

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**BRUNO AZEVEDO FERRAZ DE NEGREIROS**

**DESENVOLVIMENTO DE MÓDULO DIDÁTICO DE BAIXO CUSTO  
PARA ENSINO DE ABSORÇÃO REATIVA POR INTERMÉDIO DA  
APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA**

**FRANCISCO BELTRÃO  
2019**

BRUNO AZEVEDO FERRAZ DE NEGREIROS

**DESENVOLVIMENTO DE MÓDULO DIDÁTICO DE BAIXO CUSTO  
PARA ENSINO DE ABSORÇÃO REATIVA POR INTERMÉDIO DA  
APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Departamento Acadêmico das Engenharias da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Batista de Souza  
Coorientador: Prof. Dr. Douglas Junior Nicolin

**FRANCISCO BELTRÃO  
2019**

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**BRUNO AZEVEDO FERRAZ DE NEGREIROS**

**DESENVOLVIMENTO DE MÓDULO DIDÁTICO DE BAIXO CUSTO PARA  
ENSINO DE ABSORÇÃO REATIVA POR INTERMÉDIO DA APRENDIZAGEM  
SIGNIFICATIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso;  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná;  
Engenharia Química.

Data de aprovação: 27 de novembro de 2019.

---

**Fernanda Batista de Souza - Universidade Tecnológica Federal do Paraná**

---

**Douglas Junior Nicolin - Universidade Tecnológica Federal do Paraná**

---

**André Zuber - Universidade Tecnológica Federal do Paraná**

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Química”

À toda minha família, vocês estão no meu coração. Aos meus pais Elizabete e Marcos e minha irmã Isabella que possibilitaram que eu morasse longe para realizar o meu sonho, amo muito vocês e morro de saudade. À toda minha família que me apoiam e me ensinaram que não há limites para sonhar. A todos que me ajudaram na construção desse trabalho e durante mais essa conquista.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todos os Orixás, por me guiarem e estarem presentes na minha vida todos os dias.

À minha mãe Elizabete e meu pai Marcos pelo amor incondicional, por serem meu suporte, minha fortaleza e meu alicerce, pelos conselhos, companheirismo e as sábias palavras nos momentos difíceis da minha vida.

Às grandes mulheres da minha vida, em especial às minhas avós Aurélia e Maria Antônia e minha tia Fernanda pelo imenso amor e por me ajudarem a construir meu caráter, vocês são fundamentais. À minha irmã Isabella que mesmo mais nova me ensina muito sobre a vida, me ensina constantemente o que é o amor incondicional e o que é a proteção dos seres que amamos.

Aos seres de luz que me cercam e me guiam, à minha mãe Oxum pela proteção e carinho, seu amor transborda e me direciona, sua tranquilidade me preenche e sua força me inspira, *Ora Yê Yê Ô*.

À minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Batista de Souza por me acolher e me instruir. obrigado pela confiança e por ser minha professora você é minha inspiração profissional e seus ensinamentos serão levados pra sempre no meu coração.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Douglas Junior Nicolin pelos conselhos e contribuições no trabalho e por me reconhecer como futuro colega de profissão.

À professora Dr<sup>a</sup>. Silvane Morés pelos cafés e conversas, puxões de orelha e bolos. Você foi essencial para a minha graduação, obrigado por não me deixar desistir e ser minha amiga. E à Professora Me. Priscila Ribeiro por ser um porto seguro, pela amizade e confiança em mim. Obrigado pelas correções, dicas e conversas. Espero poder retribuir um dia o que fizeram por mim.

Aos professores Dr<sup>a</sup> Ana Paula Oliveira Schmitz, Dr<sup>a</sup> Irede Angela Lucini Dalmolin, Dr. André Zuber e Dr. Douglas Junior Nicolin que se disponibilizaram a participar da validação do módulo didático e contribuir para este trabalho.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>; Ana Paula Romio por me disponibilizar uma de suas aulas e acreditar no nosso trabalho e aos alunos da disciplina de Laboratório para Engenharia Química II pelo comprometimento e participação do teste aplicado.

A todos meus amigos, em especial à Mariana, Pedro, Matheus, Ronaldo, Thaynara, Valeska, Thiago e Maria Clara que me auxiliaram nesse processo edificante que é a graduação. Obrigado pelas conversas a qualquer hora, os cafés nas lanchonetes pra

comemorações e descontrações, festas surpresas e chamadas de vídeo. Minha vida é melhor com todos vocês.

À cervejaria Schaf Bier por emprestar o cilindro para o experimento e pela confiança no nosso trabalho, nada disso teria acontecido se não fosse por vocês.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo auxílio financeiro à execução deste trabalho e ao apoio para meu crescimento como profissional pois nesta Universidade pude crescer e aprender a ser a pessoa que sou hoje. Gostaria de agradecer também a todos os servidores por darem todo o suporte para a realização deste trabalho, obrigado por ajudar os alunos nessa fase de encerramento da nossa vida acadêmica.

*“Não há progresso sem esforço, vitória sem luta, aperfeiçoamento sem sacrifício, assim como não existe a tranquilidade sem a paciência.”*

*Chico Xavier*

## RESUMO

Devido à sua importância para a Engenharia, busca-se inserir uma visão diversificada do ensino e aplicação dos fenômenos de transporte, uma vez que eles estão ligados a inúmeros processos químicos e às operações unitárias, como as de transferência de massa. No entanto, estes fundamentos vêm sendo ministrados da mesma maneira desde a sua definição, o que impede que se possa promover a aproximação do discente com seus conceitos, ocasionando rupturas no processo de ensino-aprendizagem em virtude da metodologia de educação passiva aplicada no ensino da Engenharia, na qual o processo de aprendizado comumente é desenvolvido pela reprodução mecânica e repetitiva do conteúdo apresentado. Uma das ferramentas utilizadas para solucionar esta adversidade na educação é a aplicabilidade de módulos didáticos para a identificação e solução de problemas, além de aprimorar o processo de ensino-aprendizagem, uma vez que se vincula o conhecimento previamente obtido com as novas informações e, similarmente, a teoria e a prática. Outro alicerce para minimizar a deficiência educacional são as metodologias ativas, em especial a aprendizagem significativa, pois é aplicada por métodos interdisciplinares, que exploram os conhecimentos teóricos, combinando-os com suas aplicações práticas. Neste estudo optou-se pela aplicação da prática de absorção por ser uma das Operações Unitárias mais importantes para a indústria, que permite realizar conexões interdisciplinares, conectando fundamentos outrora vistos. Foi proposto nesse estudo a construção de um módulo de absorção líquido-gás, minimizando-se consideravelmente o custo para aquisição destes equipamentos, gastando-se R\$ 451,57 e economizando-se R\$ 25.409,85 no preço de módulos disponíveis no mercado. Realizou-se a validação do módulo como ferramenta científica e educacional através de experimentos da absorção de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) utilizando hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), obtendo-se um percentual de remoção de 53,85% de  $\text{CO}_2$  para a vazão de  $\text{NaOH}$  de  $60,72 \text{ mL min}^{-1}$ . Já para a validação educacional, os docentes realizaram a validação do módulo como ferramenta educacional, atribuindo conceito “ótimo” para os aspectos pedagógicos, técnicos e opinião dos alunos. Aplicou-se também um teste de compreensão aos discentes, obtendo-se 19,64% de crescimento no aprendizado significativo.

**Palavras-chave:** Bancada didática. Metodologia ativa. Remoção de  $\text{CO}_2$ . Validação educacional.



## ABSTRACT

Due to their importance for engineering, seeks to insert a diversified view of the teaching and application of transport phenomena, since they are linked to numerous chemical processes and unitary operations, such as mass transfer operations. However, these foundations have been taught in the same way since its definition, which prevents the student from approaching its concepts, causing ruptures in the teaching-learning process due to the passive education methodology applied in the teaching of Engineering, in which the learning process is commonly developed by the mechanical and repetitive reproduction of the presented content. One of the tools used to solve this adversity in education is the applicability of didactic modules for problem identification and solution, as well as improving the teaching-learning process, since it links the knowledge previously obtained with the new information and, similarly, theory and practice. Another basis for minimizing educational disability is active methodologies, especially meaningful learning, as it is applied by interdisciplinary methods that exploit theoretical knowledge and combine it with its practical applications. In this study, it was chosen to apply the absorption practice as one of the most important unitary operations for the industry, which allows interdisciplinary connections, connecting fundamentals previously seen. It was proposed in this study the construction of a liquid-gas absorption module, considerably minimizing the cost for the acquisition of this equipment, spending R \$ 451.57 and saving R\$ 25,409.85 in the price of modules available at the market. . The module was validated as a scientific and educational tool through experiments on the absorption of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) using sodium hydroxide (NaOH), obtaining a removal percentage 53.85% of CO<sub>2</sub> for the NaOH flow rate of 60.72 mL min<sup>-1</sup>. For the educational validation, the teachers performed the validation of the module as an educational tool, assigning the concept “great” to the pedagogical, technical and student opinion. A comprehension test was also applied to the students, obtaining a 19.64% growth in significant learning.

**Keywords:** Didactic bench. Active methodology. CO<sub>2</sub> removal. Educational validation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coluna de absorção.	20
Figura 2 - Recheios aleatórios.	22
Figura 3 - Exemplificação da teoria do filme duplo.	24
Figura 4 - Cone do aprendizado de Edgar Dale.	25
Figura 5 - Projeção 2D da coluna de absorção.	34
Figura 6 - Peças fase inferior: (a) Dispersor de bolhas, (b) malha de aço inox e (c) anéis de cerâmica.	35
Figura 7 - Controladores de vazão (a) Bomba peristáltica INTLLAB DP - 385 e (b) fluxômetro 0 -15 LPM PROTEC.	36
Figura 8 - Esquema de funcionamento do módulo didático.	36
Figura 9 - Fluxograma do processo de absorção reativa no módulo didático.	37
Figura 10 - Módulo didático: : (a) fase superior; (b) fase central; (c) fase inferior.	45
Figura 11 - Estrutura geral do módulo didático.	45
Figura 12 - Modelo de titulação aplicada nas vazões de 30,13 mL min <sup>-1</sup> , 44,90 mL min <sup>-1</sup> e 60,72 mL min <sup>-1</sup> : (a) alíquota de 10,0 mL da solução com fenolftaleína; (b) BaCl <sub>2</sub> adicionado à solução com fenolftaleína; (c) solução titulada.	48
Figura 13 - Comportamento da concentração de CO <sub>2</sub> absorvido e disponível na vazão de 30,13 mL min <sup>-1</sup> .	50
Figura 14 - Comportamento da concentração de CO <sub>2</sub> absorvido e removido (mol L <sup>-1</sup> ) na vazão de 44,90 mL min <sup>-1</sup> .	51
Figura 15 - Comportamento da concentração de CO <sub>2</sub> absorvido e CO <sub>2</sub> disponível (mol L <sup>-1</sup> ) em função do tempo na vazão de 60,72 mL min <sup>-1</sup> .	51
Figura 16 - Variação da concentração de NaOH consumido e CO <sub>2</sub> absorvido (mol L <sup>-1</sup> ) dentro da coluna de absorção na vazão de 30,13 mL min <sup>-1</sup> .	54
Figura 17 - Variação da concentração de NaOH consumido e CO <sub>2</sub> absorvido (mol L <sup>-1</sup> ) em função do posição para a vazão de 44,90 mL min <sup>-1</sup> .	55
Figura 18 - Variação da concentração de NaOH consumido e CO <sub>2</sub> absorvido (mol L <sup>-1</sup> ) em função do posição para a vazão de 60,72 mL min <sup>-1</sup> .	56
Figura 19 - Ajuste dos dados experimentais à equação linearizada da resistência de troca mássica na fase líquida.	57
Figura 20 - Análise das respostas corretas antes e depois da prática de absorção.	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Itens gerais utilizados para a construção do módulo didático.	34
Tabela 2 - Parâmetros utilizados para a resolução dos cálculos de CO <sub>2</sub> reagido, CO <sub>2</sub> livre, k <sub>CO<sub>2</sub>,a</sub> e NaOH,z.	39
Tabela 3 - Classificação do módulo didático com base nas pontuações.	42
Tabela 4 - Elementos que compõem o aspecto pedagógico do instrumento de avaliação do módulo didático.	42
Tabela 5 - Elementos que compõem o aspecto técnico do instrumento de avaliação do módulo didático.	43
Tabela 6 - Elementos que compõem a opinião dos alunos do instrumento de avaliação do módulo didático.	43
Tabela 7 - Custo total da construção e estrutura geral do módulo didático de absorção.	47
Tabela 8 - Dados de tempo(min) ,volume gasto de HCl (mL) e concentração de NaOH residual (mol L <sup>-1</sup> ) no experimento de absorção para as vazões de 30,13 mL min <sup>-1</sup> ,44,90 mL min <sup>-1</sup> e 60,72 mL min <sup>-1</sup> .	49
Tabela 9 - Dados de % de Remoção de CO <sub>2</sub> por intermédio da absorção reativa para as vazões de 30,13 mL min <sup>-1</sup> , 44,90 mL min <sup>-1</sup> e 60,72 mL min <sup>-1</sup> .	52
Tabela 10 - Variação da concentração de NaOH e CO <sub>2</sub> consumidos (mol L <sup>-1</sup> ) em função do posição para a vazão de 30,13 mL min <sup>-1</sup> , 44,90 mL min <sup>-1</sup> e 6072 mL min <sup>-1</sup>	53
Tabela 11 - Dados utilizados para o cálculo dos parâmetros da resistência de troca mássica na fase líquida c <sub>0</sub> e C.	57
Tabela 12 - Valores dos parâmetros C <sub>0</sub> e C obtidos utilizando o ajuste linear.	58
Tabela 13 - Resultado da avaliação dos docentes e discentes para a validação do módulo como ferramenta educacional.	58

## LISTA DE SÍMBOLOS

b	Coefficiente estequiométrico do CO <sub>2</sub> na equação química (adimensional)
C	Parâmetro empírico que indica a tendência exponencial da velocidade mássica (adimensional)
c0	Parâmetro empírico proporcional a velocidade mássica (adimensional)
C <sub>CO2final</sub>	Concentração de CO <sub>2</sub> no fundo da coluna (mol L <sup>-1</sup> )
C <sub>CO2inicial</sub>	Concentração de CO <sub>2</sub> no topo da coluna (mol L <sup>-1</sup> )
C <sub>NaOH,Z</sub>	Concentração de NaOH em função da posição na coluna (mol L <sup>-1</sup> )
C <sub>NaOH,Z0</sub>	Concentração de NaOH na posição inicial (mol L <sup>-1</sup> )
C <sub>NaOHfinal</sub>	Concentração de NaOH no fundo da coluna (mol L <sup>-1</sup> )
C <sub>NaOHinicial</sub>	Concentração de NaOH no topo da coluna (mol L <sup>-1</sup> )
C <sub>NaOHresidual</sub>	Concentração de NaOH presente na amostra coletada (mol L <sup>-1</sup> )
CO <sub>2l,i</sub>	Concentração de CO <sub>2</sub> livre (não reagido) no tempo 0 (mol L <sup>-1</sup> )
CO <sub>2l,t</sub>	Concentração de CO <sub>2</sub> livre no tempo t (mol L <sup>-1</sup> )
E	Fator promocional ligado ao acréscimo na velocidade de absorção causado pela reação química (adimensional)
F <sub>CO2</sub>	Taxa de CO <sub>2</sub> (mol L <sup>-1</sup> )
F <sub>CO2final</sub>	Taxa de CO <sub>2</sub> no topo da coluna (mol L <sup>-1</sup> )
F <sub>CO2inicial</sub>	Taxa de CO <sub>2</sub> no fundo da coluna (mol L <sup>-1</sup> )
F <sub>g</sub>	Fluxo de gás (mol min <sup>-1</sup> )
F <sub>g</sub>	Taxa de gás (mol min <sup>-1</sup> )
f <sub>l</sub>	Espaço que o líquido ocupa no espaço livre da coluna (adimensional)
Fl	Fluxo de líquido (ml min <sup>-1</sup> )
Fl	Vazão volumétrica da mistura, H <sub>2</sub> O e NaOH (ml min <sup>-1</sup> )
G <sub>L</sub>	Velocidade mássica (kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )
H <sub>CO2</sub>	Constante de Henry para o soluto CO <sub>2</sub> (Pa m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )
k	Constante de velocidade da reação química (s <sup>-1</sup> )
k <sub>CO2,g,a</sub>	Coefficiente de transferência de massa na fase gasosa (mol m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup> )
k <sub>CO2,l,a</sub>	Coefficiente da resistência de transferência de massa na fase líquida (s <sup>-1</sup> )
ms	Vazão mássica do líquido (kg s <sup>-1</sup> )
P <sub>CO2</sub>	Pressão parcial do soluto no sistema (Pa)
Q <sub>g</sub>	Vazão volumétrica do gás na entrada da coluna (ml min <sup>-1</sup> )
Q <sub>l</sub>	Vazão volumétrica da água (ml min <sup>-1</sup> )

$-r_{\text{CO}_2}$	Lei de velocidade para a absorção reativa de $\text{CO}_2$ ( $\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$ )
$S$	Área da seção transversal ( $\text{m}^2$ )
$x_{\text{NaOH}}$	Fração molar de $\text{NaOH}$ na fase líquida (adimensional)
$y_{\text{CO}_2}$	Fração molar de $\text{CO}_2$ na fase gasosa (adimensional)
$z$	Altura da coluna (m).
$z^*$	Posição da coluna para cada nó (m)
$\Delta_{\text{CO}_2,z}$	Concentração de $\text{CO}_2$ reagido em função da posição na coluna ( $\text{mol L}^{-1}$ )
$\rho$	Massa específica ( $\text{kg m}^{-3}$ )

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>18</b>
3.1 MÓDULOS DIDÁTICOS	18
3.2 ABSORÇÃO	20
3.3 APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA	24
3.3.1 Teste de Compreensão	26
<b>4 MODELAGEM MATEMÁTICA</b>	<b>29</b>
4.1 CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> REMOVIDO E LIVRE DENTRO DA COLUNA DE ABSORÇÃO	29
4.2 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA FASE LÍQUIDA.	31
4.3 CÁLCULO DOS PERFIS DE CONCENTRAÇÃO NA COLUNA.	33
<b>5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO</b>	<b>34</b>
5.1 CONSTRUÇÃO DO MÓDULO DIDÁTICO	34
5.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO NO MÓDULO DIDÁTICO	37
5.2.1 Preparação das Soluções	37
5.2.2 Experimento de Absorção	38
5.2.3 Titulação Direta	38
5.3 CÁLCULO DAS CONCENTRAÇÕES	38
5.3.1 Cálculo da Concentração de C <sub>NaOH</sub> Residual	38
5.3.2 Cálculo da Concentração de CO <sub>2</sub> Não Reagido	39
5.3.3 Cálculo do Perfil de Concentração em Função da Posição na Coluna de Absorção	39
5.3.4 Cálculo do % de Remoção de CO <sub>2</sub>	40
5.4 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA FASE LÍQUIDA	40
5.5 CÁLCULO DOS PARÂMETROS c <sub>0</sub> E C	41
5.6 VALIDAÇÃO DO MÓDULO DIDÁTICO COMO FERRAMENTA EDUCACIONAL.	41
5.7 VALIDAÇÃO DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA	44
5.7.1 Teste de Compreensão	44
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>45</b>
6.1 CONSTRUÇÃO DO MÓDULO DIDÁTICO	45
6.2 ANÁLISE DE CUSTO	46
6.3 EXPERIMENTO DE ABSORÇÃO REATIVA	47

6.3.1 Titulação Direta	47
6.3.2 Variação da Concentração de CO <sub>2</sub> .	49
6.3.3 Avaliação da Porcentagem de Remoção de CO <sub>2</sub> .	51
6.3.4 Perfil de Concentração de CO <sub>2</sub> em Função da Posição	53
6.3.5 Cálculo dos Parâmetros da Resistência de Troca Mássica na Fase Líquida	57
6.4 VALIDAÇÃO DO MÓDULO DIDÁTICO COMO FERRAMENTA EDUCACIONAL	58
6.5 VALIDAÇÃO DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA	59
6.5.1 Teste de Compreensão	59
<b>CONCLUSÃO</b>	<b>62</b>
<b>SUGESTÕES</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>64</b>
<b>APÊNDICE A - Roteiro para a prática de absorção reativa</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE B - Teste de compreensão</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO A – Orçamento para coluna de absorção multipropósito</b>	<b>82</b>
<b>ANEXO B – Respostas dos testes de validação do módulo como ferramenta educacional</b>	<b>83</b>
<b>ANEXO C – Respostas dos alunos às perguntas pré-prática</b>	<b>84</b>
<b>ANEXO D – Respostas dos alunos às perguntas pós-prática.</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os métodos tradicionais de ensino de Engenharia no Brasil, baseados em memorização e em aulas expositivas e repetitivas, têm se mostrado pouco eficientes para motivar o aluno a aprender, criar vínculos interdisciplinares e auxiliar no desenvolvimento das competências necessárias para o mercado de trabalho. Ainda que seja indispensável aprimorar o ensino-aprendizagem na área da Engenharia, observa-se que poucas mudanças aconteceram no modo de formar engenheiros em comparação com as mudanças técnicas e científicas que vêm ocorrendo (BRUM; PURCIDONIO; FERREIRA, 2017; CUNHA, 2015).

Dentro deste contexto, para suprir a deficiência da aprendizagem, as metodologias ativas são utilizadas para minimizar os problemas relacionados à educação passiva, de forma funcional e efetiva. Entre as metodologias ativas, a Aprendizagem Significativa é responsável por trazer ao estudante um posicionamento dinâmico e ativo perante situações reais e experimentais. Ademais, é de extrema relevância quando se trata de instrumentos de ensino como *softwares* educativos, jogos interativos ou módulos didáticos (BARBOSA; MALDONADO; MAIDANTCHIK, 2003; BARBOSA; MOURA, 2013; TAVARES, 2008).

Neste sentido, os módulos didáticos ou bancadas didáticas, são amplamente utilizados para simulações e análises de comportamentos experimentais, previsões para sistemas reais e aplicações de conceitos teóricos multidisciplinares. Uma vez que são instrumentos importantes para a aprendizagem e necessários para atender às Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia e aos Referenciais Nacionais dos Cursos de Engenharia e, tornou-se cada vez mais custosa sua aquisição devido aos materiais utilizados e por haver poucos fornecedores no mercado. No entanto, observou-se que a construção destes equipamentos com materiais de baixo custo tem sido pautada constantemente como saída econômica e eficaz para sanar estas adversidades que também viabilizam a participação ativa desde o projeto até a confecção (ALMEIDA et al., 2016; SÁENZ et al., 2015; VALDIERO; BORTOLAIA; RASIA, 2011).

Ao realizar conexões interdisciplinares, possibilita-se que a aprendizagem se torne dinâmica e interessante, repleta de vínculos significativos, que contribuem para a consolidação do processo de ensino-aprendizagem. Além disso, as bancadas didáticas são projetos de integração coletiva e interdisciplinar de ensino, que possibilitam o entendimento de conceitos mais abstratos e de fundamentos importantes (CUNHA; FREITAS, 2010; GEDRAITE et al., 2000; MARQUES; LANÇA; BUENO QUIRINO, 2015).



Para a Engenharia Química, é de extrema importância a aplicação dos conceitos de Operações Unitárias de Transferência de Massa, devido às extensas aplicações na indústria e importância para o profissional da área. No que tange aos fundamentos das Operações Unitárias de Transferência de Massa, sabe-se que elas estão presentes majoritariamente nos processos industriais, por meio da separação, combinação ou por reação, que são responsáveis por técnicas e aparelhagens para extrair produtos de maior valor agregado como as extrações líquido-líquido e sólido-líquido e por procedimentos para obter ou remover concentrações de interesse como a secagem, adsorção, destilação, dessorção e absorção (BENÍTEZ, 2011; CUSSLER, 2009; SCHULZ, 2003).

Dentre as operações já descritas, a absorção é uma das mais utilizadas na indústria química. Por ser uma operação de separação, é aplicada muitas vezes na preparação da matéria-prima, para transformá-la em produto, até a purificação de produtos. Há registros no século XIX, nos quais a absorção era aplicada para retirar odores do óleo vegetal para a produção de margarinas. Atualmente, a técnica de absorção é bastante utilizada para remoção de gases poluentes e/ou tóxicos, por meio de soluções aminadas ou básicas de hidróxido de sódio (NaOH), como benzeno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), tolueno (C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>), amônia (NH<sub>3</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (LEITE; BERTOLI; BARROS, 2006; WANG et al., 2011).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como proposta desenvolver uma coluna de absorção reativa como bancada didática, aplicando-a para remover CO<sub>2</sub> utilizando soluções de NaOH como fase líquida. Deseja-se demonstrar os resultados pertinentes à eficiência do processo, bem como calcular sua constante de transferência de massa. Além disso, espera-se que seja possível que o projeto possa auxiliar na demanda educacional por meio da aprendizagem significativa.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Construir um módulo didático de absorção reativa, com o propósito de auxiliar no processo de ensino-aprendizagem das disciplinas de Transferência de Massa, Laboratório para Engenharia Química 2 e Operações Unitárias.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Selecionar os materiais de baixo custo para a elaboração do módulo didático;
- Desenvolver o módulo didático a partir da aplicação dos conceitos de Transferência de Massa e Operações Unitárias;
- Estudar a eficiência do processo de absorção;
- Determinar os parâmetros da resistência de transferência de massa na fase líquida;
- Elaborar um roteiro para a prática utilizando a coluna de absorção;
- Realizar a validação educacional, pedagógica e técnica do módulo didático.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 MÓDULOS DIDÁTICOS

Conforme os Referenciais Nacionais dos Cursos de Engenharia, normas regentes para as universidades que ofertam as Engenharias, é necessário atender aos conteúdos de núcleo básico da Engenharia com temas profissionalizantes e característicos da área da Engenharia Química. Há também a obrigatoriedade de práticas laboratoriais, de modo que a instituição disponibilize equipamentos para práticas e laboratórios como os de fenômenos de transporte, operações unitárias, química geral, química orgânica e analítica entre outros (BRASIL, 2019).

