

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

JOÃO GABRIEL MOURA CAMPOS

Desenvolvimento de novos experimentos para a disciplina  
Fundamentos das Transformações Químicas (PQI-3101)

São Paulo  
2014

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

JOÃO GABRIEL MOURA CAMPOS

Desenvolvimento de novos experimentos para a disciplina  
Fundamentos das Transformações Químicas (PQI-3101)

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química

Orientadores:  
Prof. Dr. Augusto Camara Neiva  
Prof. Dr. André Gonçalves Antunha

São Paulo  
2014

O engenheiro deve ser ao mesmo tempo filósofo, humanista e um operário cabeça-dura e esforçado.

Ele deve ser filósofo o suficiente para saber no que acreditar, humanista o suficiente para saber o que deseja, e operário o suficiente para saber o que fazer.

(Frederick Clarke)

## RESUMO

O advento de uma nova diretriz político-pedagógica (Estrutura Curricular 3 - EC3) para Escola Politécnica da Universidade de São Paulo implicou na reformulação da disciplina laboratorial ministrada pelo departamento de Engenharia Química aos alunos do primeiro semestre da graduação. Essa é uma oportunidade interessante para se pesquisar novos formatos didáticos para as atividades laboratoriais e esse trabalho descreve o projeto de desenvolvimento da nova disciplina experimental. Em uma primeira etapa procura se esclarecer melhor quais são os objetivos da mudança de estrutura curricular e como eles se relacionam com os diferentes projetos de Universidade. Essa discussão fornecerá ferramentas para definir quais são as metas pragmáticas que orientaram o desenvolvimento de novos procedimentos. Por fim, descreve-se as experiências que foram concebidas ao longo do projeto.

Palavras chave: Engenharia. Engenharia Química. Ensino e aprendizagem. Curso de graduação. Estrutura curricular 3. Disciplina Experimental. Termodinâmica.

# ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	3
2 CONTEXTO DE MUDANÇA CURRICULAR: EC3.....	6
2.1 Estrutura Curricular 3.....	6
2.2 Premissas e Diretrizes.....	7
2.3 Objetivos relacionados às diretrizes.....	11
3 DEBATE POLÍTICO-PEDAGÓGICO.....	14
3.1 Paradigmas arquetípicos de Universidade.....	14
3.1.1 Universidade como campo de treinamento profissional.....	15
3.1.2 Universidade como agência prestadora de serviços.....	16
3.1.3 Universidade como centro de pesquisa e formação acadêmica...17	
3.2 Definição de um consenso.....	19
4 DESENVOLVIMENTO DOS NOVOS EXPERIMENTOS.....	22
4.1 Panorama das experiências anteriores.....	23
4.2 Montagens experimentais simples.....	24
4.3 Transformações químicas e físicas sob a perspectiva termodinâmica....26	
4.3.1 1a Lei e a equação fundamental da Termodinâmica.....	26
4.3.2 Pares de variáveis conjugadas.....	28
5 EXPERIMENTOS REALIZADOS.....	29
5.1 Calorímetro (Experimento T×S).....	30
5.1.1 Montagem.....	30
5.1.2 Fenômenos envolvidos.....	33
5.1.3 Relatório.....	34
5.2 Comportamento de Gases Ideais (Experimento p×V).....	36
5.2.1 Montagem.....	36

5.2.2 Fenômenos envolvidos.....	40
5.2.3 Relatório.....	41
5.3 Pilha e Eletrólise (Experimento E×q).....	44
5.3.1 Montagem.....	44
5.3.2 Fenômenos envolvidos.....	48
5.3.3 Relatório.....	50
5.4 Tensão Superficial (Experimento $\sigma \times A$ ).....	51
5.4.1 Montagem.....	51
5.4.2 Fenômenos envolvidos.....	60
5.4.3 Relatório.....	63
5.5 Diferenças de Potencial (Experimento Fluxos Difusivos).....	64
5.5.1 Montagem.....	64
5.5.2 Fenômenos envolvidos.....	67
6 CONCLUSÃO.....	69
7 BIBLIOGRAFIA.....	71
8 ANEXOS.....	72
8.1 Roteiro da experiência T×S.....	72
8.2 Roteiro da Experiência p×V.....	73
8.3 Roteiro da Experiência E×q.....	75
8.4 Roteiro da Experiência $\sigma \times A$ .....	80
8.5 Roteiro da Experiência Fluxos Difusivos.....	82

