

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE APRENDIZAGEM BASEADA
EM PROBLEMAS (ABP) NO ENSINO DE CINÉTICA E REATORES
QUÍMICOS**

Pedro Santana de Castro

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientadora: Prof^ª. **Adriana Paula Ferreira Palhares**

São Carlos – SP

2021

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 06 de abril de 2021 perante a seguinte banca examinadora:

Orientadora: Adriana Paula Ferreira Palhares, DEQ/UFSCar

Convidado: Marcelo Perecin de Arruda Ribeiro, DEQ/UFSCar

Professor da Disciplina: José Maria Corrêa Bueno, DEQ/UFSCar

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que me apoiou e encorajou ao longo de toda minha trajetória de aprendizado e minha vinda para estudar no estado de São Paulo; aos meus bons amigos que estiveram ao meu lado durante os anos de graduação, em especial à Julia, amiga que me deu apoio muito importante durante o período deste trabalho; e à Prof^a. Adriana Ferreira Palhares, pela orientação ao longo de toda a realização deste trabalho de graduação.

RESUMO

As metodologias ativas de ensino desempenham, atualmente, um importante papel de contraponto ao modelo de ensino tradicional, habituado à intensa formação técnica, aulas expositivas e um contexto no qual o estudante é estimulado a apenas ser observador. Com o objetivo de colocar o aluno no centro da aprendizagem, as metodologias ativas surgem como alternativa que estimula um aprendizado desafiador, prático e contextualizado. Desta forma, este trabalho de graduação teve como objetivo a aplicação da metodologia ativa de Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP), ou *Problem-Based Learning (PBL)*, no ensino de Cinética e Reatores Químicos, aplicado em turma do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos. A ABP é um método que consiste na utilização de situações-problemas que simulam situações reais de modo a motivar e direcionar o estudante por um processo de aprendizagem baseado em uma dinâmica de trabalho colaborativa, contextualizada e multidisciplinar. A aplicação deste estudo é estimulada, além de aspectos de melhoria do processo de aprendizagem, pela necessidade de adequação às novas Diretrizes Nacionais Curriculares (DCNs) da Engenharia por parte dos cursos de ensino superior. As novas DCNs, lançadas em 2019, procuram trazer mudanças no formato de ensino e direcionar quais habilidades são importantes para a atual formação de profissionais na engenharia, adequando às novas exigências da atualidade. Para o desenvolvimento deste trabalho de graduação foram criadas situações-problemas que simulavam cenários reais da indústria envolvendo reatores catalíticos com queda de pressão. O trabalho também propôs a avaliação do aprendizado no processo de aplicação da ABP no contexto da engenharia. A disciplina foi ministrada no formato de ensino não presencial emergencial por conta da pandemia da Covid-19. Os resultados da experiência mostraram-se positivos, com as equipes formadas apresentando ótimo desempenho ao longo da disciplina. Todas as equipes desenvolveram resultados consistentes e atingiram os objetivos de aprendizagem para reatores heterogêneos, desenvolvendo os balanços de massa para o sistema em PBR, entendimento de como a queda de pressão no leito atua sobre a reação e sua conversão, além da criação de modelos que permitiram encontrar condições operacionais ótimas para o processo. Além dos aspectos de ensino, notou-se desenvolvimento dos alunos em habilidades socioemocionais, refletidas no bom desempenho do trabalho em equipe.

ABSTRACT

The active teaching methodologies play, currently, an important role as a counterpoint to the traditional teaching model, which is used to the intense technical training, lectures, and a context in which the student is encouraged to be only a spectator of something that is being presented. To place the student at the center of learning, active methodologies emerge as an alternative that encourages challenging, practical, and contextualized learning. Thus, this undergraduate work aimed to apply the active methodology of Problem-Based Learning (PBL), in the teaching of Kinetics and Chemical Reactors, applied in a class of the Chemical Engineering course at the Federal University of São Carlos. PBL is a method that consists of using problem situations that simulate real situations that the professional may face in their daily work, in order to motivate and direct the student through a learning process based on a work dynamic that is collaborative, contextualized, and multidisciplinary. The application of this study is stimulated, in addition to aspects of improving the learning process, by the need for adaptation to the new National Curriculum Guidelines (NCG's) of Engineering on the part of higher education courses. The new NCGs, launched in 2019, seek to bring changes in the teaching format and direct which skills are important for the current training of engineering professionals, adapting to the new requirements of today. For the development of this graduation work, problem situations were created that simulated real scenarios of the industry and processes involving catalytic reactors with pressure drop. The work also proposed the evaluation and discussion of learning factors in the process of applying PBL in the context of engineering. The course was taught in the form of non-face-to-face emergency teaching due to the Covid-19 pandemic. The results of the experiment proved to be positive, with the teams formed showing very good performance throughout the discipline. All teams developed consistent results and achieved the learning objectives for heterogeneous reactors, developing the mass balances for the PBR system, understanding how the pressure drop in the bed acts on the reaction and its conversion, in addition to creating models that allowed to find optimal operational conditions for the process. In addition to teaching aspects, students' development in socio-emotional skills was noted, reflected in the good performance of teamwork.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1.	Curvas de queda de pressão e conversão em função da massa de catalisador para a produção do etileno.	40
Gráfico 4.2.	Avaliação sobre aspectos do processo educacional com a resolução do case em grupo.	42
Gráfico 4.3.	Respostas à questão sobre desafio e motivação oferecidos pela situação-problema.	44
Gráfico 4.4.	Respostas à questão sobre dificuldade em trabalhar com projeto sem definições claras.	44
Gráfico 4.5.	Respostas à questão sobre a comparação entre a metodologia PBL e o formato tradicional de ensino.	45
Gráfico 4.6.	Respostas à questão sobre aprendizado dos conceitos técnicos relacionados a reatores heterogêneos com queda de pressão.	45
Gráfico 4.7.	Respostas à questão sobre desempenho dos membros do grupo.	47
Gráfico 4.8.	Respostas à questão sobre desempenho dos membros do grupo.	47
Gráfico 4.9.	Respostas à questão sobre direcionamentos dados pela orientadora.	48
Gráfico 4.10.	Respostas à questão sobre o acompanhamento feitos pelo monitor da disciplina e pelo tutor-auxiliar da metodologia.	48
Gráfico 4.11.	Respostas à questão sobre o impacto do formato ENPE sobre o projeto.	49
Gráfico 4.12.	Respostas à pergunta de NPS.	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1	Caracterização da ABP.	15
Quadro 3.1	Grupos do teste MBTI (16 personalidades)	26
Quadro 3.2	Método formal baseado nos 7 passos da ABP para resolução do case	29
Quadro 4.1	Respostas à questão sobre dificuldade em trabalhar com projeto sem definições claras.	40
Quadro 4.2	Médias das notas finais de relatório e apresentação para cada grupo do projeto	41

SUMÁRIO

Banca Examinadora.....	i
Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Lista de Gráficos.....	v
Lista de Quadros.....	vi
1- INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	8
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1- O que é ABP e o contexto educacional de sua aplicação.....	10
2.2- Sobre a metodologia ABP.....	12
2.2.1- Fundamentos da ABP.....	12
2.2.2- Caracterização da ABP.....	13
2.2.3- Objetivos educacionais.....	15
2.2.4- Processo de aplicação da ABP.....	16
2.2.5- Situação-problema.....	17
2.2.6- Papel de docência e alunos.....	18
2.3- ABP para a engenharia.....	19
2.4- Novas Diretrizes Curriculares Nacionais.....	20
3- MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1- Contexto da aplicação do método.....	23
3.2- Aplicação para Reatores Heterogêneos.....	23
3.3- Construção da situação-problema.....	24
3.4- Formação dos grupos.....	26
3.5- Estruturação da metodologia PBL.....	27
3.6- Avaliação.....	30
4- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1- Resultados e experiência da aplicação.....	33
4.2- Avaliação da metodologia PBL.....	41
5- CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	49
5.1- Conclusões.....	49
5.2- Sugestões.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
APÊNDICE A - EXEMPLO COMENTADO UA10 – REATORES DE LEITO FIXO (PBR) E QUEDA DE PRESSÃO.....	53
APÊNDICE B – Formulário de Autoavaliação.....	61
APÊNDICE C – Formulário de Avaliação de Desempenho por Pares.....	63
APÊNDICE D - Avaliação do Processo Educacional.....	65
APÊNDICE E – Relatos da Primeira Sessão Tutorial.....	68
APÊNDICE F – Relatos da Segunda Sessão Tutorial.....	76

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Frequentemente discute-se, no meio educacional, uma possível defasagem no modelo de ensino atual adotado pela maioria das instituições de ensino no Brasil. A necessidade de modernização surge quando o mundo traz problemas cada vez mais complexos, multidisciplinares e que exigem habilidades que vão além da aplicação de conceitos e teorias. É neste contexto que as metodologias ativas de ensino são discutidas e experimentadas, a fim de trazer ao aprendizado características que tornem o aluno o centro do processo, estimulem o uso de diversas habilidades e uma formação holística do profissional.

As metodologias ativas de aprendizagem apresentam-se como um contraponto ao modelo de ensino tradicional, caracterizado por aulas expositivas em formato de palestra, nas quais alunos têm maior papel de telespectadores. As metodologias ativas se distanciam deste cenário e se aproximam de uma abordagem mais atual, propondo ferramentas que tornem o ensino mais prático, contextualizado e que abrangem as novas gerações de jovens acostumadas ao mundo mais conectado e multidisciplinar. Esta, inclusive, se torna uma tendência de um mercado de trabalho que exige cada vez mais profissionais que apresentem tais características. A dificuldade constante das instituições de ensino brasileiras em se adaptar à esta nova realidade é algo que cria um *gap* em relação ao mercado e vai contra ao que se espera do ensino superior, ao não formar e estimular novos pensamentos, minando a criatividade dos alunos e reforçando problemas como evasão e deformação profissional (LACERDA e SANTOS, 2018).

Uma das metodologias ativas mais utilizadas e discutidas, há tempos, é a chamada Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP) ou *Problem-Based Learning (PBL)*. Inicialmente concebida para o ensino de medicina na Universidade McMaster (Hamilton, Canadá) em 1969, a utilização deste método mostrou-se eficiente para diversas áreas de conhecimento. A metodologia consiste, basicamente, na utilização de situações-problema para iniciar, direcionar e motivar o processo de aprendizado do aluno. Isso tudo feito de maneira colaborativa, estimulando aspectos de multidisciplinaridade, elaboração de questões, pensamento analítico e trabalho em equipe (RIBEIRO, 2008).

A proposta deste trabalho de graduação é aplicar a metodologia ABP no ensino da modelagem de reatores heterogêneos com queda de pressão, um tópico da ementa da disciplina de Cinética e Reatores Químicos, do Departamento de Engenharia Química da UFSCar, ministrada pela Prof^a Dr^a Adriana Paula Ferreira Palhares. O objetivo do estudo está em compreender como a aprendizagem em grupo orientada pela metodologia impacta no processo de construção do conhecimento por parte dos alunos e consequente desempenho ao final da disciplina.

Para este estudo em questão há um importante fator a ser analisado de maneira secundária: a disciplina foi ministrada ao longo dos meses de setembro de 2020 a janeiro de 2021, período em que o mundo já passava pela crise pandêmica do Covid-19, deflagrada no início do ano de 2020. Dado este contexto, a disciplina em questão foi ministrada de maneira extraordinária no formato de ensino não presencial (ENPE), não característico, até o momento, dos semestres letivos do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos. Desta forma, também coube ao estudo a análise do impacto deste cenário na aplicação da metodologia e o consequente processo de aprendizagem no contexto não presencial.

Para o desenvolvimento deste projeto no formato ABP, serão elaboradas situações-problemas que simulem demandas próximas à realidade de indústrias de processos químicos catalíticos heterogêneos, de forma bastante aberta, levando os alunos a um aprendizado de maneira ativa a partir de perguntas, leituras em livros, discussões, entre outras atividades. Por fim, o trabalho propõe a análise e discussão de fatores de aprendizado neste processo, apresentando resultados da aplicação do ABP no contexto da engenharia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o presente trabalho, foi utilizado como referência para a metodologia de ensino o livro *Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL) – Uma Experiência no Ensino Superior* (2008), do Prof. Luis Roberto de C. Ribeiro. Nesta publicação é explorada a experiência da aplicação do método em turma do curso de Engenharia de Produção em uma universidade pública brasileira, situação semelhante à trabalhada no estudo atual, por também se tratar de um curso de engenharia.

Para melhor explicação do conceito do método, serão abordados nesta revisão bibliográfica: o seu contexto de aplicação no processo de aprendizado no ensino superior; fundamentos nos quais o método é baseado; formas de caracterização do método; objetivos educacionais relacionados à sua aplicação; construção da situação-problema motivadora do ensino; e papel de docente e aluno no processo.

2.1 O QUE É ABP E O CONTEXTO EDUCACIONAL DE SUA APLICAÇÃO

A Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP) – ou *Problem-Based Learning (PBL)* – é uma metodologia de ensino que está presente no campo das chamadas metodologias ativas. Neste formato, o modelo de ensino é desenhado de modo a colocar o aluno no centro do processo de aprendizagem, deixando de ser apenas um receptor de conhecimento para se tornar um agente ativo de seu próprio aprendizado. A ABP (como irá ser chamado ao longo deste trabalho), é um método que surgiu na Universidade McMaster, em Hamilton, Canadá, no fim dos anos 60. Inicialmente desenhado para o curso de medicina, logo essa forma de ensino passou a ser incorporada em outras instituições de ensino superior e para diferentes cursos. O método consiste, resumidamente, na utilização de situações-problemas para motivar e direcionar o processo de aprendizagem, baseado em uma dinâmica de trabalho colaborativa, contextualizada a situações reais e multidisciplinar. (RIBEIRO, 2008)

A necessidade do uso de métodos alternativos em sala de aula é algo latente há muitos anos. Com o processo de aceleração da globalização, constante troca de informações e problemas cada vez mais complexos na sociedade atual, nota-se a importância de uma formação mais holística de profissionais – capazes de se adaptar de maneira ágil e unir conhecimentos de diversos campos.

Neste aspecto, é relevante falar sobre a importância do desenvolvimento de *softs kills* – habilidades comportamentais relacionadas à interação com outras pessoas. Segundo Daniel Goleman, autor do livro *Inteligência Emocional* (1996), habilidades como empatia, comunicação, colaboração e resiliência são as responsáveis por distinguir profissionais incríveis de profissionais medianos. Ainda segundo Goleman, existe uma lacuna entre o que é esperado pelas lideranças do mercado de trabalho e o que de fato recém-formados podem oferecer, e na maioria das vezes essa lacuna é justamente habilidades socioemocionais.

Segundo Schulz (2008), em artigo sobre a importância de *soft skills* no meio acadêmico, a incorporação de momentos para desenvolvimentos dessas habilidades é um método bastante eficaz para alcançar uma forma mais atrativa de ensino. Considerando que habilidades pessoais cumprem papel fundamental na formação do indivíduo, Schulz afirma que é de grande importância que cada aluno adquira essas habilidades durante o ensino superior, além do conhecimento acadêmico ou técnico. Em relação ao mercado de trabalho, além da lacuna gerada pela falta de habilidades socioemocionais citadas por Goleman, Schulz também afirma que existe um déficit de conhecimentos mais práticos em meio aos recém-formados, como conhecimento de negócios e de gerenciamento de projetos.

Brata e Mahatmaharti (2020), em estudo sobre a implementação da metodologia ABP para desenvolvimento de *soft skills* de estudantes, trabalharam a partir do uso de análises de dados o entendimento sobre o impacto da metodologia na aplicação de estudo de caso em comunidade rural. Os resultados mostram que os estudantes, além de compreenderem o material do curso de maneira contextualizada e se mostraram hábeis em coleta de dados qualitativos, também desenvolveram *soft skills* em relação a habilidades de comunicação junto à comunidade, forma de pensar crítica, criativa e lógica, capacidade de resolução de problemas em equipe e ética interpessoal e de trabalho. Brata e Mahatmaharti ainda citam que este desenvolvimento se mostrou uma forma eficaz de fortalecer os alunos para a realidade trazida pela indústria 4.0 ao desenvolver os chamados de *4 Cs*: pensamento crítico, criatividade, comunicação e habilidades de colaboração – traduzindo do inglês.

Dado este contexto, a importância de conhecer e testar novos métodos de ensino no meio acadêmico se torna cada vez mais relevante. O uso de metodologias ativas, como a ABP, vem justamente para preencher as lacunas anteriormente citadas.

O diferencial do uso da ABP está na forma como seu modelo estimula o aluno através de diversos aspectos a trazer o objeto de estudo para o campo real. Ou seja, durante o processo, o aluno é estimulado (pelas atividades propostas) a desenvolver pontos relacionados a trabalho em equipe, liderança, tomada de riscos e análise de problemas multidisciplinares, que fogem do método tradicional de ensino e aproxima a aprendizagem de uma experiência real, semelhante ao do mercado de trabalho.

2.2 SOBRE A METODOLOGIA ABP

2.2.1 Fundamentos da ABP

A ABP é uma metodologia que já foi bastante adotada desde sua origem, em diferentes contextos, lugares e áreas do conhecimento. Com isso, existem diferentes vertentes e variações para o método, o que faz com que seja importante definir alguns fundamentos básicos que caracterizam a ABP. Uma importante fonte para a definição desses fundamentos está no trabalho de John Dewey (PENAFORTE, 2001), filósofo e pedagogo que deu origem ao conceito de aprendizagem autônoma, além dar base a definições relacionadas à utilização de problemas como início do processo de aprendizagem. Em sua obra, Dewey ressalta a importância do aprendizado como resposta a eventos da vida real.

Segundo Ribeiro (2008), a partir de definições de Dewey e outros teóricos da ABP, os principais princípios de aprendizagem que constroem a base da metodologia podem ser resumidos como:

1. Motivação epistêmica – motivação intrínseca a cada indivíduo que faz com que cada pessoa procure conhecer melhor o mundo;
2. Interação com a vida real;
3. Metacognição – conhecimento sobre o próprio processo cognitivo, habilidade que permite a percepção e o controle da jornada pessoal de aprendizagem;
4. Construção do conhecimento;
5. Interação social.

Levando estes conceitos em consideração, a ABP se torna uma metodologia relacionada à psicologia cognitiva, onde se entende que o processo de aprendizado deve ser encarado como a construção de novos conhecimentos, e não apenas um processo de recepção de conteúdo. Enquanto metodologia, a ABP traz a visão de que o conhecimento prévio sobre o assunto é importante, principalmente para análise e compreensão inicial do problema, mas que é preciso existir pontos desconhecidos que forcem que os alunos elaborem ativamente o conhecimento – através de discussões em grupo durante o processo (RIBEIRO, 2008).

Ainda no campo da psicologia cognitiva, o método traz a ideia de que o aprendizado vindo de sua aplicação estimula a capacidade de associar os conhecimentos aprendidos a futuros contextos semelhantes. Ou seja, acredita-se que o conhecimento adquirido através da ABP apresenta maior facilidade de ser acessado na memória quando a pessoa for colocada em situações parecidas ao problema estudado (RIBEIRO, 2008).

Pode-se citar, ainda, a importância da chamada metacognição no processo, que é a capacidade de compreender e autorregular o processo de aprendizagem que cada indivíduo pode trabalhar em si mesmo. A ABP favorece essa percepção ao estabelecer perguntas e missões claras que o grupo de alunos precisa responder, como por exemplo: se o contexto inicial do problema foi bem entendido; qual serão os objetivos do problema; ou qual estratégia será adotada para resolução. A partir da discussão em grupo e do constante questionamento sobre o projeto, acredita-se que os alunos podem explorar melhor as diferentes visões sobre aquela situação, desenvolvem maior poder de análise e melhor assimilariam o conhecimento.

2.2.2 Caracterização da ABP

Torna-se importante definir quais são os aspectos que caracterizam a metodologia ABP, uma vez que várias atividades no meio educacional podem ser trabalhadas a partir de problemas. Para que haja, de fato, a existência e aplicação da ABP é necessário que uma primeira condição seja atendida: a situação problema precisa ser usada para iniciar, direcionar e motivar o processo de aprendizado – desde o princípio. Essa definição apresenta importante diferença em relação a outras atividades nas quais são usados problemas, mas que eles aparecem em um contexto de exemplificação após uma introdução teórica. Na ABP o problema é o início de tudo e vai motivar o projeto até o fim.