Quanto à Engenharia, sempre foi imprescindível a compreensão da teoria assim como sua aplicação, seja em escala laboratorial ou industrial, com o intuito de avaliar as convicções teóricas com base na realidade ou ampliar novas tecnologias para o mercado. Os módulos didáticos, além de atenderem à normativa, realizam a conexão entre teoria e prática e antecipam comportamentos experimentais. Além de aprimorar o ensino das Engenharias ao elucidar importantes perspectivas, permite que o estudante coloque em prática o que já foi aprendido e relacione com as novas informações obtidas por intermédio da bancada didática (GROBER et al., 2004; LU et al., 2003; ONGARATTO; SARKISB; RECH, 2010).

Os módulos didáticos são equipamentos utilizados para ensino e pesquisa que contemplam a normativa na composição dos laboratórios, com a finalidade de caracterizar conteúdos teóricos, realizar experimentos de microescala e simular operações em pequena escala para aproximá-las da realidade industrial, por meio dos recursos tecnológicos e computacionais. O avanço da área eletrônica e informática tornaram os módulos mais efetivos, visto que este avanço incorporou nas estruturas didáticas, controladores, microprocessadores e *softwares*, para reconhecer comportamentos e ampliar a obtenção de dados (SANTOS et al., 2017; SOUZA; SILVA; JUNIOR, 2014; VALDIERO; BORTOLAIA; RASIA, 2011).

No que tange ao desenvolvimento e aquisição das bancadas didáticas, devem ser considerados aspectos técnicos e organizacionais da instituição de ensino. Para o processo de desenvolvimento, considera-se a importância do experimento a ser realizado dentro da matriz curricular, seu contexto na disciplina a ser inserido, custo dos materiais, metodologia presente no equipamento didático e a sua manutenção. Já no contexto da aquisição, além dos fatores já

citados, avalia-se o custo dos módulos e como eles se inserem no orçamento da instituição de ensino (BARBOSA; MALDONADO; MAIDANTCHIK, 2003; CASTRO; SIRAQUE; TONIN, 2017; PINHEIRO, 2007).

Em relação ao desenvolvimento, preocupa-se ainda com o comportamento dinâmico e evolutivo do conhecimento, isto é, com questões de como as informações são recebidas e inseridas neste processo de aprendizado e de como a compreensão do fenômeno estudado auxilia na produção de novos conhecimentos. Atenta-se também aos fatores internos de aprendizagem, como a capacidade de processar informações e a aplicação das habilidades adquiridas com práticas individuais, sendo estes os processos cognitivos e psicomotores, respectivamente (GEDRAITE et al., 2000; MARQUES; LANÇA; BUENO QUIRINO, 2015).

Outrossim, quanto ao custo dos materiais para a construção do módulo didático, buscou-se por uma opção não tão custosa e que possibilitasse a realização dos experimentos e suas simulações com eficácia. Para que os valores se enquadrassem nos orçamentos disponibilizados, as instituições de ensino começaram a construir suas bancadas didáticas e testar diversos materiais. Atestou-se que é possível minimizar o custo consideravelmente ao substituir materiais mais caros como o acrílico e controladores de lógica programada (CLP), por vidros ou tubulações de policloreto de vinila (PVC) e controladores de Arduino (ALMEIDA et al., 2016; GOMES et al., 2011; QUINTINO et al., 2017).

Além disso, a manutenção e reparo de peças apresenta-se como custo extra no caso da aquisição dos módulos, devido ao valor dos materiais e complexidade dos controladores, pois estão conectados à empresa fornecedora e seu serviço de assistência. Ao construir a bancada com materiais de baixo custo, torna-se mais prático e mais barato o processo de manutenção e reparo do equipamento, devido ao baixo custo dos materiais a serem substituídos (ALMEIDA et al., 2016; ONGARATTO; SARKISB; RECH, 2010; RANNOV et al., 2017).

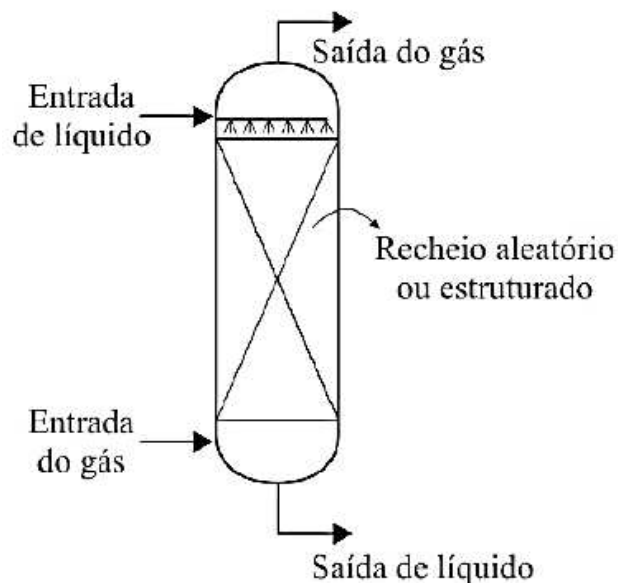
Para exemplificar o uso das bancadas didáticas com materiais de baixo custo pode-se citar o experimento para ensino de dinâmica dos fluidos (RANNOV et al., 2017), a reprodução do experimento de Reynolds (ROCHA et al., 2014), a construção de uma torre de resfriamento para o ensino de Operações Unitárias (ONGARATTO; SARKISB; RECH, 2010), a montagem de máquinas térmicas para geração de vapor reutilizando materiais (MARQUES; LANÇA; BUENO QUIRINO, 2015), e o desenvolvimento do módulo com CLP para o ensino de controle e automação (SOUZA; SILVA; JUNIOR, 2014).

### 3.2 ABSORÇÃO

Do conjunto das operações unitárias, as que se utilizam da diferença de concentração como força motriz para separar componentes ou fases, de modo mecânico ou utilizando-se da diferença de pressão, difusividade ou solubilidade, são governadas pelos fundamentos da transferência de massa, sendo chamadas de Operações Unitárias de Transferência de Massa. Tratando-se de um dos processos de separação das operações unitárias, a absorção é comumente utilizada na indústria para recuperar ou obter componentes de alto valor agregado e como alternativa ambiental para remover poluentes provenientes dos processos industriais como o sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) e o  $CO_2$  (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2005; SEADER; HENLEY, 2006; TADINI et al., 2016).

A absorção pode ser definida como uma operação unitária difusional de separação, que ocorre quando há o contato, em contracorrente, de uma fase gasosa, pura ou com soluto presente em uma mistura, com uma fase líquida, realizando a transferência mássica de, no mínimo, um componente à fase líquida. Similarmente, o processo reverso da absorção é chamado de esgotamento, dessorção ou *stripping* e é realizado para transferir elementos da fase líquida para a gasosa, com o intuito de purificar uma das fases ou separar da mistura um produto de valor agregado (CUSSLER, 2009; LEITE; BERTOLI; BARROS, 2006). A Figura 1 ilustra o modelo das colunas de absorção que operam em contracorrente.

Figura 1 - Coluna de absorção.



Fonte: Tadini et al. (2016).

Análoga à absorção, a destilação é também um processo de separação, embora na destilação o objeto de interesse esteja presente em uma mistura líquida e o propósito seja obter uma determinada pureza do constituinte mais volátil presente na mistura, por meio da evaporação seguida de condensação. Desse modo, a transferência de massa na destilação ocorre com o contato de uma mistura líquida e seu vapor. Contudo, quando se tem volatilidades similares ou se deseja transferir um componente em particular para a fase inerte, este processo se torna inviável (BENÍTEZ, 2011; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2005; NOERES; KENIG; GÓRAK, 2003).

Para exemplificar o uso da absorção cita-se a remoção de nitrogênio dos gases de combustão interna (LEITE; BERTOLI; BARROS, 2006), a solubilização e remoção de gases residuais da indústria petroquímica por meio de líquidos iônicos (RAMDIN et al., 2016), a excisão de CO<sub>2</sub> com soluções de NaOH (FULLY; D'HENI; LINARES, 2014), na remoção de dióxido de enxofre do caldo de cana (SILVA et al., 2009), e até na eliminação de odores desagradáveis ao extrair o ácido sulfídrico proveniente do biogás por absorção química (FRARE; GIMENES; PEREIRA, 2009).

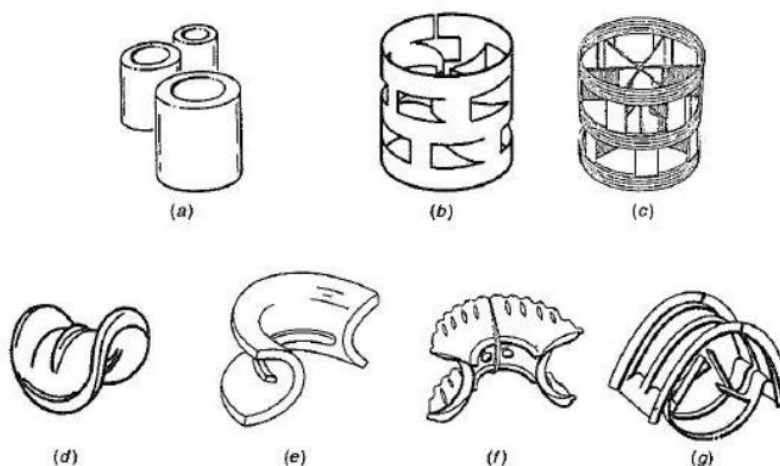
Em relação à seleção do solvente, há parâmetros a serem analisados para determinar qual solvente é mais apropriado para o processo. Um dos fatores principais da escolha é a viabilidade econômica, pois se deve adequar ao orçamento disponível. Fatores ambientais também são de extrema importância, por isso deve-se atentar à toxicidade e inflamabilidade, pois são vetores de risco para o processo e danificam a recuperação do produto final (SEADER; HENLEY, 2006; TADINI et al., 2016).

Ainda neste contexto, na escolha do solvente analisa-se o potencial corrosivo, pois este pode vir a danificar a tubulação e demais equipamentos ao longo do tempo. Observa-se também sua solubilidade com o soluto, isto é, se haverá ou não um alto grau de dissolução no solvente. Outros fatores importantes a serem considerados são viscosidade, volatilidade e pressão de vapor (FRARE; GIMENES; PEREIRA, 2009; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2005).

A absorção de gases é comumente realizada em colunas, sejam elas de recheio ou de pratos, similares às popularmente utilizadas na destilação. Utiliza-se a coluna de pratos quando se necessita de maior tempo de residência, controle apurado da temperatura, mudança na vazão e diâmetro maior que 0,6 metros ou caso se necessite de mais de 10 andares. Deste modo, a coluna de recheio é escolhida em casos que necessite de diversos materiais para sua construção, o diâmetro seja menor ou igual a 0,6 metros e o processo requeira o uso de baixas pressões (TADINI et al., 2016).

Recheios aleatórios são amplamente utilizados na área da pesquisa e na área industrial devido à sua alta disponibilidade no mercado, baixo custo de aquisição e praticidade na remoção dentro da coluna. Além disso, estão disponíveis também em diversos materiais como cerâmica, metal e plástico. Estes recheios se tornaram uma alternativa eficaz e econômica para maximizar a capacidade de troca térmica e mássica. O uso dos recheios aleatórios permite diminuir a retenção de líquido e queda de pressão dentro do equipamento, assim como apresentam melhor eficiência quando comparado com pratos (ABOUDHEIR et al., 2003; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2005; TADINI et al., 2016; YOO; HAN; WEE, 2013). A Figura 2 exemplifica os recheios aleatórios mais utilizados nas colunas.

Figura 2 - Recheios aleatórios.



Fonte: McCabe, Smith e Harriott (2005). Legenda: (a) anel de Raschig, (b) anel de Pall de metal, (c) anel de Pall de plástico, (d) sela de Berl, (e) sela Intalox de cerâmica, (f) sela Super Intalox de plástico e (g) sela Intalox de metal.

Dentro das colunas, o processo ocorre por estágios de equilíbrio líquido-vapor (ELV) ou líquido-gás, que acontece na superfície de contato, sendo prato ou recheio, na qual duas fases homogêneas presentes no sistema entrem em equilíbrio. Cada operação de absorção possui seu sistema ELV, descrito por modelos de equilíbrios termodinâmicos, devendo-se escolher o que fornece a temperatura e pressão de operação para que, durante o processo, não se atinja a região monofásica e se interrompa a transferência de massa (CUSSLER, 2009; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2005).

O processo de absorção pode ser físico ou químico, ocorrendo por diferença de solubilidade ou envolvendo reações químicas entre as espécies. Em ambos os casos, a transferência de massa ocorre predominantemente pela difusão e o processo de absorção baseia-se na lei de Henry, que determina a solubilidade de um gás em um líquido, de modo que a concentração de equilíbrio do contaminante é influenciada por sua pressão parcial na

fase gasosa, determinada pela lei de Dalton nos casos de gases ideais (NOERES; KENIG; GÓRAK, 2003; SCHULZ, 2003; TADINI et al., 2016).

A absorção física ou absorção não reativa acontece quando o soluto da fase gasosa a ser purificado apresenta solubilidade maior que os componentes presentes na fase líquida. Entretanto, não há reação com a fase absorvedora. Por não haver interações químicas com o solvente na absorção física, é possível recuperar o solvente, reutilizá-lo no processo e utilizar menor temperatura, pois não há a necessidade de fornecer energia em solventes destinados às interações físicas. Como exemplo deste tipo de absorção, pode-se citar a absorção de  $H_2S$  e  $CO_2$  em éter dimetílico de polietilenoglicol (KOHL; NIELSEN, 1997).

Por outro lado, a absorção química ou absorção reativa, é realizada quando se tem por objetivo minimizar a concentração de soluto por intermédio da reação química na fase líquida, aproximando-a de zero. Deste modo, os benefícios da absorção reativa são: aumentar a capacidade de absorção, bem como a capacidade do soluto de se dissolver na solução e, conseqüentemente, diminuir a demanda de solvente e o tamanho do equipamento. Ao reduzir a quantidade de solvente, reduz-se juntamente a dimensão da coluna, maximizando a velocidade da operação (CUSSLER, 2009; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2005).

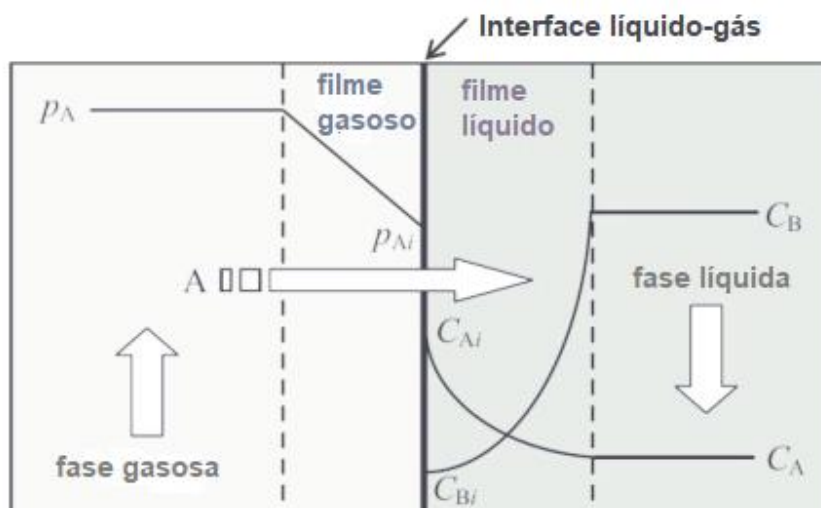
A teoria do filme duplo, descrita por Whitman em 1923, mecanismo governante de transferência mássica na absorção, descreve que, em um sistema líquido-gás, o contato de ambas as fases gera uma resistência do gás, denominada  $k_G$  e, similarmente, uma resistência para o líquido, denominada  $k_L$ . Consideram-se três fases para a transferência do soluto, sendo elas: do seio da fase gasosa até a interface; através da área de interação líquido-gás e da interface para o seio da fase líquida. Ademais, há a dependência do tamanho do filme que, conseqüentemente, é dependente da vazão volumétrica que permeará os filmes (AROONWILAS; VEAWAB; TONTIWACHWUTHIKUL, 1999; CUSSLER, 2009; SCHULZ, 2003).

Observa-se que as resistências  $k_G$  e  $k_L$  intensificam-se nas proximidades da área de interação, porém na interface propriamente dita, anulam-se devido ao equilíbrio das fases. Em seguida, a resistência que consegue ultrapassar a interface mais rapidamente tornar-se governante e a outra desprezível para o processo. As resistências  $k_G$  e  $k_L$  relacionam-se com o fluxo molar, e nenhum dos fluxos pode ser zerado, pois está ocorrendo transferência de massa. Para resolver essa adversidade, o coeficiente global de transferência de massa  $K_L$  é utilizado como alternativa para quantificar o fluxo molar de cada fase através do equilíbrio termodinâmico (BENÍTEZ, 2011; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2005).



Na Figura 3 visualiza-se a exemplificação da teoria do filme duplo, considerando-se a transferência da fase gasosa até a interface líquido-gás e da interface à reação química na fase líquida.

Figura 3 - Exemplificação da teoria do filme duplo.



Fonte: Adaptado de Chikukwa et al. (2012)

Nesse sentido, analisa-se também a cinética química para quantificar o mecanismo cinético, descrevendo-se as etapas da reação elementar por meio da velocidade de reação. A constante de reação cinética carrega consigo a energia de ativação, influência da temperatura e do equilíbrio químico, e a característica de maior interesse: o tempo de reação química. Em sistemas de absorção reativa, diferentemente dos demais processos, avalia-se o tipo de contato entre o líquido e gás, se é por aborbulhamento, por *spray* ou por recheio. Em suma, pode-se comparar a constante cinética com o coeficiente global de transferência de massa para determinar se a reação química é governante ou se é o processo difusional (CASTRO; SIRAQUE; TONIN, 2017; LEVENSPIEL, 1999; SCHULZ, 2003; TADINI et al., 2016).

### 3.3 APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

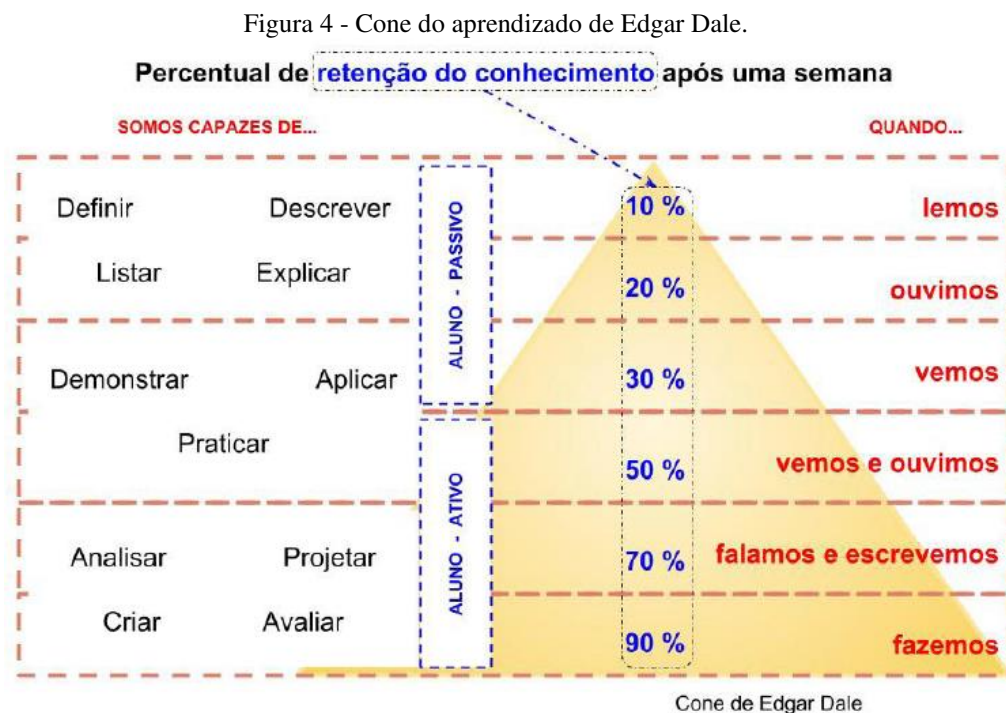
A teoria de aprendizagem significativa foi desenvolvida por Ausubel e colaboradores que buscaram a compreensão de como é construído o entendimento, para que fosse possível planejar métodos de ensino e difundir o conceito de aprendizagem significativa. Eles descreveram, ainda, três modalidades de aprendizagem, sendo: a afetiva, a psicomotora e a cognitiva (AUSUBEL, 2003; CARVALHO; PORTO; BELHOT, 2001).

A estrutura afetiva é composta pelas experiências emocionais vividas como a dor, prazer, ansiedade e satisfação. Diferentemente da aprendizagem afetiva, pode-se definir a

estrutura psicomotora pela junção das experiências musculares obtidas mediante exercício e prática. A estrutura cognitiva, por sua vez, pode ser definida como o conhecimento já armazenado durante o desenvolvimento do indivíduo e, segundo Ausubel, é um dos vetores mais significativos para um processo de aprendizagem efetivo (COSTA; MOREIRA, 2001; PIVATTO, 2013).

Neste contexto, as informações presentes no cérebro organizam-se para formar uma estrutura conceitual e representativa, na qual se conectam os conhecimentos já obtidos com as novas informações adquiridas, para acoplar este novo conjunto de dados com a estrutura cognitiva já existente. Esta conexão vai além de uma simples junção de informações, apresentando-se como um processo de compreensão no qual os novos dados modificam as concepções cognitivas, as tornando mais presentes na hierarquia conceitual (SOARES; PINTO, 2017; TAVARES, 2008).

No que diz respeito à hierarquia conceitual do aprendizado, a concepção é validada com os trabalhos sobre a pirâmide de aprendizagem, realizada pelo psiquiatra norte-americano William Glasser em 1967, e a definição do cone do aprendizado, formulada pelo educador norte-americano Edgar Dale em 1969 (DWYER, 2010; LETRUD; HERNES, 2016; SILVA; MUZARDO, 2018). Conforme Figura 4, na qual exemplifica-se o cone de aprendizagem desenvolvido por Edgar Dale.



Fonte: Schneiders (2018).

Descreve-se que, da informação recebida, retém-se no máximo 10% ao ler, 20% ao ouvir, 30% observando e 50% quando se vê e ouve a informação. Em contrapartida, ao conversar e discutir sobre a informação assimila-se 70%. Ao praticar, demonstrar e se comunicar compreende-se 80% da informação. Todavia, o conhecimento que é ilustrado, resumido, construído e transmitido permite aprender até 95%, tornando-se mais relevante para a hierarquia conceitual. Desta forma, a aprendizagem significativa é aplicada na área onde retêm-se mais conhecimento, permitindo que o aluno assuma papel mais ativo no seu processo de aprendizagem e, concomitantemente, assimile melhor as informações passadas pelo professor.

Denomina-se metodologia da educação passiva os métodos educacionais que são focados na reprodução automática e dependente do conhecimento de um docente, já as metodologias ativas são estruturas de aprendizagem voltadas à participação ativa na construção do conhecimento, na qual há um educador para auxiliar neste processo. Neste sentido, a aprendizagem significativa atua para que no processo da aprendizagem, ao entrar em contato com conteúdos novos, as informações não sejam assimiladas de modo literal e reproduzidas de modo idêntico ao apresentado anteriormente (BARBOSA; MOURA, 2013; RIBEIRO, 2005). Caso isso ocorra, significa que não houve um entendimento completo da informação apresentada e o aluno não estará apto a entender, aplicar ou transmitir a estrutura destas informações. Acreditando que o processo do conhecimento não deve ser apenas repetições de comandos, Ausubel desenvolveu o processo de aprendizagem significativa para que não ocorresse a educação por repetição, mas sim o aperfeiçoamento da habilidade de transferir o conhecimento, utilizá-lo em conceitos exteriores àquele outrora visto e entendê-lo em sua plenitude (AUSUBEL, 2003; CARVALHO; PORTO; BELHOT, 2001; PIVATTO, 2013).

No âmbito de ensino, a teoria da aprendizagem significativa foi aplicada em trabalhos como a inserção da metodologia de Ausubel no Ensino Fundamental I (SILVA; RODRIGUES, 2017), a resolução de problemas de movimento dos corpos rígidos (COSTA; MOREIRA, 2001), a nova proposta pedagógica para a disciplina de trigonometria (VIGANÓ; LIMA, 2015), o desenvolvimento de mapa conceitual para o ensino do Reino Protista (SOARES; PINTO, 2017) e o ensino da cinética química por meio de oficinas problematizadoras (CASTRO; SIRAQUE; TONIN, 2017).

### 3.3.1 Teste de Compreensão

Segundo Ausubel (1980), o entendimento pleno de um conceito ou proposição implica em significados claros, precisos, diferenciados e transmissíveis. No entanto, o autor reconhece também que ao testar os conhecimentos dos estudantes partindo-se de perguntas objetivas, as respostas obtidas serão majoritariamente memorizadas de modo mecânico e repetitivo. O autor afirma ainda que a aplicação de testes objetivos desenvolve o hábito de memorização para exemplos, explicações e maneiras repetitivas na resolução de equações (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980; AUSUBEL, 2003; CARDOSO; DICKMAN, 2012).

