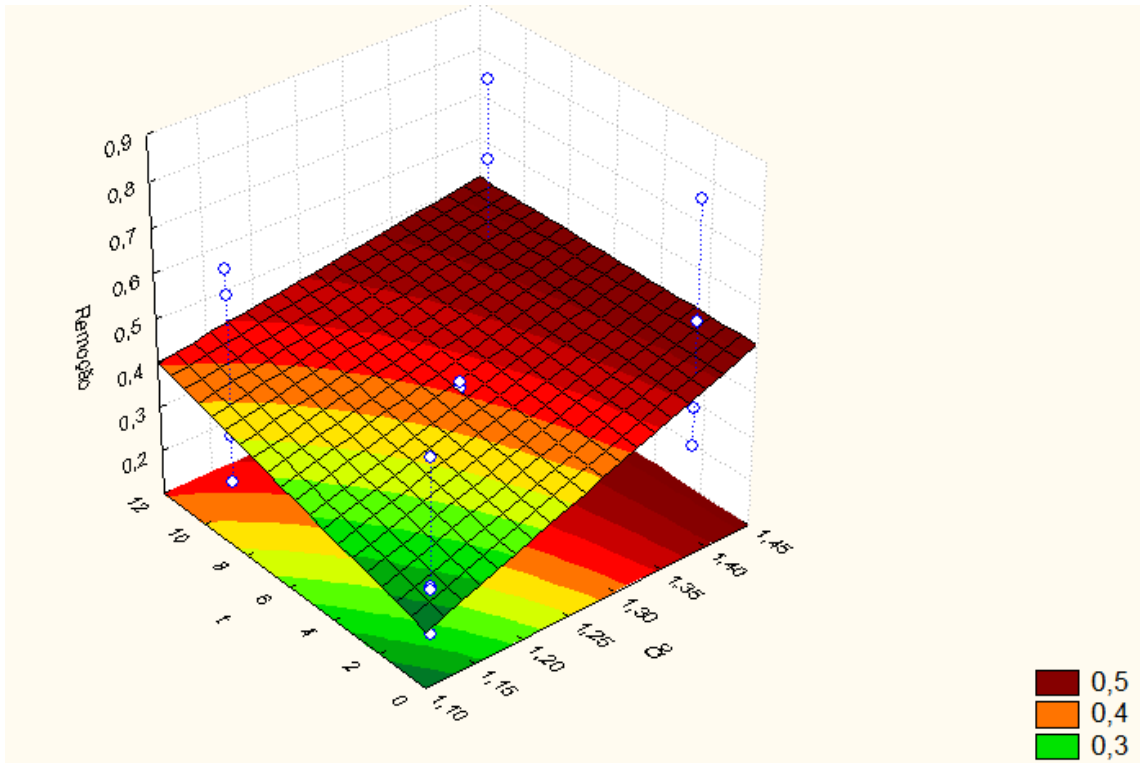


Figura 43- Superfícies de respostas mostrando a variação da remoção para a vazão da fase dispersa e a temperatura fixadas no ponto central

Na Figura 44 é mostrada a interação da vazão da fase dispersa com a temperatura, sendo mantidas fixas no ponto central a vazão da fase contínua e o tempo.