Segundo Hadgraft e Prpic (1999), há cinco elementos essenciais para a aplicação da ABP:

1. Colocação de problemas;
2. Integração de diversas disciplinas no problema;
3. Trabalho em grupo;
4. Estabelecimento de um processo formal para resolução do problema;
5. Estudo independente por parte de cada aluno.

Dadas estas características, a ABP ainda pode sofrer algumas variações, de acordo com algumas características que ele pode ou não apresentar. Por exemplo, caso após a resolução do problema os alunos sejam orientados a retornar à situação inicial e reavaliar como poderiam ter atuado melhor sobre o problema com base no que aprenderam, temos a chamada *ABP reiterativa*. Também há variações de acordo com o formato de aplicação. Inicialmente concebida para ser adotada em todo um currículo, com o tempo tornou-se comum a aplicação do método em apenas um período específico do curso, ou até uma única disciplina. Inclusive, também há exemplos da utilização pontual da ABP, em uma parte específica de uma disciplina baseada em aulas expositivas tradicionais. Este último formato se chama *post-holing* e é o que mais se aproxima do que foi aplicado neste estudo de caso. Embora as aulas deste estudo não possam ser caracterizadas como expositivas tradicionais (metodologias como sala de aula invertida e “Instrução entre Pares” associada ao uso do aplicativo *Nearpod* foram aplicadas em todo o curso), aplicou-se o método ABP nesta única disciplina do curso e apenas em um tópico dela.

Hadgraft e Prpic, ainda, sugerem uma classificação para a ABP analisando cinco diferentes fatores: quantidade de problemas; interdisciplinaridade; trabalho em grupo; solução do problema; e autonomia da aprendizagem. Essa classificação é mostrada no Quadro 1.

Quadro 2.1. Caracterização da ABP.

Nível	Quantidade de problemas	Interdisciplinaridade	Trabalho em grupo	Solução do problema	Autonomia da aprendizagem
1	Mais de um problema por semana.	Nenhuma ou quase nenhuma integração de diferentes conceitos.	Individual.	Não há método formal para resolução do problema. Alunos se concentram apenas para solucioná-lo.	Professor oferece todo conteúdo via aula ou materiais. Alunos focam em aprender o que foi dado.
2	Um problema por semana.	Alguma integração de conceitos.	Alunos desenvolvem junto em sala de aula, mas entregam projetos individualmente.	Há método formal de solução de problema aplicado durante as aulas.	Professor passa boa parte do conteúdo, mas espera que os alunos busquem alguns detalhes de forma independente.
3	Mais de um problema por semestre, cada um durando algumas semanas.	Integração significativa de diferentes conceitos e habilidades.	Trabalho desenvolvido e entregue em grupos, porém sem avaliação por pares.	Há método formal de solução de problema, orientado por tutores em aulas tutoriais.	Professor fornece livro-texto da disciplina como base, mas espera que os alunos pesquisem em outras fontes.
4	Um problema por semestre.	Muita integração, possivelmente incluindo mais de uma área de conhecimento.	Trabalho em equipe, com encontros externos, entrega em conjunto e avaliação por pares.	Há método formal de solução de problema e os alunos aplicam esse método sozinhos.	Professor fornece pouco ou nenhum material, no máximo algumas referências. Alunos devem buscar suas fontes para entendimento do problema.

Fonte: adaptado de Ribeiro (2008).

A classificação do Quadro 2.1 foi usada como base para estabelecer o formato da ABP adotado neste trabalho de graduação. Nesta tabela, Hadgraft e Prpic sugerem não só o modelo ideal de ABP (no qual todos os fatores são trabalhados no nível 4), mas também uma forma de entender o nível de profundidade que é aplicado em cada experimento em sala de aula e criar um modelo de transição até a ABP ideal. Os autores acreditam que nem sempre adotar o modelo ideal seja o mais recomendado para todos os docentes, e sim que deve haver um entendimento do que se deseja aplicar e adaptar à realidade do momento. É importante destacar que os níveis não são correlacionados, portanto pode-se ter uma aplicação que segue o modelo [2, 3, 1, 4, 2], por exemplo.

2.2.3 Objetivos educacionais

Segundo Ribeiro (2008), a aplicação da metodologia ABP segue os seguintes objetivos educacionais:

1. Aprendizagem ativa: aspecto relacionado à utilização de perguntas para direcionar a solução e a consequente busca por respostas;
2. Aprendizagem integrada: relacionada a necessidade de conectar diferentes subáreas do conhecimento e habilidades para a resolução;
3. Aprendizagem cumulativa: busca por oferecer situações e problemas sequenciados e cada vez mais complexos, onde o conhecimento adquirido anteriormente será importante para o próximo passo;
4. Aprendizagem para a compreensão: relacionada ao estímulo constante para se rever o problema, refletir sobre a solução, receber e dar *feedbacks* e praticar o conhecimento que foi aprendido.

Além destes aspectos, como já mencionado anteriormente, o método promove o desenvolvimento de habilidades socioemocionais, como flexibilidade na resolução de problemas, adaptabilidade a situações adversas, comunicação e trabalho em equipe, melhoria contínua e pensamento crítico. Desta forma, espera-se alcançar um nível de aprendizado completo, com a formação de profissionais com visão holística sobre os problemas.

2.2.4 Processo de aplicação da ABP

Para a aplicação da ABP é necessário que a estruturação da aplicação do método seja realizada de forma a fazer com que os alunos passem por alguns passos importantes. Dewey definiu essas fases de experiência do aluno da seguinte forma (RIBEIRO, 2008):

1. Perplexidade frente a uma situação-problema;
2. Tentativa de interpretação da situação;
3. Exploração e análise de cada fator do problema para buscar esclarecê-lo;
4. Reelaboração das hipóteses inicialmente realizadas a fim de refinar os principais questionamentos;
5. Aplicação das hipóteses feitas a partir da ação na realidade e verificação de suas consequências.

Ou seja, para este processo deve ser estimulado que os alunos passem pelas etapas de receber as novas informações, assimilar e analisar a partir de seus conhecimentos prévios e se questionar de maneira crítica sobre os entendimentos desenvolvidos a partir da criação e validação de hipóteses. Agora, de maneira prática e resumida, propõe-se que a aplicação da metodologia discorra através das seguintes ações que os alunos devem tomar:

1. Conhecer o problema a fundo, debater, criar hipóteses e fazer perguntas;
2. Identificar quais pontos eles não possuem conhecimento;
3. Recorrer a materiais de ensino e priorizar o que é necessário conhecer para resolução do problema;
4. Compartilhar o conhecimento adquirido nos estudos individuais, a fim de que todos do grupo estejam à par das novas descobertas;
5. Solucionar o problema.

Segundo Ribeiro (2008), os passos acima podem ser considerados os pilares da metodologia ABP, independente do formato de implantação e da abordagem escolhida.

2.2.5 Situação-problema

Para a boa aplicação do método, é imprescindível uma boa estruturação da situação-problema motivadora para o projeto. Este problema que é apresentado inicia, norteia e motiva todo o percurso. Além disso, também é importante destacar que a forma com que este problema é construído irá definir o nível de profundidade e o conteúdo que se espera ser trabalhado para aquele momento do ensino. Portanto, para cumprir os objetivos educacionais esperados existem aspectos que são importantes de serem seguidos nessa construção.

Em primeiro lugar, é importante que a situação-problema a ser apresentada simule (ou realmente seja) um problema real, com a complexidade e as lacunas que qualquer problema real apresenta. Assim, alguns aspectos devem ser atendidos (RIBEIRO, 2008):

- A estruturação do problema deve indicar para uma solução não conhecida;
- É importante que o problema seja interessante e relevante para o contexto adotado, estimulando a procura de como melhorar um processo ou a melhor forma de construir algo, por exemplo;
- Necessariamente o problema precisa levar a um fim aberto, ou seja, não existe apenas uma resposta certa – e sim àquelas que se adequam às restrições e

exigências colocadas na situação;

- O problema precisa contemplar uma situação que possa ser passada na vida real daquele profissional, e de preferência que tenha um impacto relevante – como por exemplo, afetar um número grande de pessoas ao a produção de uma grande indústria;
- A complexidade deve ser minimamente condizente com o conhecimento prévio dos alunos;
- É interessante trazer aspectos que abranjam o conhecimento de várias disciplinas e o uso de diferentes habilidades;
- Apresentar um emaranhado de questões e subquestões que devem ser destrinchadas ao longo da resolução.

Ou seja, a criação da situação-problema deve ser cuidadosamente preparada para oferecer a motivação e condições ideais para direcionar, mas ao mesmo tempo precisa de uma estruturação relativamente fraca a ponto de deixar diferentes caminhos que podem ser seguidos para investigá-la e que estes caminhos mudem à medida que se adquire novos conhecimentos. Além desses pontos, é importante entender que diferentes contextos educacionais e de áreas de conhecimento exigirão adaptações a este modelo.

2.2.6 Papel de docência e alunos

Para a boa realização da ABP também é importante falar sobre o papel de professores e alunos ao longo do processo. Atualmente, no contexto educacional tradicional brasileiro, esses agentes estão habituados ao modelo de sala de aula expositiva, no qual o aluno tem papel mais passivo, enquanto professores estão habituados ao papel de palestrantes e transmissores de conhecimento. Então, para o contexto de uma metodologia ativa, é importante que ambos tenham noção de seu papel e assumam alguns compromissos (RIBEIRO, 2008).

Observando pelo lado dos alunos, entende-se que para a aplicação da ABP é importante que eles façam parte ativamente da determinação das oportunidades de aprendizagem. Ou seja, os alunos devem assumir a autoridade e a responsabilidade sobre seu próprio aprendizado. E para isso, é fundamental que essa responsabilidade lhes seja delegada. Dito isso, existem tarefas que os alunos devem seguir ao longo do processo, como explorar o problema e levantar hipóteses; identificar o que não sabem; priorizar o que devem estudar; planejar e delegar, dentro de seu grupo, as atividades para resolução do problema; compartilhar os aprendizados com seus pares; e por fim ter avaliação crítica sobre o processo e sobre seu próprio caminho de desenvolvimento e aprendizado.

Dessa forma, o papel da docência perpassa por, idealmente, direcionar que os alunos passem pelos pontos citados e entendam sua responsabilidade no processo – se torna um papel muito mais de facilitação do que de transmissão de conhecimento. Para isso, um recurso importante de ser utilizado é a interação a partir de perguntas norteadoras, desde um simples “Por quê?” à pergunta “Como você sabe se isso é verdadeiro?”. Além disso, cabe ao professor, aqui com um papel maior de orientador, garantir a aplicação do método e estar presente como pessoa a ser consultada.

2.3 ABP PARA A ENGENHARIA

Como já citado anteriormente, a ABP nasceu como um método para o ensino de medicina – e até hoje amplamente utilizado neste curso. Contudo, com o tempo, a metodologia foi difundida para outras áreas de conhecimento. Ao chegar na engenharia, foi importante entender particularidades da área e adaptar a ABP para tal.

Naturalmente, para a engenharia, os problemas utilizados na ABP necessitam de mais informações e especificações. Além disso, nota-se que problemas na área tendem a apresentar soluções mais longas, complexas e que envolvem um projeto ou a construção de algo (como modelagens, plantas etc.). Dessa forma, esses aspectos fazem com que a ABP para a engenharia também seja chamada de *Project-Based Learning*, ou seja, aprendizado baseado em projetos (RIBEIRO, 2008).

Fatores relacionados à complexidade do processo também tornam a sua gestão, por parte do docente, ainda mais vital. Todas as variáveis envolvidas, como recursos do projeto, limitações e restrições, equações matemáticas e integração de tecnologias faz que o cuidado e o acompanhamento durante a metodologia por parte do professor ganhem bastante importância. Em questões pedagógicas e acadêmicas, nota-se que para construir-se o cenário ideal para tal, além da atuação do docente, também é necessário apoio da própria instituição de ensino superior, para garantir as questões relacionadas a interdisciplinaridade do projeto e consequente eficiência do aprendizado (MASSON et al., 2012).

Oleagordia (2014) estudou a experiência de implementação da ABP em turmas de engenharia da Universidade do País Basco, na Espanha. Nesta aplicação, o objetivo foi planejar, implementar e avaliar o método colaborativo de aprendizagem aplicado para projetar e testar o funcionamento de um sistema de carregamento utilizando energia solar – um bom exemplo da ABP para avaliar sua efetividade no campo da engenharia. Após aplicação, o estudo mostra que alunos mais estimulados ao uso da ABP obtiveram desempenho 13,3% superior àqueles mais acostumados ao método de ensino tradicional. Segundo o estudo, seus resultados foram úteis para orientar como adaptar na universidade uma nova forma de aprendizagem que visa colaborar para que seus alunos alcancem novas competências. É citado ainda que a aplicação do método não foi uma tarefa fácil, pois, em sua maioria, os estudantes não estão habituados a trabalharem em conjunto e professores também estão acostumados a estimular o aprendizado individual, se tornando assim um processo de aprendizagem tanto para estudantes quanto para a docência. Oleagordia reforça que implementar a aprendizagem colaborativa requer esforço, consistência e continuidade, uma vez que essa é uma estratégia ainda pouco utilizada. Contudo, a partir de experiência e da avaliação realizada pelos estudantes, os objetivos de ensino propostos foram devidamente alcançados (OLEAGORDIA, 2014).

Outro estudo de caso da aplicação de ABP para a engenharia foi realizado por Garcia-Robles et al. (2009), ao estudar a experiência na Universidade de Sevilha, na Espanha, para a engenharia de computação. São analisados os resultados do projeto no contexto de seu design e aplicação para a arquitetura de sistemas, com o objetivo de inovar as práticas de ensino em uma aprendizagem mista.

Os resultados da aplicação e da aprendizagem dos estudantes foram mensurados a partir de um exame realizado e a comparação entre as notas de alunos que aprenderam o assunto através da ABP e de alunos que aprenderam por meio do modelo tradicional de ensino. Os resultados mostram que 43,9% dos estudantes do modelo tradicional reprovaram no teste, enquanto apenas 22,7% daqueles que aprenderam por ABP falharam. No outro extremo da avaliação, apenas 3,2% dos alunos do modelo tradicional apresentaram nota excelente, enquanto 13,6% dos alunos da ABP obtiveram excelência. Garcia-Robles et al. Ainda apontam que os estudantes da ABP aceitaram o modelo de forma natural e avaliaram um método de forma muito positiva. É citado ainda que a experiência ajudou estes alunos a desenvolverem competências que os ajudam a prever e contornar desafios da executabilidade de projetos a serem realizados (GARCIA-ROBLES, et al., 2009).

2.4 NOVAS DIRETRIZES CURRICULARES NACIONAIS

Um último aspecto a ser analisado para a importância da aplicação de metodologias ativas no ensino de engenharia está nas novas Diretrizes Curriculares Nacionais, as chamadas DCN's. As DCN's têm como principal função definir os princípios, meios e objetivos relacionados ao ensino da Engenharia nas Instituições de Ensino Superior (IES) nacionais. As novas DCN's dos Cursos de Engenharia, lançadas em 2019, procuram trazer mudanças nas metodologias de ensino e direcionar quais habilidades e conteúdos são importantes para a atual formação de profissionais na engenharia, adequando às novas exigências da atualidade (ABMES, 2019).

No artigo 3º da nova resolução, é citado que o perfil esperado do egresso deve compreender habilidades relacionadas à visão holística e humanista sob problemas, além de capacidade crítica, colaborativa e criativa. Voltando a análise da engenharia para o contexto do mercado de trabalho, as novas DCN's apontam a necessidade do egresso apresentar habilidades empreendedoras, sendo capaz de reconhecer necessidades do mercado e conjunturas multidisciplinares envolvidas nos problemas propostos. (ABMES, 2019).

Com estas indicações para o perfil do engenheiro, em seu artigo 6º, as novas DCN's propõem que o Projeto Pedagógico do Curso, o chamado PPC, para os cursos de graduação em engenharia devem contemplar atividades que estimulem e criem o contexto ideal para que o egresso atinja o perfil esperado. Ou seja, crie mecanismos que, além da formação técnica, desenvolvam as diferentes habilidades exigidas pelo profissional da engenharia nos dias atuais (ABMES, 2019).

De maneira geral, alguns dos destaques e novidades destas novas orientações são (ABMES, 2019):

- Importância de adequação do currículo para acrescentar momentos de aprendizado relacionados à solução de problemas de engenharia e empreendedorismo;
- Aplicação de estudos multidisciplinares;
- Inserção de conteúdos e metodologia que incentivem pesquisa e soluções de problemas reais de engenharia;
- Adequação de metodologia de ensino que busque integrar mais o campo teórico à prática, com a interdisciplinaridade nos problemas de engenharia e uso de metodologias ativas.

O capítulo VI da nova resolução indica, ainda, que os cursos de engenharia devem aplicar as indicações das novas DCN's em até 3 anos após seu lançamento, ou seja, abril de 2022. Este cenário exige que as IES e cursos de engenharia busquem, de maneira ágil, mecanismos que garantem tais adequações, que passam por PPC, ementas, formação de docentes e estrutura.

Analisando as principais saídas mencionadas, nota-se mais uma vez a importância de olhar para o atual sistema educacional e procurar métodos que garantam que a aprendizagem seja mais prática e se aproxime do campo profissional – algo que as metodologias ativas como a ABP sugerem a partir de suas aplicações. Tal necessidade comprova a importância de novos estudos e aplicações na área da aprendizagem ativa, de modo que as IES e os cursos aprendam a criar, de maneira gradativa, planos de ensino cada vez mais híbridos e que contemplem a formação holística esperado para o engenheiro.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta deste trabalho de graduação é estruturar e aplicar a ABP para uma turma de engenharia química. Neste capítulo serão explorados a estruturação do método, como foi desenhada a aplicação com a turma e os aspectos da engenharia química envolvidos.

3.1 CONTEXTO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO

O experimento da ABP que foi trabalhado neste projeto foi aplicado a uma turma de Cinética e Reatores Químicos, do Departamento de Engenharia Química da UFSCar, durante novembro de 2020 a janeiro de 2021. A proposta do projeto foi trabalhar o ensino de reatores heterogêneos, parte final da disciplina, a partir de uma situação-problema nos moldes da ABP. A turma trabalhada tinha 36 alunos, além de contar com a professora como orientadora da metodologia, o aluno responsável pelo trabalho de graduação como tutor auxiliar, além de um monitor que auxiliou a turma ao longo da disciplina.

Para a estruturação do método foi utilizado como texto base o livro *Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL) – Uma Experiência no Ensino Superior* (2008), do Prof. Luis Roberto de C. Ribeiro, que relata e discute a aplicação do método em uma turma de engenharia.

Além da própria aplicação do método, também foi analisado e avaliado o contexto de ensino não presencial (ENPE) no qual a disciplina foi ministrada, uma vez que se tratou de uma situação atípica anteriormente para tal disciplina.

3.2 APLICAÇÃO PARA REATORES HETEROGÊNEOS

O tópico de reatores heterogêneos com queda de pressão foi planejado para ser trabalhado no final da disciplina de Cinética e Reatores Químicos. Neste, o foco é entender e modelar o funcionamento de reatores tubulares de leito fixo/recheado, também chamados de *Packed Bed Reactors* (ou, como será chamado daqui para frente, reatores PBR), ideais e isotérmicos.

O reator PBR apresenta como principais características a presença de catalisadores sólidos no interior do reator que, ao trabalharem com o processo de absorção ou adsorção dos agentes presentes na reação de fase gasosa, funcionam de modo a promover a reação com maior velocidade. Este tipo de reator trabalha principalmente em reações gasosas. Por existir a presença de partículas sólidas ao longo da reação gasosa, esse processo recebe o nome de heterogêneo. Dado este contexto, ao longo do reator é gerada uma diferença de pressão entre a base e o topo da coluna, o que diminui a velocidade de reação e precisa ser considerada em sua modelagem (FOGLER, 2009) – este é o aspecto “novo” para os alunos, que até então na disciplina trabalharam apenas com reatores sem queda de pressão.