Neste sentido, Ausubel propõe que testes não objetivos, denominados testes de compreensão, sejam aplicados quando o propósito for evidenciar a aprendizagem significativa, com questões diferenciadas e não repetitivas, que trabalhem a análise e compreensão do que é pedido, de modo que os alunos consigam transformar o conhecimento previamente obtido o máximo possível e então aplicá-lo nos testes (CASTRO; SIRAQUE; TONIN, 2017; SILVA; RODRIGUES, 2017).

Os testes de compreensão devem ser formulados e fraseados em um contexto diverso do conteúdo teórico, contendo perguntas dissertativas além das de múltipla escolha, para que seja evitada a simulação da aprendizagem significativa, que é o caso das respostas memorizadas. Embora a resolução de problemas seja um método válido para atestar a aprendizagem significativa, deve-se considerar também que as respostas erradas não caracterizam apenas a memorização das questões, mas podem ser indicativos de problemas de compreensão do educando (KLEINKE, 2003; SOARES; PINTO, 2017; SOUSA et al., 2015).

Deste modo, agrega-se ao teste de compreensão perguntas que requeiram a conexão de conceitos presentes em um mapa conceitual ou listas que contenham elementos e proposições similares ao que foi pedido. Isso porque Ausubel trabalha a aprendizagem por ancoragem, o que significa que o conhecimento a ser adquirido necessita, imprescindivelmente, ancorar-se em conceitos pré-existentes. Ao conectar dados em um mapa conceitual, por exemplo, torna-se explícita a ancoragem do aprendizado, e por consequência, atesta-se a aprendizagem significativa e a retenção dos conteúdos estudados de modo pedagógico, sem deixar lacunas no processo de ensino-aprendizagem (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980; AUSUBEL, 2003; SILVA; RODRIGUES, 2017).

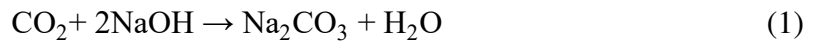
Neste sentido, ao se deparar com questões que conectam assuntos e disciplinas anteriores é possível trabalhar a aprendizagem cognitiva do educando, fortificando-a para que seja evitada a aprendizagem compartimentalizada e o educando consiga conectar os conteúdos já aprendidos, se adaptar ao que é pedido na situação e, consequentemente, maximizar seu

potencial de resolução de problemas. Devido a isso, pode-se afirmar que a ancoragem cognitiva traz para o processo de ensino-aprendizagem uma proximidade com as situações da realidade, onde haverá problemas que precisarão que o profissional reúna seu conhecimento teórico e prático para aplicá-lo e resolver as situações apropriadamente (CARVALHO; PORTO; BELHOT, 2001; HALLOUN, 1996; KLAUSEN, 2015; SOMYÜREK, 2014).

## 4 MODELAGEM MATEMÁTICA

### 4.1 CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> REMOVIDO E CO<sub>2</sub> LIVRE DENTRO DA COLUNA DE ABSORÇÃO.

A absorção química de CO<sub>2</sub> utilizando o NaOH como solvente pode ser demonstrada na Equação 1.



Como a absorção reativa é fundamentada na teoria do filme duplo, deve-se considerar a fase gasosa a fase líquida e a interface líquido-gás responsável pela reação química e. Neste sentido, deve-se relacionar o consumo de gás, com o consumo de líquido e o consumo realizado na reação química. A Equação 2 explicita a relação entre a fase gasosa, líquida e reação química.

$$\left( \begin{array}{c} \text{CO}_2 \\ \text{consumido} \\ \text{do gás} \end{array} \right) = \frac{1}{b} \left( \begin{array}{c} \text{NaOH} \\ \text{consumido} \\ \text{do líquido} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{CO}_2 \\ \text{consumido} \\ \text{na reação} \\ \text{química} \end{array} \right) \quad (2)$$

Partindo-se da definição de transferência de massa do soluto através da fase gasosa e líquida, considerando-se também a reação química e realizando-se as devidas considerações, obtém-se a Equação 3, que expressa a operação em colunas de absorção.

$$F_g \cdot dy_{\text{CO}_2} = -\frac{1}{b} \cdot F_l \cdot dx_{\text{NaOH}} = -r_{\text{CO}_2} \cdot S \cdot dz \quad (3)$$

Onde:

$F_g$  é a taxa de gás (mol min<sup>-1</sup>);

$F_l$  vazão volumétrica da mistura, H<sub>2</sub>O e NaOH (mL min<sup>-1</sup>);

$b$  o coeficiente estequiométrico do NaOH (adimensional);

$y_{\text{CO}_2}$  a fração molar de CO<sub>2</sub> na fase gasosa (adimensional);

$x_{\text{NaOH}}$  a fração molar de NaOH na fase líquida (adimensional);

$S$  a área da seção transversal (m<sup>2</sup>);

$z$  é altura da coluna (m).

Integrando a Equação 3 e considerando-se que: a coluna está operando contracorrente; por se tratar de um sistema diluído pode-se assumir a vazão da água como a vazão da mistura e o  $\text{CO}_2$  encontra-se puro na fase gasosa. Deste modo na Equação 5 obtêm-se a expressão que relaciona o consumo de NaOH com o consumo de  $\text{CO}_2$ .

$$\int_{F_{\text{CO}_2\text{inicial}}^{F_{\text{CO}_2\text{final}}}} dF_{\text{CO}_2} = -\frac{1}{b} \cdot Ql \cdot \int_{C_{\text{NaOHinicial}}^{C_{\text{NaOHfinal}}}} dC_{\text{NaOH}} \quad (4)$$

$$\Delta F_{\text{CO}_2} = \frac{Q_l}{b} \cdot (C_{\text{NaOHinicial}} - C_{\text{NaOHfinal}}) \quad (5)$$

Onde:

$C_{\text{NaOHinicial}}$  é a concentração de NaOH no topo da coluna ( $\text{mol L}^{-1}$ );

$C_{\text{NaOHfinal}}$  é a concentração de NaOH no fundo da coluna ( $\text{mol L}^{-1}$ );

$F_{\text{CO}_2}$  é a taxa molar de  $\text{CO}_2$  ( $\text{mol min}^{-1}$ );

$F_{\text{CO}_2\text{inicial}}$  é a taxa molar de  $\text{CO}_2$  no fundo da coluna ( $\text{mol min}^{-1}$ );

$F_{\text{CO}_2\text{final}}$  é a taxa molar de  $\text{CO}_2$  no topo da coluna ( $\text{mol min}^{-1}$ );

$Ql$  é a vazão volumétrica da água ( $\text{mL min}^{-1}$ ).

Dividindo a Equação 5 pela vazão volumétrica do gás  $Q_g$  ( $\text{mL min}^{-1}$ ), torna-se viável a obtenção de uma expressão matemática em termos de concentração de  $\text{CO}_2$ . As Equações 6 e 7 explicitam a variação da concentração de  $\text{CO}_2$  reagido e  $\text{CO}_2$  não consumido, respectivamente, relacionados à diferença de concentração de NaOH.

$$\Delta C_{\text{CO}_2} = \frac{Q_l}{b \cdot Q_g} \cdot (C_{\text{NaOHinicial}} - C_{\text{NaOHfinal}}) \quad (6)$$

$$C_{\text{CO}_2\text{final}} = \frac{Q_l}{b \cdot Q_g} \cdot (C_{\text{NaOHinicial}} - C_{\text{NaOHfinal}}) + C_{\text{CO}_2\text{inicial}} \quad (7)$$

Onde:

$C_{\text{CO}_2\text{inicial}}$  é a concentração de  $\text{CO}_2$  no topo da coluna ( $\text{mol L}^{-1}$ );

$C_{\text{CO}_2\text{final}}$  é a concentração de  $\text{CO}_2$  no fundo da coluna ( $\text{mol L}^{-1}$ );

$Q_g$  é a vazão volumétrica do gás na entrada da coluna ( $\text{mL min}^{-1}$ ).

O  $\Delta C_{\text{CO}_2}$  pode ser igualado à formação de produto. No entanto, o objetivo é verificar o comportamento da remoção de  $\text{CO}_2$  dentro da coluna e, por isso, expressa-se esta quantidade em termos de reagente e não de produto ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

## 4.2 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA FASE LÍQUIDA.

Segundo Levenspiel (1999), a lei de velocidade para a reação difusional entre o gás  $\text{CO}_2$  e a solução de  $\text{NaOH}$  assemelha-se a um caso de reator de leito de bolha. A Equação 8 expressa o modelo da lei de velocidade para a reação de dióxido de carbono e hidróxido de sódio:

$$-r_{\text{CO}_2} = \left( \frac{1}{k_{\text{CO}_2, \text{ga}}} + \frac{H_{\text{CO}_2}}{k_{\text{CO}_2, \text{la}} \cdot E} + \frac{H_{\text{CO}_2}}{k \cdot C_{\text{NaOH}} \cdot f_l} \right)^{-1} \cdot P_{\text{CO}_2} \quad (8)$$

Onde:

$-r_{\text{CO}_2}$  é a lei de velocidade para a absorção reativa de  $\text{CO}_2$  ( $\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$ );

$P_{\text{CO}_2}$  é a pressão parcial do soluto no sistema (Pa);

$H_{\text{CO}_2}$  é a constante de Henry para o soluto  $\text{CO}_2$  ( $\text{Pa m}^3 \text{mol}^{-1}$ );

$k_{\text{CO}_2, \text{ga}}$  é o coeficiente de transferência de massa na fase gasosa ( $\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ )

$k_{\text{CO}_2, \text{la}}$  o coeficiente de transferência de massa na fase líquida ( $\text{s}^{-1}$ )

$k$  é a constante de velocidade da reação química ( $\text{s}^{-1}$ )

$f_l$  é o espaço que o líquido ocupa no espaço livre da coluna (adimensional)

$E$  é o fator promocional ligado ao acréscimo na velocidade de absorção causado pela reação química (adimensional).

Segundo McCabe, Smith e Harriott (2005), em relação à resistência da reação química, por se tratar de um fenômeno predominantemente governado pela difusão, considera-se que o parâmetro relacionado à reação química pode ser desprezado, pois a resistência predominante é a de transferência de massa. Admitindo que o  $\text{CO}_2$  está puro, pode-



se desprezar a resistência na fase gasosa, restando apenas a resistência da fase líquida. Neste caso, a Equação 9 expressa a lei de velocidade para o dióxido de carbono considerando apenas a resistência da fase líquida.

$$-r_{\text{CO}_2}'' = \left( \frac{H_{\text{CO}_2}}{k_{\text{CO}_2,1}a \cdot E} \right)^{-1} \cdot P_{\text{CO}_2} \quad (9)$$

O Parâmetro E para o caso da absorção de CO<sub>2</sub> em solução de NaOH pode ser expresso conforme a Equação 10 (FULLY; D'HENI; LINARES, 2014).

$$E = 1 + \frac{H_{\text{CO}_2} \cdot D_{\text{NaOH}} \cdot C_{\text{NaOH}}}{b \cdot D_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{CO}_2}} \quad (10)$$

Onde:

$D_{\text{NaOH}}$  é o coeficiente de difusão do NaOH na água ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ );

$D_{\text{CO}_2}$  é o coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> na água ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ).

Aplicando à expressão do fator E na Equação 9, obtém-se a Equação 11 para a lei de velocidade que retrata a reação entre o CO<sub>2</sub> e o NaOH, que ocorre na absorção reativa.

$$-r_{\text{CO}_2}'' = k_{\text{CO}_2,1}a \cdot \frac{P_{\text{CO}_2}}{H_{\text{CO}_2}} \cdot \left( 1 + \frac{H_{\text{CO}_2} \cdot D_{\text{NaOH}} \cdot C_{\text{NaOH}}}{b \cdot D_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{CO}_2}} \right) \quad (11)$$

Utilizando-se a Equação 3 e integrando os termos do lado direito da equação, que são responsáveis pela relação de consumo do solvente com a reação química, obtém-se a expressão para a diferença da altura da coluna de absorção, apresentada pela Equação (12).

$$\int_{z_0}^z dz = - \frac{Q1 \cdot H_{\text{CO}_2} \cdot D_{\text{CO}_2}}{k_{\text{CO}_2,1}a \cdot S} \int_{C_{\text{NaOH},1}}^{C_{\text{NaOH},2}} \frac{dC_B}{(b \cdot D_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{CO}_2} + H_{\text{CO}_2} \cdot D_{\text{NaOH}} \cdot C_{\text{NaOH}})} \quad (12)$$

Integrando-se a Equação 12 e rearranjando os termos, obtém-se a Equação 13, que calcula a resistência de transferência de massa para a fase líquida.

$$k_{\text{CO}_2,1}a = \frac{Q1 \cdot D_{\text{CO}_2}}{b \cdot z \cdot S \cdot D_{\text{NaOH}}} \ln \left( \frac{b \cdot D_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{CO}_2} + H_{\text{CO}_2} \cdot D_{\text{NaOH}} \cdot C_{\text{NaOH},1}}{b \cdot D_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{CO}_2} + H_{\text{CO}_2} \cdot D_{\text{NaOH}} \cdot C_{\text{NaOH},2}} \right) \quad (13)$$

#### 4.3 CÁLCULO DOS PERFIS DE CONCENTRAÇÃO NA COLUNA.

De acordo com Levenspiel (1999), além da variação em função do tempo, as concentrações de reagentes e produtos variam também em função do eixo axial. Tratando-se das operações em colunas, é imprescindível conhecer a variação de concentração em função da cinética e da posição dentro do reator.

Rearranjando a Equação 13 é possível calcular a concentração de hidróxido de sódio, que varia em função da posição na coluna utilizando a Equação 14.

$$C_{\text{NaOH},Z} = \frac{b \cdot D_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{CO}_2} + H_{\text{CO}_2} \cdot D_{\text{NaOH}} \cdot C_{\text{NaOH},1}}{H_{\text{CO}_2} \cdot D_{\text{NaOH}} \cdot \exp\left(\frac{Z \cdot b \cdot S \cdot k_{\text{CO}_2,1} \cdot D_{\text{NaOH}}}{Q_1 \cdot D_{\text{CO}_2}}\right)} - \frac{b \cdot D_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{CO}_2}}{H_{\text{CO}_2} \cdot D_{\text{NaOH}}} \quad (14)$$

Para calcular o  $\text{CO}_2$  reagido variando conforme a posição na coluna, é possível rearranjar a Equação 6 e utilizar a Equação 15, que expressa os termos de  $\text{CO}_2$  em função da altura:

$$\Delta C_{\text{CO}_2,Z} = \frac{Q_1}{b} \cdot (C_{\text{NaOH},Z_0} - C_{\text{NaOH},Z}) \quad (15)$$

Onde:

$\Delta C_{\text{CO}_2,Z}$  é a concentração de  $\text{CO}_2$  reagido em função da posição na coluna ( $\text{mol L}^{-1}$ );

$C_{\text{NaOH},Z_0}$  é a concentração de NaOH na posição inicial ( $\text{mol L}^{-1}$ );

$C_{\text{NaOH},Z}$  é a concentração de NaOH em função da posição na coluna ( $\text{mol L}^{-1}$ ).

## 5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

### 5.1 CONSTRUÇÃO DO MÓDULO DIDÁTICO

A construção do módulo foi realizada no laboratório de Engenharia Bioquímica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) *Campus* Francisco Beltrão. Na Tabela 1 encontram-se os materiais utilizados para construir a estrutura da bancada didática.

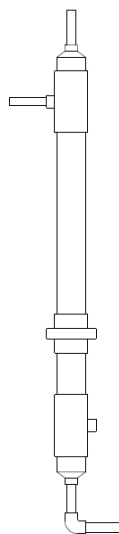
Tabela 1 - Itens gerais utilizados para a construção do módulo didático.

MATERIAIS UTILIZADOS	QUANTIDADE
Bucha de redução longa PVC 60×25mm TIGRE	2
Cap de 25 mm TIGRE	3
Cilindro de acrílico 60mm× 520mm	1
Cola de PVC	1
Joelho de 90° 25mm TIGRE	1
Tê de redução de PVC 60×25mm TIGRE	2
Torneira de plástico TIGRE	1
Tubulação de PVC 25mm× 100mm TIGRE	5
Tubulação de PVC 60 mm× 100mm TIGRE	1
União de PVC 60mm TIGRE	1

Fonte: Aatoria Própria (2019).

O processo de construção foi dividido em três etapas: a) fase superior, referente ao topo da coluna, na qual há a entrada do líquido e a saída do gás; b) fase central, referindo-se ao centro da coluna, recheado com os anéis de cerâmica e c) fase inferior, que compõe a entrada do gás e a saída do líquido. As tubulações e demais peças são de PVC soldável para realizar as conexões e vedá-las corretamente. A Figura 5 apresenta a projeção final da coluna de absorção, com as fases superior, central e inferior conectadas.

Figura 5 - Projeção 2D da coluna de absorção.



Fonte: Aatoria Própria (2019).

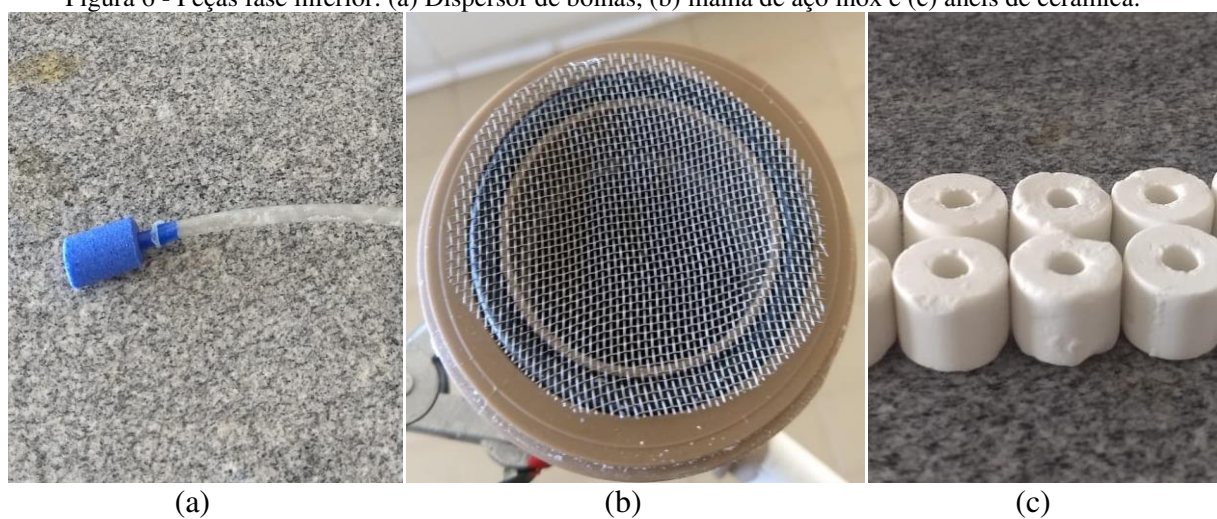
Em relação à fase superior, utilizou-se da cola de PVC para soldar um tê de redução de 50x25 mm e conectá-lo a uma bucha de redução de 50x25 mm. Estas junções de bucha e tê conectam os tubos de 25x25mm, responsáveis pela saída do gás e entrada do líquido.

Neste sentido, a fase central conectou-se à fase superior, com o cilindro de acrílico de 60x520 mm que foi conectado à junção na parte superior, os anéis de cerâmica foram inseridos dentro do cilindro e a malha de aço inox foi cortada no diâmetro similar ao cilindro e colada na junção da união, para impedir a passagem do recheio e manter o leito fixo.

Na parte inferior da coluna, colou-se a tubulação de PVC de 60 mm na junção de tê com a bucha de redução para conectar a fase central com a fase inferior. O dispersor de bolha, uma pedra porosa de aquário, foi inserido na entrada do gás para realizar uma melhor distribuição das bolhas e na saída do líquido foi inserido uma válvula para realizara coleta de alíquotas e controlar a vazão de saída do líquido.

Na Figura 6 são apresentados os materiais auxiliares para a composição da coluna como o dispersor de bolhas, a malha de aço inox e o anel de cerâmica utilizado como recheio.

Figura 6 - Peças fase inferior: (a) Dispersor de bolhas, (b) malha de aço inox e (c) anéis de cerâmica.



Fonte: Autoria Própria (2019).

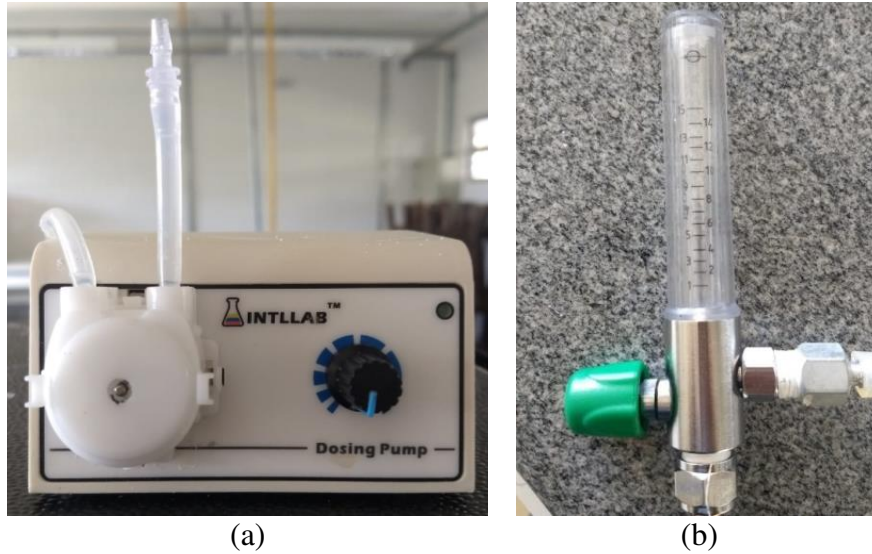
Os caps de 25 mm foram utilizados para vedar as entradas e saídas do gás e líquido, possibilitando criar aberturas de tamanhos específicos, para impedir vazamentos do gás na entrada e fixar a tubulação de alimentação do solvente.

Um tanque reservatório com capacidade máxima de 20,0 L foi disposto ao lado da bancada didática para transportar o solvente à coluna, por meio de uma bomba peristáltica INTLLAB DP - 385. De modo similar, o cilindro de CO<sub>2</sub> puro, cedido pela empresa Schaf

Bier, acompanha a estrutura, com o fluxômetro 0-15 LPM PROTEC para controle da vazão, segundo a metodologia de Fully, D'heni, Linares (2014).

A bomba peristáltica disposta na Figura 7 foi utilizada para transportar o líquido do reservatório até a coluna, e o fluxômetro foi utilizado para fixar a vazão do gás durante os ensaios de absorção.

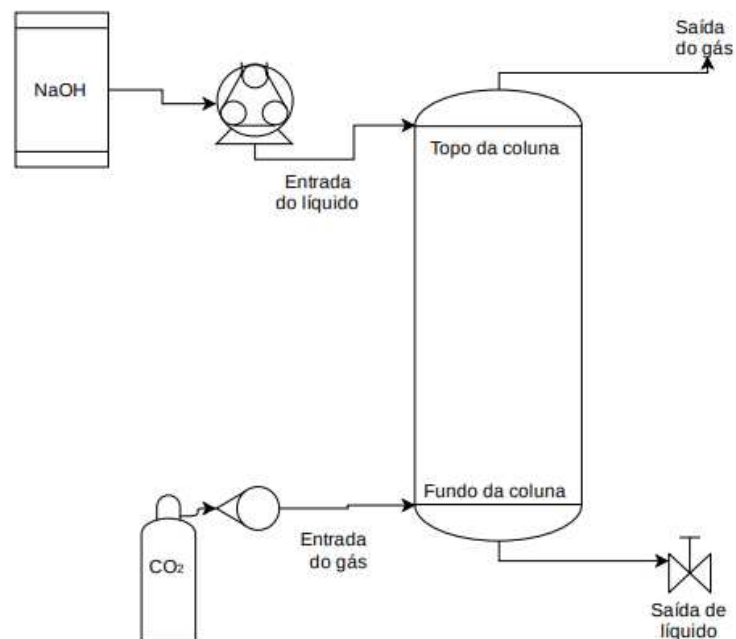
Figura 7 - Controladores de vazão (a) Bomba peristáltica INTLLAB DP - 385 e (b) fluxômetro 0 -15 LPM PROTEC.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Com o auxílio da Figura 8 visualiza-se a projeção para a construção da bancada didática.

Figura 8 - Esquema de funcionamento do módulo didático.

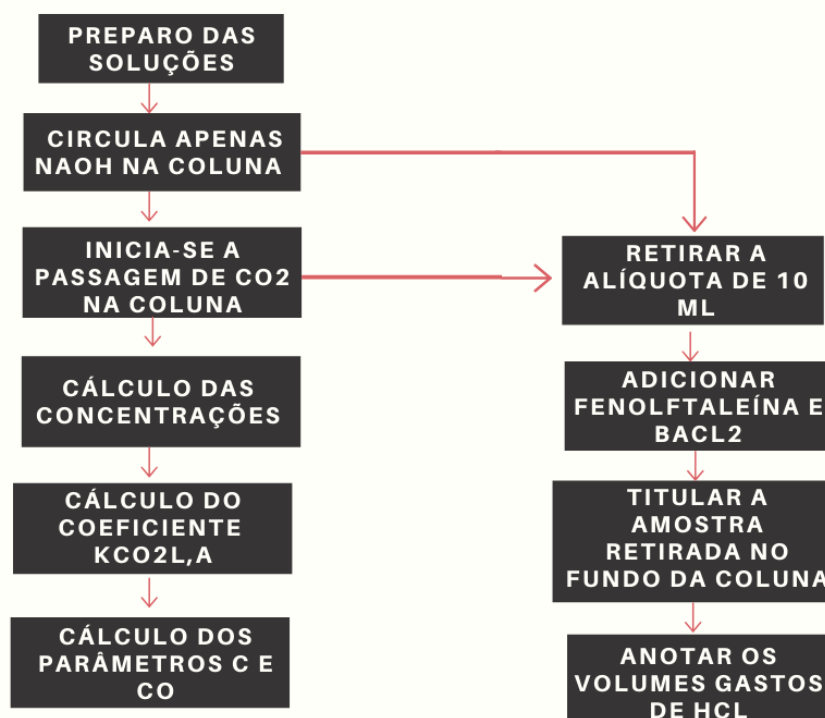


Fonte: Autoria Própria (2019).