# 1 INTRODUÇÃO

Durante o primeiro semestre de 2014, desenvolvi um projeto de Iniciação Científica que consistia na elaboração de novos experimentos e monitoria laboratorial para a matéria oferecida pelo departamento de Engenharia Química aos alunos ingressantes na graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O presente trabalho de conclusão de curso é uma extensão desse projeto e apresenta uma discussão sobre a proposta de renovação da disciplina e relata o desenvolvimento dos procedimentos laboratoriais propriamente ditos. O projeto foi orientado pelo professor Augusto C. Neiva e a equipe da disciplina específica para a qual desenvolvemos os experimentos era composta pelos professores André G. Antunha, Jorge W. Gut, José Luís de Paiva além das técnicas e técnicos dos laboratórios do departamento.

O advento de uma nova estrutura curricular (Estrutura Curricular 3 – EC3) implicou no desmembramento de uma matéria laboratorial que antes era ministrada pelo departamento de maneira conjunta a todos ingressantes em disciplinas separadas para cada ênfase em Engenharia. Dada essa divisão, optou-se por desenvolver o projeto focando, dentre as novas disciplinas, apenas aquela destinada aos 60 ingressantes na ênfase em Engenharia Química. Tendo como ponto de partida as diretrizes da EC3, o projeto de renovação dessa cadeira curricular é fruto de discussões elaboradas desde o ano passado junto à equipe de professores sobre propostas de elaboração de uma nova disciplina experimental.

Tive contato com o projeto em um momento no qual alguma parte da discussão e da elaboração de diretrizes da matéria já haviam iniciado. Nem por isso a equipe de professores deixou de me incluir em debates e considerações de caráter pedagógico naturalmente desenvolvidas ao longo do projeto. Também não participei da elaboração do plano de reestruturação curricular EC3 e da decisão de como premissas dessa renovação se relacionariam com o

desenvolvimento da disciplina específica em questão. Nem por isso a dimensão pedagógica deixou de ser abordada em nossas discussões, pois o desenvolvimento de uma nova disciplina requer muita clareza e ênfase nos objetivos gerais que se almejam.

Desse modo o presente trabalho é uma excelente oportunidade para se apresentar quais são as metas gerais da EC3 e como elas se relacionam em termos práticos com o processo de formação de um engenheiro. O projeto de reformulação curricular da Escola Politécnica apenas lista diretrizes a serem seguidas e não se estende muito em esclarecer quais concepções político-pedagógicas legitimam e justificam a escolha dessas orientações. As premissas apresentadas pela nova estrutura estão diretamente relacionadas com o perfil de engenheiro que se quer formar nessa Escola, e são indicativas das atuais demandas desse tipo de profissional e do caráter dinâmico do atual estado de desenvolvimento tecnológico e científico. Devemos então elucidar quais os princípios e objetivos dessa mudança para conseguirmos orientar com mais propriedade e eficácia o desenvolvimento da nova disciplina.

A discussão sobre quais são os objetivos a serem atingidos em um curso de graduação em Engenharia é muito ampla e ultrapassa inclusive os limites do novo projeto político-pedagógico proposto pela Escola. É impossível discutir sobre o perfil de aluno que se espera formar em um curso universitário, sem levantar quais os objetivos gerais da própria Universidade. Essa é uma discussão político-pedagógica polêmica e de escopo muito amplo para um trabalho de conclusão de curso, mas que mesmo assim será brevemente apresentada para que tenhamos mais uma ferramenta na tentativa definir com clareza quais os objetivos perseguidos com a reformulação da matéria e elaboração de novos experimentos. Para cumprir tal tarefa serão apresentados alguns tipos categóricos de ideais de Universidade que podem esquematizar as concepções em disputa no nosso contexto.