O objetivo do trabalho é promover o aprendizado do funcionamento e modelagem dos reatores PBR a partir da metodologia ABP, apresentando um problema no qual era preciso compreender as variáveis envolvidas no processo e como elas se relacionam. Analisando os objetivos de ensino descritos no tópico 2.2.3, busca-se direcionar o trabalho dos alunos para que eles aprendam de forma ativa, integrada, cumulativa e buscando compreensão a cada passo dado durante a solução. Ou seja, o estudo das variáveis envolvidas do estudo de reatores heterogêneos visa direcionar as perguntas que devem ser feitas, trazer aspectos que os alunos já aprenderam em momentos anteriores do curso e estimular a aprendizagem de novos conceitos particulares para o PBR.

Por fim, cada grupo precisa modelar seu próprio sistema para um processo em reator heterogêneo, ideal e isotérmico. As principais variáveis envolvidas e que precisaram ser exploradas pelos alunos foram (FOGLER, 2009):

- Velocidade do fluido;
- Pressão aplicada;
- Distância percorrida (altura);
- Viscosidade e densidade do fluido;
- Diâmetro das partículas e esfericidade;
- Porosidade do leito.
- Conversão da reação em função das demais variáveis.

3.3 CONSTRUÇÃO DA SITUAÇÃO-PROBLEMA

Como citado no tópico 2.2.5 deste trabalho, a estruturação da situação-problema, também chamada de *case* ao longo do processo, é de extrema importância para a boa aplicação da metodologia. Para a criação deste *case* foram considerados alguns aspectos importantes, como o direcionamento para a modelagem de reatores catalíticos com queda de pressão, apresentação de fatores reais da indústria química, dados de mercado e uma abertura suficiente para que os alunos se deparassem com um problema desafiador e com lacunas para desenvolvimento e elaboração das primeiras hipóteses.

Ainda, para a construção dos *cases*, foram definidos termos desconhecidos (novos) para os alunos que deveriam ser introduzidos pelo problema, a fim de guiar a busca pelos objetivos de aprendizagem. Estes termos e conceitos foram:

- Reatores de Leito Fixo (*Packed Bed Reactors* - PBR);
- Leito de recheio com partículas de catalisador;
- Porosidade da partícula;
- Granulometria;
- Queda de pressão;
- Processos químicos catalíticos heterogêneos e dados de processo para reator heterogêneo.

Com a temática de reatores PBR, que apresentem reações catalíticas e gasosas, cada grupo recebeu um *case* com uma reação química industrial distinta:

1. Produção de Óxido de Etileno;
2. Síntese da Amônia;
3. Síntese do Metanol;
4. Produção de Etileno;
5. Produção de Formaldeído;
6. Produção de Anidrido Maleico.

O *case* trabalhado pelo primeiro grupo encontra-se no tópico 4 deste trabalho de graduação. Para os demais *cases*, mudou-se apenas o produto – cada grupo trabalhou com uma produção diferente, seguindo a divisão acima – e dados de mercado.

3.4 FORMAÇÃO DOS GRUPOS

Para a formação dos grupos, segundo Ribeiro (2008), é interessante analisar diferentes habilidades que cada membro possui, a fim de criar equipes heterogêneas. Essa maneira de criar grupos, além de evitar a formação de “panelas”, também estimula a troca de experiências, a criação de diferentes pontos de vistas sobre o mesmo problema e a formação de conflitos durante a discussão, o que é enriquecedora para o processo. Desta forma, como parâmetro para a divisão, foi adotada a metodologia MBTI – ou *16 personalidades* (16Personalities, 2021).

O MBTI é um teste de personalidade mundialmente conhecido amplamente utilizado no meio corporativo. Esse teste funciona como uma ferramenta para identificação de características e preferências pessoais, traçando assim perfis psicológicos. No teste existem quatro fatores com duas classificações cada que são determinados a partir das respostas da pessoa que o estiver realizando: Introverso ou Extroverso (I-E); Sensorial ou Intuitivo (S-N); Racional ou Sentimental (T-F); e Julgador ou Perceptivo (J-P). Combinado as quatro letras que são determinadas pelo teste de cada pessoa, existem no total 16 tipos de personalidades onde cada um pode ser encaixado. Considerando as 16 personalidades, existem ainda quatro grupos (com quatro tipos de personalidades cada) com maiores afinidades que podem ser colocados em conjunto com personalidades semelhantes, como pode-se notar no Quadro 3.1 (16Personalities, 2021).

Quadro 3.1. Grupos do teste MBTI (16 personalidades).

Grupo	Personalidade	Grupo	Personalidade
Analistas	INTJ	Sentinelas	ISTJ
	INTP		ISFJ
	ENTJ		ESTJ
	ENTP		ESFJ
Diplomatas	INFJ	Exploradores	ISTP
	INFP		ISFP
	ENFJ		ESTP
	ENFP		ESFP

Fonte: Adaptado de *16Personalities* (2021).

O teste MBTI e a divisão apresentada no Quadro 3.1 é bastante utilizada na conjuntura de Recursos Humanos em empresas, a fim de melhor compreender o modo de trabalho e a motivação de cada pessoa, além de criar equipes de trabalho de acordo com a necessidade. No experimento desenvolvido para este trabalho de graduação, para a separação final dos grupos de trabalho, então, cada um dos 36 alunos realizou o teste MBTI e informou o resultado para o tutor-auxiliar, que por sua vez organizou 6 equipes de 6 pessoas buscando abranger da melhor forma possível todos os quatro macro grupos do teste MBTI. A intenção do método foi justamente garantir a formação de grupos heterogêneos e com a presença de diferentes personalidades e habilidades.

3.5 ESTRUTURAÇÃO DA METODOLOGIA PBL

Seguindo os passos do PBL trazido por Ribeiro (2008) e introduzido na revisão bibliográfica, foram então definidos os objetivos de aprendizagem para o tema de Reatores Heterogêneos com Queda de Pressão e estruturada a metodologia a ser aplicada em sala de aula. Considerando a caracterização proposta pelo Quadro 2.1, o PBL adotado para o presente experimento tem características [3, 3, 4, 3, 3], ou seja, apresenta: problema a ser trabalhado apenas em parte do semestre, com duração de algumas semanas; integração significativa de conceitos e habilidades; trabalho em equipe, com encontros externos, entrega em conjunto e avaliação por pares; método formal de solução de problema, orientado por tutores em aulas tutoriais; e professora fornece livro-texto da disciplina como base (FOGLER, 2009), mas espera que os alunos pesquisem em outras fontes.

Os principais objetivos que os alunos deveriam cumprir, a nível de aprendizagem, definidos por professora orientadora e tutor-auxiliar, foram apresentados aos alunos na aula inicial do projeto. Os objetivos apresentados foram os seguintes:

- Identificar e dimensionar um reator catalítico heterogêneo para diferentes tipos de reações, especialmente em fase gasosa;
- Compreender os efeitos das características e especificidades dos catalisadores;
- Entender e aplicar a equação de Ergun;
- Otimizar o tipo e quantidade de catalisador no dimensionamento do PBR, para alcançar a maior conversão e produtividade;
- Resolver problemas de reatores PBR com queda de pressão através de

métodos numéricos;

- Trabalhar (em grupo) um problema aberto com dados reais através da metodologia PBL.

Definidos os objetivos, os mesmos e a proposta de organização do trabalho da unidade de aprendizagem foram então apresentados aos grupos:

- Escolha de um líder ou coordenador (fixo) da equipe e de um redator pelo grupo. Ao líder compete a responsabilidade de liderar o grupo, estimular a discussão entre todos os membros, manter a dinâmica, administrar o tempo e assegurar o cumprimento das tarefas, além de fazer a distribuição da nota global do grupo entre os membros. Já o redator tem a responsabilidade de registrar ideias e discussões em relatório, otimizar o debate para não haver repetições ou perda de foco, informar à professora tutora sobre o andamento da discussão, além de gravar os encontros (todos em salas de vídeo-chamada online) e disponibilizá-los no ambiente virtual de aprendizagem da disciplina (AVA2).
- Além dessas duas funções, uma responsabilidade do grupo como um todo é a definição de regras e compromissos que todos devem seguir ao longo do desenvolvimento do projeto, compondo um documento a ser postado no ambiente virtual de aprendizagem da disciplina (AVA2).
- Participação integral e obrigatória do grupo em duas sessões tutoriais (com a professora e tutor) agendadas.
- Participação opcional do grupo em sessões tutoriais auxiliares (com a tutor) agendadas.
- Elaboração de um relatório final e apresentação da resolução do case, a serem postados no ambiente virtual de aprendizagem da disciplina (AVA2);
- Apresentação de 15 minutos da resolução do case pelo grupo, em data agendada, com arguição individual pela professora e por um membro de cada um dos outros grupos (escolhidos aleatoriamente para compor uma suposta diretoria da empresa fantasia do *case*).
- Os grupos definem sua forma de trabalho, cronograma, necessidade de reuniões extras e de ajuda do monitor da disciplina.

Com objetivos e dinâmica de trabalho dos grupos definidos, foi então explicado à turma qual seria o método formal de resolução do *case* através da metodologia proposta, resumido em 7 principais passos da ABP (RIBEIRO, 2008). No Quadro 3.2 são apresentados cada um dos passos, além do detalhamento do que deve ser realizado e qual era o resultado esperado após cada um deles.

Quadro 2.2. Método formal baseado nos 7 passos da ABP para resolução do case.

(continua)

Passo	Descrição	O que deve ser feito	Onde o grupo deve chegar
1	Ler atentamente o problema e esclarecer os termos desconhecidos.	Primeiro contato em conjunto com o <i>case</i> .	Identificação de termos desconhecidos (novos): PBR, leito recheado com partícula de catalisador, porosidade de partícula, granulometria, queda de pressão e dados do processo.
2	Identificar questões propostas no enunciado.	Melhorar o entendimento sobre o desafio proposto a partir de perguntas norteadoras: Quais os questionamentos-chaves para a estruturação? Quais são os elementos desconhecidos? Onde encontrar as informações necessárias?	Acentuar o nível de profundidade dos questionamentos, passando a olhar para o processo: Como é o processo e qual a sua taxa? Qual o catalisador? Como o catalisador afeta a conversão? O que é leito de recheio? Por que há queda de pressão? Quais são as variáveis importantes?
3	Oferecer explicações para questões com base no conhecimento prévio do grupo (<i>brainstorm</i>).	Debater, resgatar conhecimentos prévios em processo de <i>brainstorm</i> , esboçar primeiras hipóteses.	Buscar classificar a reação, compreendendo que se trata de um sistema gás-sólido. Identificar aspectos positivos e negativos do uso do catalisador. Inferir sobre atuação do PBR e sobre o efeito do leito na conversão.
4	Resumir estas explicações.	Revisitar passos anteriores e organizar todas as ideias, elencando o que ainda precisa ser conhecido (conceitos, dados e ferramentas).	Sistematização de passos anteriores para montagem de uma estrutura de solução do problema.
5	Estabelecer objetivos de aprendizagem que levem o aluno ao aprofundamento e complementação.	Eleger critérios para a escolha da solução, distribuir funções e definir objetivos de aprendizado do grupo.	Definir o que cada membro do grupo deve estudar individualmente e trazer de informações para o encontro seguinte – buscar esclarecer quais são as variáveis importantes e quais informações são necessárias.
6	Estudo individual, respeitando os objetivos almejados.	Cada membro deve cumprir sua função que foi definida em grupo, aprofundando em pesquisas e novas fontes.	A partir dos estudos, preencher as lacunas dos termos até então desconhecidos, encontrar dados de processo, entender a atuação de um reator catalítico com queda de pressão.

Quadro 3.2. Método formal baseado nos 7 passos da ABP para resolução do case.

(conclusão)

Passo	Descrição	O que deve ser feito	Onde o grupo deve chegar
7	Rediscussão no grupo tutorial dos avanços do conhecimento obtidos pelo grupo para elaboração de uma estratégia de resolução do problema, com divisão de tarefas.	Em novo encontro, integrar as informações, compartilhar o conhecimento adquirido e, por fim, chegar à proposta de como solucionar o problema.	Ter clareza sobre as perguntas feitas em passos anteriores, identificar a necessidade de simplificações e dividir tarefas para o restante da execução do trabalho e resolução do problema.

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2008).

O trabalho foi realizado durante quatro semanas. Na primeira semana ocorreu a primeira sessão tutorial, cujo objetivo era conduzir os grupos pelos 5 primeiros passos do método formal. Com uma semana de intervalo para a realização do passo 6 (individual), os grupos voltaram a se reunir para a segunda sessão tutorial e executar o 7º e último passo. Depois deste processo, com o método de solução bem estruturado, os alunos tiveram duas semanas para executar o projeto, aprofundando-se nos aprendizados técnicos que envolvem a modelagem do reator PBR, e preparar a apresentação à turma de sua proposta de solução da situação-problema.

Ao longo das duas semanas após a realização do passo 7, foram disponibilizadas aos alunos sessões de monitoria nas quais o monitor e o tutor-auxiliar estiveram disponíveis para sanar dúvidas técnicas sobre o conteúdo estudado, bem como sessões tutoriais opcionais com o tutor-auxiliar. Além disso, também foi preparado e disponibilizado aos alunos um exemplo comentado de um problema envolvendo reatores heterogêneos, apresentado no APÊNDICE A.

3.6 AVALIAÇÃO

Uma importante etapa deste trabalho e da aplicação de uma atividade acadêmica no formato de ABP consistiu na avaliação de desempenho dos alunos e, posteriormente, avaliação sobre o próprio método.

Para a avaliação dos alunos foram definidas cinco diferentes notas, que combinadas resultariam na nota final individual do trabalho para este aluno:

- Nota do relatório final (30%): a mesma nota para todos os membros do grupo, sendo avaliado, principalmente, se a pergunta final do *case* foi respondida e se eles conseguiram alcançar um nível de otimização para a modelagem do PBR;

- Nota da apresentação final (30%): a mesma nota para todos os membros do grupo, sendo avaliado, principalmente, se a pergunta final do *case* foi respondida e a organização da apresentação;
- Nota individual de arguição (20%): todos alunos fizeram e responderam questões ao longo do dia de apresentações. Avaliou-se principalmente se o aluno demonstrou domínio do assunto, construção do conhecimento cognitivo esperado e desenvolveu algumas habilidades em todo o processo;
- Nota individual auto avaliativa (10%): obtida pelo preenchimento de um formulário elaborado;
- Nota individual da avaliação por pares (10%): cada membro do grupo avaliou individualmente os outros membros, sendo o principal objetivo desta avaliação o desenvolvimento das habilidades do trabalho em equipe.

Para estas duas últimas notas, avaliaram-se aspectos socioemocionais estimulados pelo ABP, como contribuição para discussões em grupo, postura como ouvinte e papel de liderança, a partir de dois formulários foram disponibilizados para a autoavaliação e a avaliação por pares, apresentados nos APÊNDICES B e C, respectivamente. Esses formulários foram elaborados com base na escala de Likert. Esta escala é uma metodologia bastante popular para realização de pesquisas de opinião, apresentando como característica opções de respostas em escala, que vão de um extremo como “Discordo totalmente” até outro extremo como “Concordo totalmente”, fugindo de respostas binárias como “sim ou não”. Esta avaliação permite que o avaliador possa entender o nível de intensidade da opinião de quem respondeu, permitindo a extração de conclusões mais qualitativas da questão (FRANKENTHAL, 2017). Além da escala de Likert, também foi utilizada na avaliação a metodologia *Net Promoter Score*, mais conhecida como NPS. O NPS é uma metodologia amplamente usada para avaliação da qualidade de produtos e serviços, no qual é perguntado o quanto o cliente, de 1 a 10, indicaria aquele produto ou serviço para um amigo. Respostas 9 ou 10 são considerados promotores, 7 ou 8 considerados neutros e de 1 a 6 como detratores. O NPS é calculado subtraindo promotores menos detratores, e dividindo pelo número total de respondentes. Sua escala vai de -100 a 100, onde -100 é uma situação com 100% de detratores e 100 é de 100% de promotores (SILVA, 2020).

O somatório das notas do trabalho (de 0 a 10) dos alunos de um mesmo grupo compuseram o valor fictício do pagamento da empresa fantasia do *case* para o grupo de consultoria simulado pelos alunos. Estes valores totais foram informados aos líderes dos grupos pela professora para que eles atribuíssem a cada membro um montante compatível com sua colaboração com o projeto.

O trabalho teve um peso de 10% da média final dos alunos na disciplina e esta nota final foi calculada pela média aritmética entre a nota do trabalho de cada aluno (calculada pelas cinco avaliações) e o montante atribuído ao aluno pelo líder.

Por fim, para avaliação da metodologia, além da própria análise do desempenho dos alunos, também foi proposto um formulário específico para que os alunos apontassem suas percepções de aprendizados diversos pelo método ABP, bem como sua satisfação com o mesmo ao longo do processo, apresentado no APÊNDICE D. Neste formulário focou-se na percepção do aluno sobre sua própria aprendizagem e sobre os principais pontos que compuseram a estrutura da metodologia aplicada. Por exemplo, utilizaram-se questionamentos como: se o aluno se sentiu mais desafiado e motivado; como foi o processo de aprendizagem colaborativo; se as sessões tutoriais ajudaram a direcionar o trabalho; se sentiu dificuldade em trabalhar com um projeto sem definições iniciais claras; e até como foi a experiência de participar deste projeto em um semestre atípico, não presencial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS E EXPERIÊNCIA DA APLICAÇÃO

Neste capítulo serão relatados a experiência de elaboração da situação-problema, o acompanhamento do trabalho dos grupos, os resultados finais dos projetos realizados e analisadas as respostas dadas aos formulários de avaliação, com o objetivo de extrair conclusões em relação ao estudo aplicado.

A situação-problema construída teve como objetivo apresentar um cenário semelhante a um desafio real da engenharia química. A maior dificuldade enfrentada para a construção desse *case* foi encontrar equilíbrio entre apresentar as informações necessárias para que os alunos fossem direcionados para os pontos de aprendizagem esperados e, ao mesmo tempo, apresentar lacunas que tornassem o problema aberto e complexo de forma a estimular dúvidas e debates.

Para o problema, definiu-se a utilização de uma situação fictícia na qual uma empresa detentora de uma indústria química tinha a intenção de otimizar seu processo industrial através de uma consultoria. Para isso, foi considerado a escolha de processos que ocorressem em fase gasosa e em leito catalítico. Buscou-se apresentar as variáveis importantes para o processo, algumas novas para os alunos. A seguir, o caso criado para o Grupo 1 – para os demais grupos seguiu-se a mesma estrutura, mudando apenas o produto:

CASE 1 – PRODUÇÃO DE ÓXIDO DE ETILENO

No início deste mês você e sua equipe de consultoria em projeto de engenharia foram contratados por a empresa multinacional OX, referência na produção de óxido de etileno. A produção do óxido de etileno nessa indústria ocorre através de um processo catalítico e há cerca de 15 anos se mantém sem maiores alterações. O mercado nacional no ano de 2019 movimentou mais de R\$2,3 mi com importações de óxido de etileno.

Visando trazer inovações que possam gerar redução ao custo de produção, a sua equipe foi alocada na área de P&D da empresa. No momento da contratação, a gerente da área informou que o maior objetivo da consultoria é a otimização do processo catalítico no reator PBR principal usado há anos no processo, cuja queda de pressão no leito de recheio com partículas de

catalisador deve ser estudada. Uma possibilidade poderia ser um estudo sobre as características do catalisador utilizado no processo, visto que, dependendo do fornecedor, a porosidade, granulometria e densidade do leito variam bastante, além do custo.

Um requisito importante para o projeto está em manter a conversão mínima de 50% para a reação desejada do processo, historicamente utilizado na produção, e/ou uma produtividade mensal competitiva no mercado. Pode-se considerar que o reator principal é operado isotermicamente, pois tem-se um bom controle de temperatura do mesmo.

A responsabilidade da sua equipe é estudar e concluir, através de estudos qualitativos e quantitativos, sobre a otimização do processo no reator em questão, no que diz respeito às propriedades do catalisador usado no mesmo, respeitando os requisitos descritos para o projeto. A equipe deverá apresentar seu estudo e conclusões para a diretoria de P&D da empresa OX em um mês.