## 5.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO NO MÓDULO DIDÁTICO

Na Figura 9 observa-se o fluxograma do experimento de absorção reativa na banca didática, com NaOH na fase líquida e CO<sub>2</sub>.

Figura 9 - Fluxograma do processo de absorção reativa no módulo didático.



Fonte: Autoria Própria (2019).

### 5.2.1 Preparação das Soluções

Os reagentes hidróxido de sódio e ácido clorídrico, foram cedidos pela Coordenação de Estação Experimental (COEXP) da UTFPR *Campus* Francisco Beltrão. A solução de solvente foi preparada em um balão volumétrico de 2,0 L diluindo-se 80,0 g de NaOH - NEON para obter a concentração de 1,0 mol L<sup>-1</sup>, este procedimento foi repetido quatro vezes para obter 8,0 L de solução de NaOH, que forma despejados no reservatório de solvente. Para a solução titulante, retirou-se uma alíquota de 85,0 mL de solução concentrada de HCl - NEON, que foi diluída em um balão volumétrico de 2,0 L para atingir a concentração de 1,0 mol L<sup>-1</sup>.

### 5.2.2 Experimento de Absorção

Iniciando-se o sistema, o solvente circulou através da coluna antes do gás com o propósito de medir a concentração inicial do sistema no tempo zero, retirando-se uma alíquota de 10,0 mL para ser levada à titulação. Após coleta, deu-se início à cronometragem e em simultâneo, a circulação de CO<sub>2</sub> foi iniciada. O fluxo do gás foi fixado em 1,0 L min<sup>-1</sup>. Interromperam-se as coletas da solução de NaOH que percorreu a coluna no momento em que o volume gasto de HCl na titulação começou a se repetir, indicando o fim da reação entre NaOH e CO<sub>2</sub>. Realizou-se os experimentos à pressão atmosférica e temperatura igual à 25 °C. Este procedimento foi realizado para as vazões volumétricas de 30,13, 44,90 e 60,72 mL min<sup>-1</sup>.

### 5.2.3 Titulação Direta

A titulação volumétrica do residual de NaOH foi realizada com uma bureta de 50,0 mL, preenchida com a solução de HCl a 1,0 mol L<sup>-1</sup>. A alíquota de 10,0 mL foi colocada em um erlenmeyer de 125,0 mL que continha fenolftaleína 0,1% como indicador e 0,5 g de cloreto de bário, BaCl<sub>2</sub> – NEON, com o propósito de evitar a interferência dos carbonatos, precipitando-os em carbonato de bário (BaCO<sub>3</sub>) conforme, Equação 16.



Os valores de volume gasto do ácido clorídrico foram anotados até que a reação terminasse, ou seja, a reação atingiu o limite de troca mássica. Este processo foi repetido para as três vazões.

## 5.3 CÁLCULO DAS CONCENTRAÇÕES

### 5.3.1 Cálculo da Concentração de C<sub>NaOH</sub> Residual.

O cálculo da concentração de hidróxido de sódio não reagido em função do tempo foi realizado utilizando-se os volumes de ácido clorídrico. Este cálculo está expresso na Equação 17.

$$C_{\text{NaOHresidual}} = \frac{V_{\text{NaOH}}}{C_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl}}} \quad (17)$$

Onde:

$C_{\text{NaOHresidual}}$  é a concentração de NaOH presente na amostra coletada ( $\text{mol L}^{-1}$ ).

### 5.3.2 Cálculo da Concentração de $\text{CO}_2$ Não Reagido.

O cálculo da concentração dióxido de carbono livre dentro da coluna, expresso na Equação 7, foi realizado para as três vazões.

$$C_{\text{CO}_2\text{final}} = \frac{Q_1}{b} \cdot (C_{\text{NaOHinicial}} - C_{\text{NaOHfinal}}) + C_{\text{CO}_2\text{inicial}} \quad (7)$$

### 5.3.3 Cálculo do Perfil de Concentração em Função da Posição na Coluna de Absorção.

A Tabela 2 apresenta os dados adotados para os cálculos de  $\text{CO}_2$  reagido,  $\text{CO}_2$  livre, o consumo de NaOH em função da posição da coluna e o coeficiente de troca mássica na fase líquida  $k_{\text{CO}_2, \text{la}}$ .

Tabela 2 - Parâmetros utilizados para a resolução dos cálculos de  $\text{CO}_2$  reagido,  $\text{CO}_2$  livre,  $k_{\text{CO}_2, \text{a}}$  e NaOH, z.

b	Z (m)	S ( $\text{m}^2$ )	$P_{\text{CO}_2}$ (atm)	$D_{\text{CO}_2}$ ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )	$D_{\text{NaOH}}$ ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )	H ( $\text{atm L mol}^{-1}$ )	$\rho$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )
2	0,52	$2,83 \cdot 10^{-3}$	1,0	$1,80 \cdot 10^{-9}$	$3,06 \cdot 10^{-9}$	29,99	999,87

Fonte: FULLY; D'HENI; LINARES (2014).

O cálculo da concentração de  $\text{CO}_2$  em função da posição dentro da coluna de absorção é realizado conforme a metodologia proposta por Fully, D'heni e Linares (2014). Utilizou-se 15 nós que indicaram posições diferentes ao longo da coluna, onde há a variação de hidróxido de sódio e, conseqüentemente, de dióxido de carbono. As diferentes posições na coluna foram calculadas utilizando a Equação 18.

$$z^* = \frac{\text{Nó}}{15} \cdot Z \quad (18)$$

Onde:

z é altura da coluna (m);



$z^*$  é a posição da coluna para cada nó (m).

A Equação 14 foi utilizada para obter a concentração de hidróxido de sódio presente nos 15 nós.

$$C_{\text{NaOH},Z} = \frac{b \cdot D_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{CO}_2} + \text{HCO}_2 \cdot D_{\text{NaOH}} \cdot C_{\text{NaOH},\text{inicial}}}{\text{HCO}_2 \cdot D_{\text{NaOH}} \cdot e^{\left( \frac{Z \cdot b \cdot S \cdot k_{\text{CO}_2,1a} \cdot D_{\text{NaOH}}}{Q1 \cdot D_{\text{CO}_2}} \right)}} - \frac{b \cdot D_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{CO}_2}}{\text{HCO}_2 \cdot D_{\text{NaOH}}} \quad (14)$$

Consequentemente, realizou-se o cálculo da concentração de dióxido de carbono utilizando a Equação 15.

$$\Delta C_{\text{CO}_2,Z} = \frac{Q1}{b} \cdot (C_{\text{NaOH},Z0} - C_{\text{NaOH},Z}) \quad (15)$$

#### 5.3.4 Cálculo da porcentagem de Remoção de CO<sub>2</sub>.

A porcentagem de remoção de CO<sub>2</sub> no ensaio de absorção reativa foi calculada por meio da Equação 19.

$$\% \text{ de Remoção de CO}_2 = \left( \frac{\text{CO}_{2,i} - \text{CO}_{2,t}}{\text{CO}_{2,i}} \right) \times 100 \quad (19)$$

Onde:

CO<sub>2,i</sub> é a concentração de CO<sub>2</sub> livre (não reagido) no tempo 0 (mol L<sup>-1</sup>);

CO<sub>2,t</sub> é a concentração de CO<sub>2</sub> livre no tempo t (mol L<sup>-1</sup>).

#### 5.4 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA FASE LÍQUIDA

O cálculo do coeficiente de transferência de massa na fase líquida foi realizado utilizando a Equação 13, sendo repetido para todas as vazões.

$$k_{\text{CO}_2,1a} = \frac{Q1 D_{\text{CO}_2}}{b z S D_{\text{NaOH}}} \ln \left( \frac{b D_{\text{CO}_2} P_{\text{CO}_2} + \text{HCO}_2 D_{\text{NaOH}} C_{\text{NaOH},1}}{b D_{\text{CO}_2} P_{\text{CO}_2} + \text{HCO}_2 D_{\text{NaOH}} C_{\text{NaOH},2}} \right) \quad (13)$$

## 5.5 CÁLCULO DOS PARÂMETROS $c_0$ E C.

Após realizar os testes com diferentes vazões, relacionou-se a resistência de transferência de massa na fase líquida com a velocidade mássica ( $G_L$ ) de cada vazão volumétrica da fase líquida utilizada. A Equação 20 demonstra como foi realizado o cálculo da velocidade do gás.

$$G_L = \frac{ms}{S} \quad (20)$$

Onde:

$G_L$  é a velocidade mássica ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );

$ms$  é a vazão mássica do líquido ( $\text{kg s}^{-1}$ );

$S$  é a área da seção transversal ( $\text{m}^2$ )

De acordo com McCabe, Smith e Harriott (2005) a relação empírica linearizada para os cálculos dos parâmetros  $c_0$  e C, proporcionalmente ligados à resistência de transferência de massa na fase líquida, e seu comportamento perante à operação difusional nas diferentes vazões, é evidenciada na Equação 21.

$$\ln k_{\text{CO}_2} = \ln c_0 + C \cdot \ln G_L \quad (21)$$

Onde:

$c_0$  é um parâmetro empírico proporcional a velocidade mássica (adimensional).

C é um parâmetro empírico que indica a tendência exponencial da velocidade mássica (adimensional);

## 5.6 VALIDAÇÃO DO MÓDULO DIDÁTICO COMO FERRAMENTA EDUCACIONAL.

A validação de ferramentas educacionais proposta por Rodrigues (2014) considera três aspectos: (a) pedagógicos, (b) técnicos e (c) opinião dos alunos. Por se tratar da validação

de uma ferramenta educacional, os aspectos pedagógicos possuem mais perguntas e, em seguida, os aspectos técnicos e opinião dos alunos, de modo que seja possível avaliar fatores importantes como a interdisciplinaridade, relevância educacional e aplicabilidade em outras disciplinas.

O conjunto de avaliadores foi composto por quatro docentes do Departamento Acadêmico das Engenharias (DAENG) da UTFPR *Campus* Francisco Beltrão, que avaliaram o módulo didático nos quesitos pedagógicos e técnicos. Os avaliadores observaram o funcionamento da coluna de absorção e a interação do discente com o módulo didático, e por fim, responderam às perguntas do instrumento de avaliação conforme metodologia proposta. As perguntas são apresentadas nas Tabelas 4 e 5.

A validação ocorreu por forma de pontuação, e para isto, cada item foi avaliado por três respostas objetivas: sim, em partes e não. Somou-se dois pontos a cada resposta “sim”, um ponto para as respostas “em partes” e zero pontos para as respostas “não”. O somatório total foi dividido pelo número total de avaliadores para se obter a média das respostas (JUNIOR, 2017; RODRIGUES, 2014).

Neste contexto, os três parâmetros são classificados entre ÓTIMO, BOM, REGULAR e RUIM, sendo aceitáveis apenas as classificações de ótimo e bom (RODRIGUES, 2014). A Tabela 3 apresenta a pontuação média dos quesitos avaliados e suas respectivas classificações.

Tabela 3 - Classificação do módulo didático com base nas pontuações.

Avaliação Pedagógica	Avaliação Técnica	Opinião dos Alunos	Conceito do Módulo Didático
≥ 17 pontos	≥ 9 pontos	≥ 8 pontos	ÓTIMO
12,5 a 16,5 pontos	5,5 a 8,5 pontos	5,5 a 7,5 pontos	BOM
6 a 12 pontos	3 a 5 pontos	3 a 5 pontos	REGULAR
0 a 5,5 pontos	0 a 2,5 pontos	0 a 2,5 pontos	RUIM

Fonte: Adaptado de RODRIGUES (2014, p. 64).

A Tabela 4 contém os 16 aspectos pedagógicos que compuseram o instrumento de avaliação da bancada didática.

Tabela 4 - Elementos que compõem o aspecto pedagógico do instrumento de avaliação do módulo didático.

ASPECTOS PEDAGÓGICOS	SIM	EM PARTES	NÃO
O módulo didático apresenta objetivos específicos ou proposta educacional.			
O módulo trabalha aspectos necessários para atender o objetivo proposto			
As atividades são abordadas de forma prática e objetiva, encaixando-se no período em que se encontram os alunos.			
Na bancada didática são apresentadas situações que remetem a vida cotidiana ou contexto real, semelhante à realidade industrial ou laboratorial.			
As etapas ou situações-problema apresentam mais de uma possibilidade de solução.			
O módulo aborda temas transversais.			

ASPECTOS PEDAGÓGICOS	SIM	EM PARTES	NÃO
<p>No módulo é possível trabalhar a interdisciplinaridade.</p> <p>Há possibilidade de interação entre os alunos, como: troca de experiência ou trabalho cooperativo.</p> <p>Desperta o interesse do aluno pelo conteúdo trabalhado, de forma inteligente e envolvente.</p> <p>É desafiador, pois motiva o aluno a resolver as situações propostas.</p> <p>Estimula a criatividade dos participantes durante as atividades.</p> <p>Possibilita ao aluno desenvolver estratégias de ação que permite a solução das situações problemas com facilidade.</p> <p>Ao realizar a prática o aluno nem percebe que está estudando.</p> <p>O módulo valoriza o desenvolvimento pessoal do aluno ou do grupo.</p> <p>A bancada didática possibilita a prática dos conteúdos abordados pelo professor em sala de aula</p> <p>As atividades propostas durante a prática são fidedignas aos conteúdos curriculares.</p>			

Fonte: Adaptado de RODRIGUES (2014, p. 66).

A Tabela 5 apresenta os 7 aspectos técnicos que compuseram o instrumento de avaliação da bancada didática.

Tabela 5 - Elementos que compõem o aspecto técnico do instrumento de avaliação do módulo didático.

ASPECTOS TÉCNICOS	SIM	EM PARTES	NÃO
<p>O roteiro da prática traz informações de forma simples, objetiva e compreensível.</p> <p>As instruções da prática e do manual estão em português e em consonância com as normas desta língua.</p> <p>A banca didática é compatível com propósito da disciplina.</p> <p>O módulo didático é suficiente para realização das tarefas propostas no roteiro.</p> <p>O módulo apresenta sucesso de execução, como por exemplo: é evidenciado o consumo do reagente e é possível quantificar quanto remove-se do soluto.</p> <p>Ao ler o roteiro da prática, o aluno consegue compreender o que está sendo proposto sem uma intervenção significativa do professor.</p> <p>O nível de complexidade apresentado está adequado a um período específico na graduação.</p>			

Fonte: Adaptado de RODRIGUES (2014, p. 65).

A Tabela 6 contém os 7 aspectos trabalhados na visão dos 12 alunos que compuseram o instrumento de avaliação da bancada didática.

Tabela 6 - Elementos que compõem a opinião dos alunos do instrumento de avaliação do módulo didático.

OPINIÃO DOS ALUNOS	SIM	EM PARTES	NÃO
<p>Entendi melhor o assunto que foi ensinado na sala de aula.</p> <p>Enquanto eu realizava a prática o tempo passou que nem percebi.</p> <p>Vou lembrar do que aprendi na prática quando estiver fazendo atividades em sala de aula que tenham o mesmo assunto.</p> <p>Pude ajudar meus colegas durante a prática</p> <p>Achei o módulo interessante, pois teve desafios durante a prática.</p> <p>Consegui conectar os assuntos que já aprendi durante a graduação com o assunto da prática.</p> <p>Consegui visualizar outras aplicações no módulo didático.</p>			

Fonte: Adaptado de (RODRIGUES, 2014b, p. 67)

O roteiro da prática de absorção reativa aplicado na disciplina de Laboratório para Engenharia II está disponível no APÊNDICE A.

## 5.7 VALIDAÇÃO DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

### 5.7.1 Teste de Compreensão

O primeiro teste de compreensão foi aplicado antes da prática se iniciar, baseando-se apenas no conhecimento pré-existente do educando. Após a aplicação do teste inicial, deu-se início à introdução da prática e esperou-se que os 12 alunos finalizassem o experimento para aplicar o teste pós-prática, localizado no APÊNDICE B.

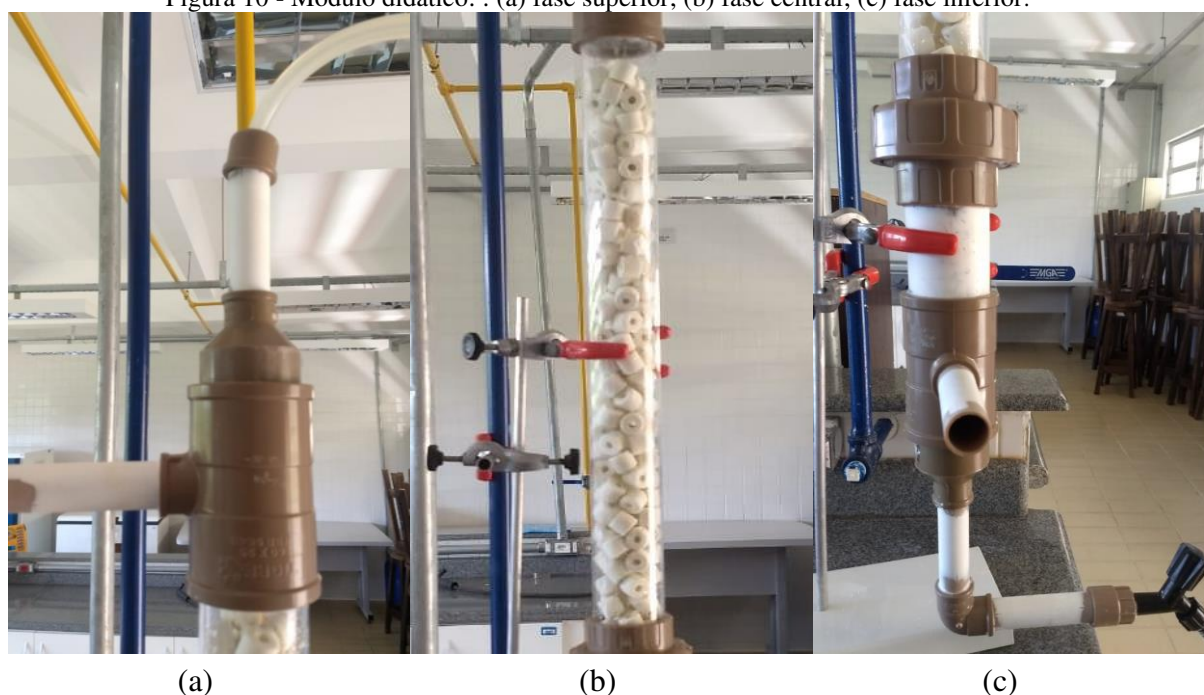
Quanto à validação da aprendizagem significativa, as respostas da pré-prática e da pós-prática foram comparadas uma a uma, utilizando-se um gráfico de barras para visualizar o comportamento da aprendizagem durante o teste de compreensão.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 CONSTRUÇÃO DO MÓDULO DIDÁTICO

Apresenta-se na Figura 10 a bancada didática já construída, seccionada em 3 fases: superior, central e inferior.

Figura 10 - Módulo didático: : (a) fase superior; (b) fase central; (c) fase inferior.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Nas partes referentes à entrada e saída do gás, bem como na junção fase central, realizou-se um teste para verificar se havia vazamento de gás. Utilizou-se uma esponja molhada com detergente para passar nas junções e ligou-se o fluxo de gás, o objetivo era analisar se haveria crescimento das bolhas de sabão, indicador de vazamento de gás. Entretanto, não houve quaisquer alterações onde foi passado o detergente com a esponja confirmando que não há vazamento de gás na coluna de absorção.

Ainda neste contexto, na fase inferior é possível observar a válvula de controle de vazão conectada para controlar o fluxo de solvente já reagido e, assim, possibilitar que a coluna opere em regime permanente.

A Figura 11 apresenta o reservatório de solvente NaOH e o cilindro de gás CO<sub>2</sub> e os anéis de cerâmica utilizados como recheio na fase central.

Figura 11 - Estrutura geral do módulo didático.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Observa-se na Figura 11 a bancada didática já montada e com as conexões devidamente realizadas. Salienta-se os locais das conexões realizadas no reservatório de solvente e no cilindro de gás, pois estão localizadas na fase superior e inferior, respectivamente. Isso porque espera-se operar em contracorrente, para obter maior troca mássica e maximizar a transferência de massa.

## 6.2 ANÁLISE DE CUSTO

Os valores referentes ao custo de aquisição de materiais para a construção e composição da bancada didática estão expressos na Tabela 7.

No ANEXO A está apresentado um orçamento realizado pela coordenação do curso de Engenharia Química para a aquisição de uma bancada didática multipropósito para ensino de absorção e seu custo de aquisição.

Tabela 7 - Custo total da construção e estrutura geral do módulo didático de absorção.

Item	Quantidade	Custo Unitário	Custo Total
Adesivo de PVC	1	R\$ 7,00	R\$ 7,00
Anéis cerâmicos de aquário	1	R\$ 73,00	R\$ 73,00
Bomba peristáltica INTLLAB DP - 835	1	R\$ 96,56	R\$ 96,56
Buchas de redução longas PVC 60x25mm	2	R\$ 7,00	R\$ 14,00
Cap de 25 mm	3	R\$ 1,50	R\$ 4,50
Cilindro de acrílico de 60 mm x 520mm	1	R\$ 100	R\$ 100,00
Joelho 90° de PVC de 25 mm	1	R\$ 1,25	R\$ 1,25
Peneira de aço inoxidável	1	R\$ 14,50	R\$ 14,50
Recarga do cilindro de CO <sub>2</sub>	5	R\$ 12,00	R\$ 60,00
Tê de redução de PVC 50x25mm	2	R\$ 12,20	R\$ 24,40
Tubulação de PVC 25mm x 1m	1	R\$ 8,95	R\$ 8,95
União de PVC de 60 mm	1	R\$ 47,41	R\$ 47,41
ORÇAMENTO FINAL			R\$ 451,57

Fonte: Autoria Própria (2019)

O custo total da bancada é de R\$ 103.445,69, porém por se tratar de uma bancada com 4 funções, optou-se por dividir o valor por 4, afim de aproximar-se da comparação correlação apenas ao correspondente à coluna de absorção. Estimando que o valor seja proporcional à cada função, a coluna de absorção tem como custo de aquisição R\$ 25.861,42 enquanto a coluna construída neste trabalho apresenta um custo de aquisição de R\$ 451,57.

Entretanto, a bancada vendida comercialmente, neste caso, dispõe de controladores e consequentemente haverá um custo maior para sua aquisição, visto que são equipamentos mais custosos. Neste sentido, o módulo didático construído pode ser ainda incrementado com controladores de arduino, uma alternativa mais rentável para o desenvolvimento de módulos educacionais dentro das universidades. Em suma, a construção do módulo didático deste trabalho possibilitou uma economia de R\$ 25.409,85 para a universidade ao se optar por construí-lo em suas instalações.

Para fins comparativos, realizou-se um orçamento para verificar o valor do cilindro e do rotâmetro para controle da vazão do gás. Em média, um cilindro de 6 kg custa cerca de R\$ 800,00 para ser adquirido e preço do rotâmetro custa R\$ 200,00. Acrescentando-se este valor ao já gasto anteriormente, estima-se que a construção do módulo didático pode viabilizar uma economia de R\$ 24.409,85.

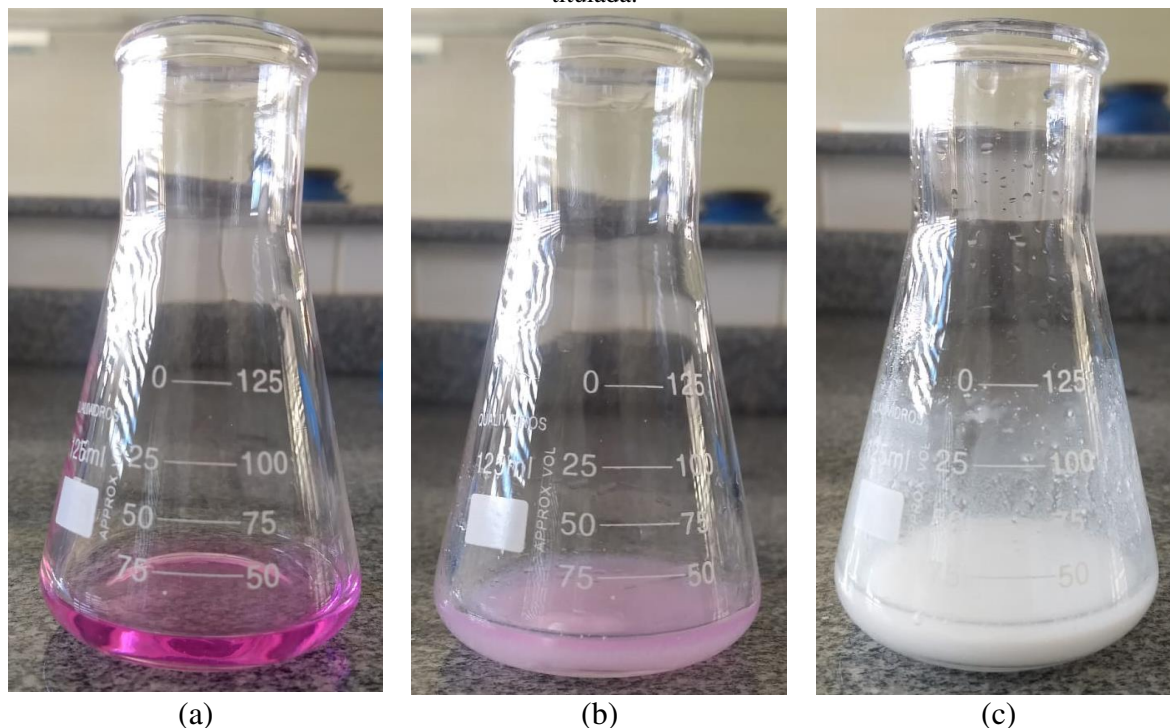
## 6.3 EXPERIMENTO DE ABSORÇÃO REATIVA

### 6.3.1 Titulação Direta

A Figura 12 apresenta o procedimento realizado durante a titulação direta e repetido para todas as vazões durante o experimento de absorção.