Por maiores e mais insolúveis que pareçam os conflitos entre os interesses envolvidos na formação universitária, devemos encontrar algum ponto de consenso mínimo. Essa postura é capaz de evitar um debate longo e



pouco frutífero para nossos objetivos particulares e pragmáticos, lembrando que iniciamos essa investigação com a finalidade de elaboração de procedimentos experimentais para uma nova disciplina. Desse modo, identificamos que qualquer o projeto de universidade ou orientação de graduação em Engenharia deve ter uma forte ênfase nos princípios fundamentais dos métodos e das ciências próprias à Engenharia. Nos resta então identificar quais as ferramentas e ciências que tornam a Engenharia um instrumento tão efetivo em alterar a realidade física do mundo que nos cerca, para que possamos propor novos experimentos didáticos que privilegiem o desenvolvimento dessas competências fundamentais nos alunos.

Após todo o levantamento preliminar de objetivos e princípios orientadores, será descrito como foi o processo de elaboração das experiências propriamente ditas. Participei do desenvolvimento das novas experiências e, paralelamente, acompanhei as atividades de laboratório como monitor da disciplina. Seguindo as conclusões da linha de discussão apresentada até o momento, buscamos desenvolver experiências que privilegiassem as características fundamentais que diferenciam a Engenharia. Em suma, as experiências foram orientadas pela busca de montagens experimentais simples que evidenciassem de forma bem direta os conceitos basais que serão tratados segundo uma abordagem Termodinâmica dos fenômenos físicos e químicos.

## **2 CONTEXTO DE MUDANÇA CURRICULAR: EC3**

O ano de 2014 marcou o início de uma nova estrutura curricular dos cursos da Escola, a Estrutura Curricular 3 (EC3). Passados mais de 10 anos desde sua última grande reforma curricular, a Escola Politécnica da USP iniciou, em 2010, um processo de discussão sobre o tipo de profissional que deve formar e o modo como o ensino de graduação deve ser nela conduzido. Os trabalhos evoluíram de discussões preliminares mais gerais para grupos de trabalho responsáveis por orientar a elaboração das diretrizes do projeto político pedagógico. A reestruturação da disciplina laboratorial Fundamentos das Transformações Químicas (PQI-3101) ocorreu nesse contexto de mudança curricular e as premissas político-pedagógicas desenvolvidas serviram como orientação dos objetivos perseguidos com esse novo curso.

### **2.1 Estrutura Curricular 3**

Devido ao longo tempo decorrido desde o estabelecimento da estrutura de formação em vigor naquele momento, as discussões em torno da reestruturação do curso foram bastante profundas e extensas. Após um tempo de discussões preliminares envolvendo a comunidade acadêmica, seguiu-se a sistematização de grupos responsáveis por elaborar propostas concretas que orientassem as mudanças. Dentre as propostas resultantes, a de maior impacto foi a que propôs a flexibilização dos itinerários formativos dos alunos nas diferentes modalidades ou habilitações, proposta por grupo que contava com a participação de representantes da Comissão de Graduação (CG) da Escola e da comunidade acadêmica envolvida. Em março de 2010 o subgrupo concluiu o seu trabalho, cuja essência foi aprovada em reunião da CG de novembro de 2011 e pela sua Congregação em setembro de 2012, passando a ser adotada a partir de 2014 para orientar os Projetos Políticos Pedagógicos da chamada Estrutura Curricular 3 e abreviada como EC3.

## 2.2 Premissas e Diretrizes

Como já foi dito, dentre as principais diretrizes traçadas pelos grupos de discussão sobre a nova estrutura, foi dada maior ênfase à flexibilização das carreiras de formação e à intercomunicação entre as diversas áreas da formação em Engenharia, garantida por forte base conceitual. Segundo consta no documento do Projeto Político Pedagógico da EC3 (PROJETO...,2013) as premissas adotadas para o trabalho do subgrupo foram:

- a Escola Politécnica da USP deve continuar formando os líderes locais e nacionais das diferentes áreas da Engenharia;
- o modo como o conhecimento em todas as áreas evolui, o caráter cada vez mais sistêmico da profissão de Engenheiro e a dinâmica de mudanças da sociedade, dentre outros pontos, exigem uma formação permanente do engenheiro ao longo de sua vida profissional e leva a mudanças de suas atividades e funções, sugerindo uma formação durante a graduação pautada em conhecimentos que lhe assegurem as bases conceituais dessa trajetória multifacetada;
- o País e o estado de São Paulo necessitam da formação de um grande contingente de engenheiros que sejam capazes de enfrentar os problemas contemporâneos, nas áreas pública e privada, sugerindo uma formação durante a graduação também pautada em conhecimentos que assegurem ao jovem engenheiro uma rápida inserção profissional;
- a flexibilização da carreira não se opõe à ideia da existência de um corpo de disciplinas básicas de caráter geral, reunidas no Núcleo Comum da Escola;
- a flexibilização da carreira não se opõe à ideia de se formar um engenheiro generalista, tampouco de formar um engenheiro especialista;
- o quinto ano com um número de créditos por semestre inferior ao dos demais anos;

- busca de homogeneização do número de créditos das diferentes habilitações da Escola, assim como da sua distribuição entre disciplinas básicas e de ciências da engenharia, que cobrem grande parte dos tópicos do núcleo de conteúdos básico; de disciplinas profissionais, que cobrem o núcleo de conteúdos profissionalizantes e o núcleo de conteúdos específicos; e de optativas livres;
- existência de mecanismos que o ajudem o aluno a corrigir eventuais opções insatisfatórias, evitando lhe causar prejuízo e precarização da sua situação;
- formação assegurada mínima na habilitação do aluno, atendendo às exigências da Resolução CNE/CES 11, de 11 de março de 2002, que institui Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia, bem como as do Conselho Federal de Engenharia e Agronomia - CONFEA, no que se refere as atividades, competências e caracterizações do âmbito de atuação das diferentes modalidades profissionais da Engenharia;
- complementação da formação do aluno podendo ser feita fora da sua habilitação, ou mesmo fora da Escola Politécnica da USP ou do País (formação internacional);
- oferecimento pela Escola Politécnica da USP de diferentes alternativas de itinerários formativos, que atendam à tradição da Escola, às vocações dos alunos e às necessidades do estado e do País;
- aproximação entre as formações de graduação e de pós-graduação, de modo a acelerar o processo de titulação dos alunos que se encaminharem para a atividade de pesquisa;
- existência de mecanismos transparentes e ágeis para orientar os alunos na escolha ou na mudança do seu itinerário formativo;
- continuação do uso do critério de desempenho acadêmico como base para o ordenamento e a seleção dos alunos.

Com base nessas premissas, o trabalho do grupo propôs uma flexibilização baseada em duas estratégias (PROJETO...,2013). A primeira estratégia passa pela criação de um vetor de formação, que se inicia no segundo e vai até o último semestre do curso, que abre ao aluno a possibilidade de cursar disciplinas optativas livres, na sua habilitação, em outras habilitações da Escola ou em outras unidades da USP. A segunda estratégia passa pela oferta de módulos de formação no quinto ano, que compõem a essência desse ano, devendo o aluno cursar um dentre os módulos de sua habilitação, ou um módulo oferecido por outra habilitação ou, ainda, um módulo compartilhado, definido conjuntamente por duas ou mais habilitações; o aluno poderá também optar por um módulo voltado à pós-graduação. A proposta de distribuição de créditos entre disciplinas básicas e disciplinas de uma habilitação é tal que, mesmo ao optar sistematicamente por optativas livres e por um módulo de quinto ano fora da sua habilitação, o aluno terá assegurado um diploma na sua habilitação que atende à legislação.