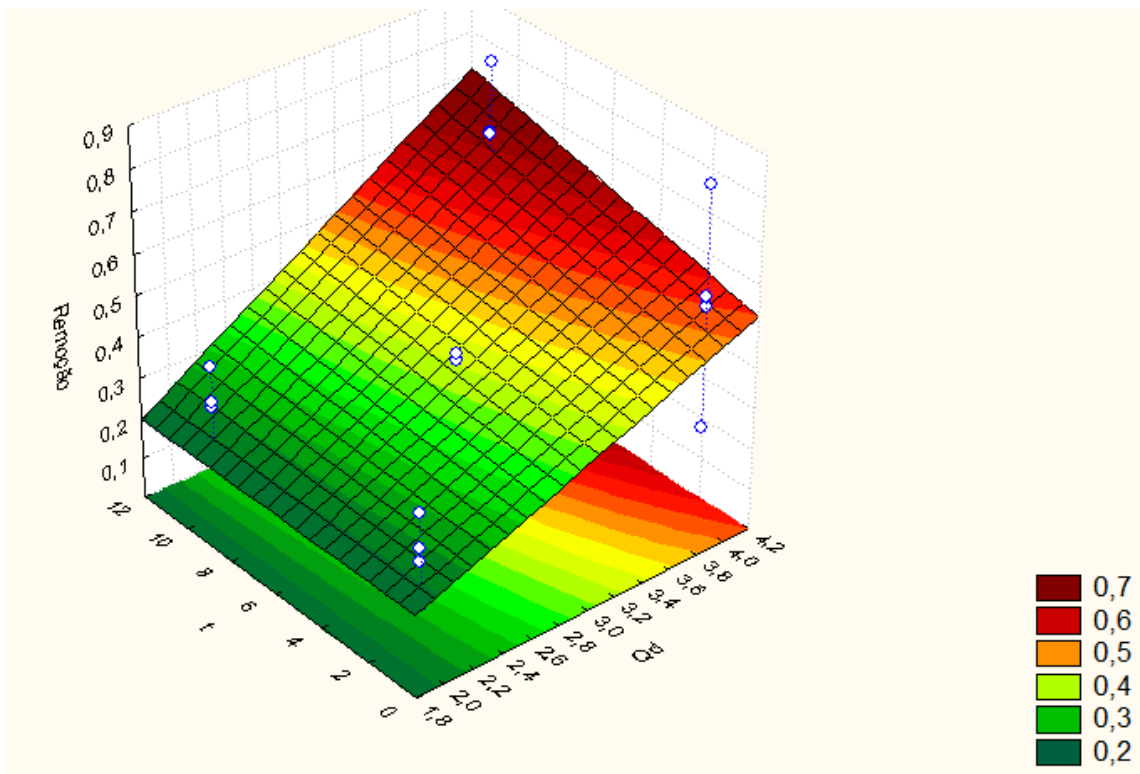


Figura 44- Superfícies de respostas mostrando a variação da remoção para a vazão da fase dispersa e a temperatura fixados no ponto central em valores codificados

O tempo na interação com a vazão da fase contínua e na fase dispersa, assim como mostradas nas Figuras 43 e 44, respectivamente, revelou a importância real dessas variáveis, os valores quanto maior em seus níveis mais elevados, apresentou uma remoção maiores de 50%. Ou seja, quanto maior o tempo de contato, e as vazões, os gráficos de superfícies de respostas mostram a tendência de maior remoção da acetona pela água.

O comparativo dos valores de remoção entre as respostas calculadas pela correlação empírica proposta e as previstas pela Equação 41 podem ser observadas na Figura 45.