Nota-se que o caso apresentou os conceitos de aprendizagem esperados para o problema: PBR, leito recheado com partícula de catalisador, porosidade de partícula, granulometria, queda de pressão. Contudo, o problema se limitou apenas a citá-los, cabendo aos alunos estudar e entender o significado de cada conceito ou variável e como se correlacionam.

A partir da primeira sessão tutorial, momento no qual o projeto e o *case* foram apresentados, os grupos foram formados, receberam as instruções gerais sobre a dinâmica de realização da Unidade de Aprendizagem envolvendo a metodologia ABP, migraram para salas virtuais separadas e começaram a trabalhar no entendimento do problema.

Foi possível notar que as equipes estavam relativamente equilibradas, demandando tempos parecidos para resolução de cada passo da metodologia. Essa impressão foi comprovada ao fim do projeto, pois todos os grupos tiveram desempenhos bons e semelhantes – esse ponto será explorado mais à frente. Durante o início da primeira sessão houve algumas definições importantes para a dinâmica dos grupos: em consenso cada grupo definiu uma pessoa que seria o líder e outra que seria redator; e foram estabelecidas regras para o trabalho em equipe.

De maneira geral, as escolhas foram feitas de maneira rápida e as principais regras estabelecidas são relacionadas à definição do canal de comunicação da equipe, periodicidade de reuniões e nível de comprometimento na participação. A seguir, o exemplo das regras elaboradas pelo Grupo 3 – nota-se que, de maneira distinta aos demais grupos, uma das regras do Grupo 3 já predefinia que as notas seriam distribuídas igualmente ao fim do trabalho:

Definição de regras – Grupo 6:

- a. Todos se comprometem em estudar os temas relacionados ao trabalho.*
- b. O grupo se reunirá nas segundas-feiras, das 16h às 18h. Concordamos em ser pontuais.*
- c. Quaisquer problemas, avisar com antecedência no grupo do WhatsApp, se possível. Este será nosso canal de comunicação.*
- d. Em caso de divergência, as questões serão resolvidas por voto da maioria.*
- e. Ao final do trabalho, a nota será dividida igualmente entre os integrantes do grupo.*

Na primeira sessão tutorial era esperado que os grupos avançassem pelos cinco primeiros passos do método formal indicado pela professora orientadora: ler atentamente o problema e esclarecer os termos desconhecidos; identificar questões propostas no enunciado; fazer um *brainstorm* para identificar conhecimentos prévios presentes no problema; elaborar primeiras hipóteses; e definir os objetivos educacionais para continuação do projeto.

Durante este processo, que durou cerca de 3 horas, a professora orientadora e o tutor-auxiliar revezaram-se entre as diferentes salas para orientar os grupos, o que foi fundamental para garantir o cumprimento dos objetivos de cada passo da metodologia pelos alunos, evitando que os mesmos se perdessem em pontos que deveriam ser enfrentados apenas em etapas mais avançadas do projeto – comprovando a importância deste papel para os orientadores no ABP. Como exemplo, algo comum aos grupos, foi a tendência de procurarem respostas técnicas sobre o reator e a reação envolvida logo em um primeiro momento, antes até mesmo de finalizar a leitura do *case* e levantamento de pontos desconhecidos.

Ao fim da sessão tutorial, o redator de cada grupo relatou para a orientadora o que foi feito (os relatos da primeira sessão tutorial dos seis grupos estão disponíveis no APÊNDICE E) e, para cerca de metade dos grupos, foi necessário que a professora intervisse e ressaltasse a importância da criação de hipóteses que deveriam ser analisadas durante os estudos posteriores.

Contudo, a partir das orientações, os seis grupos conseguiram finalizar a primeira sessão atingindo os objetivos esperados: maior clareza sobre o desafio, definição da função de cada membro, o que cada um deveria estudar e onde buscar as informações necessárias. A seguir relato da primeira sessão tutorial realizado pelo Grupo 2, demonstrando o direcionamento seguido pelo grupo atingindo os cinco primeiros passos do método:

Relato 1º sessão tutorial - Grupo 2

Primeiramente o case foi estudado e destrinchado em informações mais importantes, como o processo sendo realizado em um reator PBR, isotermicamente e com conversão mínima de 50%. O objetivo é realizar uma produção que seja competitiva no mercado nacional, levando em consideração também o catalisador utilizado.

Em um segundo momento, foi levantado pontos de atenção como qual seria o foco para avaliar a competitividade, se isso seria pela quantidade produzida ou pelo preço e custos de produção e também a questão de fornecedores. Para avaliar esses pontos, o grupo separou alguns temas que devem ser estudados no desenvolver do trabalho, como estudo sobre o PBR, queda de pressão no leito, aumento de conversão, revisão geral de cinética e catálise, estudo sobre o processo de síntese de amônia, ferramentas numéricas, etc.

Feita essa primeira análise, o grupo pensou e já separou os materiais teóricos necessários para ao decorrer do projeto, tudo foi upado e compartilhado em um drive. Logo após, foi definido o método de trabalho com algumas regras:

- Estudo individual e geral do processo e de PBR nessa primeira semana;*
- Todas as informações devem ser compartilhadas no drive;*
- Divisão em duplas ou trios nas tarefas das semanas seguintes;*

- *Temas das tarefas divididos por afinidade com o assunto;*
- *Apoio mútuo entre as duplas/trios;*
- *Resumo de todas as discussões em grupo;*
- *Reuniões fixas semanais.*

Por fim, foram elencadas hipóteses para a solução do case, todas elas estão disponíveis no Jamboard.

Algumas das hipóteses elencadas pelo Grupo 2 na plataforma *Jamboard* citada anteriormente foram: é possível trabalhar em cima de um processo já existente e ir adaptando ao objetivo; verificar se a conversão mínima de 50% já não seria a ideal; deve-se definir o catalisador a partir do custo benefício.

Na segunda sessão tutorial, uma semana depois, pode-se constatar que a aplicação da metodologia estava evoluindo bem, pois ficou nítido que os alunos tinham estudado e aprofundado seu conhecimento. Todos os grupos já discutiam sobre o reator PBR, encontraram referências bibliográficas sobre os processos em estudo, sobre taxas reais de reação para obtenção dos produtos de interesse e o(s) tipo(s) de catalisador(es) utilizado(s) em cada reação. Alguns dos grupos, inclusive, já estavam utilizando planilhas de cálculos para simular situações simplificadas do balanço para um PBR e também várias ferramentas auxiliares, especialmente para trabalhos em grupo de forma remota: *Jamboard*, *Onenote*, etc. Neste encontro, a professora orientadora ressaltou que o objetivo do 7º passo é integrar as informações, compartilhar o conhecimento adquirido, rediscutir as hipóteses e, por fim, chegar à proposta de como solucionar o problema, que é a modelagem do PBR e entendimento dos efeitos da queda de pressão.

Além disto, nesta sessão tutorial era importante traçar a estratégia de resposta ao *case*, ou seja, quais seriam as respostas que precisariam ser dadas para justificar e argumentar sobre o que eles iriam desenvolver como sendo a otimização solicitada do suposto processo industrial à equipe de consultoria pela empresa fictícia da situação-problema.

Com isso, os grupos direcionaram seu trabalho para maior entendimento dos equacionamentos – alguns deles já tinham ciência que seria necessária a utilização de método numérico para resolução – e como as variáveis se relacionavam, além de buscar definir qual seria cada dado de processo que eles utilizariam para os cálculos a partir de suas referências encontradas. Notou-se também que já era claro para os alunos – pelo menos para aqueles que se destacaram nos grupos provocando a troca de conhecimentos e as discussões – como o leito fixo agia sobre o processo, causando a queda de pressão e consequente dificuldade na conversão.

Para os grupos que apresentaram maior dificuldade de traçar a estratégia, algumas perguntas norteadoras da professora orientadora foram importantes para ajudá-los a cumprir o objetivo desta sessão, como “Quais aspectos do processo serão comparados para definir as condições ótimas?” ou “O que será apresentado para a diretoria da empresa?”. Ao fim da sessão os seis grupos traçaram suas estratégias e novamente dividiram as tarefas que cada um deveria cumprir. Ao fim da 2ª sessão tutorial, o redator de cada grupo relatou para a orientadora o que foi feito (relatos da segunda sessão tutorial de cada grupo estão presentes no APÊNDICE F). Pode-se notar, com o exemplo de parte do relato do Grupo 4 a seguir, que os grupos atingiram os passos 6 e 7 da metodologia, ao apresentar domínio sobre o processo e traçarem estratégia para resolução do case e apresentação à empresa fictícia:

Relato 2º sessão tutorial - Grupo 4

Rota Etanol (motivos para escolha):

- *Devido à limitada fonte de recursos fósseis e à crescente preocupação mundial com o meio ambiente, pesquisas visando rotas alternativas para a produção de eteno a partir de fontes renováveis, têm atraído a atenção de pesquisadores no mundo todo, especialmente a desidratação catalítica de etanol, preferível em relação a do etano.*
- *Rota de craqueamento não é feita em leito fixo, dessa forma não condiz coma realidade do cliente.*

Apresentação (o que deve conter):

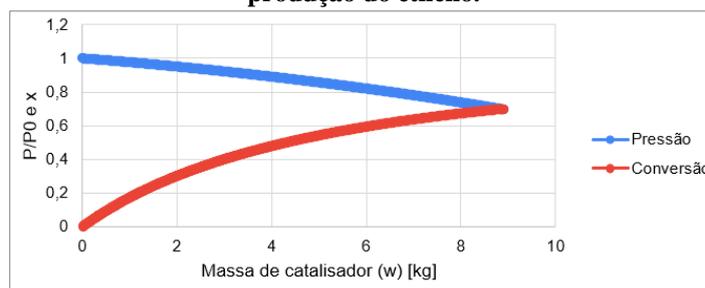
- *Apresentar método atual do cliente (desidrogenação do etanol utilizando a alumina como catalisador, alumina foi escolhida por conta da representatividade comercial) e compará-lo com o nosso;*

- *Estimativa de custo/produktividade ;*
- *Cálculo do reator e dimensões fixas;*
- *Queda de pressão;*
- *Gráficos comparativos;*
- *Tabela comparativa variando os catalisadores:*
 - 1. Catalisadores: Alumina, zeólita e óxido misto de cério-zircônio;*
 - 2. Características (porosidade, granulometria, porosidade, esfericidade, densidade e massa do catalisador);*
 - 3. Estimativa de custo/produktividade.*

Durante as semanas posteriores de execução da estratégia traçada, foi notável a importância do monitor da turma, responsável por acompanhar e ajudar os alunos ao longo de toda disciplina, nos desafios relacionados à utilização do *Runge-Kutta* como método numérico para resolução completa do balanço de um PBR. Além desse acompanhamento, também ocorreram duas sessões complementares opcionais realizadas pelo tutor-auxiliar para tirar dúvidas dos grupos. As principais dúvidas que surgiram foram à cerca da utilização do método numérico de resolução do problema e se os cálculos e iterações realizadas estariam corretos. Em sua maioria, as dúvidas foram sanadas ao analisar o comportamento dos gráficos obtidos ou buscando realizar simplificações nas taxas de reação obtidas na literatura pelos alunos.

Ao fim da quarta semana de execução do trabalho os grupos apresentaram os trabalhos finais (relatórios acompanhados de planilhas de cálculos e apresentações) e os resultados obtidos foram bastante satisfatórios: os seis grupos desenvolveram o que era esperado: buscaram informações reais do processo, assumiram simplificações razoáveis dentro do conteúdo de reatores isotérmicos ideais, estudaram os reatores de leito fixo para reações catalíticas heterogêneas com queda de pressão e traçaram as curvas de queda de pressão por massa de catalisador e de conversão por massa de catalisador (curvas importantes para análise do desempenho de um sistema em PBR), de forma a obterem o argumento necessário à resposta do *case*. No Gráfico 4.1 pode-se observar um exemplo de curva obtida pelos alunos.

Gráfico 4.1. Curvas de queda de pressão e conversão em função da massa de catalisador para a produção do etileno.



Fonte: Grupo 4.

É interessante observar que, embora a estrutura do *case* fosse a mesma para todos os grupos, variando-se apenas o processo, cada grupo delineou uma estratégia de solução a ser apresentada para embasar sua resposta, como mostra o Quadro 4.1 abaixo:

Quadro 4.1. Comparação da estratégia de solução adotada por cada grupo.

Grupo	Processo	Principais variáveis comparadas durante a resolução
1	Produção de Óxido de Etileno	Conversão da reação e massa de catalisador.
2	Síntese da Amônia	Condições da reação (pressão e temperatura) e conversão.
3	Síntese do Metanol	Porosidade e massa de catalisador, existência de reciclo, conversão e análise econômica.
4	Produção de Etileno	Diâmetro de partícula de catalisador, massa de catalisador, conversão e análise econômica.
5	Produção de Formaldeído	Diâmetro de partícula de catalisador e conversão.
6	Produção de Anidrido Maleico	Porosidade, diâmetro de partícula de catalisador e conversão.

Fonte: elaborada pelo autor.

Além do entendimento e apresentação da solução do *case*, notou-se também um bom desempenho dos seis grupos durante a apresentação, conseguindo explorar pontos relacionados a habilidades de comunicação e desenho de uma linha lógica para apresentar o projeto à empresa fictícia contratante do *case*. Todos os membros dos grupos participaram das apresentações e responderam satisfatoriamente à arguição. Algumas informações incompletas ou equivocadas foram corrigidas pelas professoras, mas não prejudicaram as apresentações. Todos os alunos também se envolveram nas apresentações dos colegas, quando chamados à compor a suposta diretoria na arguição.

Comprovando o bom desempenho dos grupos, a nota final geral para cada grupo, que é a média entre as notas finais de relatório e de apresentação – notas que são iguais para todos os membros do grupo –, encontram-se no Quadro 4.2.

Quadro 4.2. Médias das notas finais de relatório e apresentação para cada grupo do projeto.

Grupo	Avaliação geral (de 0 a 10)
1	9,0
2	8,5
3	9,0
4	10,0
5	9,5
6	8,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Os alunos também demonstraram terem trabalhado bem em grupo, de forma geral. Nenhuma situação específica foi apresentada, praticamente todas as tarefas foram cumpridas nos prazos e todos os membros participaram das etapas obrigatórias.

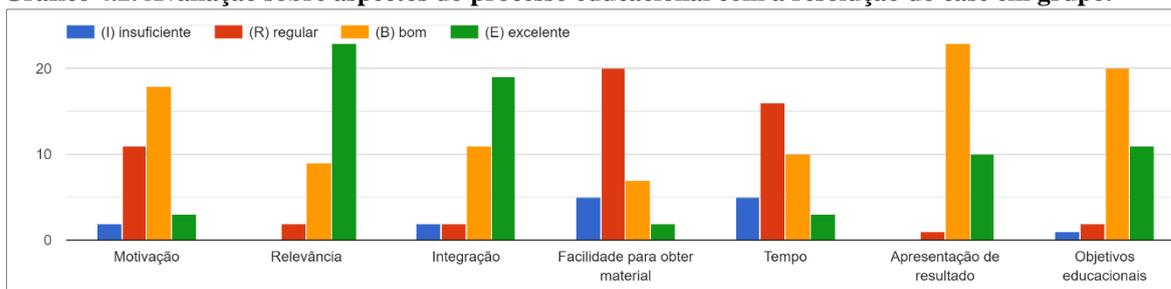
Analisando as avaliações dos formulários respondidos pelos alunos ao fim do projeto, é possível destacar alguns pontos interessantes. Primeiramente, analisando e comparando as auto avaliações e as avaliações: considerando as 36 respostas, foi obtida uma nota média de 8,3 para a auto avaliação, enquanto houve uma nota média de 8,9 para a avaliação por pares – deve-se levar em consideração que o espaço amostral da avaliação por pares foi 5 vezes maior, pois cada pessoa avaliou outros cinco membros do seu grupo. Desta análise, pode-se notar diferença significativa de como as pessoas podem ter uma tendência de se auto avaliar de maneira mais negativa do que avalia os outros ou é avaliada pelos outros. Certamente cada pessoa tem o melhor entendimento se sua dedicação e contribuição foram tão grandes quanto poderiam ser. Uma hipótese para uma boa nota geral na avaliação por pares também é que a formação dos grupos e o trabalho em equipe foram positivos para os alunos, o que causou a boa percepção sobre os companheiros de grupo. De qualquer forma, foram notas consideradas boas e condizentes para o desempenho dos alunos de acordo com a percepção do tutor-auxiliar. Importante também citar que, apesar de boas notas médias na avaliação interpares, pode-se notar através da atribuição variável das notas, que os os alunos tiveram uma percepção madura das contribuições dos demais membros do grupo, instigando a autocrítica dos alunos e também suas habilidades de liderança, trabalho em equipe e avaliação interpares.

4.2 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PBL

Para avaliação da metodologia adotada para este trabalho, além do desempenho dos alunos – que foi muito bom, de forma geral, como se pode notar no subitem anterior – também é importante extrair percepções dos próprios alunos sobre o processo. Uma série de perguntas foram realizadas para avaliação da metodologia (APÊNDICE D) e agora suas respostas serão analisadas.

No Gráfico 4.2, pode-se observar as respostas para um levantamento geral sobre a percepção dos alunos sobre algumas características do método: motivação gerada pela situação-problema; relevância da metodologia; integração de diferentes conhecimentos; facilidade para obtenção de materiais; tempo para execução; apresentação dos resultados; e alcance dos objetivos educacionais. Para cada um desses fatores, o aluno precisou indicar se achou Insuficiente, Regular, Bom ou Excelente.

Gráfico 4.2. Avaliação sobre aspectos do processo educacional com a resolução do case em grupo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando os resultados apresentados, pode-se fazer alguns destaques. Primeiro, é interessante ver o resultado positivo para a Relevância do problema e do método, que obteve 67% de respostas “Excelente” e 26% de respostas “Bom”. Este é um resultado que pode indicar que os alunos captaram a proposta da metodologia e sentem a necessidade de aplicações mais práticas ao longo do curso e que tragam experiências mais próximas da realidade. Analisando o fator de Integração de conhecimentos, também é notável a avaliação positiva, o que indica que o método de fato cumpriu com o esperado de solidificar principalmente os conceitos da disciplina e de algumas outras áreas complementares do conhecimento, e tornar a formação mais generalista e contextualizada.

Para o fator Motivação, nota-se a presença da maior parte das avaliações como “Bom” ou “Regular”, o que pode acender um sinal de alerta sobre o momento de aplicação do projeto, que foi ao fim de um semestre extraordinariamente à distância. Ao observar essa resposta, em conjunto com a avaliação ruim dada para o fator Tempo de trabalho, o autor deste trabalho de graduação procurou alguns alunos para conversar. Dos três alunos que participaram desse bate-papo posterior, todos se queixaram que o fim do semestre estava com excesso de carga de estudo e de trabalho, seja na própria disciplina de Cinética e Reatores Químicos, quanto nas restantes. Além disso, o contexto de semestre não presencial emergencial, ENPE (devido a crise da Covid-19) também prejudicou, pois o semestre que normalmente dura 5 meses foi condensado para o período de menos de 4 meses, num formato nunca antes praticado. Este ponto pode ser melhorado numa próxima oferta desta atividade, bem como uma revisão do texto da própria situação-problema, deixando-o mais instigador e, talvez, competitivo.