Figura 12 - Modelo de titulação aplicada nas vazões de 30,13 mL min<sup>-1</sup>, 44,90 mL min<sup>-1</sup> e 60,72 mL min<sup>-1</sup>: (a) alíquota de 10,0 mL da solução com fenolftaleína; (b) BaCl<sub>2</sub> adicionado à solução com fenolftaleína; (c) solução titulada.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Observa-se na Figura 12 (a) a coloração esperada de uma solução básica com o indicador fenolftaleína. Em (b) analisa-se a mudança de coloração ao adicionar BaCl<sub>2</sub> e em (c) a coloração branca é resultado de BaCl<sub>2</sub> diluído, indicando que todo o NaOH residual havia sido neutralizado.

Tratando-se de um método de análise visual, utilizou-se a Figura 12 (c) como padrão de comparação nas titulações seguintes para que todas as alíquotas analisadas mantivessem o mesmo padrão de coloração final da solução titulada, minimizando o erro intrínseco à técnica de titulação direta (ASSUMPCÃO et al., 2010; HOTTES; CLAIN, 2010; WANG et al., 2011).

A Tabela 8 apresenta os dados de tempo de coleta e volume gasto de HCl na titulação realizada para todas as vazões.

Com base na Tabela 8, observa-se que para consumir todo o NaOH ou atingir o limite de reação química foram necessários 34 minutos para a vazão de 30,13 mL min<sup>-1</sup>, para a vazão de 44,90 mL min<sup>-1</sup> precisou-se de 45 minutos e a vazão de 60,72 mL min<sup>-1</sup> requereu 82 minutos para atingir o limite reacional.

Observou-se na Tabela 8 que os dados oscilam para mais ou para menos em torno do valor do limite da reação, isso ocorre devido à uma das características do método de titulação

direta. Isso porque é um método totalmente dependente da coloração da solução titulada e, por isso, podem ocorrer erros ao visualizar as soluções e não identificar corretamente o ponto de viragem. Salienta-se também que a solução de  $\text{BaCl}_2$  em água apresenta uma coloração bem forte que pode atrapalhar a visualização da coloração rosada do indicador fenolftaleína. (ASSUMPÇÃO et al., 2010; CAVACO; GARCIA, 2007; FULLY; D’HENI; LINARES, 2014).

Tabela 8 - Dados de tempo(min) ,volume gasto de HCl (mL) e concentração de NaOH residual ( $\text{mol L}^{-1}$ ) no experimento de absorção para as vazões de  $30,13 \text{ mL min}^{-1}$ ,  $44,90 \text{ mL min}^{-1}$  e  $60,72 \text{ mL min}^{-1}$ .

QI $30,13 \text{ mL min}^{-1}$			QI $44,90 \text{ mL min}^{-1}$			QI $60,72 \text{ mL min}^{-1}$		
t (min)	$V_{\text{HCl}}$ (mL)	$C_{\text{NaOH}}$ ( $\text{mol L}^{-1}$ )	t (min)	$V_{\text{HCl}}$ (mL)	$C_{\text{NaOH}}$ ( $\text{mol L}^{-1}$ )	t (min)	$V_{\text{HCl}}$ (mL)	$C_{\text{NaOH}}$ ( $\text{mol L}^{-1}$ )
0	8,5	0,85	0	8,7	0,87			0,89
2	6,1	0,61	2	4,2	0,42	0	8,9	0,43
4	3,5	0,35	4	3,7	0,37	2	4,3	0,53
6	2,6	0,26	6	2,8	0,28	4	5,3	0,49
8	1,7	0,17	8	2,7	0,27	6	4,9	0,44
10	2	0,2	10	2,6	0,26	8	4,4	0,46
14	2	0,2	14	2,6	0,26	10	4,6	0,43
18	1,9	0,19	18	2,4	0,24	14	4,3	0,45
22	2,1	0,21	22	2,1	0,21	18	4,5	0,45
26	1,9	0,19	26	1,9	0,19	22	4,5	0,43
30	1,7	0,17	30	2,1	0,21	26	4,3	0,4
34	1,6	0,16	35	2	0,2	30	4	0,39
38	1,6	0,16	40	1,7	0,17	34	3,9	0,33
43	1,1	0,11	45	1,6	0,16	40	3,3	0,35
48	1,6	0,16	50	1,5	0,15	46	3,5	0,3
52	1,6	0,16	55	2,2	0,22	52	3	0,26
-	-	-	60	1,6	0,16	62	2,6	0,22
-	-	-	-	-	-	72	2,2	0,16
-	-	-	-	-	-	82	1,6	0,17
-	-	-	-	-	-	92	1,7	0,16
-	-	-	-	-	-	112	1,6	0,17

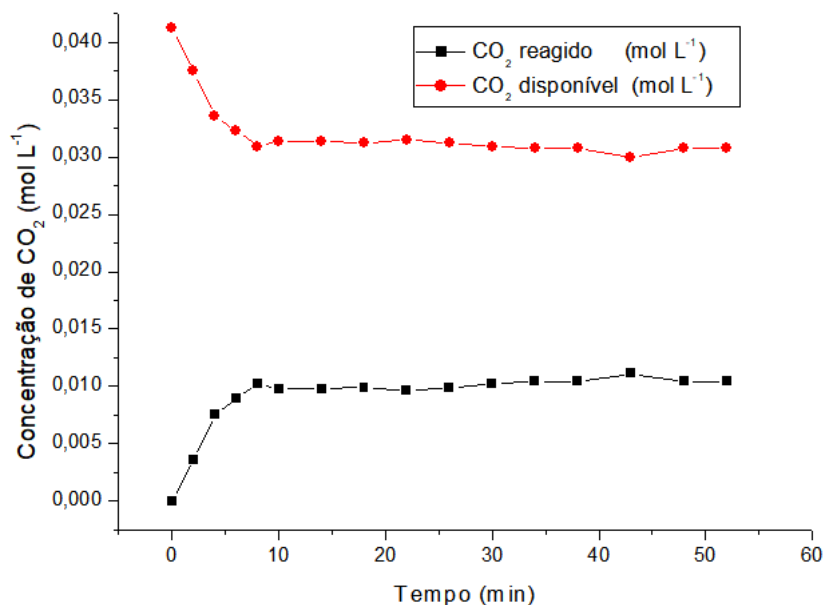
Fonte: Autoria Própria (2019)

### 6.3.2 Variação da Concentração de $\text{CO}_2$ .

A Figura 13 apresenta a variação da concentração de  $\text{CO}_2$  reagido e disponível no sistema e seu comportamento conforme o passar do tempo na vazão de  $30,13 \text{ mL min}^{-1}$ . Analisando-se a Figura 13, notou-se que a curva que representa a variação da concentração de  $\text{CO}_2$  reagido, demonstrando uma crescente concentração de  $\text{CO}_2$  reagido entre o tempo de 0 até 8 minutos e após esta crescente, observa-se o comportamento constante até 35 minutos, indicando a estagnação da absorção reativa. Logo, não havia mais número de mols do solvente disponíveis para reagir com o soluto. (ABOUDHEIR et al., 2003; BISHNOI; ROCHELLE, 2000; MAGALHÃES et al., 2004)

Observou-se ainda que nas condições que o experimento foi realizado, para a vazão de  $30,13 \text{ mL min}^{-1}$  as concentrações de  $\text{CO}_2$  reagido e disponível que atingiram o limite de troca mássica foram de aproximadamente  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  e  $0,03 \text{ mol L}^{-1}$  respectivamente.

Figura 13 - Comportamento da concentração de  $\text{CO}_2$  absorvido e disponível na vazão de  $30,13 \text{ mL min}^{-1}$ .



Fonte: Autoria Própria (2019).

Com o auxílio da Figura 14 visualiza-se a variação do  $\text{CO}_2$  consumido na vazão volumétrica de  $44,90 \text{ mL min}^{-1}$ . Na Figura 14, verificou-se que ambas as curvas apresentam crescimento e decaimento exponencial simultaneamente próximo do tempo de 8 minutos. Após este período, é possível observar que no tempo de 45 minutos a reação se encaminha à estagnação, ou seja, próximo a este tempo, o  $\text{NaOH}$  absorveu para a fase líquida o máximo de  $\text{CO}_2$  permitido pela vazão operante.

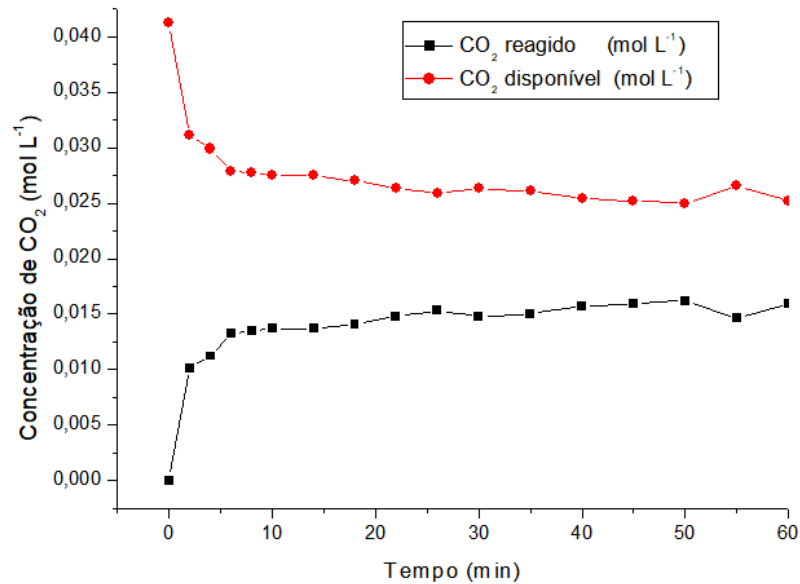
Operando-se na vazão de  $44,90 \text{ mL min}^{-1}$ , as concentrações de  $\text{CO}_2$  reagido e disponível são de aproximadamente  $0,015 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{CO}_2$  absorvido para a fase líquida e  $0,025 \text{ mol L}^{-1}$  disponível na fase gasosa, respectivamente.

Na Figura 15, elucida-se a variação da concentração de  $\text{CO}_2$  reagido, variando em função do tempo para a vazão de  $60,72 \text{ mL min}^{-1}$ . Com base na Figura 15, observa-se que há diferença no comportamento do tempo de estabilização com relação ao comportamento visualizado na Figura 13 e Figura 14. Isso porque o experimento foi realizado com uma vazão consideravelmente alta em comparação às demais. Logo, há mais moléculas de solvente para absorver o soluto  $\text{CO}_2$  e a sua estabilização ocorre de modo mais lento.

Observou-se que do tempo 0 até o tempo de 40 minutos há um aumento de  $\text{CO}_2$  reagido e, conseqüentemente, um decaimento do  $\text{CO}_2$  disponível. Em seqüência, ambas as

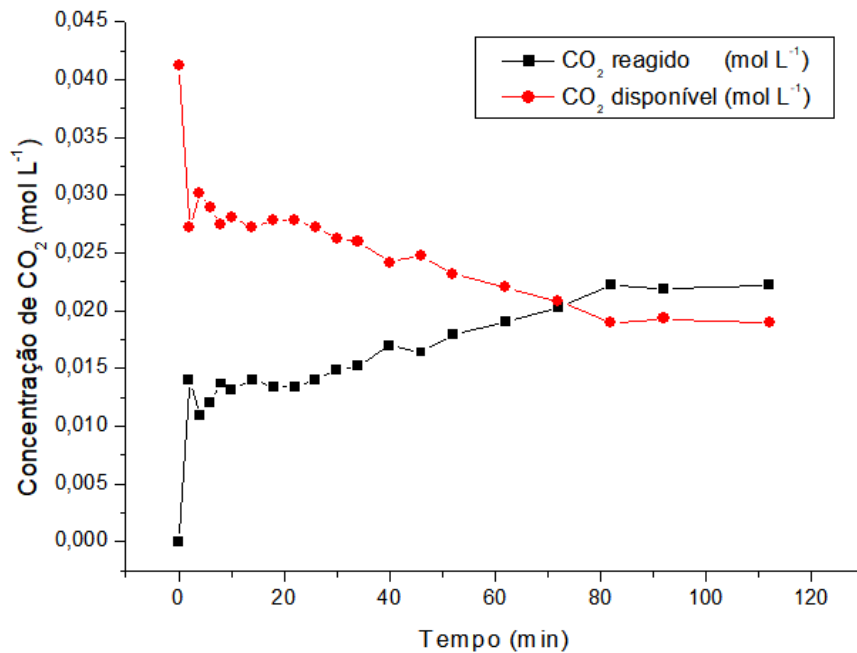
curvas mantêm um comportamento constante até que se atinja o limite de troca mássica no tempo igual a 80 minutos, indicando que a absorção reativa atingiu o limite de consumo de soluto para a vazão de  $60,72 \text{ mL min}^{-1}$ .

Figura 14 - Comportamento da concentração de  $\text{CO}_2$  absorvido e removido ( $\text{mol L}^{-1}$ ) na vazão de  $44,90 \text{ mL min}^{-1}$



Fonte: Aatoria Própria(2019)

Figura 15 - Comportamento da concentração de  $\text{CO}_2$  absorvido e  $\text{CO}_2$  disponível ( $\text{mol L}^{-1}$ ) em função do tempo na vazão de  $60,72 \text{ mL min}^{-1}$ .



Fonte: Aatoria Própria (2019)

### 6.3.3 Avaliação da Porcentagem de Remoção de $\text{CO}_2$ .

Na Tabela 9 pode-se observar os dados de remoção de CO<sub>2</sub>, expressos em porcentagem, utilizando o NaOH como solvente no processo de absorção reativa para as diferentes vazões de 30,13 mL min<sup>-1</sup>, 44,90 mL min<sup>-1</sup> e 60,72 mL min<sup>-1</sup>.

Tabela 9 - Dados de % de Remoção de CO<sub>2</sub> por intermédio da absorção reativa para as vazões de 30,13 mL min<sup>-1</sup>, 44,90 mL min<sup>-1</sup> e 60,72 mL min<sup>-1</sup>.

Q1 (30,13 mL min <sup>-1</sup> )		Q1 (44,90 mL min <sup>-1</sup> )		Q1 (60,72 mL min <sup>-1</sup> )	
Tempo (min)	%Remoção	Tempo (min)	%Remoção	t(min)	%Remoção
0	0,00	0	0,00	0	0,00
2	8,78	2	24,54	2	33,93
4	18,30	4	27,27	4	26,55
6	21,59	6	32,18	6	29,50
8	24,89	8	32,73	8	33,19
10	23,79	10	33,27	10	31,72
14	23,79	14	33,27	14	33,93
18	24,16	18	34,36	18	32,45
22	23,42	22	36,00	22	32,45
26	24,16	26	37,09	26	33,93
30	24,89	30	36,00	30	36,14
34	25,25	35	36,54	34	36,88
38	25,25	40	38,18	40	41,31
43	27,08	45	38,73	46	39,83
48	25,25	50	39,27	52	43,52
52	25,25	55	35,45	62	46,47
-	-	60	38,73	72	49,42
-	-	-	-	82	53,85
-	-	-	-	92	53,11
-	-	-	-	112	53,85

Fonte: Autoria Própria (2019)

Observou-se na Tabela 9 os percentuais de remoção do CO<sub>2</sub> para as vazões trabalhadas no ensaio de absorção, apresentando os seguintes valores: 25,25% para a vazão de 30,13 mL min; 38,73% para a vazão de 44,90 mL min<sup>-1</sup> e 53,85% na vazão de 60,72 mL min<sup>-1</sup>. Fully, D'heni e Linares (2014) obtiveram 58,1% de remoção de CO<sub>2</sub> utilizando a vazão de 30 mL min<sup>-1</sup> com concentração de NaOH inicial de 0,1 mol L<sup>-1</sup> e taxa de CO<sub>2</sub> mL min<sup>-1</sup> operando em uma coluna de 50 mm de diâmetro e 0,6 m de altura, utilizando anéis de cerâmica como recheio. Fleischer Becker e Eigenberger (1996) obtiveram 45% de remoção de CO<sub>2</sub> utilizando a vazão volumétrica de 383,33 mL min<sup>-1</sup>, com concentração inicial de NaOH de 1,0 mol L<sup>-1</sup> e taxa de CO<sub>2</sub> 2,8 L min<sup>-1</sup>, em uma coluna de 80 mm de diâmetro e 1,78 m de altura, utilizando uma coluna com pratos. Ambos os processos de absorção foram realizados em pressão atmosférica e temperatura ambiente, considerando 1 atm e 25 °C respectivamente.

Com base nos dados apresentados na Tabela 9, averiguou-se que a vazão de 60,72 mL min<sup>-1</sup> apresentou o maior percentual de remoção e melhor desempenho quando comparado aos tempos limites das demais vazões. Justifica-se que o desempenho da vazão máxima utilizada é devido a relação proporcional entre vazão volumétrica e volume, pois

conforme aumenta-se a vazão, aumenta-se o volume de solvente disponível para absorver o soluto.

#### 6.3.4 Perfil de Concentração de CO<sub>2</sub> em Função da Posição.

A Tabela 10 apresenta os dados das concentrações de NaOH e CO<sub>2</sub> (mol L<sup>-1</sup>) variando em função da posição dentro da coluna de absorção, para as vazões de 30 mL min<sup>-1</sup>, 44,90 mL min<sup>-1</sup> e 60,72 mL min<sup>-1</sup>, utilizadas neste experimento.

Tabela 10 - Variação da concentração de NaOH e CO<sub>2</sub> consumidos (mol L<sup>-1</sup>) em função da posição para as vazões de 30,13 mL min<sup>-1</sup>, 44,90 mL min<sup>-1</sup> e 60,72 mL min<sup>-1</sup>

Nó	Posição (m)	QI 30,13 mL min <sup>-1</sup>		QI 44,90 mL min <sup>-1</sup>		QI 60,72 mL min <sup>-1</sup>	
		C <sub>NaOH</sub> (mol L <sup>-1</sup> )	C <sub>CO2</sub> (mol L <sup>-1</sup> )	C <sub>NaOH</sub> (mol L <sup>-1</sup> )	C <sub>CO2</sub> (mol L <sup>-1</sup> )	C <sub>NaOH</sub> (mol L <sup>-1</sup> )	C <sub>CO2</sub> (mol L <sup>-1</sup> )
0	0,0000	0,8500	0,01039	0,8700	0,0159	0,8900	0,0222
1	0,0347	0,7656	0,00912	0,7825	0,0140	0,7993	0,0194
2	0,0693	0,6892	0,00797	0,7034	0,0122	0,7175	0,0169
3	0,1040	0,6201	0,00693	0,6319	0,0106	0,6437	0,0147
4	0,1387	0,5575	0,00599	0,5673	0,0091	0,5771	0,0127
5	0,1733	0,5009	0,00513	0,5089	0,0078	0,5169	0,0108
6	0,2080	0,4496	0,00436	0,4562	0,0066	0,4627	0,0092
7	0,2427	0,4032	0,00366	0,4085	0,0056	0,4137	0,0077
8	0,2773	0,3612	0,00303	0,3654	0,0046	0,3695	0,0064
9	0,3120	0,3232	0,00246	0,3264	0,0037	0,3296	0,0051
10	0,3467	0,2888	0,00194	0,2912	0,0029	0,2936	0,0041
11	0,3813	0,2577	0,00147	0,2594	0,0022	0,2612	0,0031
12	0,4160	0,2295	0,00105	0,2307	0,0016	0,2319	0,0022
13	0,4507	0,2040	0,00066	0,2047	0,0010	0,2054	0,0014
14	0,4853	0,1809	0,00031	0,1812	0,0005	0,1815	0,0007
15	0,5200	0,1600	0,0000	0,1600	0,0000	0,1600	0,0000

Fonte: Autoria Própria (2019)

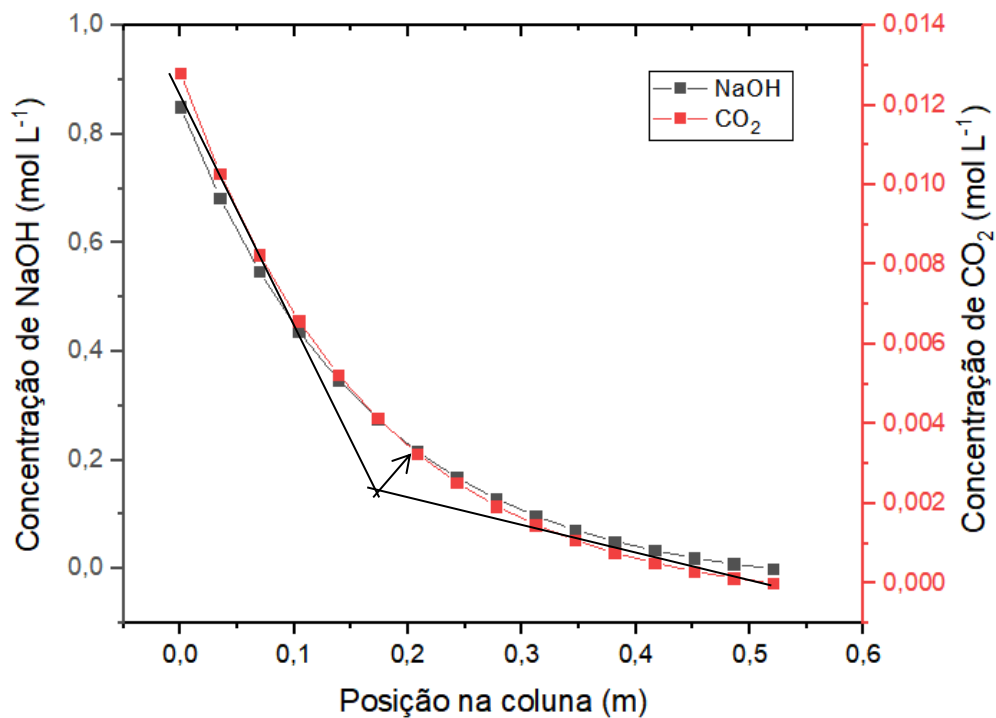
É necessário atentar-se à coordenada em z, pois está similar ao fluxo de líquido. Logo, a posição 0 é referente ao topo da coluna e a posição de 0,52 m refere-se ao fundo da coluna. Portanto, ao se analisar o ponto de decaimento, a bissetriz localizada entre o comportamento linear do decaimento e a linearidade da estagnação da reação dentro da coluna, deve-se observar a posição, pois quanto mais se está próximo do topo da coluna, mais próximo se está do limiar de operação dentro da coluna (LEVENSPIEL, 1999; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2005; TADINI et al., 2016).

Salienta-se ainda que na posição de 0,52 m as concentrações de CO<sub>2</sub> consumido estão igualadas à zero, pois essa posição é referente ao fundo da coluna onde há a entrada do gás e, neste momento, o CO<sub>2</sub> está presente apenas na fase gasosa, e portanto, não foi absorvido pelo solvente na fase líquida.

Ademais, os dados da posição 0,52 m referem-se aos dados iniciais do experimento e os valores da posição 0 m referem-se ao tempo final de coleta do líquido na parte inferior da coluna para as vazões utilizadas.

Na Figura 16 está expresso o comportamento da concentração de NaOH reagido e CO<sub>2</sub> consumido na vazão de 30,13 mL min<sup>-1</sup> dentro da coluna.

Figura 16 - Variação da concentração de NaOH consumido e CO<sub>2</sub> absorvido (mol L<sup>-1</sup>) dentro da coluna de absorção na vazão de 30,13 mL min<sup>-1</sup>.



Fonte: Autoria Própria (2019)

Analisando a Figura 16, observou-se que ambas as concentrações apresentam um decaimento exponencial. Conforme Levenspiel (1999), o ponto de decaimento ou ponto de estabilização é o ponto anterior ao comportamento constante. Analisa-se a posição desse ponto dentro da coluna, pois o mesmo está diretamente ligado ao potencial máximo de operação dentro da coluna.