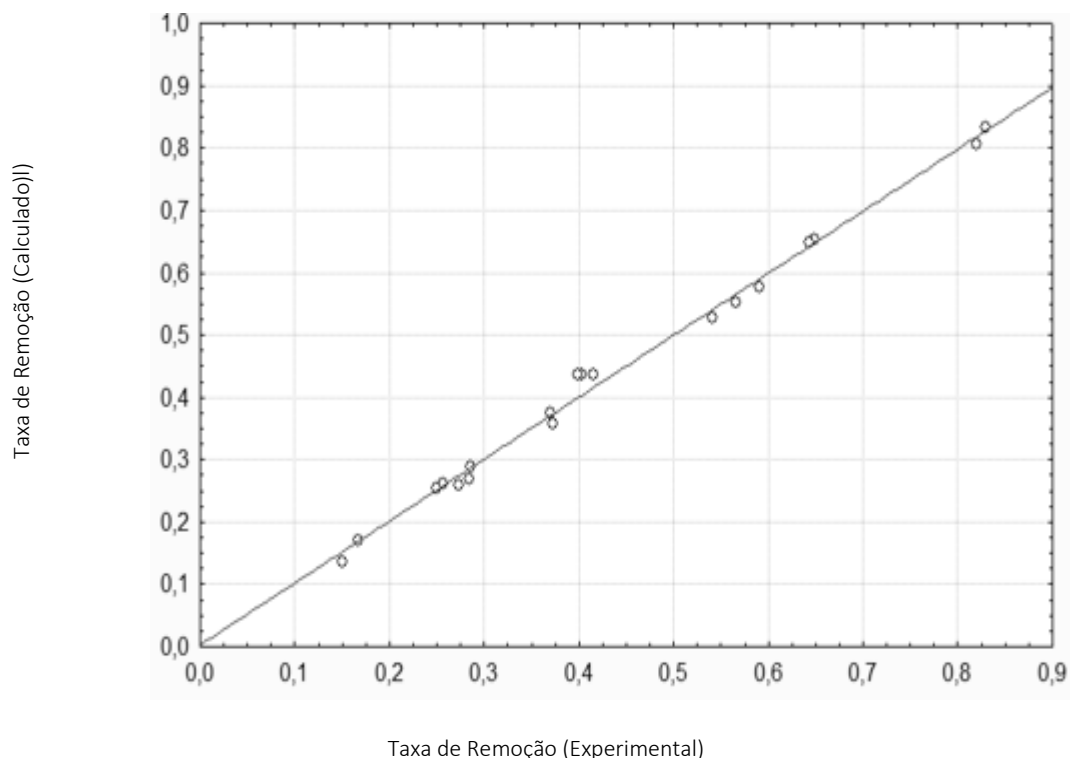


Figura 45 - Comparação entre os valores de Taxa de Remoção entre os valores experimentais e os calculados pela equação 41

Após a determinação das variáveis significativas para o processo, um gráfico de Pareto (Figura 45) foi construído, onde foi possível se determinar a ordem das variáveis significativas que mais impactam na variável resposta.

Observa-se na Figura 46, todas as variáveis independentes a análise individual mostrou-se significativos. Mas destaca-se a vazão da fase dispersa (Qd), como a que mais se distanciou do limite de 0,05 de p valor. Diferentemente nenhuma combinação ternária se mostrou significativa.

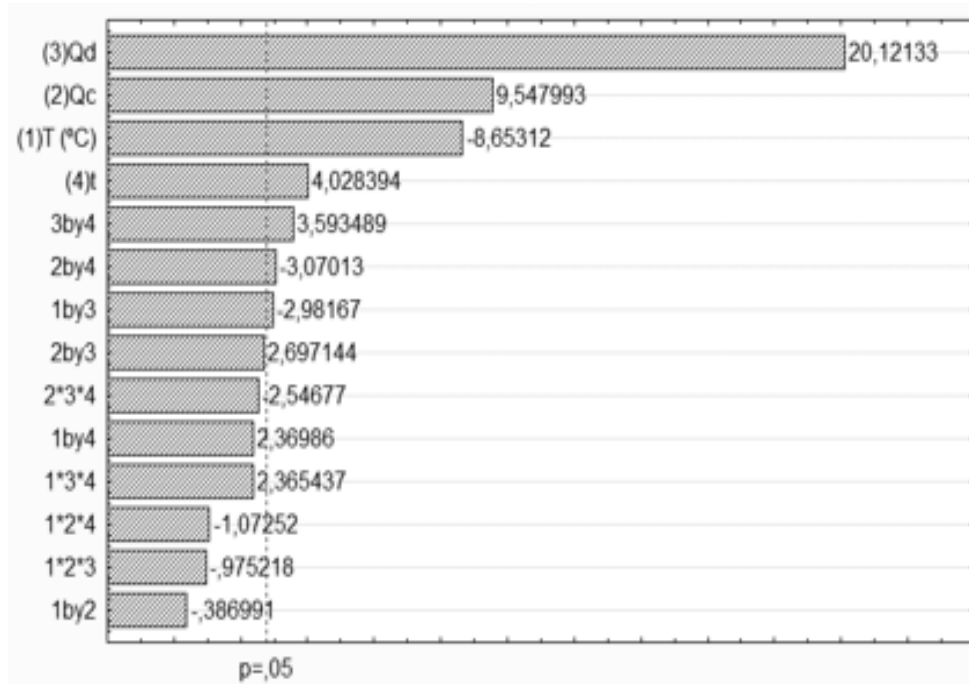


Figura 46 - Gráfico de Pareto para interações de parâmetros na coluna de absorção na obtenção de Remoção entre valores de entrada e saída de massa de acetona

CAPÍTULO 6

Conclusões

6 CONCLUSÕES

Alguns dos métodos utilizados para a realização de tratamento de dados foram baseados em correlações fundamentadas e estudadas por referências base, como a correlação de Ergun e Método de Prah. Por haver realidades diversas, como dimensões da coluna, como recheio não estabelecido para a correlação apresentada, foram feitas correções, ainda assim, observaram-se resultados coerentes com o fundamentado. Esse estudo prévio trouxe informações relevantes para trabalhos seguintes que envolverão transferência de massa. Diante dos dados apresentados no presente trabalho pode-se concluir que vários aspectos foram determinados visando à eficiência na operação da absorvedora. Foi constatado o aumento da queda de pressão com as vazões, tanto de gás como de líquido. A importância do estudo se comprova no levantamento de informações, onde a postura frente ao processo experimental foi compensada por dados coletados nesse estudo, dando-nos maior conhecimento sobre a coluna recheada trabalhada, como exemplo das vazões de carga e de inundação que foram determinadas com o modelo de Bianchini (2018), através das inclinações das linhas de operação formadas. Para as curvas de carga e de inundação onde são identificadas três regiões de operação da torre, onde em cada região são apresentadas condições específicas de operação.