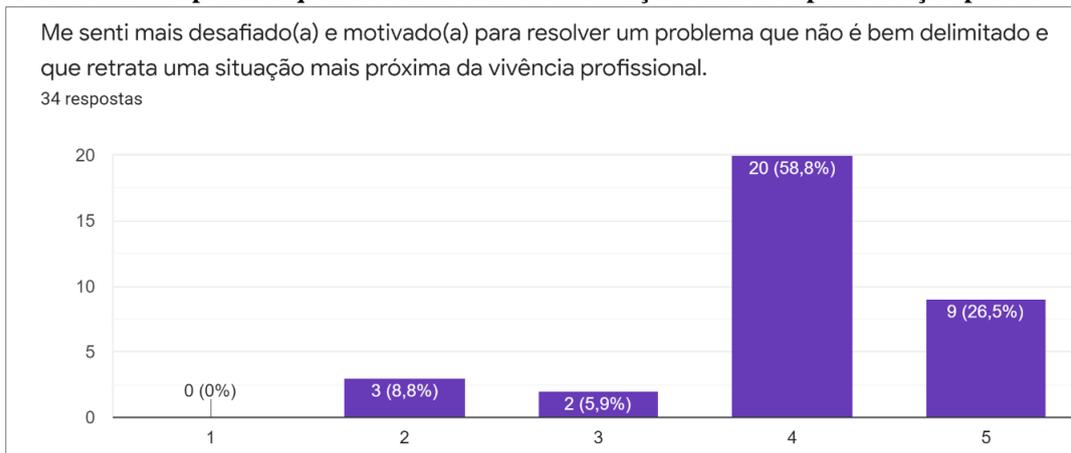
Sobre o fator de Facilidade para obter materiais, que obteve a pior avaliação, já era esperado uma resposta negativa. Para este modelo do ABP foi adotado um nível alto de autonomia na aprendizagem, algo que os alunos não estão acostumados e é agravado pelo modelo de ensino ENPE. Porém, houve disponibilização de material conceitual no AVA pela professora orientadora, e indicação do livro-base da disciplina e de bases de dados abertas para consultas de artigos e patentes, como o acervo aberto da própria Biblioteca Comunitária da UFSCar, Periódicos da CAPES, Portal do MEC e algumas editoras que têm mantido o acervo aberto durante a pandemia. Além destes, sites da indústria química foram sugeridos para levantamento de informações. É característico da metodologia ABP que os alunos busquem a informação de forma mais autônoma e isso é algo inovador para eles, movendo-os de sua “zona de conforto”, onde recebem toda informação selecionada e preparada, num ambiente formatado. Portanto, pode-se dizer que é intencional e, considerando o bom desempenho dos grupos, pode-se inferir que o resultado foi positivo.

Para encerrar a análise dos fatores, nota-se que para Apresentação dos resultados e alcance dos Objetivos educacionais obtiveram-se avaliações em sua maioria entre “Bom” e “Excelente”, cumprindo a expectativa de que o direcionamento feito pela orientadora e pelo próprio método ao longo do projeto proporcionaram aos alunos meios de chegar a bons resultados e alcançarem os principais pontos de aprendizado.

Posteriormente, as perguntas do formulário foram feitas a partir de afirmações, as quais os alunos deveriam responder se: (1) Discorda totalmente; (2) Discorda parcialmente; (3) Neutro; (4) Concorda parcialmente; (5) Concorda totalmente – modelo de avaliação baseado na escala Likert.

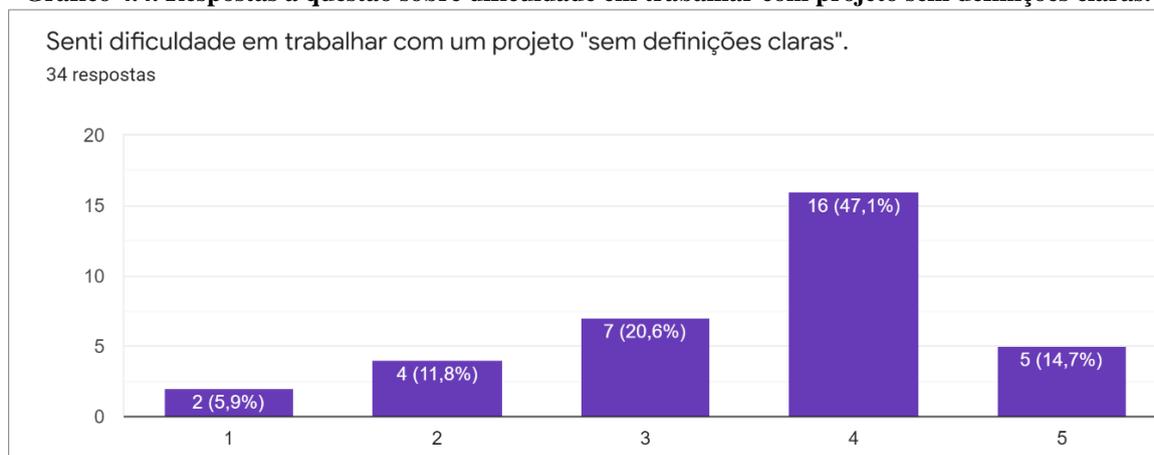
Os Gráficos 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 retratam respostas às perguntas relacionadas à metodologia e questões de aprendizagem.

Gráfico 4.3. Respostas à questão sobre desafio e motivação oferecidos pela situação-problema.



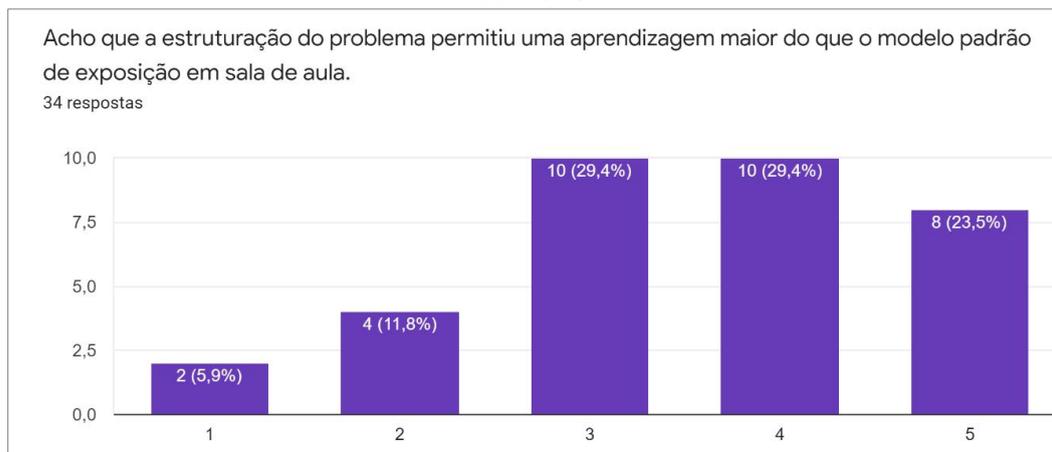
Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 4.4. Respostas à questão sobre dificuldade em trabalhar com projeto sem definições claras.



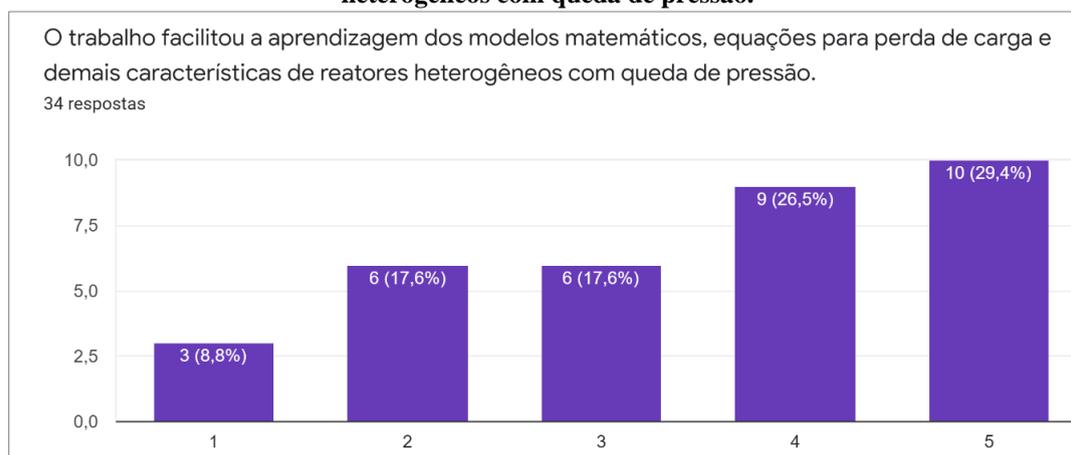
Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 4.5. Respostas à questão sobre a comparação entre a metodologia PBL e o formato tradicional de ensino.



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 4.6. Respostas à questão sobre aprendizado dos conceitos técnicos relacionados a reatores heterogêneos com queda de pressão.

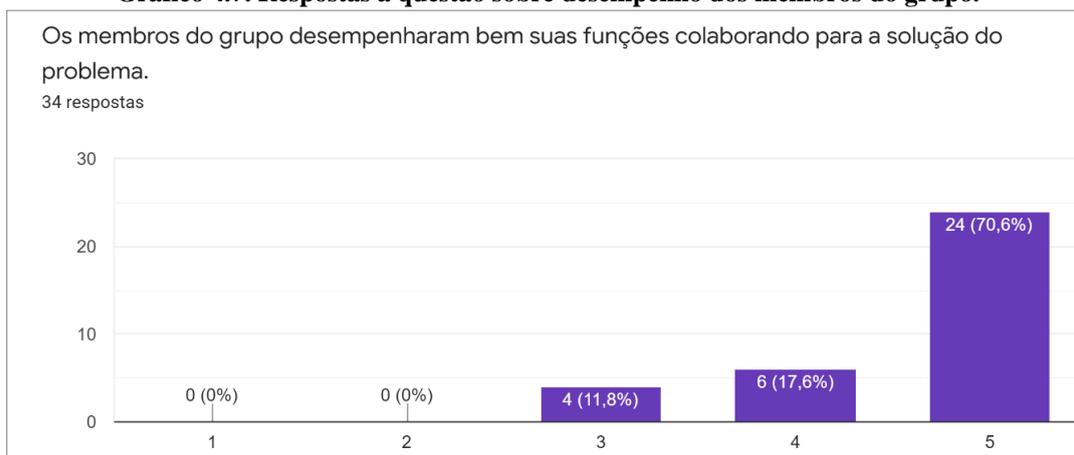


Fonte: elaborado pelo autor.

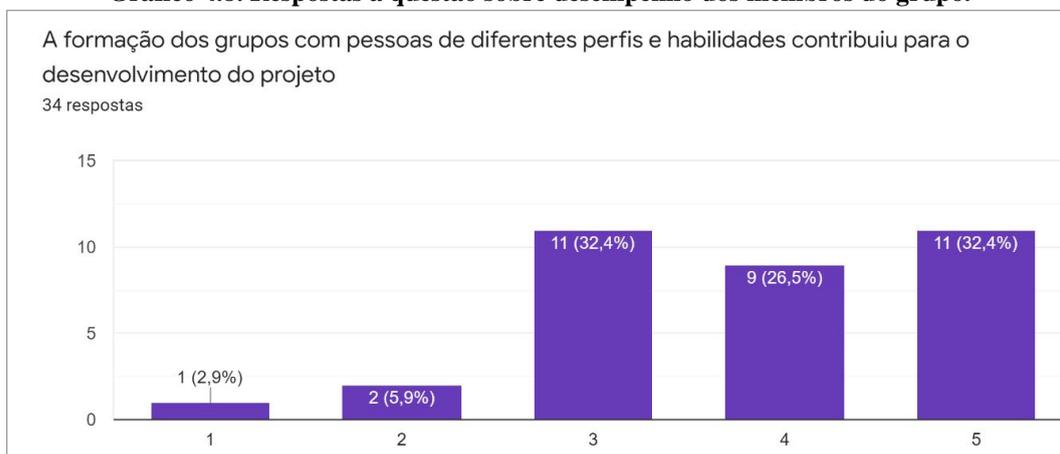
Analisando os Gráficos 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 é possível analisar e extrair conclusões importantes sobre o uso da metodologia. Pela questão relacionada ao desafio e motivação promovida pela situação problema (Gráfico 4.3), 58,8% dos alunos disseram concordar parcialmente com a utilização do método, o que condiz com a análise feita sobre motivação anteriormente. Contudo, ao analisar os resultados sobre a comparação entre o PBL e o modelo tradicional expositivo (Gráfico 4.5), apesar da maioria (52,9%) ter concordado parcialmente ou totalmente, é possível notar que uma parcela significativa dos alunos não tem uma preferência ou preferem o modelo tradicional. Isso por indicar uma série de questões, mas uma hipótese é a de que é importante mesclar diferentes modelos de ensino, pois há alunos que se adequam mais a um, enquanto outros alunos preferem outros – o que é normal, pois o processo de aprendizagem é próprio de cada pessoa.

Uma outra hipótese é que, devido ao modelo tradicional expositivo ser aplicado ao longo de todo o curso, muitos dos alunos podem preferir permanecer com um modelo que eles já estão acostumados. Esses pontos também são endossados pelas respostas à questão sobre o aprendizado dos conceitos técnicos de reatores heterogêneos (Gráfico 4.6), na qual há situação parecida, onde maior parte dos alunos gostou da experiência (55,9%), mas há uma parcela significativa que diz aprender mais facilmente a partir do modelo tradicional. Para encerrar essa análise, as respostas à questão sobre a dificuldade de se trabalhar com problemas mais “abertos” (Gráfico 4.4), indicam que maioria dos alunos teve dificuldades. Visto que essa situação é a que mais se assemelha a condições reais de mercado de trabalho – algo, inclusive, destacado pelas novas DCN’s da Engenharia para implementação no Projeto Pedagógico do Curso –, é importante analisar essa tendência de forma a entender como pode-se, no ambiente do ensino superior, tornar essas atividades mais constantes e ajudar os estudantes a adquirirem tais habilidades e competências.

Os Gráficos 4.7 e 4.8 trazem respostas a afirmações relacionadas ao trabalho em equipe e formação dos grupos.

Gráfico 4.7. Respostas à questão sobre desempenho dos membros do grupo.

Fonte: elaborado pelo autor.

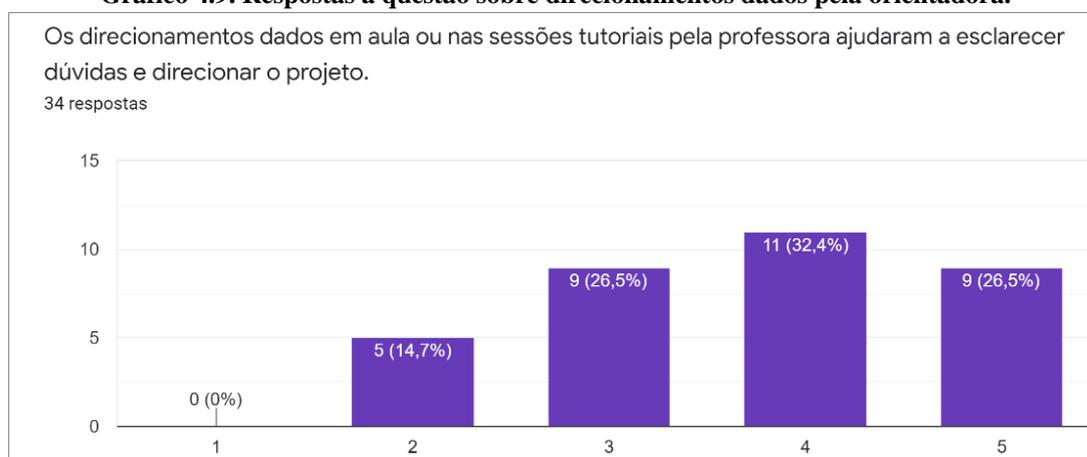
Gráfico 4.8. Respostas à questão sobre desempenho dos membros do grupo.

Fonte: elaborado pelo autor.

As respostas dadas por estas últimas questões trazem um cenário positivo ao trabalho em grupo. Na análise sobre a questão do desempenho dos membros do grupo (Gráfico 4.7), com um percentual de 88,2% de respostas positivas, é possível corroborar os resultados trazidos pela avaliação por pares de que os alunos gostaram de trabalhar em equipe durante o projeto. As respostas para o método de formação dos grupos (Gráfico 4.8), a partir do teste MBTI, também foram positivas, já que 58,4% concordaram que foi um método que contribuiu, 32,4% acharam indiferente e apenas 8,8% não concordaram com sua aplicação. Isso mostra que, de maneira geral, pensar em formas de separar grupos de acordo com personalidade e habilidades é um método interessante e que pode ser bem explorado nas atividades curriculares do ensino superior.

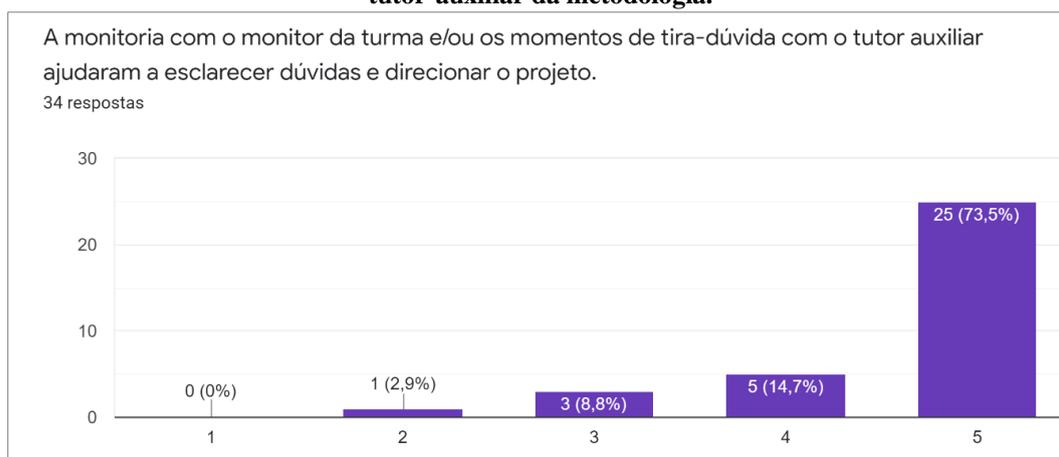
Agora, os Gráficos 4.9 e 4.10 trazem a perspectiva dos alunos sobre a orientação dada pela professora orientadora e sobre os demais acompanhamentos ao longo do projeto.

Gráfico 4.9. Respostas à questão sobre direcionamentos dados pela orientadora.



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 4.10. Respostas à questão sobre o acompanhamento feitos pelo monitor da disciplina e pelo tutor-auxiliar da metodologia.



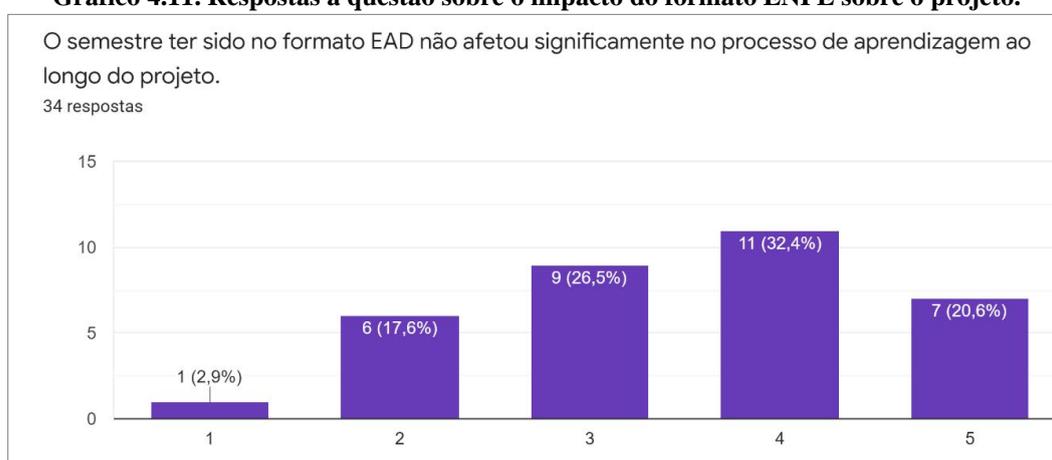
Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando os resultados dados para as questões de direcionamento e orientação por parte da professora orientadora, nota-se que maior parte (58,9%) concordou que foi algo positivo, mas também há uma parcela importante que se mostrou indiferente ou que não gostou parcialmente.

Dado que a intenção do método PBL é justamente deixar os alunos buscarem e construam seu próprio aprendizado, é interessante pensar que o resultado obtido é natural. Observando o desempenho da turma e outros aspectos relacionados ao aprendizado, pode-se inferir que a orientação esteve muito perto do “suficiente”, ou seja, conseguiu direcionar para a realização de bons projetos, mas sem entregar muitas respostas já prontas. Em contrapartida, a alta aprovação à monitoria e ao acompanhamento (Gráfico 4.9) mostram que os alunos buscaram as outras opções disponibilizadas para sanar suas dúvidas, sendo que, para tal, precisaram amadurecê-las. Em conversa com os alunos, foi diagnosticado que a monitoria foi um fator muito importante para que os grupos conseguissem desenvolver a parte dos cálculos, principalmente envolvendo o método numérico do *Runge-Kutta*, que é uma aplicação mais complexa e nova para estes alunos, destacando-se o perfil dedicado e competente do monitor.