Com o objetivo de flexibilizar as habilitações e ênfases da Escola Politécnica da USP, a sua Comissão de Graduação – CG definiu que os processos de revisão das estruturas curriculares dos seus cursos incorporarão os seguintes princípios, cuja adequação ao cronograma da graduação é ilustrada na Figura 1:

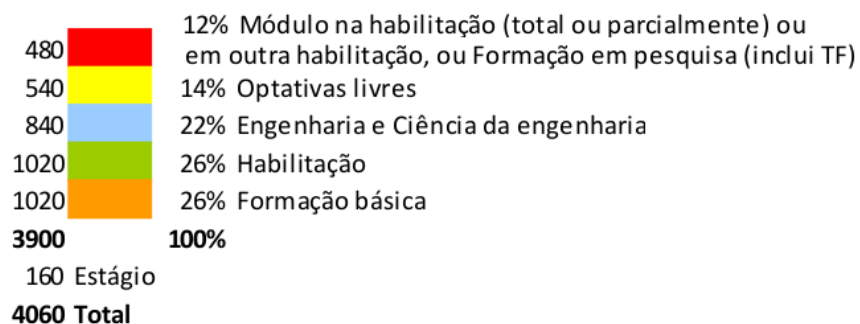
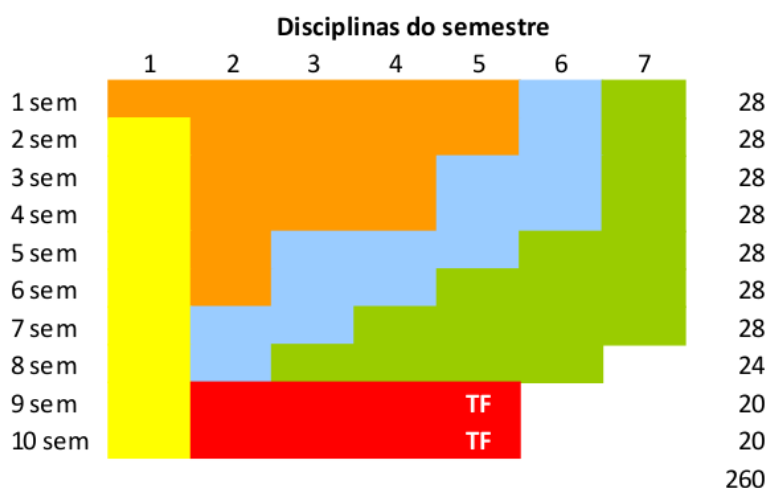


Figura 1: Proposta de novo cronograma de graduação da EC3

- uma iniciação profissional desde o primeiro ano e um ciclo básico que perpassa o segundo ano (bloco laranja, e blocos azul e verde);
- uma flexibilização curricular com disciplinas optativas livres (bloco amarelo);
- uma formação com carga horária mínima na habilitação/ênfase do aluno, atendendo às exigências do Conselho Nacional de Educação (blocos laranja, azul e verde, e eventual bloco vermelho);
- uma flexibilização curricular pela opção por um dentre os Módulos de formação previamente montados, que podem ser constituídos no todo ou em parte na habilitação/ênfase do aluno, ou por Formação em pesquisa (por exemplo, pós-graduação), cuja escolha seja feita a critério

do aluno, respeitando-se as orientações da Comissão de Coordenação de Cursos da sua habilitação / ênfase (bloco vermelho – 5º ano);

- uma homogeneização da carga curricular dos vários cursos da Escola;
- a possibilidade de as coordenações de cursos realizarem ajustes nos blocos de cores da Figura 1, em função de necessidades específicas de cada habilitação / ênfase ou do ciclo básico.

### **2.3 Objetivos implícitos às diretrizes**

Como qualquer outra decisão dentro do ambiente acadêmico, as premissas apresentadas na proposta de Estrutura Curricular 3 são orientadas por um projeto político-pedagógico. Um projeto político-pedagógico engloba todos os princípios que direcionam as decisões tomadas dentro de uma Universidade. Esses princípios norteadores muitas vezes não são explícitos e tampouco recebem o grau de atenção e debate merecido. Se compreendemos esses objetivos com melhor clareza estamos mais preparados para conceber uma nova disciplina para o curso de graduação.

Ao fazer uma análise mais detalhada da lista de diretrizes alguns pontos são mais relevantes para se entender quais os princípios e objetivos implícitos das premissas. Esses pontos representam uma série de influências internas e externas à Escola e interpõem uma infinidade de interesses, por vezes divergentes. De maneira esquemática podemos escolher alguns pontos e tentar identificar quais são os agentes interessados nas diretrizes apontadas por determinada premissa.