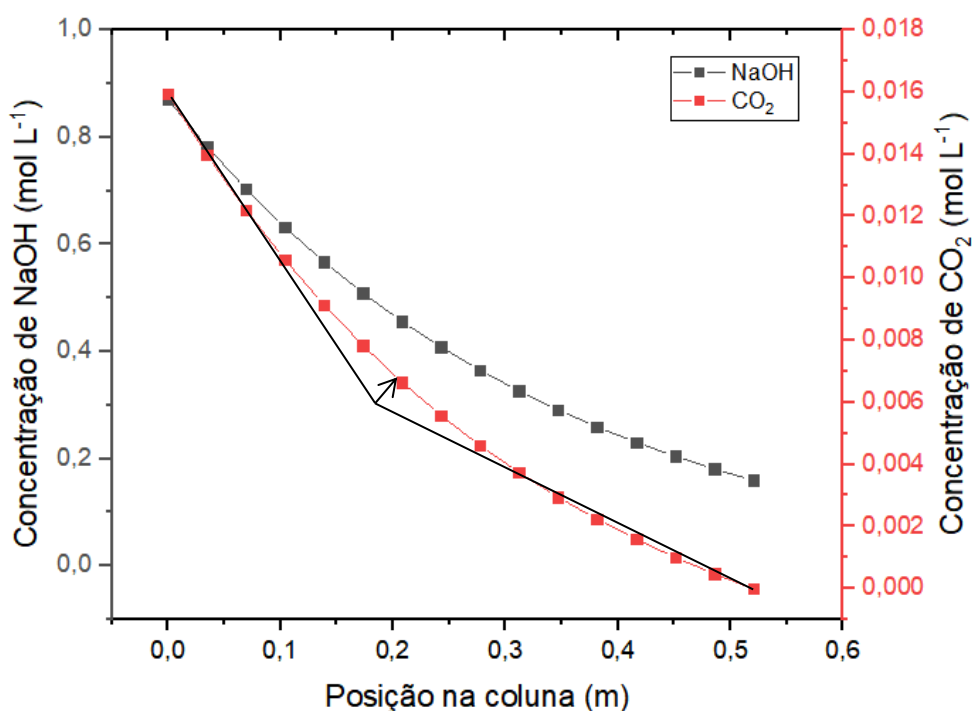
Neste sentido, o ponto de decaimento está localizado no sexto nó, na posição de 0,2080 m. Observa-se que a concentração de NaOH e CO<sub>2</sub> reagido no ponto de decaimento é de 0,4562 mol L<sup>-1</sup> e 0,00436 L<sup>-1</sup>, respectivamente, indicando que naquela posição aproximadamente metade da concentração de NaOH já havia reagido.

Determinou-se que o ponto de decaimento exponencial, na posição de 0,2080 m apresenta o ponto de eficiência máxima da coluna para a vazão de 30,13 mL min<sup>-1</sup>. Indica-se ainda que para esta operação, é possível maximizar o potencial de remoção de CO<sub>2</sub>

aumentando a vazão de solvente dentro da coluna, visto que metade do solvente foi consumido antes do valor que corresponde à metade do altura da coluna (LEVENSPIEL, 1999; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2005; TADINI et al., 2016).

Analisou-se o comportamento da concentração de NaOH reagido e CO<sub>2</sub> consumido na vazão de 44,90 mL min<sup>-1</sup> dentro da coluna na Figura 17.

Figura 17 - Variação da concentração de NaOH consumido e CO<sub>2</sub> absorvido (mol L<sup>-1</sup>) em função da posição para a vazão de 44,90 mL min<sup>-1</sup>.



Fonte: Autoria Própria (2019)

Com base na Figura 17, foi possível analisar que a curva de concentração NaOH apresenta um consumo mais lento, sem traços de decaimento expressivo, indicando que a absorção reativa ocorreu de forma progressiva. Tratando-se da curva de remoção de CO<sub>2</sub> ao longo da coluna, averiguou-se que há um consumo mais significativo. Apresentando um comportamento semelhante à vazão de 30,13 mL min<sup>-1</sup>, seu ponto de decaimento é localizado também no sexto nó, na posição de 0,2080 m e as concentrações de NaOH e CO<sub>2</sub> removido nesta posição são de 0,4562 mol L<sup>-1</sup> e 0,0066 mol L<sup>-1</sup>.

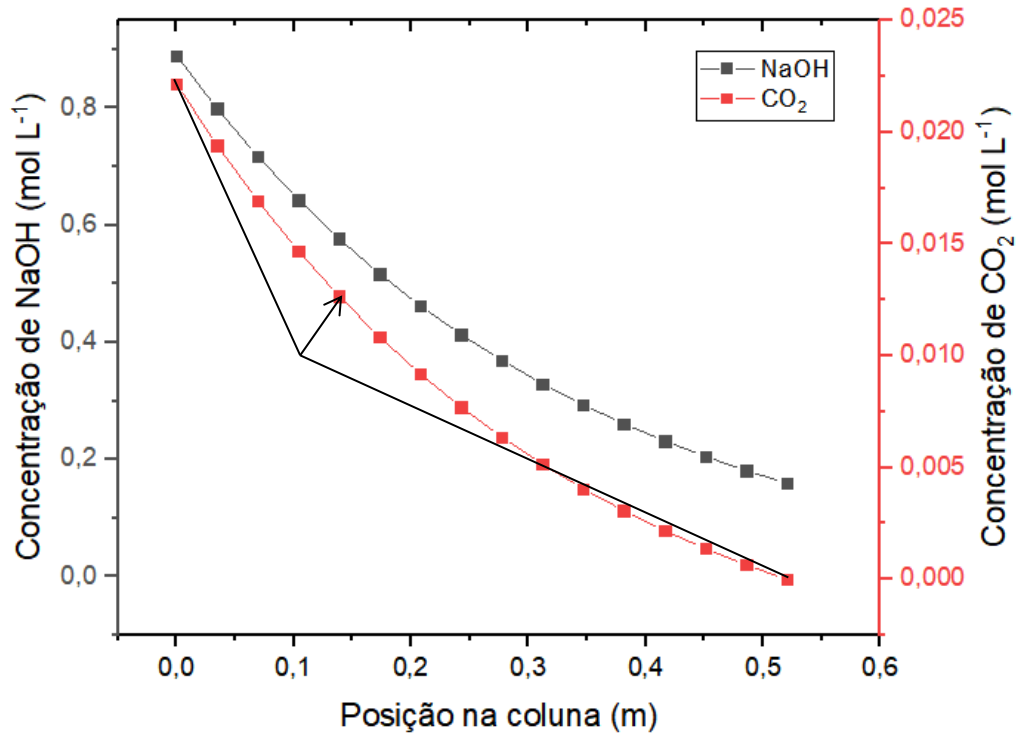
Nota-se que para a vazão de 44,90 mL min<sup>-1</sup> houve uma melhoria na absorção de CO<sub>2</sub> para a fase líquida, corroborando o que fora atestado anteriormente: que a vazão de 30,13 mL min<sup>-1</sup> não atingiu a operação máxima dentro da coluna. Entretanto, o ponto anterior ao comportamento constante, chamado neste caso de ponto de decaimento, indica que ainda há a



possibilidade de maximizar o potencial de remoção ao aumentar a vazão volumétrica da fase líquida dentro da coluna.

Na Figura 18 está expresso o comportamento da concentração de NaOH reagido e CO<sub>2</sub> consumido na vazão de 60,72 mL min<sup>-1</sup> dentro da coluna.

Figura 18 - Variação da concentração de NaOH consumido e CO<sub>2</sub> absorvido (mol L<sup>-1</sup>) em função da posição para a vazão de 60,72 mL min<sup>-1</sup>.



Fonte: Autoria Própria (2019)

Ponderou-se a variação de NaOH e CO<sub>2</sub> apresentada na Figura 17 e foi possível observar que ambas as curvas apresentam um consumo mais lento, indicando que a absorção reativa ocorreu de forma progressiva, porquanto havia moléculas de solvente suficiente para reagir com o soluto dentro da coluna sem atingir rapidamente o limite de absorção na vazão de 60,72 mL min<sup>-1</sup>.

Neste caso, observou-se a curva de remoção de CO<sub>2</sub> ao longo da coluna para identificar o fim do comportamento constante, indicativo do ponto de remoção significativo. Obteve-se que o ponto de decaimento está localizado no terceiro nó, na posição de 0,140 m com concentrações de NaOH 0,6437 mol L<sup>-1</sup> consumidos e 0,0147 mol L<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub> removidos.

Diante do exposto, o ponto de decaimento para a vazão de  $60,72 \text{ mL min}^{-1}$  localiza-se próximo à posição 0 m, localizada no topo da coluna, indicando que a operação de absorção reativa atingiu a máxima nas condições em que o experimento foi realizado.

### 6.3.5 Cálculo dos Parâmetros da Resistência de Troca Mássica na Fase Líquida

Na Tabela 11 estão apresentados os dados de resistência da troca mássica na fase líquida ( $k_{\text{CO}_2, \text{a}}$ ), vazão volumétrica (Ql) e vazão mássica (Qm), velocidade mássica ( $G_L$ ) e os valores do logaritmo natural (ln) de  $k_{\text{CO}_2, \text{a}}$  e  $G_L$ , utilizados para calcular a relação empírica apresentada na Equação 21.

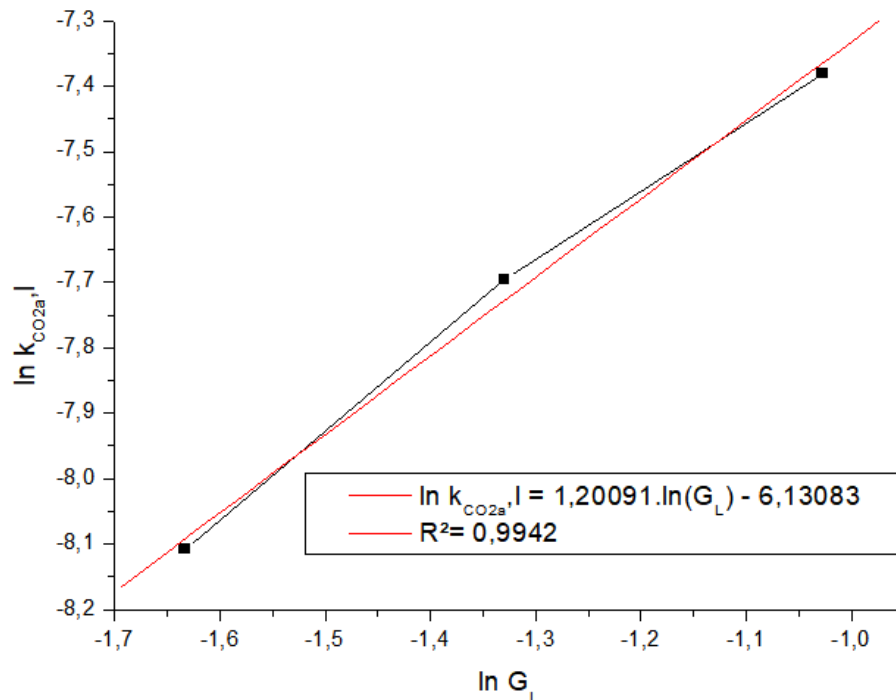
Tabela 11 - Dados utilizados para o cálculo dos parâmetros da resistência de troca mássica na fase líquida  $c_0$  e C.

$k_{\text{CO}_2, \text{a}} (\text{s}^{-1})$	Ql ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	Qm ( $\text{kg s}^{-1}$ )	$G_L (\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1})$	$\ln(G_L)$	$\ln(k_{\text{CO}_2, \text{a}})$
$3,0100 \cdot 10^{-4}$	$5,5217 \cdot 10^{-7}$	$5,5209 \cdot 10^{-4}$	$1,9526 \cdot 10^{-1}$	-1,6334	-8,1084
$4,5500 \cdot 10^{-4}$	$7,4833 \cdot 10^{-7}$	$7,4824 \cdot 10^{-4}$	$2,6463 \cdot 10^{-1}$	-1,3294	-7,6952
$6,2300 \cdot 10^{-4}$	$1,0120 \cdot 10^{-6}$	$1,0119 \cdot 10^{-3}$	$3,5788 \cdot 10^{-1}$	-1,0276	-7,3810

Fonte: Autoria Própria (2019)

A Figura 19 apresenta o comportamento da equação em função do ajuste linear, plotando-se o logaritmo natural dos coeficientes de transferência de massa calculados para as vazões volumétricas estudadas *versus* o logaritmo natural da velocidade mássica para a obtenção dos parâmetros empíricos  $c_0$  e C.

Figura 19 - Ajuste dos dados experimentais à equação linearizada da resistência de troca mássica na fase líquida.



Fonte: Autoria Própria (2019)

Na Tabela 12 observam-se os parâmetros C e  $c_0$  calculados para a resistência de troca mássica na fase líquida para a absorção reativa de NaOH a  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ , nas vazões de  $30,13 \text{ mL min}^{-1}$ ,  $44,90 \text{ mL min}^{-1}$  e  $60,72 \text{ mL min}^{-1}$ .

Tabela 12 - Valores dos parâmetros  $C_0$  e C obtidos utilizando o ajuste linear.

C	$\ln(c_0)$	$c_0$
1,2009	-6,13083	$2,1748 \cdot 10^{-3}$

Fonte: Autoria Própria (2015)

Com base na Tabela 12, para os casos de absorção reativa utilizando o NaOH como solvente e  $\text{CO}_2$  como soluto, a Equação 21 pode ser expressa conforme a Equação 22:

$$k_{\text{CO}_2, a} = 2,1748 \cdot 10^{-3} \cdot G_L^{1,2009} \quad (22)$$

A Equação 22 expressa a relação diretamente proporcional existente entre o coeficiente de transferência de massa na fase líquida com a velocidade mássica entre as vazões de  $30,13 \text{ mL min}^{-1}$  até  $60,72 \text{ mL min}^{-1}$ .

#### 6.4 VALIDAÇÃO DO MÓDULO DIDÁTICO COMO FERRAMENTA EDUCACIONAL

A validação da coluna de absorção como módulo didático foi realizada com base nas respostas de 4 docentes que avaliaram o módulo em aspectos pedagógicos e técnicos, durante a prática com os 12 alunos. Os discentes contribuíram com a análise para o terceiro aspecto, que é a opinião dos alunos com relação à bancada didática e o experimento de absorção reativa. As respostas para cada pergunta dos três aspectos estão localizadas no ANEXO B.

Consultou-se a Tabela 3 para que, com base na média das respostas, fosse possível obter os conceitos do módulo nos três aspectos conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultado da avaliação dos docentes e discentes para a validação do módulo como ferramenta educacional.

	Aspectos pedagógicos	Aspectos técnicos	Opinião dos alunos
Total de respostas SIM	58	56	66
Total de respostas EM PARTES	6	0	17
Total de respostas NÃO	0	0	1
Média das respostas	30,5 pontos	14 pontos	12,4 pontos
CONCEITO	ÓTIMO	ÓTIMO	ÓTIMO

Fonte: Autoria Própria (2019)

Conforme a média da pontuação das respostas dos docentes, 30,5 pontos para os aspectos pedagógicos, observando na Tabela 3, que dispõe dos conceitos de cada aspecto com base nas pontuações, avalia-se os aspectos pedagógicos do módulo didático como “ótimo”.

No que tange aos aspectos técnicos, a análise era composta de sete perguntas que retratam análises do entendimento do manual e roteiro da prática, da operacionalidade, complexidade da prática e do módulo didático. Analisando a média da pontuação das respostas obtidas, 14 pontos, atesta-se que para os aspectos técnicos o módulo didático também obteve conceito “ótimo”.

Os sete itens presentes no item “Opinião dos Alunos” complementam a análise pedagógica, pois compreendem a parcela receptora do aprendizado, a qual lidou com o módulo didático diretamente. Conferindo a média das respostas, 12,40, na opinião dos alunos, a bancada didática recebeu concomitante o conceito “ótimo”.

Diante do exposto, os três parâmetros receberam conceito ótimo, indicando que o módulo didático pode ser utilizado como ferramenta educacional e está pronto para ser disponibilizado para fins educacionais, com suas funções pedagógicas e técnicas avaliadas pelos docentes da universidade.

## 6.5 VALIDAÇÃO DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

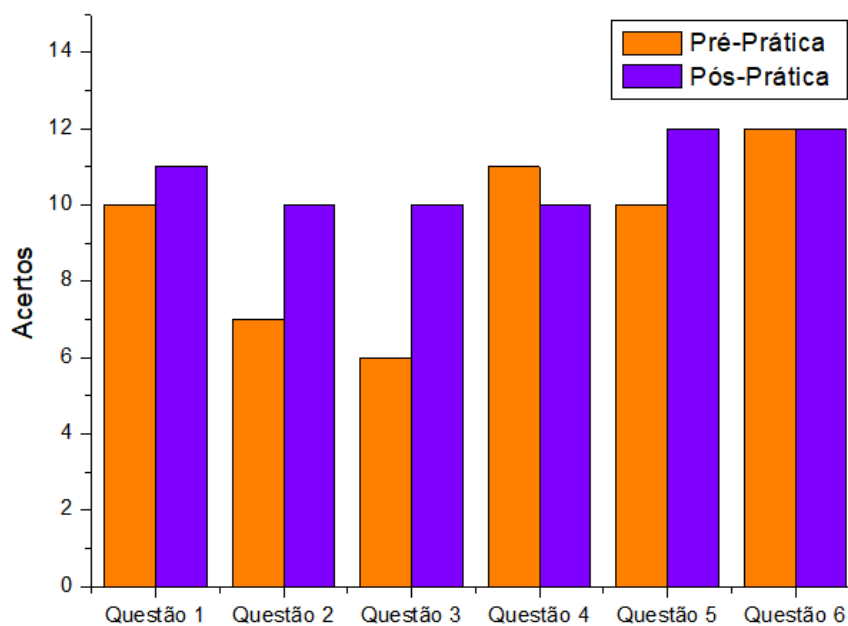
A validação da metodologia ativa inserida no módulo didático foi realizada com alunos da UTFPR – Campus Francisco Beltrão, cursando a disciplina Laboratório para Engenharia Química II, que abrange as práticas de Transferência de Calor e de Massa. Deste modo, os alunos tiveram contato com a coluna de absorção, realizando o experimento seguindo o roteiro localizado no APÊNDICE A.

### 6.5.1 Teste de Compreensão

O teste de compreensão foi realizado com 12 alunos matriculados na disciplina Laboratório para a Engenharia Química II. O modelo do teste de compreensão está localizado no Apêndice B e o gabarito para as questões objetivas e dissertativas está localizado no Apêndice C. Analisou-se na Figura 20 o número de acertos anteriores e posteriores à prática, para que se viabilizasse a avaliação entre o conhecimento pré-estabelecido dos educandos e suas modificações após a prática em laboratório.

De modo geral, o teste foi construído para conter perguntas diretamente relacionadas ao conteúdo de absorção e outras perguntas das demais matérias, que fazem parte do conteúdo de absorção, porém tendo seus conceitos vistos em outras disciplinas. As questões 1, 4 e 5 são conectadas diretamente aos conceitos de absorção e as questões 2 e 6 são conectadas às disciplinas de Termodinâmica I e II e a questão 3 é ligada às disciplinas de Química Analítica e Química Analítica Instrumental. Os resultados do teste pré-prático estão localizados no ANEXO C e o resultado do pós-prática está disposto no ANEXO D.

Figura 20 - Análise das respostas corretas antes e depois da prática de absorção.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Tratando-se das perguntas objetivas, pôde-se observar que as questões 2 e 3, ligadas às disciplinas de Termodinâmica I e II, Química Analítica e Química Analítica Instrumental são as que mais obtiveram variação de respostas corretas no teste de compreensão. Atribui-se a isso a falta de interdisciplinaridade causada pela metodologia de educação passiva, na qual o aluno não é incentivado à conectar os assuntos vistos durante seu processo educacional.

Entretanto, a questão 4 apresentou uma variação negativa nas respostas assertivas, estes erros após a prática podem estar relacionados à confusão do que foi pedido no enunciado, ao tempo de assimilação de cada educando e ao nervosismo relacionado a realização de testes ou provas.

Observando o crescimento nas respostas posteriores à prática no geral, atestou-se a realização da interdisciplinaridade proposta na metodologia de Aprendizagem Significativa, realizada por intermédio da ancoragem de conhecimentos, na qual o educando realiza conexões com os conteúdos outrora aprendidos. Durante e após a prática, os dicentes

necessitaram destes conceitos para a resolução dos problemas apresentados o que fortifica a conexão educacional e melhor desempenho no teste de compreensão.

Analisando em conjunto as respostas dissertativas e objetivas localizadas no ANEXO C e D, a prática possibilitou aos alunos desenvolver a estrutura cognitiva, responsável pelo armazenamento de informações e a aprendizagem efetivamente, transformando sua hierarquia conceitual e sua aquisição de dados. As crescentes nas respostas corretas, bem como a modificação das respostas objetivas são indícios de que foi possível descompartmentalizar o aprendizado e interligá-los na resolução de problemas, oportunizando que o aluno assumisse uma posição ativa frente à resolução de problemas realizando vínculos significativos com a aprendizagem (HALLOUN, 1996; SOUSA et al., 2015; TAVARES, 2008).

## CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se a construção do módulo didático, foi feita sua validação científica, bem como sua validação como ferramenta educacional. Ademais, realizaram-se testes de compreensão para atestar a metodologia ativa denominada Aprendizagem Significativa, inserida na prática de absorção reativa. As principais conclusões obtidas neste estudo são apresentadas abaixo:

- Os materiais de PVC se mostraram eficientes para a construção do módulo didático;
- Em comparação ao instrumento comercial, a coluna de absorção construída dentro da universidade possibilitaria uma economia de R\$ 24.547,85.
- Com relação ao estudo da variação das vazões volumétricas, constatou-se que as maiores vazões apresentaram melhores potenciais de remoção.
- As melhores condições para a absorção de  $\text{CO}_2$  são operando-se o módulo na vazão de  $60,72 \text{ mL min}^{-1}$  da solução de  $\text{NaOH } 1,0 \text{ mol L}^{-1}$  e vazão de  $1,0 \text{ L min}^{-1}$  de  $\text{CO}_2$ , obtendo-se 53,85% de percentual de remoção de  $\text{CO}_2$  e demorando 82 minutos para atingir o limite mássico.
- O coeficiente de transferência de massa na fase líquida que apresentou o melhor desempenho foi de  $0,000623 \text{ s}^{-1}$ .
- Os parâmetros da resistência de troca mássica na fase líquida  $C_0$  e  $C$  obtidos foram: 0,002174 e 1,2009.
- O módulo obteve conceito “ótimo” nos 3 aspectos da validação como ferramenta educacional, indicando que o módulo possui propostas técnico-pedagógicas para colaborar com o ensino e aprendizagem dos alunos da UTFPR *Campus* FB.
- Validou-se a metodologia de aprendizagem significativa com o teste de compreensão aplicado com os alunos no laboratório, apresentando 19,64% de crescimento educacional no teste antes e posterior à prática.
- A prática permitiu a ancoragem dos assuntos vistos durante à graduação, especialmente às matérias de Transferência de Massa, Operações Unitárias III, Termodinâmica I, Termodinâmica II, Química Analítica, Química Analítica Instrumental e Cálculo de Reatores II.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos dados obtidos neste trabalho, visando o aperfeiçoamento deste projeto, são propostas as seguintes sugestões:

- Testar outros recheios e verificar sua eficiência no processo de absorção;
- Operar em outras pressões e temperaturas para verificar o comportamento do processo e se é possível maximizar o percentual de absorção;
- Inserir controladores de arduino no módulo didático para verificar as temperaturas ao longo da coluna;
- Aplicar diferentes concentrações de NaOH dentro da coluna, bem como diferentes taxas de CO<sub>2</sub> a fim de verificar a melhor condição de operação dentro da coluna para as diferentes concentrações e taxas;
- Realizar o experimento com uma mistura de gases para calcular a resistência de transferência na fase gasosa;
- Aplicar misturas de solventes para analisar sua eficiência na remoção de CO<sub>2</sub> para a fase líquida;
- Aplicar o teste de compreensão em outras turmas para obter uma amostragem maior e conseqüentemente, uma maior aprendizagem significativa;
- Realizar dinâmicas com os discentes além dos testes objetivos e dissertativos, para trabalhar os conceitos motores e afetivos em conjunto com o cognitivo.



## REFERÊNCIAS

- ABOUDHEIR, A. et al. Kinetics of the reactive absorption of carbon dioxide in high CO<sub>2</sub>-loaded, concentrated aqueous monoethanolamine solutions. **Chemical Engineering Science**, [s. l.], v. 58, n. 23–24, p. 5195–5210, 2003.
- ALMEIDA, A. N. De et al. Desenvolvimento e usabilidade de módulo didático de baixo custo para ensaios de tubo gotejadores. **REVISTA GEAMA - Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 2, p. 1–9, 2016.
- AROONWILAS, A.; VEAWAB, A.; TONTIWACHWUTHIKUL, P. Behavior of the Mass-Transfer Coefficient of Structured Packings in CO<sub>2</sub> Absorbers with Chemical Reactions. [s. l.], n. iii, p. 2044–2050, 1999.
- ASSUMPÇÃO, M. H. M. T. et al. Construção e adaptação de materiais alternativos em titulação ácido-base. **Eclética Química**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 133–138, 2010.
- AUSUBEL, D.; NOVAK, J.; HANESIAN, H. **Psicologia Educacional**. Rio de Janeiro: Editora: Interamericana, 1980.
- AUSUBEL, D. P. **Aquisição e Retenção de Conhecimentos: Uma Perspectiva Cognitiva**. 1ª ed. [s.l.] : Plátano - Lisboa, 2003.
- BARBOSA, E. F.; MALDONADO, J. C.; MAIDANTCHIK, C. L. L. Padronização de processos para o desenvolvimento de módulos educacionais. **XXIX Latin-American Conference on Informatics**, [s. l.], p. 1–12, 2003.
- BARBOSA, E. F.; MOURA, D. G. De. Metodologias ativas de aprendizagem na Educação Profissional e Tecnológica. **Boletim Técnico do Senac**, [s. l.], v. 39, n. 2, p. 48–67, 2013.
- BENÍTEZ, J. **Principles and Modern Applications of Mass Transfer Operations**. 2nd. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. v. 57
- BISHNOI, S.; ROCHELLE, G. T. Absorption of carbon dioxide into aqueous piperazine: reaction kinetics, mass transfer and solubility. **Chemical Engineering Science**, [s. l.], v. 55, n. 22, p. 5531–5543, 2000.
- BRASIL. **Referenciais nacionais dos cursos de engenharia**. 2019. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/dmdocuments/referenciais2.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2019.
- BRUM, K. F.; PURCIDONIO, P. M.; FERREIRA, M. L. A. Aprendizagem ativa no ensino de engenharia de métodos: uma experiência no CEFET/RJ. **Revista Produção Online**, [s. l.], v. 17, n. 3, p. 956, 2017.
- CARDOSO, S. O. de O.; DICKMAN, A. G. Simulação computacional aliada à teoria da aprendizagem significativa: uma ferramenta para ensino e aprendizagem do efeito fotoelétrico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, [s. l.], v. 29, n. 0, p. 891–934, 2012.
- CARVALHO, A. C. B. D. De; PORTO, A. J. V.; BELHOT, R. V. Aprendizagem

Significativa no Ensino de Engenharia. [s. l.], v. 11, n. 1, p. 81–90, 2001.