A troca de massa na coluna, de forma sucinta, para todos os gráficos apresentados e tabelas, as vazões da fase dispersa e da fase contínua, foram os que se destacaram quanto ao desejo de maior troca de massa entre elas. O planejamento experimental trouxe importantes dados frente a parâmetro individuais, e como esses se comportam nas interações, bem como a metodologia de superfície de resposta, de forma gráfica trazendo conceitos fundamentais que ajudam no processo de aprendizado da operação, em específico para a operação na coluna recheada com anéis de *Raschig* trabalhada nesse projeto.

Dessa forma, compilando as informações de estudo hidrodinâmico juntamente com os dados obtidos na transferência de massa utilizada como base de coletar informações de comportamento da coluna, ficou notável a importância de estudo desses parâmetros, trazendo dados relevantes para continuidade do uso do aparato experimental.

Sugestões para próximos trabalhos:

- Variar a altura do recheio da coluna, bem como variar o tipo de recheio, materiais e dimensões.
- Realizar os procedimentos com outros tipos de substâncias para identificar a variabilidade dos dados junto a essa mudança.
- Encontrar método quantitativo de determinação do valor experimental de K_{La} , para comparação com os valores encontrados com base nos modelos da literatura.

REFERENCIAS

AGUIAR, M.R.M.P.; NOVAES, A.C.; GUARINO, A.W.S. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por alumínios silicatos. *Química Nova*, São Paulo, v.25, n.6B, p.1145-1154, 2002;

ALVAREZ-CUENCA, M., BAYER, C.G.J , BERGOUGNOU, M.A. Oxygen Mass Transfer in Bubble Columns, *Chem. Eng. Sci.*, v. 35, n. 5, p. 1121 - 1127, 1980;

AMATUZI,D.R. - Transferencia de Massa Gas-Liquido , 1 Em Leitos Centrifugos - Dissertação De Mestrado - Universidade Estadual De Campinas Faculdade De Engenharia Química – Campinas - SP -1999

ASADOLLAHZADEH, M.; SAFDARI, J.; HAGHIGHI-ASL, A.; TORABMUSTAEDI, M. Dispersed phase hold-up and characteristic velocity in a pulsed packed extraction column. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*. v. 18, n. 2, p. 255-262, 2012.

BANSAL, R.C.; GOYAL, M. Activated carbon adsorption. Flórida, USA: Taylor e Francis Group - Boca Raton,2005;

BARROS NETO, B., SCARMINO, I.S., BRUNS, R.E. Como Fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2010;

BETAEQ - Absorção gasosa: relevância e aplicações industriais - Disponível em : <<https://betaeq.com.br/index.php/2015/09/05/absorcao-gasosa-relevancia-e-aplicacoes-industriais/>>: Posted on setembro 5, (2015);

BIANCHINI, R.H.L., Estudo comparativo da Absorção e Dessorção de Dioxido de Carbono em Colunas para Solução de Aminas: Monoetileno amina e Monodietil Amina Piperazina. Dissertação de Mestrado- Universidade de São Paulo – 2018

BIARD, P.F., COUVERT, A., GIRAUDET S. - Volatile organic compounds absorption in packed column: theoretical assessment of water, DEHA and PDMS 50 as absorbents - DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.10.008> - 2017>;

BILLET, R. E MACKOWIAK, J. J. Fette Seifen Anstrichminel. 86, 342-358, (1984);

BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M. Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological Processes*, v. 6, n. 3-4, p. 251-290, 1994.