Um dos pontos diz respeito ao posicionamento que reconhece o caráter mutável do conhecimento. O projeto político pedagógico faz questão de ressaltar logo no início que “o conhecimento em todas as áreas evolui de maneira bastante veloz na sociedade contemporânea” (PROJETO...,2013). Diante disso é proposto reforçar cada vez mais o caráter sistêmico da profissão de Engenheiro enfatizando uma forte base conceitual que o capacite para um

estado de formação permanente. Essa postura é bastante indicativa da dinâmica da sociedade contemporânea e representa os interesses dos indivíduos e setores que estão preocupados em manter-se em passo com o extraordinário nível de desenvolvimento técnico e científico atual.

Outro ponto que reflete um debate muito recorrente se refere a função formativa da Universidade, principalmente no que diz respeito a qual deve ser a contribuição dessa instituição para a sociedade. Essa discussão é bem frequente principalmente quando se trata do ensino superior em instituições públicas. O documento que estabelece a EC3 afirma que “o País e o estado de São Paulo necessitam da formação de um grande contingente de engenheiros que sejam capazes de enfrentar os problemas contemporâneos, nas áreas pública e privada, sugerindo uma formação durante a graduação também pautada em conhecimentos que assegurem ao jovem engenheiro uma rápida inserção profissional” (PROJETO...,2013). Por mais que essa posição pareça bastante consolidada dentro dos objetivos de qualquer curso de graduação em Engenharia, ela depende de um debate muito amplo e delicado que passa pela definição de quais são os papéis da Universidade e do ensino superior de uma maneira geral. Essa discussão muitas vezes não é realizada e essas posições são admitidas *a priori*.

Um curso de Engenharia atende também às demandas de formação e credenciamento profissional. Os parâmetros curriculares de qualquer curso são estabelecidos por legislação específica definida pelo Ministério da Educação. De modo semelhante o exercício profissional é regulamentado pelos conselhos profissionais regionais e nacionais, responsáveis por fiscalização da profissão e pelo credenciamento dos bacharéis. Nesse sentido o projeto político pedagógico define que deve ser assegurada a formação mínima na habilitação do aluno, atendendo às exigências da Resolução CNE/CES 11, de 11 de março de 2002 (CREMASCO, 2005), que institui Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia, bem como as do Conselho Federal de Engenharia e Agronomia - CONFEA, no que se refere às atividades, competências e caracterizações do âmbito de atuação das diferentes modalidades profissionais da Engenharia.



Por fim podemos observar que o projeto da EC3 ressalta a importância da “aproximação entre as formações de graduação e de pós-graduação, de modo a acelerar o processo de titulação dos alunos que se encaminham para a atividade de pesquisa e ensino” (PROJETO...,2013). Esse ponto diz respeito aos interesses da própria comunidade acadêmica, pois indica a preocupação em formar os quadros que serão responsáveis por prosseguir o caminho da pesquisa e do ensino universitário. Por mais que estejam sintetizadas em um único ponto, pesquisa e ensino partem de perspectivas distintas dentro da dinâmica de funcionamento interno da Universidade (KOURGANOFF, 1990), o que implica em dizer que existem tanto pontos convergentes quanto pontos de conflito entre esses dois tipos de direcionamento. A escolha entre qual desses pontos privilegiar consiste em foco frequente de disputa interna da academia e uma melhor compreensão desse fenômeno depende da definição e do debate sobre os objetivos da Universidade como um todo.

Diante desse breve desenvolvimento sobre os princípios identificáveis em cada uma das premissas analisadas é possível concluir que diversos são os atores e agentes interessados na definição das diretrizes de um curso de graduação em Engenharia. Para maior clareza na decisão de que critérios devem orientar o desenvolvimento de uma nova disciplina é essencial que os princípios envolvidos estejam evidentes. Diante da dimensão e da importância da discussão seguiremos um pouco mais a fundo na análise dos projetos políticos pedagógicos que de modo geral orientam a vida universitária.