Ainda foi realizada uma afirmação em relação ao formato do ensino não presencial emergencial, para avaliar o impacto deste no processo de execução do projeto. As respostas estão representadas no Gráfico 4.11.

Gráfico 4.11. Respostas à questão sobre o impacto do formato ENPE sobre o projeto.

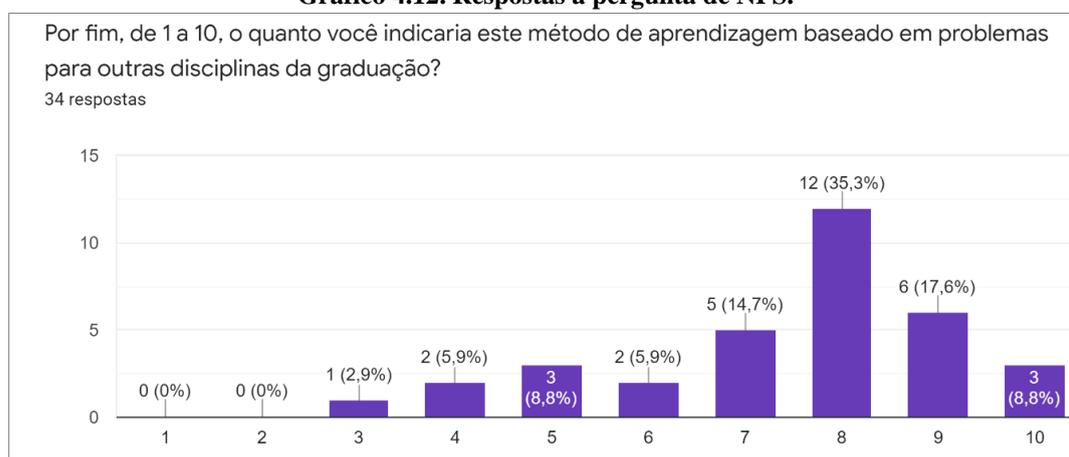


Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando os resultados para a questão relacionada ao ENPE, nota-se que pouco mais da metade dos alunos respondeu que acha que o formato de aulas não presenciais não gerou grande impacto no processo de aprendizagem. Possivelmente isso se deve a uma já habituação a esse formato emergencial, e também porque todos os encontros ocorreram sem maiores problemas a partir da ferramenta *Google Meet*, de vídeo-chamadas. Algo que de fato impactou, como já mencionando anteriormente e conversado com os alunos, foi como o semestre foi condensado em um período mais curto, concentrando muitas atividades e provas de diversas disciplinas em uma mesma época.

Por fim, a título de buscar consolidar o entendimento geral sobre o uso da metodologia ABP, a última pergunta da pesquisa com os alunos foi para definir o *Net Promoter Score*, ou NPS, da aplicação realizada. A Gráfico 4.12 apresenta o resultado para a pesquisa de NPS.

Gráfico 4.12. Respostas à pergunta de NPS.



Fonte: elaborado pelo autor.

Com o número de 9 promotores (responderam 9 ou 10), 8 detratores (de 1 a 6) e 34 respondentes no total, o NPS total foi de 0,03 (ou 1/34). Este não é um resultado ótimo, mas também não é ruim. Segundo estudos sobre a metodologia do NPS (SILVA, 2020), valores de 0 a 49 são considerados NPS razoáveis. Esse resultado nos mostra que ainda há muito a melhorar e mais testes a serem realizados no campo de ABP para a engenharia, mas a experiência se mostra muito mais positiva do que negativa, especialmente sendo complementar a outras metodologias.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões relacionadas à aplicação do ABP na disciplina de Cinética e Reatores Químicos no Departamento de Engenharia Química da UFSCar e sugestões de como, enquanto meio acadêmico, pode-se dar seguimento ao estudo e aplicação de metodologias ativas.

5.1 CONCLUSÕES

A partir da aplicação da metodologia ABP para o ensino de Reatores Heterogêneos foi possível entender na prática como trabalhar a mentalidade do aprendiz voltado a problemas. Notou-se, durante a estruturação da metodologia e aplicação em sala de aula, que a utilização de problemas motivadores aproxima os alunos de situações reais do campo da engenharia e, notadamente, os tiram da zona de conforto ao oferecer um cenário onde eles precisam atuar ativamente em seu aprendizado.

Analisando o resultado final do desempenho dos alunos, o método mostrou-se como um mecanismo que pode estimular o aprendizado de maneira bastante interessante. A totalidade de grupos da turma apresentou projeto coerentes, completos e que contemplaram os principais aspectos esperados do ensino de reatores heterogêneos com queda de pressão: utilização e adaptação da Equação de Ergun para encontrar os balanços de massa para o sistema em PBR, entendimento de como a queda de pressão no leito atua sobre a reação e sua conversão, além da criação de modelos que permitem encontrar condições operacionais ótimas para a produção. De maneira geral, foi possível introduzir um assunto novo para os alunos através de problemas mais abertos e que estimulam o pensamento crítico, aprendizado colaborativo e adaptabilidade a situações reais, sem abrir mão do aprendizado técnico.

Como pontos positivos, além do desempenho dos grupos, destaca-se a própria dinâmica de trabalho em equipe desenvolvida por cada um dos grupos e o estímulo ao aprendizado de forma ativa, que tende a desenvolver habilidades que vão além da parte técnica trabalhada na maior parte do curso. Pode-se notar, também, que além da aplicação da ABP, pode ser interessante desenvolver atividades com a formação de grupos heterogêneos com a utilização da, por exemplo, análise de perfis do teste MBTI. Também é notável que a aplicação no formato de ensino não presencial não limita a aplicação de metodologias ativas, mas que é necessário analisar o contexto de aplicação para que os alunos possam se dedicar da melhor maneira possível para a atividade.

Desta forma, como principais pontos de melhoria, é importante compreender que a aplicação da ABP não é uma tarefa convencional, e que exige bastante dedicação e tempo por parte de docentes e de alunos – e que as condições de exigência do semestre de estudos a ser aplicado o método devem estar condizentes com o desafio proposto. Além disso, ao analisar a aplicação realizada neste estudo, nota-se que a estruturação da situação-problema utilizada pode ser melhorada, a fim de apresentar desafios mais motivadores para os alunos.

5.2 SUGESTÕES

Dadas as novas Diretrizes Curriculares Nacionais para a Engenharia, nota-se que é bastante importante as instituições de ensino superior se esforcem para adequar seu Projeto Pedagógico do Curso (PPC) para contemplar momentos de aprendizado relacionados a solução de problemas reais de engenharia, práticas relacionadas ao empreendedorismo, aprendizado em contextos multidisciplinares, entre outros aspectos que vêm para modernizar e adequar o ensino à realidade atual do mundo globalizado. Para isso, as metodologias ativas são um caminho quase que inevitável.

Algumas sugestões para aplicação de metodologias ativas perpassam pelo apoio à pesquisa e desenvolvimento nessa área, como foi desenvolvido neste trabalho de graduação. Testar, errar e acertar devem fazer parte do processo de entendimento de como melhor encaixar esses momentos na grade curricular.

Para isso, é importante que coordenações de curso incentivem projetos relacionados ao aprendizado ativo, e que docentes estejam abertos a aplicarem novas práticas e colher feedbacks com seus alunos. Uma outra sugestão perpassa pelo aspecto da multidisciplinaridade envolvida em metodologias ativas como a ABP. Pode-se analisar e criar maneiras para fazer com que essa aplicação não seja mais tão pontual, como foi neste projeto, e sim de forma mais sequenciada envolvendo diferentes disciplinas do curso que se conectam. Dessa forma, os alunos irão se acostumar a analisar e trabalhar com problemas reais, além de conectar diferentes aprendizados adquiridos ao longo de toda a graduação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

16PERSONALITIES. **16Personalities**, [S. l.], c2021. Disponível em: <https://www.16personalities.com/br>. Acesso em: 7 dez. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANTENEDORAS DE ENSINO SUPERIOR. **Resolução N° 2, de 24 de abril de 2019**. Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. Brasília: Abmes, 2019.

BRATA, D. P. N.; MAHATMAHARTI, A. K. The implementation of Problem Based Learning (PBL) to develop student's soft-skills. *In: International Conference on Education and Technology (ICETECH)*, 1., Jombang, 2019. **Anais [...]**, Jombang, Indonesia: Iop Publishing, 2020. p. 1-5.

COBENGE CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 40., 2012, Belém-Pa. **METODOLOGIA DE ENSINO: APRENDIZAGEM BASEADA EM PROJETOS (PBL)**.

FOGLER, H. S. **Elementos de engenharia das reações químicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 853 p.

FRANKENTHAL, R. Entenda a escala Likert e como aplicá-la em sua pesquisa. **MindMiners**, [S. l.], 24 maio 2017. Disponível em: <https://mindminers.com/blog/entenda-o-que-e-escala-likert/>. Acesso em: 27 mar. 2021.

GARCIA-ROBLES, R. et al. An eLearning standard approach for supporting PBL in computer engineering. **IEEE Transactions on Education**, [S. l.], v. 52, n. 3, p. 328-339, 2009.

GOLEMAN, D. **Inteligência Emocional: a teoria revolucionária que redefine o que é ser inteligente**. 2. ed. Rio de Janeiro: Objetiva, 2012. 383 p.

HADGRAFT, R. G. et al. The key dimensions of problem based learning. *In: Unfolding Landscapes in Engineering Education, Australasian Conference on Engineering Education*, 11., Australasian Women in Engineering, 6., 1999. **Proceedings [...]**, University of South Australia, 01 jan. 1999. p. 127. Disponível em: <https://search.informit.org/doi/10.3316/INFORMIT.216266618416958>. Acesso em: 29 mar. 2021.

LACERDA, F. C. B.; DOS SANTOS, L. M.. Integralidade na formação do ensino superior: metodologias ativas de aprendizagem. **Avaliação (Campinas)**, Sorocaba, v. 23, n. 3, p. 611-627, set./dez. 2018. DOI: 10.1590/s1414-40772018000300003.

MAMEDE, S.; PENAFORTE, J. C. **Aprendizagem baseada em problemas: anatomia de uma nova abordagem educacional**. Fortaleza: Hucitec, 2001.

OLEAGORDIA, I. J. et al. Active Methodology Applied in Engineering by PBL. I-Approach. *In: Tecnologias Aplicadas a la Ensenanza de la Electronica (Technologies Applied to Electronics Teaching)(TAEE)*, 11., Bilbao, 2015. **Anais [...]**, Bilbao: University

Of The Basque Country, 22 set. 2015. DOI: 10.1109/TAAE.2014.6900180. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6900180>. Acesso em: 29 mar. 2021.

RIBEIRO, L. R. C. **Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL)**: uma experiência no ensino superior. São Carlos: Edufscar, 2008. 151 p.

SCHULZ, B. The Importance of Soft Skills: Education beyond academic knowledge. **Journal of Language And Communication**, Windhoek, Namibia, p. 146-154. jun. 2008. Disponível em: <https://ir.nust.na/bitstream/10628/39/1/The%20Importance%20of%20Soft%20%20Skills-Education%20beyond%20academic%20knowledge.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2021.

SILVA, D. O Guia do NPS: o que a Net Promoter Score tem a dizer sobre sua empresa? **Blog de Marketing Digital de Resultados**, [S. l.], 25 abr. 2020. Disponível em: <https://resultadosdigitais.com.br/blog/o-que-e-nps/>. Acesso em: 7 dez. 2020.

APÊNDICE A - EXEMPLO COMENTADO UA10 – REATORES DE LEITO FIXO (PBR) E QUEDA DE PRESSÃO

Exemplo – (Fogler, 4ª edição, Exemplo 4-5, p. 148)

A reação de segunda ordem



ocorre em 20 metros de um tubo de 1½ in, série 40, recheado com catalisador. A reação é isotérmica, ocorre em fase gasosa e seu regime é turbulento. Considere as seguintes condições:

Vazão volumétrica na entrada: $v_0 = 7,15 \text{ m}^3/\text{h}$

Tamanho do *pellet* de catalisador: $D_p = 0,006 \text{ m}$ (cerca de ¼ in)

Massa específica do catalisador sólido: $\rho_c = 1923 \text{ kg/m}^3$

Área da secção transversal de um tubo de 1½ in, série 40: $A_C = 0,0013 \text{ m}^2$

Parâmetro da queda de pressão: $\beta_0 = 25,8 \text{ kPa/m}$

Comprimento do reator: $L = 20 \text{ m}$

Fração de vazios do leito: $\Phi = 0,45$

Consideraremos que a velocidade específica de reação, k , não seja afetada pelo tamanho da partícula, uma suposição válida somente para partículas pequenas.

- Primeiro, calcule a conversão na ausência de queda de pressão.
- Em seguida, calcule a conversão considerando a queda de pressão.
- Finalmente, determine como sua resposta para o item (b) mudaria se o diâmetro da partícula de catalisador fosse dobrado.

A concentração de entrada de A é $0,1 \text{ kmol/m}^3$ e a velocidade específica de reação é

$$k = \frac{12 \text{ m}^6}{\text{kmol} \cdot \text{kg cat} \cdot \text{h}}$$

RESOLUÇÃO:

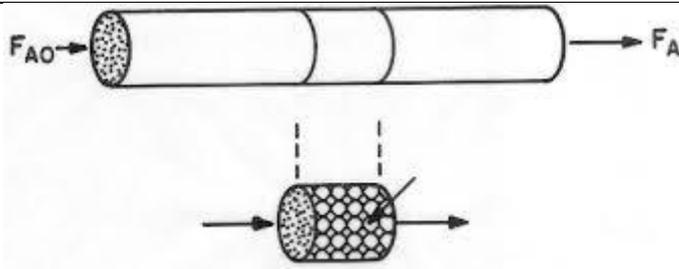
Passo 1: Leia o problema:

É importante ler completamente todo o problema, antes de iniciar a resolução, para se pensar numa estratégia de solução.

Passo 2: Releia o problema, extraindo todas as informações dadas direta e indiretamente e entendendo o que se deseja calcular:

	Informação:
Reação dada	$2A \rightarrow B + C$ (2ª ordem)
Reator PBR	Presença de catalisador; operando isotermicamente
Dimensões do leito	$L = 20 \text{ m}$; $A_C = 0,0013 \text{ m}^2$
Fase gasosa com catalisador sólido	Reação heterogênea; equimolar (ρ da mistura = cte)
Condições de alimentação (PBR):	$C_{A0} = 0,1 \text{ kmol/m}^3$ de reagente A $v_0 = 7,15 \text{ m}^3/\text{h}$ de reagente A
Constantes de velocidade de reação:	$k = 12 \text{ m}^6/\text{kmol.kg}_{\text{cat.}}\cdot\text{h}$
Pede-se:	X_A na ausência de queda de pressão X_A na presença de queda de pressão X_A com novo diâmetro da partícula $D_p^* = 2.D_p$

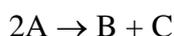
Passo 3: Desenhe e visualize o problema

Entrada global: $C_{A0} = 0,1 \text{ kmol/m}^3$ $v_0 = 7,15 \text{ m}^3/\text{h}$ F_{A0}		Saída global: $X_A = ?$
	$2A \rightarrow B + C$ $(-r_A) = 12.C_A^2$ $L = 20 \text{ m}$; $A_C = 0,0013 \text{ m}^2$	

Passo 4: Uniformize as unidades das informações do problema

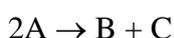
As unidades dadas no problema já estão uniformizadas.

Passo 5: Escreva a equação química da reação envolvida, faça o balanceamento estequiométrico e classifique a reação



Sendo uma equação algébrica contendo coeficientes estequiométricos, pode-se supor que está balanceada. Conforme dados, trata-se de uma reação gasosa, na presença de catalisador, portanto heterogênea. Irreversível, equimolar e de segunda ordem. Portanto, é elementar.

Passo 6: Escreva a tabela estequiométrica para a reação em função da variável de interesse (no caso, X_A)



Espécies químicas	Fluxo molar inicial (na entrada)	Fluxo molar que reage	Fluxo molar na saída global do sistema
A	F_{A0}	$(-a/a).F_{A0}.X_A$	$F_A = F_{A0} - F_{A0}.X_A = F_{A0}.(1-X_A)$
B	F_{B0}	$(+b/a).F_{A0}.X_A$	$F_B = F_{B0} + (+b/a).F_{A0}.X_A = F_{A0}.(F_{B0}/F_{A0} + b/a.X_A)$
C	F_{C0}	$(+c/a).F_{A0}.X_A$	$F_C = F_{C0} + (+c/a).F_{A0}.X_A = F_{A0}.(F_{C0}/F_{A0} + c/a.X_A)$
Total	F_{T0}	$((+b+c-a)/a).F_{A0}.X_A$	$F_T = F_{T0} + ((+b+c-a)/a).F_{A0}.X_A$ $F_T = F_{A0}.((F_{A0}+F_{B0} + F_{C0})/F_{A0} + ((+b+c-a)/a).X_A)$

Passo 7: Escrever a lei de velocidade da reação

Neste caso, trata-se de uma reação elementar irreversível de segunda ordem:

$$-r_A = k C_A^2$$

C_A é a concentração de A na saída do PBR; pode ser estimada da tabela estequiométrica do passo 6, lembrando que:

$$F_A = C_A \cdot v$$

$$F_A = F_{A0}(1 - X_A)$$

Passo 8: Obter todas os parâmetros cinéticos necessários, caso não estejam informados

A lei de velocidade foi informada como de elementar de segunda ordem: $(-r_A) = k.C_A^2$, para $k = 12 \text{ m}^6/\text{kmol.kg}_{\text{cat.h}}$.

Passo 9: Análise das informações

- O reator do exemplo estudado é um reator de leito fixo (também chamado de PBR ou de leito recheado). Este tipo de reator trabalha com reações catalíticas, normalmente em processo de adsorção ou absorção. Com essa informação sabe-se que, para reações em fase gasosa, há no processo uma queda de pressão ao longo do leito.
- A equação mais usada para calcular a queda de pressão em um leito fixo poroso é a Equação de Ergun:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{-G}{\rho g_c D_p} \left(\frac{1-\phi}{\phi^3} \right) \left[\frac{150(1-\phi)\mu}{D_p} + 1.75G \right]$$

PARA A SITUAÇÃO SEM QUEDA DE PRESSÃO – item (a):

Passo 9: Análise das informações – continuação

- Com as informações dadas no problema, pode-se fazer os seguintes cálculos iniciais

$$\text{Volume do leito: } V_{leito} = L \cdot A_C = 20 \text{ m} \cdot 0,0013 \text{ m}^2 = 0,026 \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade do leito: } \rho_b = \rho_c \cdot (1 - \phi) = 1923 \text{ kg/m}^3 \cdot (1 - 0,45) = 1058 \text{ kg/m}^3$$

- A massa de catalisador então para 20 m de tubo de 1½ in, série 40, é

$$w = V_{leito} \cdot \rho_b = 0,026 \text{ m}^3 \cdot 1058 \text{ kg/m}^3 = 27,5 \text{ kg}$$

Passo 10: Escrever a equação de balanço de massa do reator em função da variável desejada

Numa reação elementar, simples, para PBR de segunda ordem:

$$\frac{dF_A}{dw} = r_A$$

$$F_{A0} \frac{dX_A}{dw} = -r_A$$

Passo 11: Combinar a equação de projeto do reator com a lei de velocidade de reação

Numa situação onde não há queda de pressão, a equação de projeto dará que a conversão de A é função apenas da massa de catalisador. Dessa forma, pode-se calcular:

$$F_{A0} \frac{dX_A}{dw} = k \cdot C_A^2$$

$$C_{A0} \cdot v_0 \frac{dX_A}{dw} = k \cdot C_{A0}^2 \cdot (1 - X_A)^2$$

Aplicando integral:

$$\int_0^{X_A} \frac{1}{(1 - X_A)^2} dX_A = \frac{k \cdot C_{A0}}{v_0} \cdot \int_0^w dw$$

$$\frac{-X_A}{X_A - 1} = \frac{k \cdot C_{A0}}{v_0} \cdot w$$

Passo 12: Fazer as substituições numéricas e os cálculos

$$\frac{-X_A}{X_A - 1} = \frac{k \cdot C_{A0}}{v_0} \cdot W = \frac{12 \frac{m^6}{kmol \cdot kg_{cat} \cdot h} \cdot 0,1 kmol/m^3}{7,15 m^3/h} \cdot 27,5 kg_{cat}$$

$$X_A = 0,82 \text{ resposta do item (a)}$$

PARA A SITUAÇÃO COM QUEDA DE PRESSÃO – item (b):

Passo 9: Análise das informações – continuação

- No caso de considerar a queda de pressão no leito de um PBR para uma reação em fase gasosa, é preciso analisar as consequências na velocidade de reação. Para isso, será utilizada a equação de Ergun e consequentes novas equações que podem ser encontradas a partir dela, considerando as propriedades de um gás ideal.
- Para gases ideais pode-se considerar:

$$\frac{P_0 \cdot v_0}{P \cdot v} = \frac{F_{T0} \cdot R \cdot T_0}{F_T \cdot R \cdot T}$$

$$\frac{v}{v_0} = \frac{F_{T0}}{F_T} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0}$$

Para um sistema isotérmico e chamando $\frac{P}{P_0} = y$, encontramos:

$$v = \frac{v_0}{y} \quad (eq. 1)$$

Agora, sabe-se que o desenvolvimento da equação de Ergun nos dá:

$$y = (1 - \alpha \cdot w)^{1/2} \quad (eq. 2), \quad \text{para } \alpha = \frac{2 \cdot \beta_0}{A_c \cdot (1 - \phi) \cdot \rho_c \cdot P_0}$$

Essas equações encontradas serão usadas no balanço mais à frente.