BOTTA, K.C., Estudo Hidrodinâmico de Colunas De Destilação com Recheio Randômico (IMTP) e Coluna Empacotada (Mellapak) - Universidade de São Paulo Escola de Engenharia De Lorena – EEL/USP - Lorena/SP 2015;

BRADU A. Fisher F Test with signifi cantly low values in small samples Revista română de statistică, 01 May 2011, Vol.59(4), pp.59-68

CALADO V., MONTGOMERY,D.C., Planejamento e Experimentos usando o Statistica. e-papers - Rio de Janeiro 2003;

CALDAS, J. N.; LACERDA, A. I. Internos de torres: pratos & recheios. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2003. 466 p. ISBN 8575110608;

- CASTRO, C.S.; GUERREIRO, M.C.; OLIVEIRA, L.C. A.; GONÇALVES, M.. Remoção de compostos orgânicos em água empregando carvão ativado impregnado com óxido de ferro: ação combinada de adsorção e oxidação em presença de H₂O₂. Química Nova, São Paulo, SP, v.32, n.6, p.1561-1565, 2009;
- CARVALHO, A.V. - Educação ambiental no desenvolvimento Sustentável Municipal - Revista Desafios, 2(1), 97-108. <<https://doi.org/10.20873/uft.2359-3652.2015v2n1p97>>- 2015;
- Chen,L.; Jin-Wei Lin; Yawb,C.I.; Absorption of NO₂ in a Packed Tower with Na₂S₂O₃ Aqueous Solution - Environmental Progress (V01.21, No.4)December 2002
- Chen,L., Hsu C.H., Tamkang, C.L.Y. - Oxidation and Absorption of NitricOxide in a Packed Tower withSodium Hypochlorite AqueousSolutions Published online 30 March 2005 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI 10.1002/ep.10075
- CHEN, N.H. Calculating actual plates in absorbers or strippers. Chem. Eng.. v. 71, n. 10, May 11, p. 159, 1964;
- CHISTI, Y., Mass transfer. John Wiley & Sons, Ltda. (2007);
- Chiu, W.A., Jinot, J., Scott, C.S., Makris, S.L., Cooper, G.S., Dzubow, R.C., Bale, A.S., Evans, M.V., Guyton, K.Z., Keshava, N., Lipscomb, J.C., Barone Jr., S., Fox, J.F., Gwinn, M.R., Schaum, J., Caldwell, J.C., 2013. Human health effects of trichloroethylene: key findings and scientific issues. Environ. Health Perspect. 121 (3), 303–311
- COMANA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE DE Nº 430 DE 13/05/2011 – DISPONÍVEL EM: <[HTTPS://WWW.LEGISWEB.COM.BR/LEGISLACAO/?ID=114770](https://www.legisweb.com.br/legislacao/?ID=114770)> , acessado na data: 13/04/2019;
- COSTA, G. - Estudo do processo oxidativo avançado como uma alternativa tecnológica e eficaz no tratamento de efluentes - RETC - Revista Eletrônica de Tecnologia e Cultura - Edição 19ª, P 64-84 , Outubro de 2016;
- COULSON J.M. & RICHARDSON, J.F. Chemical Engineering – Particle Tecnology and Separation Processes, Vol.2, Ed.4, Pergamo, Oxford, 1991;
- CREMASCO, A. , Fundamentos de transferência de massa. Brasil Ed. Unicamp 1998;
- CREMASCO, M. A. Fundamentos de transferência de massa. 2. ed. rev. Campinas, SP: Ed. UNICAMP, 2002. 729p. ISBN 8526805959 (broch.);
- DEZOTTI, M. – Processos e Tecnicas para Controle Ambiental de Efluentes Líquidos – Serie: Escola Piloto de Engenharia Química – COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro , 2008;
- DECKWER, W.D., SCHUMPE, A., 1993. Improved tools for bubble column reactor design and scale-up. Chemical Engineering Science 48, 889-911.
- DHARMA, S.; MASJUKI, H. H.; ONG, H. C.; SEBAYANG, A. H.; SILITONGA, A. S.; KUSUMO, F.; MAHLIA, T. M. I. Optimization of biodiesel production process for mixed jatropha curcas-ceiba pentandra biodiesel using response surface methodology. Energy convers. Manage. 2016, 115, 178–190;