CARVALHO, J. D. .; LIMA, R. M. Organização de um processo de aprendizagem baseado em projetos interdisciplinares em engenharia. **Anais: XXXIV Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia - COBENGE. Passo Fundo: UPF.**, [s. l.], 2006.

CASTRO, M. C. De; SIRAQUE, M.; TONIN, L. T. D. Aprendizagem significativa no ensino de cinética química através de uma oficina problematizadora. **ACTIO: Docência em Ciências**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 151, 2017.

CAVACO, I.; GARCIA, A. R. **Faculdade de Ciências e Tecnologia Manual de boas práticas de laboratório e tratamento de resultados em Química Analítica**. 2007. UNIVERSIDADE DO ALGARVE Faculdade de Ciências e Tecnologia, [s. l.], 2007

CHIKUKWA, A. et al. Dynamic modeling of post-combustion CO<sub>2</sub> capture using amines - A review. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 23, n. 1876, p. 82–91, 2012.

COSTA, S. S. C. Da; MOREIRA, M. A. a Resolução De Problemas Como Um Tipo Especial de Aprendizagem Significativa. **Caderno Brasileiro de ensino de Física**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 263–277, 2001.

CUNHA, F. L. Da; FREITAS, R. A. de C. Metodologia para projeto e implementação de laboratórios de cursos de engenharia. **Anais: XXXVIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia – COBENGE. Fortaleza: ABENGE.**, [s. l.], 2010.

CUNHA, F. M. Ensino de Engenharia: Abordagem pela Complexidade. **Revista de Ensino de Engenharia**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 3–16, 2015. Disponível em:  
<<http://www.bibliotekevirtual.org/index.php/2013-02-07-03-02-35/2013-02-07-03-03-11/1202-abenge/v34n01/12660-ensino-de-engenharia-abordagem-pela-complexidade.html>>

CUSSLER, E. L. **Diffusion: mass transfer in fluid systems**. 3<sup>a</sup> ed. [s.l.] : Cambridge University Press, 2009.

DWYER, F. Edgar Dale's cone of experience: A quasi-experimental analysis. **International Journal of Instructional Media**, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 431–438, 2010.

FLEISCHER, C.; BECKER, S.; EIGENBERGER, G. Detailed Modeling of the chemisorption of CO<sub>2</sub> into NaOH in a bubble column. **Chemical Engineering Science**, [s. l.], v. 51, n. 10, p. 1715–1724, 1996.

FRARE, L. M.; GIMENES, M. L.; PEREIRA, N. C. Processo para remoção de ácido sulfídrico de biogás. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 167–172, 2009.

FULLY, F.; D'HENI, M. B.; LINARES, J. J. Construção de Um Sistema Simples e Econômico para o Estudo da Absorção Reativa em Laboratório. **Revista de Ensino de Engenharia**, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 23–30, 2014.

GEDRAITE, R. et al. Como a utilização de bancada experimental simples e de baixo custo torna mais significativo o processo de ensino e aprendizagem nos cursos de engenharia.

**Anais: XXVIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia – COBENGE. Ouro Preto: UFOP, [s. l.], 2000.**

GOMES, F. J. et al. Módulo laboratorial de baixo custo, baseado em FOSS, para educação em engenharia de controle de processos industriais. **Clagtee**, [s. l.], p. 1–7, 2011.

GROBER, E. D. et al. The educational impact of bench model fidelity on the acquisition of technical skill: The use of clinically relevant outcome measures. **Annals of Surgery**, [s. l.], v. 240, n. 2, p. 374–381, 2004.

HALLOUN, I. Schematic Modeling for Meaningful Learning of Physics. **Journal of Research in Science Teaching**, [s. l.], v. 33, n. 9, p. 1019–1041, 1996.

HOTTES, S.; CLAIN, A. F. Estimativa dos Erros de Medição Associados ao Uso de Vidraria Inadequada e Condições Extremas do Indicador em uma Titulação Ácido-base. **Revista Eletrônica TECCEN**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 45, 2010.

JUNIOR, V. H. **Jogos Digitais No Ensino Da Matemática Como Auxílio para a Prática Docente**. 2017. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Curso Superior de Licenciatura em Informática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão, [s. l.], 2017.

KLAUSEN, L. dos S. Aprendizagem Significativa : Um Desafio. **EDUCERE - XIII Congresso Nacional de Educação**, [s. l.], p. 6403–6411, 2015.

KLEINKE, R. de C. M. **Aprendizagem Significativa: a pedagogia por projetos no processo de alfabetização**. 2003. UFSC, [s. l.], 2003.

KOHL, A. L.; NIELSEN, R. **Gas Purification**. 5th. ed. Houston: Elsevier, 1997.

LEÃO, M. L. O ensino de engenharia e a conjuntura brasileira. **Anais: XXIX Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia - COBENGE. Porto Alegre: PUCRS**, [s. l.], 2006.

LEITE, A. B.; BERTOLI, S. L.; BARROS, A. A. C. Absorção química de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 49–57, 2006.

LETRUD, K.; HERNES, S. The diffusion of the learning pyramid myths in academia: an exploratory study. **Journal of Curriculum Studies**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 291–302, 2016.

LEVENSPIEL, O. **Chemical reaction engineering**. 3rd. ed. New York: Wiley, 1999.

LU, L. T. et al. Active control for a benchmark building under wind excitations. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 91, n. 4, p. 469–493, 2003.

MAGALHÃES, E. A. et al. Confecção e avaliação de um sistema de remoção do CO<sub>2</sub> contido no biogás. **Acta Scientiarum. Technology**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 11–19, 2004.

MARQUES, E. C.; LANÇA, T.; BUENO QUIRINO, S. Análise da aplicação de um projeto interdisciplinar na educação de futuros engenheiros: montagem de máquinas térmicas com materiais reciclados. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, [s. l.], v. 10, n. 4,

p. 121–138, 2015.

MCCABE, W.; SMITH, J.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 7th. ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

NOERES, C. .; KENIG, E. Y. .; GÓRAK, A. Modelling of reactive separation processes: reactive absorption and reactive distillation. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 157–178, 2003.

ONGARATTO, R. S.; SARKISB, J. R.; RECH, R. Construção de Uma Torre de Resfriamento de Bancada para o Ensino de Operações Unitárias. **Revista de Ensino de Engenharia**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 27–34, 2010.

PINHEIRO, P. C. da C. Aula prática sobre trocadores de calor: bancada e guia de aula. **Anais: XXXV Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia - COBENGE**. Curitiba: UnicenP, [s. l.], 2007.

PIVATTO, W. Aprendizagem Significativa: Revisão Teórica E Apresentação De Um Instrumento Para Aplicação Em Sala De Aula. **Itinerarius Reflectionis**, [s. l.], v. 2, n. 15, 2013.

QUINTINO, L. F. et al. Kit didático de baixo custo para práticas interdisciplinares em cursos de Engenharia Eletrônica. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, [s. l.], v. 1, n. 34, p. 124, 2017.

RAMDIN, M. et al. Solubilities of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, and SO<sub>2</sub> in ionic liquids and Selexol from Monte Carlo simulations. **Journal of Computational Science**, [s. l.], v. 15, p. 74–80, 2016.

RANNOV, C. L. et al. Modelagem e validação experimental de uma bancada didática modular para ensino de dinâmica de fluidos em cursos de engenharia. **Anais: XLV Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia - COBENGE**. Joinville: UDESC, [s. l.], 2017.

RIBEIRO, L. R. de C. A Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL): Uma Implementação na Educação em Engenharia na Voz dos Atores. **Tese**, [s. l.], p. 0–209, 2005.

ROCHA, A. R. R. et al. a Práxis Da Tecnologia Na Educação De Engenharia : Experiência De Reynolds. **Anais: XLII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia – COBENGE**. Juiz de Fora: UFJF, [s. l.], 2014.

RODRIGUES, G. C. Instrumento Para Avaliação De Jogos Eletrônicos Instrumento Para Avaliação De Jogos Eletrônicos. [s. l.], p. 123, 2014. a.

RODRIGUES, G. C. F. S. **Instrumento para avaliação de jogos eletrônicos educativos do Ensino Fundamental I**. 2014b. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

SÁENZ, J. et al. Open and Low-Cost Virtual and Remote Labs on Control Engineering. **IEEE Access**, [s. l.], v. 3, p. 805–814, 2015.

- SANTOS, T. C. et al. Desenvolvimento de equipamentos didáticos para ensino de mecânica dos fluidos: Estudo da perda de carga. **Revista de Ensino de Engenharia**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 14–25, 2017.
- SCHNEIDERS, L. A. **O método da sala de aula invertida (flipped classroom) Coletânea Cadernos Pedagógicos: Metodologias Ativas de Aprendizagem**. Lajeado.
- SCHULZ, H. E. **O essencial em fenômenos de transporte**. São Carlos: EESC-USP, 2003.
- SEADER, J. D.; HENLEY, E. J. **Separation Process Principles**. 2nd. ed. New York: Wiley, 2006.
- SILVA, F. L. Da; MUZARDO, F. T. Pirâmides e cones de aprendizagem: da abstração à hierarquização de estratégias de aprendizagem. **Dialogia**, [s. l.], n. 29, p. 169–179, 2018.
- SILVA, R. B. Da et al. Aplicação da produção mais limpa no processo de clarificação do caldo de cana para produção de açúcar. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas (GEPROS)**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 59–71, 2009.
- SILVA, L. O. C.; RODRIGUES, M. F. Aprendizagem Significativa: passível de ser trabalhada no Ensino Fundamental I. **Revista Mosaico**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 40, 2017.
- SOARES, L. G.; PINTO, J. M. de O. Aprendizagem Significativa na Construção de Mapas Conceituais. **Scientia cum Industria**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 241–243, 2017.
- SOMYÜREK, S. An effective educational tool: construction kits for fun and meaningful learning. **International Journal of Technology and Design Education**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 25–41, 2014.
- SOUSA, A. T. O. De et al. A utilização da teoria da aprendizagem significativa no ensino da Enfermagem. **Revista Brasileira de Enfermagem**, [s. l.], v. 68, n. 4, p. 713–722, 2015.
- SOUZA, R. T. De; SILVA, I. dos S.; JUNIOR, S. C. da S. Desenvolvimento de Módulos Didáticos para Ensino de Técnicas de Automação no IFPB. **Anais: XLII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia – COBENGE. Juiz de Fora: UFJF**, [s. l.], 2014.
- TADINI, C. C. et al. **Operações unitárias na indústria de alimentos vol. 2**. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- TAVARES, R. Aprendizagem Significativa E O Ensino De Ciências. **Ciências & Cognição**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 94–100, 2008.
- VALDIERO, A. C.; BORTOLAIA, L. A.; RASIA, L. A. Desenvolvimento de uma bancada didática para ensaio de vibrações mecânicas como ferramenta educacional na engenharia. **Anais: XXXIX Congresso Brasileiro de Ensino em Engenharia - COBENGE. Blumenau: FURB.**, [s. l.], 2011.
- VIGANÓ, V. C. R.; LIMA, I. G. De. Aprendizagem significativa de Trigonometria. **REMAT: Revista Eletrônica de Matemática**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 1–10, 2015.

WANG, M. et al. Post-combustion CO<sub>2</sub> Capture with Chemical Absorption: A State-of-the-art Review. **Chemical engineering research and design**, [s. l.], v. 89, n. 9, p. 1609–1624, 2011.

YOO, M.; HAN, S. J.; WEE, J. H. Carbon dioxide capture capacity of sodium hydroxide aqueous solution. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 114, n. August 2018, p. 512–519, 2013.

**APÊNDICE A - Roteiro para a prática de absorção reativa**

**ROTEIRO DE AULA PRÁTICA**

**LABORATÓRIO DE ENGENHARIA QUÍMICA II**

**MÓDULO DE ABSORÇÃO EM COLUNA DE RECHEIO**

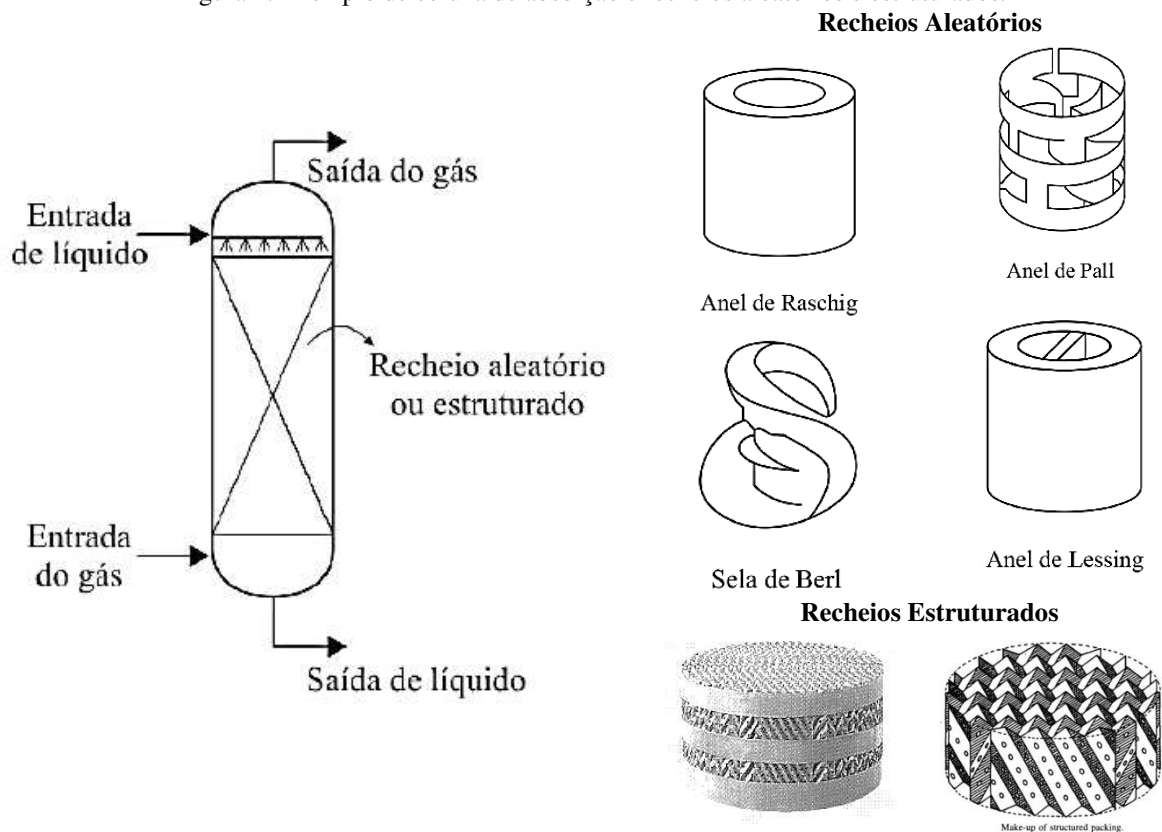
**Francisco Beltrão  
2019**

## INTRODUÇÃO

A absorção é um dos processos de separação das operações unitárias com grande aplicabilidade na indústria para recuperar ou obter componentes de alto valor agregado e como alternativa ambiental para remover poluentes provenientes dos processos industriais como o sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) e o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2005; SEADER; HENLEY, 2006; TADINI et al., 2016).

Usualmente, esta operação unitária é realizada em contracorrente e ocorre em colunas nas quais podem ser aplicadas a absorção ou *stripping* com o líquido na parede da coluna, similar ao caso da coluna da parede molhada (CREMASCO, 2016) ou utilizando-se a coluna por inteiro, ocorrendo o equilíbrio líquido-vapor (ELV) em toda sua extensão com o auxílio de materiais conhecidos como recheios, que podem possuir forma já conhecida, como os recheios aleatórios, ou serem projetos para processos específicos como os recheios estruturados, conforme elucidada a Figura 1 abaixo.

Figura 1: Exemplo de coluna de absorção e recheios aleatórios e estruturados.



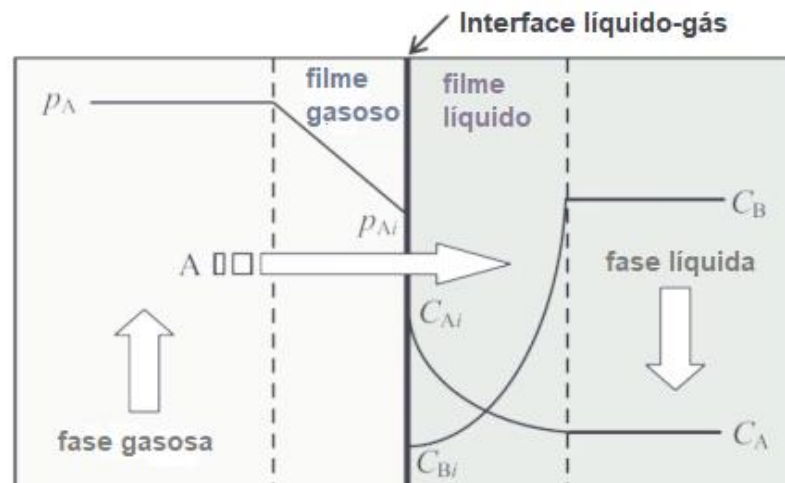
Fonte: TADINI et al. (2016).

O mecanismo governante que descreve a transferência mássica na absorção é a teoria do filme duplo, descrita por Whitman em 1923, conforme a Figura 2 abaixo, na qual em um sistema líquido-gás, o contato de ambas as fases gera uma resistência do gás, denominada  $k_G$  e, similarmemente, uma resistência para o líquido, denominada  $k_L$ . Consideram-se três fases para



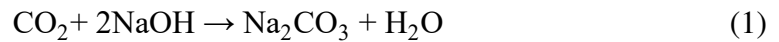
a transferência do soluto, sendo elas: do seio da fase gasosa até a interface; através da área de interação líquido-gás e da interface para o seio da fase líquida. Ademais, há a dependência do tamanho do filme que, conseqüentemente, é dependente da vazão volumétrica que permeará os filmes (CUSSLER, 2009; SCHULZ, 2003).

Figura 2: Exemplificação da Teoria do Filme Duplo.

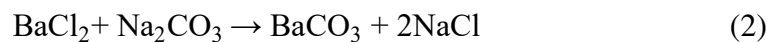


Fonte: Adaptado de CHIKUKWA et. al. (2012)

Deste modo, considerando a absorção reativa de  $\text{CO}_2$  em  $\text{NaOH}$ , a reação química entre a fase líquida e gasosa está disposta na Equação 1:



Para evitar a interferência dos carbonatos na titulação, adiciona-se cloreto de bário,  $\text{BaCl}_2$ , para precipitar os interferentes como carbonato de bário, conforme a Equação 2 a seguir:



O parâmetro deste tipo de sistema é a altura do leito de recheio e neste caso, é necessário levar em consideração o elemento diferencial de altura do reator por ser o local onde ocorre o processo de transferência de massa do soluto. Definindo  $F_g$  ( $\text{mol min}^{-1}$ ) como o fluxo de gás e  $Q_l$  ( $\text{mL min}^{-1}$ ) ao fluxo de líquido,  $b$  o coeficiente estequiométrico,  $y_a$  a fração molar de soluto,  $x_b$  a fração molar do reagente,  $S$  ( $\text{m}^2$ ) a área da seção transversal e  $z$  ( $\text{m}$ ) é altura da coluna. Assumindo que a reação ocorre predominantemente na reação na fase líquida, para a absorção reativa, consideram-se as seguintes equações abaixo:

$$\left( \begin{array}{c} A \\ \text{consumido} \\ \text{do gás} \end{array} \right) = \frac{1}{b} \left( \begin{array}{c} B \\ \text{consumido} \\ \text{do líquido} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{consumo de A} \\ \text{na reação} \end{array} \right) \quad (3)$$

$$F_{gdyA} = -\frac{1}{b} Q_{ldxB} = -ra''SdZ \quad (4)$$

Abaixo está disposta a lei da velocidade para a reação na fase líquida,  $-ra''$  ( $\text{mol min}^{-1}$ ) para reatores de leito de bolha, que são os casos de colunas de absorção. O  $k_{CO_2,1a}$  é o coeficiente de transferência de massa na fase líquida,  $P_{CO_2}$  a pressão do gás,  $H_{CO_2}$  ( $\text{Pa m}^3 \text{mol}^{-1}$ ) a constante de Henry do soluto,  $C_{NaOH}$  ( $\text{mol L}^{-1}$ ) é a concentração de NaOH presente na solução, por fim,  $D_{CO_2}$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) e  $D_{NaOH}$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) são os coeficientes difusivos.

$$-ra'' = k_{1a} \frac{P_{CO_2}}{H_{CO_2}} \left( 1 + \frac{H_{CO_2} D_{NaOH} C_{NaOH}}{b D_{CO_2} P_{CO_2}} \right) \quad (5)$$

Integrando a Equação 4, considerando que o componente A se encontra puro, para calcular o fluxo de  $CO_2$  final, obtêm-se a Equação 6:

$$F_{CO_2 \text{ final}} - F_{CO_2 \text{ inicial}} = \frac{Q_1}{b} (C_{NaOH \text{ inicial}} - C_{NaOH \text{ final}}) \quad (6)$$

De forma semelhante, para calcular o coeficiente de transferência de massa na fase líquida ( $k_{CO_2,1a}$ ), integra-se a Equação 4 utilizando os termos referentes à reação química e B consumido para a reação.

$$Z = \frac{Q}{S} \frac{1}{(k_{1a}) D_{NaOH}} \ln \left( \frac{2D_{CO_2} + H_{CO_2} D_{NaOH} C_{NaOH,1}}{2D_{CO_2} + H_{CO_2} D_{NaOH} C_{NaOH,2}} \right) \quad (7)$$

## MATERIAIS

Balão volumétrico de 2,0 L;

Bomba peristáltica;

Cilindro de  $CO_2$ ;

Erlenmeyers 125 ml;

Fluxômetro;

Módulo didático de absorção (520x60mm);

Pipeta volumétrica;

Tubos de ensaio;

Tubos de ensaio.

## REAGENTES

BaCl<sub>2</sub>, 15 g;

Solução de HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>, 1,0 L;

Solução de NaOH 1,0 mol L<sup>-1</sup>, 6,0 L;

Fenolftaleína 0,1%.

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Figura 3 – Regulador de vazão da bomba.



	Vazão (mL min <sup>-1</sup> )
1	10,00
2	15,00
3	30,00
4	45,00
5	60,00
6	65,00

Fonte: Autoria Própria (2019)

- ✓ Preparar as soluções necessárias para a prática (6,0 L de solução de NaOH 1,0 mol L<sup>-1</sup> e 1,0 L de solução de HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>);
- ✓ Preencher a bureta de 50 mL com a solução de HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>;
- ✓ Abrir a válvula da coluna referente à saída do líquido;
- ✓ Ajustar a vazão na posição correspondente à vazão de 30,0 mL min<sup>-1</sup> e ligar a bomba, deixando a solução de 1,0 mol L<sup>-1</sup> de NaOH circular dentro da coluna;
- ✓ Quando o líquido sair no fundo da coluna, coletar uma alíquota de 10 mL e transferir para um erlenmeyer de 125 mL;
- ✓ Adicionar 2 gotas do indicador fenolftaleína na solução e adicionar previamente à titulação 0,5 g de BaCl<sub>2</sub>;

- ✓ Titular com HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> lentamente com agitação constante até a coloração mudar de rosa para branco (cor resultante da mistura do cloreto de bário na solução). Anotar o volume gasto;
- ✓ Após a coleta no tempo 0, abrir a válvula de gás e ajustar o fluxômetro para 1,0 L min<sup>-1</sup>. Ligar o cronometro no momento em que a válvula de gás for aberta;
- ✓ Coletar as demais amostras em intervalos regulares e repetir o processo de titulação. Sugestão: a cada 2 minutos;
- ✓ Parar o experimento no momento em que o volume gasto começar a se repetir, indicando o final da reação;
- ✓ Finalizado o experimento, deve-se realizar a última etapa que é a lavagem da coluna. Para isso, deve-se substituir a linha de alimentação da bomba por água destilada e deixar passar pela coluna. Obs.: Pingar 2 gotas de indicador fenolftaleína para visualizar se ainda possui NaOH residual na água destilada, desligar a bomba quando o líquido presente não apresentar traços de NaOH.

Conforme a coleta, preencher o seguinte quadro:

<b>Tempo (s)</b>	<b>Volume (mL) gasto de HCl</b>

### **ANÁLISE DOS RESULTADOS**

- ✓ A partir dos dados obtidos, construir as curvas de  $C_A$ ,  $C_B$  e  $X$  (conversão) *versus*  $t$ ;

- ✓ Obter a concentração final de CO<sub>2</sub> e expressar o percentual de remoção de CO<sub>2</sub>;
- ✓ Com base nos dados obtidos, utilizando a Equação 7, calcular o coeficiente de transferência de massa na fase líquida.

Para padronizar a resolução das questões, a Tabela 1 abaixo dispõe dos dados necessários para a resolução dos exercícios propostos.

Tabela 1 – Dados extras para a solução do problema

H(CO <sub>2</sub> )	25000 Pa·m <sup>3</sup> /mol;
D(CO <sub>2</sub> )	1,8·10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s
D(NaOH)	3,06·10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s
P(CO <sub>2</sub> )	101300 Pa

Fonte: FULLY, D'HENI e LINARES (2014)

### REFERÊNCIAS

CHIKUKWA, Actor et al. Dynamic modeling of post-combustion CO<sub>2</sub> capture using amines—a review. *Energy Procedia*, v. 23, p. 82-91, 2012.