Passo 10: Escrever a equação de balanço de massa do reator em função da variável desejada

Numa reação elementar, simples, para PBR de segunda ordem:

$$\frac{dF_A}{dw} = r_A$$

$$F_{A0} \frac{dX_A}{dw} = -r_A$$

Passo 11: Combinar a equação de projeto do reator com a lei de velocidade de reação

$$F_{A0} \frac{dX_A}{dw} = k \cdot C_A^2$$

$$C_{A0} \cdot v_0 \frac{dX_A}{dw} = k \cdot \left(\frac{F_A}{v}\right)^2$$

Substituindo a eq. 1 na equação de projeto:

$$C_{A0} \cdot v_0 \frac{dX_A}{dw} = k \cdot \left(\frac{F_{A0} \cdot (1 - X_A)}{v_0/y}\right)^2$$

Agora, substituindo a eq. 2:

$$C_{A0} \cdot v_0 \frac{dX_A}{dw} = k \cdot \frac{C_{A0}^2 \cdot v_0^2 \cdot (1 - X_A)^2}{v_0^2 / (1 - \alpha \cdot w)}$$

$$v_0 \frac{dX_A}{dw} = k \cdot \frac{C_{A0} \cdot (1 - X_A)^2}{1 / (1 - \alpha \cdot w)}$$

Aplicando integral:

$$\int_0^{X_A} \frac{dX_A}{(1 - X_A)^2} dX_A = \frac{k \cdot C_{A0}}{v_0} \cdot \int_0^w (1 - \alpha \cdot w) dw$$

$$\frac{1}{1 - X_A} - 1 = \frac{k \cdot C_{A0}}{v_0} \cdot \left(w - \frac{\alpha \cdot w^2}{2}\right) \quad (eq. 3)$$

Passo 12: Fazer as substituições numéricas e os cálculos

Calculando valor de α :

$$\alpha = \frac{2 \cdot \beta_0}{A_c \cdot (1 - \phi) \cdot \rho_c \cdot P_0} = \frac{2 \cdot 25,8 \frac{kPa}{m}}{0,0013 m^2 \cdot (1 - 0,45) \cdot 1923 \frac{kg}{m^3} \cdot 1013 kPa}$$

$$\alpha = 0,037 kg^{-1}$$

Agora, finalmente, voltando à eq. 3:

$$\frac{1}{1 - X_A} - 1 = \frac{k \cdot C_{A0}}{v_0} \cdot \left(w - \frac{\alpha \cdot w^2}{2}\right)$$

$$\frac{1}{1 - X_A} = \frac{12 \cdot 0,1}{7,15} \cdot \left(27,5 - \frac{0,037 \cdot 27,5^2}{2}\right)$$

$$X_A = 0,693 \quad \text{resposta do item (b)}$$

PARA A SITUAÇÃO COM QUEDA DE PRESSÃO E DIÂMETRO DA PARTÍCULA D_p DOBRADO – item (c):

Passo 9: Análise das informações – continuação

- Analisando a equação de Ergun, há dois termos que dependem do diâmetro da partícula e que são dominantes em diferentes regimes:
laminar turbulento

$$\frac{dP}{dz} = \frac{-G}{\rho g_c D_p} \left(\frac{1-\phi}{\phi^3} \right) \left[\frac{150(1-\phi)\mu}{D_p} + 1,75G \right]$$

Dado um regime turbulento, pode-se considerar o termo 1,75G dominante, e pode-se fazer a seguinte aproximação para o termo de β_0 :

$$\beta_0 = \frac{G(1-\phi)}{\rho_0 \cdot g_c \cdot D_p \cdot \phi^3} \left[\frac{150 \cdot (1-\phi) \cdot \mu}{D_p} + 1,75G \right]$$

$$\beta_0 = \frac{1,75G^2(1-\phi)}{\rho_0 \cdot g_c \cdot D_p \cdot \phi^3}$$

Nesse caso, pode-se traçar a seguinte correlação:

$$\beta_0 \sim \frac{1}{D_p}$$

Assim, considerando a equação de α que cria a correlação $\alpha \sim \beta$, temos que:

$$\alpha \sim \frac{1}{D_p}$$

Assim sendo, para um diâmetro de partícula dobrado, temos que α será reduzido à metade, ou seja, o ‘novo α ’, que chamaremos de α^* , será:

$$\alpha^* = \frac{\alpha}{2} = \frac{0,037 \text{ kg}^{-1}}{2} = 0,0185 \text{ kg}^{-1}$$

Passo 10: Escrever a equação de balanço de massa do reator em função da variável desejada

Numa reação elementar, simples, para PBR de segunda ordem:

$$\frac{dF_A}{dw} = r_A$$

$$F_{A0} \frac{dX_A}{dw} = -r_A$$

Passo 11: Combinar a equação de projeto do reator com a lei de velocidade de reação

$$F_{A0} \frac{dX_A}{dw} = k \cdot C_A^2$$

$$C_{A0} \cdot v_0 \frac{dX_A}{dw} = k \cdot \left(\frac{F_A}{v}\right)^2$$

Como já demonstrado, do balanço é possível chegar na eq. 3:

$$\frac{1}{1 - X_A} - 1 = \frac{k \cdot C_{A0}}{v_0} \cdot \left(w - \frac{\alpha \cdot w^2}{2}\right) \quad (eq. 3)$$

Passo 12: Fazer as substituições numéricas e os cálculos

Substituindo α^* encontrado:

$$\frac{1}{1 - X_A} - 1 = \frac{k \cdot C_{A0}}{v_0} \cdot \left(w - \frac{\alpha^* \cdot w^2}{2}\right)$$

$$\frac{1}{1 - X_A} = \frac{12 \cdot 0,1}{7,15} \cdot \left(27,5 - \frac{0,0185 \cdot 27,5^2}{2}\right)$$

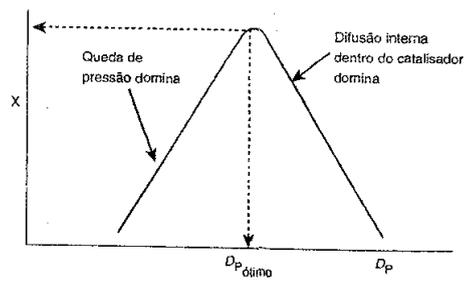
$$X_A = 0,774 \quad \text{resposta do item (c)}$$

Passo 13: Análise do resultado numérico e conclusão do problema

Analisando e comparando os resultados entre os itens (a) e (b), conclui-se que, de fato, a conversão cai após considerarmos a queda de pressão (de 82% para 69,3%). Este ponto mostra a importância de considerar este efeito para PBR com reações gasosas, a fim de ser projetado um valor real de conversão.

Agora nota-se que, para o caso levantado, comparando os itens (b) e (c) pode ser concluído que o aumento do diâmetro de partícula gera também aumento da conversão (de 69,3% para 77,4%). Isso ocorre porque o esse aumento no D_p gera também o aumento do parâmetro de queda de pressão (β_0) e, conseqüentemente, aumento da velocidade de reação.

Contudo, como trazido em Fogler (4ª edição, p. 150), esta última correlação nem sempre será verdadeira. Para partículas muito grandes, também são necessários tempos mais longos de reação. Ou seja, há um ponto ótimo para essa correlação – ou diâmetro ótimo –, como visto na imagem abaixo:



APÊNDICE B – FORMULÁRIO DE AUTOAVALIAÇÃO

AUTOAVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Formulário para autoavaliação do seu desempenho durante o trabalho sobre Reatores heterogêneos com queda de pressão para a disciplina de Reatores.

1. Nome: _____

2. Grupo:

- () 1 – Óxido de Etileno
 () 2 – Amônia
 () 3 – Metanol
 () 4 – Etileno
 () 5 – Formaldeído
 () 6 – Anidrido Maleico

3. Como você avalia a sua presença nos encontros da equipe, preparação e contribuição para a discussão em grupo? Considere para a escala de avaliação: (N) não apresentou; (I) insuficiente; (R) regular; (B) bom; e (E) excelente.

	1	2	3	4	5	
Não apresentou	<input type="radio"/>	Excelente				

4. Como você avalia sua participação ao fazer perguntas e responder perguntas dos demais? Considere para a escala de avaliação: (N) não apresentou; (I) insuficiente; (R) regular; (B) bom; e (E) excelente.

	1	2	3	4	5	
Não apresentou	<input type="radio"/>	Excelente				

5. Você se colocou à disposição para realizar tarefas fora do horário de aula e trazer materiais relevantes para a discussão em grupo? Considere para a escala de avaliação: (N) não apresentou; (I) insuficiente; (R) regular; (B) bom; e (E) excelente.

	1	2	3	4	5	
Não apresentou	<input type="radio"/>	Excelente				

6. Como você avalia sua postura como ouvinte (foi um bom ouvinte e respeitou a opinião dos outros)? Considere para a escala de avaliação: (N) não apresentou; (I) insuficiente; (R) regular; (B) bom; e (E) excelente.

	1	2	3	4	5	
Não apresentou	<input type="radio"/>	Excelente				

7. Como você avalia sua participação para a organização geral da equipe e construção de consenso? Considere para a escala de avaliação: (N) não apresentou; (I) insuficiente; (R) regular; (B) bom; e (E) excelente.

	1	2	3	4	5	
Não apresentou	<input type="radio"/>	Excelente				

8. Por fim, de maneira geral, como você avalia sua participação no projeto? Considere para a escala de avaliação: (N) não apresentou; (I) insuficiente; (R) regular; (B) bom; e (E) excelente.

	1	2	3	4	5	
Não apresentou	<input type="radio"/>	Excelente				

9. Comentários (use este espaço para fazer comentários que julgar necessários sobre as avaliações acima).

APÊNDICE C – FORMULÁRIO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO POR PARES

AVALIAÇÃO DESEMPENHO POR PARES

Formulário para avaliação por pares no trabalho sobre Reatores heterogêneos com queda de pressão para a disciplina de Reatores.

Na avaliação por pares você irá avaliar a participação de cada um de seus colegas de equipe, preenchendo este formulário uma vez por membro.

1. Seu nome: _____

2. Nome do membro da equipe a ser avaliado: _____

3. Grupo:

- () 1 – Óxido de Etileno
- () 2 – Amônia
- () 3 – Metanol
- () 4 – Etileno
- () 5 – Formaldeído
- () 6 – Anidrido Maleico

4. Como você avalia a presença desse(a) membro nos encontros da equipe, preparação e contribuição para a discussão em grupo? Considere para a escala de avaliação: (N) não apresentou; (I) insuficiente; (R) regular; (B) bom; e (E) excelente.

	1	2	3	4	5	
Não apresentou	<input type="radio"/>	Excelente				

5. Como você avalia a participação desse(a) membro ao fazer perguntas e responder perguntas dos demais? Considere para a escala de avaliação: (N) não apresentou; (I) insuficiente; (R) regular; (B) bom; e (E) excelente.

	1	2	3	4	5	
Não apresentou	<input type="radio"/>	Excelente				

6. Esse(a) membro colocou-se à disposição para realizar tarefas fora do horário de aula e trazer materiais relevantes para a discussão em grupo? Considere para a escala de avaliação: (N) não apresentou; (I) insuficiente; (R) regular; (B) bom; e (E) excelente.

	1	2	3	4	5	
Não apresentou	<input type="radio"/>	Excelente				

7. Como você avalia a postura desse(a) membro como ouvinte (foi um bom ouvinte e respeitou a opinião dos outros)? Considere para a escala de avaliação: (N) não apresentou; (I) insuficiente; (R) regular; (B) bom; e (E) excelente.

	1	2	3	4	5	
Não apresentou	<input type="radio"/>	Excelente				

8. Como você avalia a participação desse(a) membro para a organização geral da equipe e construção de consenso? Considere para a escala de avaliação: (N) não apresentou; (I) insuficiente; (R) regular; (B) bom; e (E) excelente.

	1	2	3	4	5	
Não apresentou	<input type="radio"/>	Excelente				

9. Por fim, de maneira geral, como você avalia a participação desse(a) membro no projeto? Considere para a escala de avaliação: (N) não apresentou; (I) insuficiente; (R) regular; (B) bom; e (E) excelente.

	1	2	3	4	5	
Não apresentou	<input type="radio"/>	Excelente				

10. Comentários (use este espaço para fazer comentários que julgar necessários sobre as avaliações acima).

APÊNDICE D - AVALIAÇÃO DO PROCESSO EDUCACIONAL

AVALIAÇÃO DO PROCESSO EDUCACIONAL

Formulário para avaliação sobre o método empregado para aprendizagem de reatores heterogêneos com queda de pressão (Aprendizagem Baseada em Problemas ou PBL) com a resolução do case em grupo.

1. Nome: _____

2. Grupo:

- () 1 – Óxido de Etileno
- () 2 – Amônia
- () 3 – Metanol
- () 4 – Etileno
- () 5 – Formaldeído
- () 6 – Anidrido Maleico

3. Avalie o processo educacional com a resolução do case em grupo para cada um dos critérios abaixo, assinalando (I), (R), (B) ou (E).

	Insuficiente (I)	Regular (R)	Bom (B)	Excelente (E)
Motivação				
Relevância				
Integração de conhecimentos				
Facilidade de obtenção de material				
Tempo para conclusão das atividades				
Apresentação dos resultados				
Alcance dos objetos educacionais				

4. Me senti mais desafiado(a) e motivado(a) para resolver um problema que não é bem delimitado e que retrata uma situação mais próxima da vivência profissional. Considere para a escala de avaliação: (1) Discordo totalmente; (2) Discordo parcialmente; (3) Neutro; (4) Concordo parcialmente; (5) Concordo totalmente.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

5. Os membros do grupo desempenharam bem suas funções colaborando para a solução do problema. Considere para a escala de avaliação: (1) Discordo totalmente; (2) Discordo parcialmente; (3) Neutro; (4) Concordo parcialmente; (5) Concordo totalmente.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	Concordo totalmente				

6. A formação dos grupos com pessoas de diferentes perfis e habilidades contribuiu para o desenvolvimento do projeto. Considere para a escala de avaliação: (1) Discordo totalmente; (2) Discordo parcialmente; (3) Neutro; (4) Concordo parcialmente; (5) Concordo totalmente.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	Concordo totalmente				

7. Os direcionamentos dados em aula ou nas sessões tutoriais pela professora ajudaram a esclarecer dúvidas e direcionar o projeto. Considere para a escala de avaliação: (1) Discordo totalmente; (2) Discordo parcialmente; (3) Neutro; (4) Concordo parcialmente; (5) Concordo totalmente.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	Concordo totalmente				

8. A monitoria com o monitor da turma e/ou os momentos de tira-dúvida com o tutor auxiliar ajudaram a esclarecer dúvidas e direcionar o projeto. Considere para a escala de avaliação: (1) Discordo totalmente; (2) Discordo parcialmente; (3) Neutro; (4) Concordo parcialmente; (5) Concordo totalmente.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	Concordo totalmente				

9. Senti dificuldade em trabalhar com um projeto "sem definições claras". Considere para a escala de avaliação: (1) Discordo totalmente; (2) Discordo parcialmente; (3) Neutro; (4) Concordo parcialmente; (5) Concordo totalmente.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	Concordo totalmente				

10. Acho que a estruturação do problema permitiu uma aprendizagem maior do que o modelo padrão de exposição em sala de aula. Considere para a escala de avaliação:

(1) Discordo totalmente; (2) Discordo parcialmente; (3) Neutro; (4) Concordo parcialmente; (5) Concordo totalmente.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	Concordo totalmente				

11. O trabalho facilitou a aprendizagem dos modelos matemáticos, equações para perda de carga e demais características de reatores heterogêneos com queda de pressão. Considere para a escala de avaliação: (1) Discordo totalmente; (2) Discordo parcialmente; (3) Neutro; (4) Concordo parcialmente; (5) Concordo totalmente.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	Concordo totalmente				

12. O semestre ter sido no formato EAD não afetou significativamente no processo de aprendizagem ao longo do projeto. Considere para a escala de avaliação: (1) Discordo totalmente; (2) Discordo parcialmente; (3) Neutro; (4) Concordo parcialmente; (5) Concordo totalmente.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	Concordo totalmente				

13. Por fim, de 1 a 10, o quanto você indicaria este método de aprendizagem baseado em problemas para outras disciplinas da graduação?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

14. Comentários (use este espaço para fazer comentários que julgar necessários sobre as avaliações acima, indicando como o caso de ensino poderia ser melhorado).

APÊNDICE E – RELATOS DA PRIMEIRA SESSÃO TUTORIAL

GRUPO 1

Começamos estudando sobre o Case e, a partir do guia dos passos nós organizamos nossas ideias da seguinte forma:

- Questionamentos-Chave para estruturar o problema:

Estudos de mercado exterior, tópico financeiro em relação ao mercado, parte econômica do processo, se tem lucro alto, custo-benefício.

Catalisador, características deles, como ele influencia no processo e os custos (ideia de criar planilha no Excel com os possíveis catalisadores).

Focar no PBR, como o reator é utilizado no processo, como é o equacionamento, qual a função, em quais condições trabalha (temperatura e pressão ideal), quantas reações são, o que entra e sai.

Garantir 50% de conversão desejada no reator.

Dimensionar o reator (saber quanto é a produção anual, baseado em outros processos para ser competitivo?)

Como otimizar o processo.

- Elementos desconhecidos:

Catalisador (catalisador de prata suportada em alumina?)

Propriedades do catalisador;

Reator PBR;

Condições do reator.

Reator atua em pressão constante?

Média de produção anual de Oxido de Etileno para dimensionarmos.

Tem pontos quentes no reator? (Catalisador sensível)

Determinação da massa do catalisador.

- Onde encontrar informações:

Literatura;

Processos industriais;

Patentes.

- O que já sabemos:

Catalisador vai influenciar muito no processo;

Característica da porosidade influencia na queda de pressão?

Temperatura e pressão podem influenciar na conversão;

Concentração dos reagentes influencia na conversão e seletividade;

Queda de pressão é prejudicial ao processo;

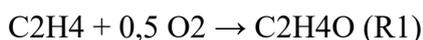
Catalisador de prata suportada em alumina, provavelmente, baseado na literatura (acredita-se que os átomos de prata possuem um papel fundamental no processo de adsorção do etileno e oxigênio reagentes);

Desvantagem do PBR é que é difícil remover o catalisador;

Ainda não conseguimos dimensionar o reator, falta informação.