- ECO Educacional– Produtos & serviços laboratoriais - Manual de instruções – coluna de absorção – 2015;
- ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. Chem. Eng. Prog. 48 (1952);
- FALCÃO, P. Equacionamento de torres de absorção. 2011. 17 f. Dissertação (trabalho de conclusão de curso) – curso de engenharia química, universidade federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011;
- FOUST, A.S., WENZEL, L. A., CLUMP, C.W., MAUS, L., ANDERSEN, L.B. Princípio das Operações Unitárias. Parte 1. Capítulo 2. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1982.
- FROMENT, G. F.; BISCHOFF, K. B., Chemical Reactor Analysis And Design, 2 ed., New York, John Wiley, p.664, 1990.
- GALES, L., A. MENDES*, C. COSTA -Removal of acetone, ethyl acetate and ethanol vapors from air using a hollow fiber PDMS membrane module – 2002;
- GOLDEMBERG, J- Biomassa e energia - Quim. Nova, Vol. 32, No. 3, 582-587, 2009;
- GUILLERM, M., COUVERT, A., AMRANE, A., NORRANT, E. LESAGE, N., DOUMONT, E., Absorption of toluene in silicone oil: Effect of the solvent viscosity on hydrodynamics and mass transfer - Chemical Engineering Research and Design Volume 109, May 2016, Pages 32-40;
- GRAFF K., Oil & Gas Journal, May of (1985);
- HASSAN, R., LOUBIERE, K., LEGRAND, J., DELAPLACE, G. A consistent dimensional analysis of gas-liquid mass transfer in an aerated stirred tank containing purely viscous fluids with shear-thinning properties. Chemical Engineering Journal, 184, 42-56-(2012);
- HEYOUNI, A., ROUSTAN, M.; DO-QUANG, Z. Hydrodynamics and mass transfer in gas– liquid flow through static mixers. Chemical Engineering Science, v. 57, p. 3325 – 3333, (2002);
- HEYMES, F.; DEMOUSTIER, P. M.; CHARBIT, F.; FANLO, J. L.; MOULIN, P. Hydrodynamics and mass transfer in a packed column: Case of toluene absorption with a viscous absorbent. Chemical Engineering Science. v. 61, p. 5094 – 5106, 2006;
- HOFFMANN R., TERRA, L.M., JUNIOR, R.J.S.M., Validação, Pelo Método Estatístico, da Produção e Alcance da Graduação de Etanol (Álcool Etilico Hidratado) Carburante, Sob o Enfoque das Microdestilarias em Processo de Batelada - ISSN 2178-3659 (2011);
- HOKMABADI, F. T.; BAHMANYAR, H.; SAFDARI, J. Dispersed phase holdup and slip velocity of phases in a pulsed packed column in conditions with and without mass transfer. Can. Jour. Chem. Eng.. v. 87, p. 855-861, 2009;
- HU, Q.Y., WANG, C., HUANG, K.X., 2015a. Biofiltration performance and characteristics of high-temperature gaseous benzene, hexane and toluene. Chem. Eng. J. 279, 689–695;
- HU, Q.Y., WANG, C., HUANG, K.X., 2015b. Interaction of gaseous aromatic and aliphatic compounds in thermophilic biofilters. J. Hazard. Mater. 300, 210–217

- HWA, Mei-Yin. HSIEH, Chu-chin. WU, Tsung-Cheng. CHANG, Lenf-Fu W. Real-world vehicle emissions and VOCs profile in the Taipei tunnel located at Taiwan Taipei area. *Atmospheric Environment*. v.36. 2002;
- INCROPERA, F.P., DEWWIT, D.P., *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. Ed 7, São Paulo SP.2014;
- JEMAL A, Bray F, Center MM, Ferlay J, Ward E, Forman D. Global cancer statistics. *CA Cancer J Clin*. 2011;61(2):69-90. Erratum in: *CA Cancer J Clin*. 2011;61(2):134. – Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3322/caac.20107>>;
- JIE, Y.; WEIYANG, F. Hydrodynamics and mass transfer in a pulsed packed column. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. v. 78, p. 1040-1045, 2000;
- KISTER, H. Z. *Distillation Design*. Alhambra, CA: McGraw-Hill, 1992;
- KRAAKMAN, N. J. R., ROCHA-RIOS, J., VAN LOOSDRECHT M. C. M. Review of mass transfer aspects for biological gas treatment. *Applied Microbial and Biotechnology*, 91, 873-886- (2011);
- KHOL A.L, NILESEN R. B., *Gas purification*. 5 edition Texas Gulf Publishing Company, 1997, 1414p;
- KOVÁCS, Viktória Barbara; MEGGYES, Attila. Energetic utilisation of pyrolysis gases in IC engine. *Acta Polytechnica Hungarica*, v. 6, n. 4, p. 157-172, 2009;
- LASO, M.; Henriques de Brito, M.; Bomio, P.; Von Stockar, U. Liquid-side mass transfer characteristics of a structured packing. *Chem. Eng. J.*, 58, 251-258 – (1995);
- LEITE, A. B.; BERTOLI, S. L.; BARROS, A. A. C., Chemical absorption of nitrogen dioxide (NO₂)”, *Engenharia Sanitária Ambiental*, Blumenau, jan/mar, 10. 1, p. 49-57 (2005);
- LEVA, M. *Tower Packings and Packed tower Design*. 2a ed. Akron, Ohio: The United States Stoneware Copany, (1953);
- LEWIS, W. K.; WHITMAN, W. G. Principles of gas absorption. *Ind. Eng. Chem*, v. 16, n. 12, p. 1215-1220, 1924;
- LIMA, A.C.; SOARES, R.B.; MENDES, M.F., Estudo de uma coluna de Recheada para a Produção de Etanol Anidro. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Inicicção Científica. Uberlandia , MG, 2009
- LIU, S. HU, R. ZHAO, J., BRÜGGEMANN, N., BOL, R. CAI, G., LIN, S., SHAABAN, M. Flooding effects on soil phenol oxidase activity and phenol release during rice straw decomposition - *Journal of plant nutrition and soil science*- 2014 Wiley-VCH verlag gmbh & Co. Kгаа, Weinheim <https://doi-org.ez10.periodicos.capes.gov.br/10.1002/jpln.201300356>