CREMASCO, Marco Aurélio. *Fundamentos de transferência de massa*. Editora Blucher, 2016

CUSSLER, Edward Lansing; CUSSLER, Edward Lansing. *Diffusion: mass transfer in fluid systems*. Cambridge university press, 2009.

FULLY, F.; D'HENI, M. B.; LINARES, J. J. Construção de Um Sistema Simples e Econômico para o Estudo da Absorção Reativa em Laboratório. *Revista de Ensino de Engenharia*, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 23–30, 2014.

MCCABE, W.; SMITH, J.; HARRIOTT, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 7th. ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

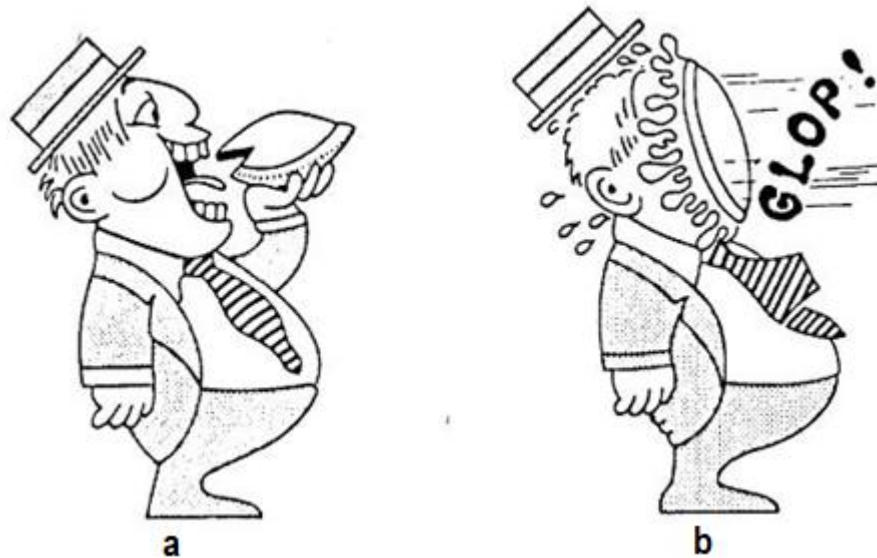
SCHULZ, H. E. *O essencial em fenômenos de transporte*. São Carlos: EESC-USP, 2003.

SEADER, J. D.; HENLEY, E. J. *Separation Process Principles*. 2nd. ed. New York: Wiley, 2006.

TADINI, C. C. et al. *Operações unitárias na indústria de alimentos vol. 2*. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

## APENDICE B - Teste de compreensão

Questão 1) A imagem abaixo refere-se ao clássico exemplo para diferenciar as técnicas de adsorção e absorção.



Fonte: <https://slideplayer.com.br/slide/3318767/>

Conforme seu entendimento da imagem, assinale a alternativa que corresponde aos fenômenos que ocorrem em (a) e (b) respectivamente:

- (a) Absorção e Absorção: Em ambos os casos ocorre um fenômeno de massa, e portanto, acontece por toda a extensão do material e sua superfície diferenciando-se apenas de um caso reativo e um não reativo.
- (b) Adsorção e Adsorção: Em ambos os casos se trata de um fenômeno de superfície, ocorrendo em poros e na superfície propriamente dita, diferenciando-se apenas de um caso reativo e um não reativo.
- (c) Absorção e Adsorção: No primeiro caso trata-se de um fenômeno de massa, ocorrendo em toda a extensão do material. Já no segundo caso trata-se de um fenômeno de superfície, que acontece apenas na superfície e poros do material.
- (d) N.D.A: Nenhum dos casos representa os fenômenos de adsorção e/ou absorção.

Questão 2) A Absorção é uma técnica comumente utilizada na Engenharia Química devido à sua vasta aplicabilidade e alto poder de remoção de solutos. Dentro da coluna, este processo ocorre geralmente por equilíbrio líquido-gás ou líquido-vapor (ELV). A respeito desse sistema, é incorreto afirmar que:

- (a) – Para sistemas com ELV, sempre haverá a absorção, independente da pressão ou temperatura utilizada no sistema.
- (b) – Deve-se optar por modelos de equilíbrios termodinâmicos e escolher o que fornece a temperatura e pressão de operação para que, durante o processo, não se atinja a região monofásica e se interrompa a transferência de massa.
- (c) – O processo de absorção pode ser físico ou químico, ocorrendo por diferença de solubilidade ou envolvendo reações químicas entre as espécies.
- (d) – Em sistemas ELV, a absorção ocorrerá apenas na região bifásica, havendo um limite para esta troca mássica.

Questão 3) Para quantificar o quanto é removido na absorção, utilizam-se de técnicas instrumentais ou métodos analíticos. Como resultado da lixiviação das rochas sedimentares, os íons sulfatos  $\text{SO}_4^{2-}$  encontram-se em grande quantidade na água para consumo industrial. O engenheiro responsável decide utilizar a técnica de absorção com hidróxido de sódio (NaOH) como solvente para resolver este problema. No laboratório, constatou-se que o solvente no final do processo continha alto teor de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , apresentando uma coloração alaranjada. Qual destas opções abaixo deve ser utilizada para quantificar o sulfato de sódio absorvido?

- (a) – Espectrofotometria
- (b) – Análise gravimétrica
- (c) – Potenciometria
- (d) – Titulação volumétrica

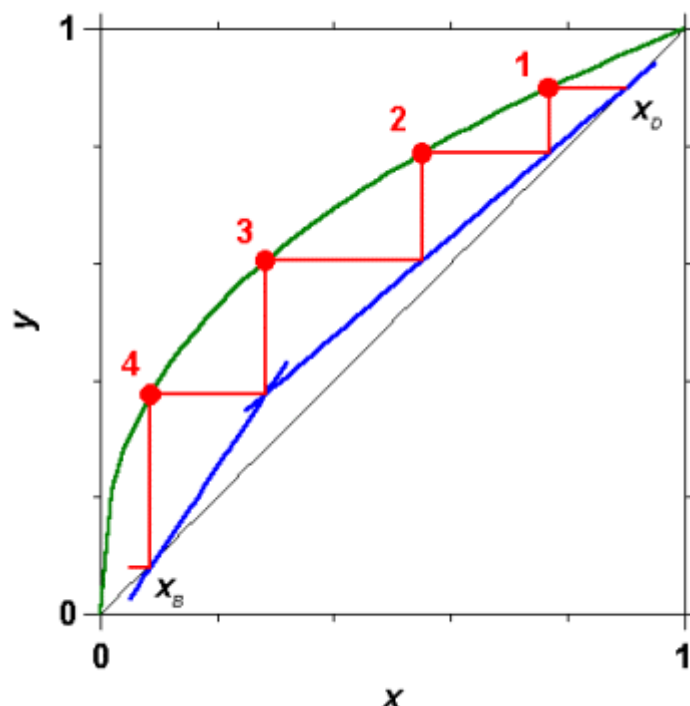
Questão 4) A absorção de gases é comumente realizada em colunas, sejam elas de recheio ou de pratos, similares às popularmente utilizadas na destilação. Tratando-se dos recheios, assinale a alternativa correta:

- (a) – Todos os recheios participam da reação como catalisadores que auxiliam na diminuição do tempo de reação.
- (b) - Os recheios não possuem diferenças entre os variados tipos. Logo, todos os recheios possuem a mesma eficiência.
- (c) – Os recheios são auxiliares inertes para aumentar a área de contato e conseqüentemente a troca mássica.
- (d) – É possível que os recheios interfiram na reação, aumentando o tempo de residência.

Questão 5) A absorção é um processo majoritariamente difusional que pode ser físico ou químico, ocorrendo por diferença de solubilidade ou envolvendo reações químicas entre as espécies. Correlação à absorção física e química é incorreto afirmar que:

- ( ) A absorção física ou absorção não reativa acontece quando o soluto da fase gasosa a ser purificado apresenta solubilidade maior que os componentes presentes na fase líquida.
- ( ) Na absorção física é possível recuperar o solvente e reutilizá-lo no processo.
- ( ) A absorção química ou reativa tem como objetivo minimizar a concentração de soluto por intermédio da reação química na fase líquida, aproximando-a de zero.
- ( ) Na absorção física há um gasto excessivo de energia devido à ausência da reação química e de fatores que acelerem a reação, necessitando de altas temperaturas para realizar a operação.

Questão 6) A imagem abaixo representa um exemplo de equilíbrio líquido-vapor (ELV). Em uma das reuniões da empresa, foi pedido ao engenheiro responsável que projetasse uma coluna de absorção para remover sulfeto de hidrogênio residual do petróleo ( $H_2S$ ) e atingir as legislações vigentes. O engenheiro no dia seguinte apresentou o gráfico ELV utilizando a técnica de McCabe-Thiele para determinar o número de pratos que irão compor a coluna.



Fonte: [http://sites.poli.usp.br/p/luiz.terron/destilacao/4\\_paginas\\_projeto/4\\_1\\_McCabe-Thiele.htm](http://sites.poli.usp.br/p/luiz.terron/destilacao/4_paginas_projeto/4_1_McCabe-Thiele.htm)

- (a) Projetar a coluna de absorção com 4 metros e 2 pratos, pois as linhas vermelhas indicam a altura da coluna e as linhas azuis os números de pratos.
- (b) Projetar a coluna com 4 pratos, pois a linha do 4º prato atinge o valor requerido do produto de fundo.



- (c) Construir uma coluna com 3,5 pratos já que a alimentação está entre 3 e 4.
- (d) Projetar a coluna com um prato único, pois o maior valor de fração na fase líquida e gasosa está presente no primeiro prato atingindo o valor requerido no produto de topo.

Questão 8) Qual é a força motriz da troca mássica?

Questão 9) Quando deve-se utilizar a técnica de absorção?

Questão 10) Você diria que precisou reunir conhecimento de outra(s) disciplina(s) para responder esse questionário? Se sim, quais?

**APENDICE C – Gabarito do teste de compreensão**

Questão 1) (c)

Questão 2) (a)

Questão 3) (a)

Questão 4) (c)

Questão 5) (d)

Questão 6) (b)

Questão 8) Qual é a força motriz da troca mássica?

Foram consideradas corretas as respostas: diferença de concentração; Gradiente de concentração e similares.

Questão 9) Quando deve-se utilizar a técnica de absorção?

Foram consideradas corretas as respostas: Alta solubilidade com o solvente; Lavagem de gases; Retirada de compostos tóxicos ou de interesse;

Questão 10) Você diria que precisou reunir conhecimento de outra(s) disciplina(s) para responder esse questionário? Se sim, quais?

Resposta de cunho pessoal, portanto não há resposta errada ou correta.

## ANEXO A – Orçamento para coluna de absorção multipropósito

132456-BANCADA MULTIPROPÓSITO EXTRAÇÃO- ABSORÇÃO ADSORÇÃO FLUIDIZAÇÃO 01 COLUNA DE EXTRAÇÃO CONTÍNUA LÍQUIDO-LÍQUIDO, PARA ESCOAMENTO CONTRACORRENTE LIVRE, TIPO SPRAY/MICROGOTAS, OU ESCOAMENTO OBSTADO COM RECHEIOS RANDÔMICOS, COM POSSIBILIDADES DE TROCA DE RECHEIOS CONSTRUÍDO COM MATERIAL MISTO [VIDRO E TEFLON] DE DIÂMETRO INTERNO DE 7,0 CM E COMPRIMENTO DE 100 CM COM CAMISA [DIÂMETRO DE 9,5 CM] PARA ISOLAMENTO A VÁCUO, CONTROLES DE TEMPERATURA NAS ALIMENTAÇÕES DAS FASES LEVE E PESADA TOMADAS DE AMOSTRAS NAS ENTRADAS DAS FASES DILUENTE E SO VENTE E SAÍDAS DAS FASES EXTRATO E RAFINADO, E AMOSTRAGEM NA PARTE CENTRAL CONSTRUÍDA DE FORMA MODULAR, PERMITINDO TOTAL MANUSEIO [MONTAGEM E DESMONTAGEM] PARA FACILITAR OPERAÇÕES DE LIMPEZA, BEM COMO, TROCA DE RECHEIOS. ESTA COLUNA É COMPOSTA PELOS SEGUINTE ACESSÓRIOS E PERIFÉRICOS: 01 CONJUNTO DE QUATRO SENSORES DE TEMPERATURA [PT-100], E RESPECTIVOS INDICADORES LOCADOS EM PAINEL ELÉTRICO 02 AQUECEDORES ELÉTRICOS [CONTROLE DE TEMPERATURA PID], COM SERPENTINAS, PARA A FASE LEVE/EXTRATO E PARA A FASE PESADA/RAFINADO, COM POTÊNCIAS ELÉTRICAS DEVIDAMENTE DIMENSIONADAS 02 BOMBAS PERISTÁLTICAS ESPECIAIS PARA SOLVENTES ORGÂNICOS DIVERSOS, COM CONTROLE DE VAZÃO DE 200 A 1.500 ML/MIN 02 AGITADORES/AQUECEDORES MAGNÉTICOS 04 RESERVATÓRIOS DE 50 LITROS, EM POLIETILENO, ADAPTADOS, SENDO 02 DELES MUNIDOS DE TUBOS PESCADORES E INTERLIGADOS NO CIRCUITO DE BOMBEAMENTO DE ALIMENTAÇÃO DA FASE LEVE E OUTRO NA ALIMENTAÇÃO DA FASE PESADA E 02 DELES PARA RECEBIMENTO DE EXTRATO E DE RAFINADO 01 CONJUNTO DE VIDRARIAS NECESSÁRIAS PARA A PRÁTICA DESTA COLUNA 01 CONJUNTO DE REAGENTES QUÍMICOS NECESSÁRIOS PARA A PRÁTICA DESTA COLUNA 01 COLUNA DE ABSORÇÃO LÍQUIDO-GÁS: COLUNA DE ABSORÇÃO COM RECHEIO RANDÔMICO, PREPARADA ESPECIFICAMENTE PARA ABSORÇÃO DE GASES [POR EXEMPLO O DIÓXIDO DE CARBONO [CO<sub>2</sub>]] DE UMA MISTURA GASOSA [AR ATMOSFÉRICO OU SI TÉTICO] UTILIZANDO SOLVENTES APROPRIADOS [SOLUÇÕES AQUOSAS ALCALINAS]. UTILIZA A MESMA ESTRUTURA DA COLUNA DE EXTRAÇÃO, USANDO OS SEGUINTE ACESSÓRIOS E PERIFÉRICOS: 01 CONJUNTO DE QUATRO SENSORES DE TEMPERATURA [PT-100], E RESPECTIVOS INDICADORES LOCADOS EM PAINEL ELÉTRICO 01 AQUECEDOR ELÉTRICO [CONTROLE DE TEMPERATURA PID], COM SERPENTINAS, PARA A SOLUÇÃO DE ABSORÇÃO, COM POTÊNCIA ELÉTRICA DEVIDAMENTE DIMENSIONADA 01 BOMBA PERISTÁLTICA ESPECIAL PARA SOLUÇÕES AQUOSAS ALCALINAS, COM CONTROLE DE VAZÃO DE 200 A 1.500 ML/MIN 02 RESERVATÓRIOS DE 50 LITROS, EM POLIETILENO, ADAPTADOS, SENDO 01 DELES MUNIDO DE TUBOS PESCADORES E INTERLIGADOS NO CIRCUITO DE BOMBEAMENTO DE ALIMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO ABSORVENTE E OUTRO PARA RECEBIMENTO DA SOLUÇÃO FINAL 02 MEDIDORES DE VAZÃO, TIPO ROTÂMETROS: UM PARA VAZÃO DE AR E OUTRO PARA VAZÃO DE CO<sub>2</sub>, PARA SINTETIZAR A MISTURA GASOSA NA CONCENTRAÇÃO DESEJADA 01 CONJUNTO DE VIDRARIAS NECESSÁRIAS PARA A PRÁTICA DESTA COLUNA 01 CONJUNTO DE REAGENTES QUÍMICOS NECESSÁRIOS PARA A PRÁTICA DESTA COLUNA 01 COLUNA DE ADSORÇÃO DE GASES OU VAPORES: COLUNA DE ADSORÇÃO PREPARADA PARA UTILIZAR QUALQUER TIPO DE ADSORVENTE GRANULADO, EM LEITO FIXO, E PARA ADSORÇÃO DE GASES [POR EXEMPLO O CO<sub>2</sub>] E ADSORÇÃO DE VAPORES ORGÂNICOS CONSTRUÍDO COM MATERIAL MISTO [VIDRO E TEFLON] DE DIÂMETRO INTERNO DE 5 CM E COMPRIMENTO DE 30 CM E DE 100 CM COM CAMISA [DIÂMETRO DE 8 CM] PARA ISOLAMENTO A VÁCUO, TOMADAS DE AMOSTRAS NA ENTRADA E SAÍDA DA FASE GASOSA/VAPORE CONSTRUÍDA DE FORMA MODULAR, PERMITINDO TOTAL MANUSEIO [MONTAGEM E DESMONTAGEM] PARA FACILITAR OPERAÇÕES DE LIMPEZA, BEM COMO, TROCA DE MATERIAIS ADSORVENTES. ESTA COLUNA É COMPOSTA PELOS SEGUINTE ACESSÓRIOS E PERIFÉRICOS: 01 CONJUNTO DE DOIS SENSORES DE TEMPERATURA [PT-100], E RESPECTIVOS INDICADORES LOCADOS EM PAINEL ELÉTRICO 02 MEDIDORES DE VAZÃO, TIPO ROTÂMETROS: UM PARA VAZÃO DE AR E OUTRO PARA VAZÃO DE CO<sub>2</sub>, PARA SINTETIZAR A MISTURA GASOSA NA CONCENTRAÇÃO DESEJADA 01 MÓDULO TERMOSTÁTICO DE SATURAÇÃO, CONSTRUÍDO COM MATERIAL MISTO [VIDRO E P.E.] PARA SATURAÇÃO DE AR

R\$103.445,69

## ANEXO B – Respostas dos testes de validação do módulo como ferramenta educacional

ASPECTOS PEDAGÓGICOS	SIM	EM PARTES	NÃO
O módulo didático apresenta objetivos específicos ou proposta educacional.	4	0	0
O módulo trabalha aspectos necessários para atender o objetivo proposto	4	0	0
As atividades são abordadas de forma prática e objetiva, encaixando-se no período em que se encontram os alunos.	3	1	0
Na bancada didática são apresentadas situações que remetem a vida cotidiana ou contexto real, semelhante à realidade industrial ou laboratorial.	4	0	0
As etapas ou situações-problema apresentam mais de uma possibilidade de solução.	2	2	0
O módulo aborda temas transversais.	4	0	0
No módulo é possível trabalhar a interdisciplinaridade.	4	0	0
Há possibilidade de interação entre os alunos, como: troca de experiência ou trabalho cooperativo.	4	0	0
Desperta o interesse do aluno pelo conteúdo trabalhado, de forma inteligente e envolvente.	4	0	0
É desafiador, pois motiva o aluno a resolver as situações propostas.	3	1	0
Estimula a criatividade dos participantes durante as atividades.	4	0	0
Possibilita ao aluno desenvolver estratégias de ação que permite a solução das situações problemas com facilidade.	4	0	0
Ao realizar a prática o aluno nem percebe que está estudando.	2	2	0
O módulo valoriza o desenvolvimento pessoal do aluno ou do grupo.	4	0	0
A bancada didática possibilita a prática dos conteúdos abordados pelo professor em sala de aula	4	0	0
As atividades propostas durante a prática são fidedignas aos conteúdos curriculares.	4	0	0
ASPECTOS TÉCNICOS	SIM	EM PARTES	NÃO
As instruções da prática e do manual estão em português e em consonância com as normas desta língua.	4	0	0
A banca didática é compatível com propósito da disciplina.	4	0	0
O roteiro da prática traz informações de forma simples, objetiva e compreensível.	4	0	0
O módulo didático é suficiente para realização das tarefas propostas no roteiro.	4	0	0
O módulo apresenta sucesso de execução, como por exemplo: é evidenciado o consumo do reagente e é possível quantificar quanto remove-se do soluto.	4	0	0
Ao ler o roteiro da prática, o aluno consegue compreender o que está sendo proposto sem uma intervenção significativa do professor.	4	0	0
O nível de complexidade apresentado está adequado a um período específico na graduação.	4	0	0
OPINIÃO DOS ALUNOS	SIM	EM PARTES	NÃO
Entendi melhor o assunto que foi ensinado na sala de aula.	11	1	0
Enquanto eu realizava a prática o tempo passou que nem percebi.	9	3	0
Vou lembrar do que aprendi na prática quando estiver fazendo atividades em sala de aula que tenham o mesmo assunto.	9	3	0
Pude ajudar meus colegas durante a prática	9	2	1
Achei o módulo interessante, pois teve desafios durante a prática.	9	3	0
Consegui conectar os assuntos que já aprendi durante a graduação com o assunto da prática.	10	2	0
Conseguo visualizar outras aplicações no módulo didático.	9	3	0

### ANEXO C – Respostas dos alunos às perguntas pré-prática

- Objetivas

Questão(1)	Questão(2)	Questão(3)	Questão(4)	Questão(5)	Questão(6)
c	a	a	c	d	b
c	a	d	a	d	b
b	c	a	c	d	b
c	a	a	c	d	b
c	d	a	c	d	b
a	a	a	c	d	b
c	c	d	c	d	b
c	a	c	c	d	b
c	a	d	c	c	b
c	c	d	c	c	b
c	d	a	c	d	b
c	a	d	c	d	b

- Dissertativas

Questão (7)	Questão (8)	Questão (9)
Diferença de concentração	Quando há um equilíbrio líquido vapor de uma mistura, sendo possível absorver um dos componentes em outro solvente útil	Sim. Fenômenos de transporte, operações unitárias e termodinâmica, principalmente
A resistência ao processo	Não sei	Sim operação 3
Concentração gradiente	Quando se quer separar uma mistura com diferença de solubilidade, geralmente gases separar componentes de uma mistura	Sim, operações unitárias, fenômenos de transferência e laboratório op3, fenotran3, termo 1 e 2
Concentração	Não sei	Sim. Op 3
Diferença de concentração	Diferença de concentração	Quando se quer passar um componente de uma fase para outra fase
Diferença de conservação e solubilidade preferencial	Quando a solubilidade contaminante na fase de interesse for superior na fase oposta	Termodinâmica, fenômenos de transferência, operações unitária, química analítica
Diferencial de concentração massica	Ao querer transferir ou diminuir uma concentração	Sim, fenômenos, química, física, operações
Temperatura, ponto de ebulição	Separação	Op3, fenotran3, reatores 2, termo2
Gradiente de concentração	Quando o soluto da fase gás tiver boa afinidade com a solvente	Fenômeno de superfície, fenômenos de transferência 3, química analítica, química orgânica, operações unitárias 3
Gradiente de concentração	Quando a solubilidade do soluto for baixa.	Sim, operações unitárias 3 e fenômenos de transferência de massa
Gradiente de concentração massiva entre os fluidos.	Para separação de compostos, purificação de gases, ou quando se deseja remover um composto que está solubilizado em um fluido.	Sim, termodinâmica, cálculo de reatores, fenômenos de transferência de massa, operações unitárias e química analítica.

## ANEXO D – Respostas dos alunos às perguntas pós-prática.

- Objetivas

Questão(1)	Questão(2)	Questão(3)	Questão(4)	Questão(5)	Questão(6)
c	a	a	c	d	b
c	a	d	a	d	b
c	c	a	c	d	b
c	a	a	c	d	b
c	a	a	c	d	b
c	a	a	c	d	b
c	a	a	c	d	b
c	a	d	c	d	b
c	a	a	c	d	b
c	a	a	a	d	b
c	a	a	c	d	b
c	a	a	c	d	b

### Dissertativas

Questão (7)	Questão (8)	Questão (9)
concentração	para misturas com solubilidades distintas	sim, química analítica, operações unitárias, fenotran, lab
Diferença se concentração	Quando existem substâncias dentro do ELV que podem ser absorvidas por outros componentes, de forma facilitada	Fenômenos de transporte, operações unitárias e termodinâmica, principalmente
gradiente	separar componentes de uma mistura	op3, fenotran3, termo 1 e 2
Diferença de concentração	Remover soluto da fase gasosa ou líquida.	Operacoes, fenômenos, física, química, termo, analíticos, orgânica, etc
diferença de concentração	Quando se quer separar ou recuperar componentes de uma mistura	Termodinâmica, Operações unitárias, Fenômenos de transferência , Química Analítica , Calculo de Reatores
Concentração	Quando tiver um componente em estado líquido, gasoso ou sólido que deseja-se retirar do meio.	Sim, operações 3, fenotran3, termo dois e lab 3
O gradiente de concentração do soluto.	Quando deseja-se separar dois componentes de uma mistura por meio da diferença de solubilidade	Sim. Fenômenos de Transferência de Massa e Operações Unitárias.
O gradiente de concentração do soluto.	Quando se quer separar uma mistura binária contendo 2 fluidos, sendo pelo menos um gás normalmente.	Sim. Fenômenos de transferência de Massa, Operações unitárias, Química analítica instrumental e experimental, conceitos de Termodinâmica
Temperatura, ponto de ebulição	Separação	Op3, fenotran3, termo 2, reatores 2
É a diferença de concentração de substâncias, poder ser medido pelo potencial químico ou pressão.	Não sei responder	Sim operação 3
Diferença de concentração	Quando se quer passar um componente de uma fase para outra fase	Sim termodinâmica fenotran 3 Op.3 química analítica experimental
Diferença de concertação	Quando o soluto da fase gás tiver boa afinidade com a solvente	Op.3 Fenotran 3