- Reações do processo:

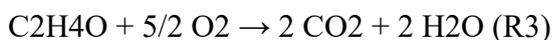
Reação de Produção do Óxido de Etileno (combustão incompleta)



Queima Total do Etileno (combustão completa)



Queima Direta do Óxido de Etileno (combustão completa)



- Tarefas da semana (até 14/12):

Geral: Estudar a ua10 – reator PBR

Duplas: Mercado econômico; PBR específico para o projeto; Catalisador

- Meta de aprendizado:

Entender como funciona o reator PBR, qual o Catalisador ideal e como ele funciona e como otimizar o processo.

- Regras:

Cumprir todas as tarefas destinadas nessa semana até nossa próxima reunião. Além de estudar, compilar as informações e apresentar para o restante do grupo.

GRUPO 2

Primeiramente o case foi estudado e destrinchado em informações mais importantes, como o processo sendo realizado em um reator PBR, isotermicamente e com conversão

mínima de 50%. O objetivo é realizar uma produção que seja competitiva no mercado nacional, levando em consideração também o catalisador utilizado.

Em um segundo momento, foi levantado pontos de atenção como qual seria o foco para avaliar a competitividade, se isso seria pela quantidade produzida ou pelo preço e custos de produção e também a questão de fornecedores. Para avaliar esses pontos, o grupo separou alguns temas que devem ser estudados no desenvolver do trabalho, como estudo sobre o PBR, queda de pressão no leito, aumento de conversão, revisão geral de cinética e catálise, estudo sobre o processo de síntese de amônia, ferramentas numéricas, etc.

Feita essa primeira análise, o grupo pensou e já separou os materiais teóricos necessários para ao decorrer do projeto, tudo foi upado e compartilhado em um drive. Logo após, foi definido o método de trabalho com algumas regras:

- Estudo individual e geral do processo e de PBR nessa primeira semana;
- Todas as informações devem ser compartilhadas no drive;
- Divisão em duplas ou trios nas tarefas das semanas seguintes;
- Temas das tarefas divididos por afinidade com o assunto;
- Apoio mútuo entre as duplas/trios;
- Resumo de todas as discussões em grupo;
- Reuniões fixas semanais.

Por fim, foram elencadas hipóteses para a solução do case, todas elas estão disponíveis no Jamboard.

GRUPO 3

Nesta reunião foram discutidos os seguintes assuntos:

1. Definição do coordenador e Redator do grupo

2. Definição de Regras:

- a. Todos se comprometem em estudar os temas relacionados ao trabalho.
- b. O grupo se reunirá nas segundas-feiras, das 16h às 18h. Concordamos em ser pontuais.
- c. Quaisquer problemas, avisar com antecedência no grupo do Whatsapp, se possível. Este será nosso canal de comunicação.
- d. Em caso de divergência, as questões serão resolvidas por voto da maioria.
- e. Ao final do trabalho, a nota será dividida igualmente entre os integrantes do grupo.

3. Estudo inicial do processo: Inicialmente todos os membros do grupo estudaram em conjunto o case, discutindo e levantando a problemática e os aspectos relevantes do problema.

4. Brainstorm:

- a. Reator PBR e leito fixo com queda de pressão
- b. Síntese do metanol
- c. Parâmetros do processo
- d. Catalisadores
- e. Pesquisa de reatores disponíveis no mercado
- f. Produção anual de metanol

5. Divisão de temas para estudo:

- a. Volume do reator
- b. Catalisadores
- c. Temperatura e Pressão
- d. Razão Molar
- e. Produção anual
- f. Reatores disponíveis no mercado

6. Todos deverão pesquisar sobre o equacionamento da conversão e da queda de pressão em um reator PBR.

7. Objetivos e estratégias para a próxima reunião: Reunir os dados pesquisados por todos e avaliar sua influência na queda de pressão e conversão, comparando com o equacionamento.

GRUPO 5

REGRAS:

- 1. Todos se ajudarem nas tarefas, apesar de cada integrante ser responsável por uma
- 2. Conversar pelo grupo de Whatsapp e compartilhar o que conseguir encontrar
- 3. Avisar com pelo menos um dia de antecedência caso não conseguir fazer sua parte

OBJETIVOS: otimização do processo catalítico de síntese do formaldeído no reator PBR (isotérmico; conversão mínima de 50% para a reação desejada e/ou uma produtividade mensal competitiva no mercado), a partir do estudo sobre as características do catalisador e do reator utilizado no processo.

PONTOS IMPORTANTES DO CASE:

- Produção de formaldeído
- Processo catalítico
- Ocorre em reator PBR (leito fixo)
- Deve ser estudada a queda de pressão no leito de recheio com partículas de catalisador
- Manter a conversão mínima de 50% e/ou uma produtividade mensal competitiva no mercado.
- Reator é operado isotermicamente
- Será necessário estudar sobre a otimização do processo no reator PBR (estudos qualitativos e quantitativos)

1º Momento - estudar o produto final, o reator PBR e procurar processos em que ele seja produzido.

ASSUNTOS A SEREM ESTUDADOS:

- Formaldeído
- Reator PBR
- Catalisador para o processo de produção do formaldeído

QUESTÕES LEVANTADAS:

- Formaldeído
 - Produção do formaldeído ocorre pela oxidação do metanol com o ar
- Catalisador
 - O catalisador utilizado geralmente é um catalisador de metal ou óxido de metal
 - O mais específico encontrado foi o catalisador de prata

PONTOS A SEREM ESTUDADOS FUTURAMENTE:

- Otimização e catálise
- Custo de produção

SEPARAÇÃO DOS TEMAS PARA ESTUDO:

- Ficha técnica
- Catalisadores
- Reator PBR
- Caso real

- Processos de formaldeído

GRUPO 6

Neste documento, apresentamos as regras para o bom andamento do trabalho. Temos também informações retiradas pelo grupo do case apresentado, juntamente com informações coletadas em pesquisa nas bibliografias sobre o processo. Por último, definimos o que deve ser pesquisado por cada membro do grupo para nosso próximo encontro e realizamos um brainstorming de como apresentar o trabalho.

Definições:

Segunda-feira encontro do grupo para explicar e demonstrar as pesquisas

(TEMAS PRÉ ESTABELECIDOS)

Regras:

Pontualidade nas reuniões

Sempre trazer os temas pré-estabelecidos de pesquisa

Faltas e atrasos justificáveis são toleráveis

Manter um Google Doc organizado com as bibliografias para que não haja perda de dados

Participar das aulas de tutoria

Informações do Processo:

- Produção do Anidrido Maleico
- Reação Catalítica
- Objetivo (Reduzir o custo de produção/ Otimização do reator PBR catalítico)
- Há queda de pressão no leito fixo
- Porosidade, granulometria, densidade e custo do leito variam de acordo com os fornecedores
- Conversão mínima 50%
- Reator opera isotermicamente (bom controle de temperatura)
- Anidrido Maleico é utilizado na produção de polímeros (TINTAS/PLÁSTICOS/BDO) poliésteres, resinas, óleos de secagem, produtos de aplicação na agricultura (inseticidas, fungicidas e inibidores do crescimento), ácido fumárico, plásticos, lubrificantes, copolímeros, etc.

O que devemos fazer:

Estudar os temas e apresentar para o grupo

Analisar como otimizar o processo no PBR (propriedades do catalisador)

1. Aumentar a conversão
2. Avaliar o tempo espacial
3. Avaliar financeiramente o processo
4. Respeitar os requisitos pré-estabelecidos

Ideias:

- Comparar o processo atual (feito com benzeno) com o processo realizado com outros reagentes (butano e buteno)
- Estudar o mecanismo de reação
- Avaliar os catalisadores para cada processo e seu valor
- Verificar se as reações são seletivas com os diferentes reagentes
- Ler a aula UA10
- Condições de operação que afetam a atividade/seletividade do catalisador
- Possibilidade de reciclo no reator
- Possibilidade do reagente O₂ com o anidrido maleico, sendo necessário retirá-lo do processo

Temas para pesquisa:

1. Diferentes reagentes no processo (preço; seletividade; se é usado industrialmente)

O benzeno e o n-butano são as matérias-primas utilizadas para a produção de anidrido maleico. Entretanto, os critérios de avaliação são:

- As emissões de benzeno ocasionam difícil controle de poluição, se classifica como uma substância cancerígena e apresenta preço elevado (em torno de 1,07 € face a 0,585 € do n-butano);
- Devido à exploração de campos de gás natural, o n-butano apresenta maior disponibilidade.

2. Mecanismo de reação (Leis de velocidade/ Sítios ativos/ etc.)

- Mecanismo de Mars e Van Krevelen (Leva em conta a adsorção do sítio catalítico)
- Modelo estacionário de Adsorção (Muito parecido com o anterior)
- Modelo de Hinshelwood
- Modelo de Langmuir-Hinshelwood (Mais completo)

3. Catalisadores utilizados no processo

Óxidos de Vanádio (Metal pesado)

Sistema Binário (Vanádio - Outro Metal)

- provocava um aumento da energia de ligação do oxigênio até a saturação de 30% coincidente com um aumento da seletividade do catalisador, levando à conclusão que a energia de ligação do oxigênio deve ser um fator importante para compreender as propriedades seletivas de um catalisador de oxidação;
- trabalhando com catalisadores de vanádio e molibdênio concluíram que a atividade e a seletividade máximas do catalisador coincide com a máxima solubilidade do MoDa no Y_2O_5 e que a ação do MoDa está mais provavelmente ligada à inclusão de imperfeições na rede original de Y_2O_3 e à criação de novos níveis eletrônicos.

Podemos comparar a reação catalisada com óxido de vanádio (simples) com a reação catalisada com uma mistura de óxidos metálicos + promotores.

Brainstorming:

1. Comparação do processo antigo (realizado com benzendo como reagente e vanádio como catalisador) com o processo com inovações (como utilização do n-butano e mistura de catalisadores metálicos)
2. Como isso influencia no mecanismo de reação (leis de velocidade)
3. Como isso influencia na queda de pressão (alteração do recheio)
4. Como isso influencia nos custos e no grau de conversão do processo
5. Verificar se o processo apresenta ou não reciclo (se é favorável)
6. Verificar o tempo de reação e tempo espacial (Vazão de alimentação)
7. Analisar condições de operação

Para próxima reunião:

- Ter estudado a UA10
- Entender o funcionamento do reator PBR
- Entender como é realizado seu dimensionamento
- Verificar as equações de queda de pressão em leitos fixos
- Aprender o método numérico para sermos capazes de realizar os cálculos corretamente
- Comparação de preços e rendimento dos dois processos (dados reais)
- Modelo de reação
- Tipos de recheio e queda de pressão (catalisadores)

APÊNDICE F – RELATOS DA SEGUNDA SESSÃO TUTORIAL

GRUPO 1

Variáveis do processo:

- Qual é mais eficaz, com entrada de oxigênio ou ar?
- Massa de catalisador.
- Condições de operação (temperatura e pressão).
- Correntes de entrada (porcentagem dos reagentes)

Podemos utilizar os parâmetros cinéticos encontrados na bibliografia (Fogler).

No caso da entrada de ar, será necessário um Separador, deverá ser citado.

Catalisador

- **Catalisador utilizado:** Ag/ α -Al₂O₃
- **Características:** Contém teores de sílica em torno de 15% m/m; área superficial inferior a 1 m²/g. Deve conter de 10 a 15% de massa de Ag no catalisador.
- **Motivo:** Catalisadores a base de prata garantem a eficiência da reação de formação de óxido de etileno, uma vez que, a taxa de oxidação do etileno por unidade de área de prata é significativamente maior que a adsorção não dissociativa do oxigênio. Além disso, a prata tem mostrado um comportamento catalítico mais seletivo em processos de oxidação parcial.
- **Condições:** tamanho de partículas maiores que 200-400 angstroms;

Reator

- **Temperatura:** entre 200 e 300°C (reações exotérmicas, se for a temperatura muito alta, desfavorece o processo e muito baixa favorece a inversa).
- **Pressão:** por volta de 2×10^6 Pa

Dados do Processo

- Correntes de entrada:

Opção 1: Etileno 17% / Oxigênio 6% / Inerte (N₂) 77%

Opção 2: Etileno 5% / Oxigênio 6% / Inerte (N₂) 89%

Opção 3: Etileno 29,5% / Oxigênio 15,5% / Inerte 55%

- **K:** 0,0141 lb.mol/atm.lb m cat.h a 260 °C (Fogler página 184)

- **Lei da velocidade:** $-r_A = k \cdot P_a^{1/3} \cdot P_b^{2/3}$

- **Porosidade do leito fixo:** 0,45 (Fogler) ou 3/8 (outra literatura)

Tarefas da semana:

Início da montagem da planilha

Resumo das nossas decisões (escolha das entradas do processo, catalisador, condições de operação)

Encontrar a densidade

Parte teórica para encontrar as EDOs de forma genérica

Passar para a planilha genérica

Montar o RK-4

GRUPO 2

O que foi pesquisado:

Catalisadores pesquisados: ferro, óxido de ferro (magnetita Fe_3O_4), urânio e ósmio.

Reator Catalítico (PBR): Nos pdfs encontramos que o processo utiliza dois leitos catalíticos em série com trocadores de calor nas saídas.

Processo com pressão elevada (100~200 atm), T?

Cinética: taxa de reação (encontramos duas taxas diferentes que precisamos testar)

Conversão nos processos pesquisados são muito baixas (20 a 25%), verificar o que deve ser feito se não for possível atingir 50%

Catalisador com formato de grânulos óxidos fundidos de ferro (dimensões?)

A única forma de aumentar a conversão seria trocar o catalisador do processo, seria viável? Se não, por quê?

Reação:



Dúvidas:

Como a queda de pressão afeta a conversão do reator? (fundamento da UA10)

Reatores PBR Múltiplos (parecido com o PFR)

Aumento de conversão (depende do catalisador)

Divisão de tarefas:

1° trio: Pesquisar sobre a queda de pressão

2° trio: Pesquisar sobre os catalisadores

Conclusão: As indústrias utilizam como base o processo desenvolvido por Haber-Bosch, utilizando como catalisador o ferro promovido com óxidos de alumínio e potássio. Dupont e Claude conseguem uma conversão maior, então vamos verificar esses processos.

Próximos passos:

Utilizaremos como base o processo de **Haber-Bosch**;

Encontrar as propriedades e definir um catalisador (magnetita, ferro promovido com óxidos ou outros?);

Verificar a questão do fluxo ser radial e axial e como isso afeta a queda de pressão;

Marcar reunião para semana que vem discutirmos possíveis equacionamentos.

GRUPO 3

- **Tópicos estudados por cada aluno:**

No início, cada aluno apresentou os resultados das pesquisas determinadas no primeiro encontro, a partir dos dados apresentados por cada um, seguimos para uma discussão acerca do equacionamento.

- **Equacionamento:**

Um dos integrantes do grupo realizou uma apresentação detalhando o equacionamento, a partir disso realizamos uma breve discussão sobre os parâmetros necessários para seguirmos o trabalho.

- **Valores determinados segundo a literatura:**

Utilizando os conhecimentos adquiridos nas pesquisas individuais chegamos aos seguintes dados:

Temperatura de operação – 573 K

Pressão de operação – 30 atm

Vazão de alimentação de CO – 840 kg/h

Proporção molar de alimentação (CO:H₂) – 1:2

Dimensões do Reator – 2,8 m de diâmetro; 11,7m de altura

Catalisador utilizado – Cu/ZnO/Alumina

Proporção mássica do catalisador – 8%/1%/91%

Produção anual de metanol – 2700,4 m³/h

Fábrica operando 251 dias no ano, 18 horas por dia

A partir dos dados acima podemos determinar ainda:

Densidade do gás de alimentação

Viscosidade do gás de alimentação

Densidade do catalisador

Fluxo mássico total de alimentação

- **Estratégia de resolução**

Desenvolver uma planilha eletrônica utilizando os dados determinados anteriormente, em conjunto com as equações para observar como a conversão e a queda de pressão variam em função da porosidade do leito e o diâmetro da partícula portanto, a massa do catalisador. Utilizaremos o método Runge Kutta de quarta ordem para resolver o sistema de 7 EDOS.

- **Análise Econômica**

Faremos uma avaliação dos custos e das receitas de produção baseado nos dados adquiridos.

- **Separação de tarefas**

Equacionamento

Análise Econômica

GRUPO 4

Opções de processos

- Produção de eteno com base no catalisador Ni
- Produção etileno a partir da desidrogenação de etano com catalisador MoVTenbO/TiO₂
- Produção de etileno a partir de etanol
- Produção de etileno a partir de etanol em alumina e óxido misto de cério-zirconio

Pesquisa

- Catalisadores utilizados? -> Craqueamento (Ni, MoVTeNbO/TiO₂) não é em leito fixo. Etanol (alumina e óxido misto de cério-zirconio), produção de etileno a partir da desidrogenação de etanol.
- Como otimizar o processo catalítico no reator PBR? -> Comparar catalisadores, pois a queda de pressão varia dependendo de suas características
- Qual a reação principal?
- Como é a produção de etileno? -> Reação endotérmica, reciclo, reversível, leito fixo com queda de pressão
- Custo?
- Qual reator seria o melhor pra esse caso? (Melhor conversão) -> Reator PBR
- Estudar queda de pressão no leito de recheio com partículas de catalisador -> Depende da granulometria, porosidade, esfericidade, densidade e massa do catalisador(a calcular)
- Pesquisar método de produção atual, e se existem novos métodos que podem ser utilizados -> 78% de base nafta, 16% gás e 6% etanol (2016)

Levantamento Final

- Analisar 2 opções dos mesmos processos já que o cliente possui uma empresa consolidada com reator já otimizado para este processo, optando-se então por analisar apenas os diferentes catalisadores dentro o mesmo processo
- Craqueamento, desidrogenação do etano ou rota do etanol: dentre o escolhido comparar as 2 opções
- Opções catalisador:
 1. Zeolita
 2. Oxido de magnesio
 3. Silica
 4. óxido misto de cério-zirconio
 5. Alumina
 6. Tetraluminio zeolita
 7. Silicato de magnesio
 8. Pt/LaMnO₃ (oxidação de etano e propano)
 9. Ni (níquel)

10. Desidrogenação de etano para etileno usando catalisador MoVTaNbO/TiO₂,

Rota etanol (motivos)

- Devido à limitada fonte de recursos fósseis e à crescente preocupação mundial com o meio ambiente, pesquisas visando rotas alternativas para a produção de eteno a partir de fontes renováveis, têm atraído a atenção de pesquisadores no mundo todo, especialmente a desidratação catalítica de etanol, preferível em relação a do etano.
- Rota de craqueamento não é feita em leito fixo, dessa forma não condiz coma realidade do cliente.

Apresentação (o que deve conter)

- Apresentar método atual do cliente (desidrogenação do etanol utilizando a alumina como catalisador, alumina foi escolhida por conta da representatividade comercial) e compará-lo com o nosso
- Estimativa de custo/produktividade
- Cálculo do reator e dimensões fixas
- Queda de pressão
- Gráficos comparativos
- Tabela comparativa variando os catalisadores:
 1. Catalisadores : Alumina, zeolita e óxido misto de cério-zirconio
 2. Características (porosidade, granulometria, porosidade, esfericidade, densidade e massa do catalisador)
 3. Estimativa de custo/produktividade

Tarefas

- Ler as duas teses e o artigo sobre o assunto (que estão no drive)
- Reunir após o recesso para realização do projeto

GRUPO 6

No documento de hoje, iniciamos a montagem e a ordem de apresentação para solução do case apresentado. Como debatido anteriormente, selecionamos um modelo de reação para calcular as leis de velocidade (a partir do Benzeno).

O modelo é denominado modelo de Mars e van Kreveler.

- Tópicos da Apresentação:
 - Informações do Case
 - Modelo de Reação
 - Leis de Velocidade de Reação
 - Otimização do Processo
 - Equações de Projeto
 - Dimensionamento do Reator
- O grupo decidiu trabalhar com a troca do leito fixo (catalisador)
 - Pentóxido de Vanádio
 - VPO
- Próximo passo:
 - Conseguir informações sobre os dois catalisadores
 - Verificar como equacionar o projeto em função da conversão para um mesmo preço (massa) de catalisador