LÓPEZ-g.D., FERNANDEZ. M., VALVERDE, J. L. SANCHEZ-SILVA, L. Gasification Of Lignocellulosic Biomass Char Obtained from Pyrolysis: kinetic and evolved gas analyses energy, v. 71, n. 0, p. 456-467, 2014;

MADDOX, R., HINES, A., Transferencia de masa, fundamentos y aplicaciones. mexicoretice hall hispanoamericanos. a 1996 ;

MANISHA A. KHEDKARA, PRANHITA R. NIMBALKARA, SHASHANK G. GAIKWAD, PRAKASH V. CHAVAN PHD; MAYER, F.D. Desenvolvimento da tecnologia de destilação apropriada à produção de álcool combustível em pequena escala. Dissertação de mestrado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia de processos, universidade federal de santa maria, santa maria, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7946/MAYER%20c%20FLAVIO%20DIAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y> acesso em 12/08/2019;

MELO, V.M.S - Estudo hidrodinâmico e transferência de massa gás/líquido em coluna de borbulhamento/recheada: aplicação para sequestro de CO₂ do biogás em soluções aquosas - Programa de pós-graduação em engenharia química UFPE - 2017

MELLO, L. C - Estudo do processo de absorção de CO₂ em soluções de aminas empregando-se coluna recheada - Tese de doutorado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química – Universidade São Paulo- 2013;

McCABE, W. L; SMITH, J. C. HARRIOT, P., Unit operations of chemical engineering. 7° ed New York. Mcgraw Hill, 2005;

MIDOUX, N., MORSI, B.I., PURWASASMITA, M., LAURENT, A., CHARPENTIER, J. Interfacial area and liquid side mass transfer coefficient in trickle bed reactors operating with organic liquids. Chemical engineering science. v.39, p. 781-794, 1984;

MURRIETA, C., SEIBERT, A.F., FAIR, J.R, ROCHA, A.U., Liquid-Side Mass-Transfer Resistance of Structured Packings- Separations Research Program, The University of Texas at Austin, Austin, Texas 78712, and Universidad Regiomontana, Monterrey, Nuevo Leon, C.P. 64000, MeXic - American Chemical Society -2004;

NASSER, JR. AND TAQUEDA M.E.S- Replacement of Trays by Packing To Increase the Absorption Capacity of Acetone during Cellulose Acetate Spinning Roberto - Ind. Eng. Chem. Res. 2008, 47, 8376–8383;

NOBREGA, G.A.S.- Remoção da água do gás natural por absorção utilizando sistemas microemulsionados - Tese de Mestrado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – 2003;

NOBREGA, G.A.S. - Estudo de uma coluna de absorção recheada para desidratação do gás natural utilizando microemulsão como absorvente – Tese de Doutorado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – 2007;

NIRANJAN, K. Chem. Eng., 90, 67, (1983);

OSGOOD, N. L. The Performance burden of individual-based models through dimensional analysis and scale modeling. Wiley InterScience, p. 101-134, out. 2008.

PINHO, M.N., PRAZERES, D.M. Fundamentos de Transferência de Massa, IST Press, Lisboa , 2008;

PERRY, R. Chemical Engineers' Handbook. 7. ed. New York: Mc GRAW-HILL, 1997;
PRAHL, W. H. Liquid Density Distorts Packed Column Correlation. Chemical Engineering, 77 (24), 109-112, (1970);

RAHBAR M.S., KAGHAZCHI,T., Modeling of packed absorption tower for volatile organic compounds emission control-Autumn 2005, Vol. 2, No. 3, pp. 207-215

RAZI, N.; BOLLAND O.; Svendsen, H. Review of design correlations for CO₂ absorption into mea using structure packings. International journal of greenhouse gas control, v. 9. p. 193-219. 2012;

RIGATTO, S. F., SIQUEIRA, R. N. - Perda de carga em escoamentos laminares de fluidos pseudoplásticos através de uma curva de 90° Latin American Journal of Energy Research – Lajer v. 2, n. 2, p. 1 – 7 DOI: <http://dx.doi.org/10.21712/lajer.2015.v2.n2.p1-7> (2015)

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. Planejamento experimental e otimização de processos: uma estratégia de planejamento sequencial, campinas, SP. Casa do Pão Editora, 2005.

ROSU, M. ,MARLINA, A., KAYA, A.,SHUMPE, A. - Surfactant adsorption onto activated carbon and its effect on absorption with chemical reaction - chemical engineering science volume 62, issue 24, December 2007, pa7336-7343;

REVELLO , J.H.P. - Transferência de massa em colunas de absorção: uma abordagem numérica e experimental- Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química. Florianópolis - SC, março de 1998;

RIERA, JAIME ; ZEPPIERI, SUSANA ; DERJANI-BAYEH, SYLVANA - Hydrodynamic study of a multiphase spouted column-Fuel, 15 December 2014, Vol.138, pp.183-192

SARNIGHAUSEN,V.C.R – Revisão sistemática e metassíntese: medição de Gases do Efeito Estufa(GEE) emitidos pela pecuária bovina brasileira – Dissertação de Doutorado – USP, 2011;

SOUZA, I.G., CARASEK, E. DEBACHER, N.E. - Produção de gás de síntese por plasma térmico via pirólise de metano e dióxido de carbono - Quim. Nova, Vol. 34, No. 9, 1491-1495, 2011;

SOUZA, W.L.R. - Estudo do desempenho de uma coluna de destilação recheada na produção de etanol anidro usando glicerol como solvente – Dissertação de Mestrado - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro- Instituto de Tecnologia Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Química - Seropédica, RJ - 2012;

SIMONELLI, G.; MORAES, C.; PIRES, C. A. M.; SANTOS, L. C. L. Multivariate Study and Optimization of Biodiesel Production Using Commercial Surfactants. Chem. Ind. Chem. Eng. Q. 2019, 25 (2), 183–192;

Swamy, Kurella ; Kumar, Neeraj ; Meikap, B.C.- Hydrodynamic study of multi-stage plate column scrubber for removal of particulate-South African Journal of Chemical Engineering, 2015, Vol.20(1), pp.44-60;

Troendle, James F. Biometrical Journal, August 2008, Vol.50(4), pp.571-583;

TREYBAL, R E. "Mass-Transfer Operations", Third Edition. McGraw-Hill Book Company, London, 1980;

VILELA, F. H.- Influência do posicionamento do distribuidor de líquido na eficiência de absorção de dióxido de carbono em torre de absorção – Tese de Mestrado- Universidade Santa Cecília- Programa de pós-graduação em engenharia mecânica–2014;

WHITMAN W. G. A preliminary experimental confirmation of the two-film theory of gas adsorption. Chem. Metall. Eng. v. 29, p. 146, 1923;

Yu C.H.;Wu, T.W.;Tan C.S.- CO₂ capture by piperazine mixed with non-aqueous solvent diethylene glycol in a rotating packed bed - International Journal of Greenhouse Gas Control 19 (2013) 503–509;

YÜKÇÜ, N.; SENLIK, I.; ÖZTEKIN, E. Calculation of electric multipole moment integrals with the different screening parameters via the Fourier transform method. International Journal of Quantum Chemistry, v. 112, n. 2, p. 414-425, 2012;

ZAKERI, A.; EINBU, A.; SVENDSEN, H. F. Experimental investigation of pressure drop in structure packings. Chemical Engineering Science.Trondheim, Norway: Elsevier, 2012;