### **3 DEBATE POLÍTICO-PEDAGÓGICO**

A definição dos objetivos almejados durante a concepção de uma disciplina requer uma avaliação mais detalhada sobre as orientações político-pedagógicas do ensino universitário. A descrição completa dessa análise é muito extensa e foge do escopo desse trabalho. Do mesmo modo não posso afirmar ou descrever qual visão de Universidade preponderou sobre a decisão do novo programa pedagógico pois não estive presente durante as discussões de formulação da EC3. Mesmo assim é interessante dedicar um pouco de atenção a esse ponto e pelo menos indicar alguns direcionamentos para investigações de maior profundidade. Dessa maneira é possível explicitar um pouco mais quais os princípios escolhidos e identificar objetivos da concepção de nossa disciplina. Como já exposto acima, as decisões político-pedagógicas são objeto de disputa entre vários projetos de Universidade e existe a necessidade de definição de algum ponto de consenso para que possamos encontrar metas pragmáticas que orientem a escolha de procedimentos laboratoriais adequados.

#### **3.1 Paradigmas de Universidade**

Não é simples a categorização de quais os ideais possíveis de Universidade. Para facilitar e tornar a tarefa viável, podemos dividir a análise em um número reduzido de tipos ideais de projetos de Universidade. A tarefa é complexa pois inúmeros são os exemplos de experiências de ensino superior e uma mesma Universidade ou Escola superior pode abarcar mais de um arquétipo dentro de si ou ser melhor representada por uma combinação de diferentes arquétipos. Para prosseguir com essa tarefa partiremos de alguns tipos encontrados na literatura referente a esse tema.

Paul Wolff diferencia os ideais de universidade em quatro tipos paradigmáticos diferentes (WOLFF, 1993): a Universidade como santuário do

saber; a Universidade como campo de treinamento para as profissões liberais; a Universidade como agência prestadora de serviço; e a Universidade como linha de montagem para o homem do sistema. O próprio autor reconhece que se tratam de modelos de Universidades imaginárias e não representam a complexidade das situações reais, mas ressalta que “o objetivo é confrontar os vários ideais e tentar decidir quais deles deveriam realmente dominar a educação superior” (WOLFF, 1993). Dada nossa realidade e o contexto da mudança curricular EC3, nos focaremos em dois dos tipos apresentados por Wolff que possuem correspondentes mais diretos nos princípios e premissas adotados pelo projeto político-pedagógico da Escola Politécnica. Assim descreveremos brevemente a Universidade como campo de treinamento profissional e a Universidade enquanto agência prestadora de serviços.

Wladimir Kourganoff é conhecido pelo seu trabalho em descrever a relação entre ensino e pesquisa (KOURGANOFF, 1990). O autor reconhece que as mais notáveis das missões da Universidade são a função formadora e a função de desenvolvimento da pesquisa científica. Assim surgem duas categorias (ensino e pesquisa) que se conflitam em alguns pontos com relação ao direcionamento da vida universitária. Partiremos desse ponto de divergência para descrever o modelo de Universidade como centro de pesquisa e formação acadêmica.

### **3.1.1 Universidade como campo de treinamento profissional**

Historicamente, a Universidade surge como um centro de conhecimento dedicado à erudição e comprometido basicamente com estudo e comentário dos textos clássicos. As universidades criadas na Europa nos séculos XII e XIII eram constituídas de faculdades de Teologia, Direito e, Medicina (WOLFF, 1993). Somente mais tarde, no século XIX, as instituições de educação superior realmente começaram adquirir o aspecto de faculdades profissionais. Essa perspectiva é tão evidente nas Universidades contemporâneas, que domina boa parte do imaginário da população em geral sobre a finalidade do ensino superior.

O ideal de escola das profissões liberais pressupõe a existência de um número de papéis ou categorias ocupacionais socialmente definidos que conhecemos como “profissões”. A marca essencial e definidora da profissão liberal é a dependência do profissional em relação a outros profissionais para seu credenciamento na profissão (WOLFF, 1993), papel que é exercido contemporaneamente pelos conselhos profissionais. O credenciamento implica na manutenção e aplicação de padrões mínimos, públicos, objetivos imparciais de competências. Dentro desse modelo ideal caberia à Universidade preparar e capacitar seus alunos apenas para seu futuro desenvolvimento profissional.

Esse modelo de Universidade fica bastante claro na elaboração das diretrizes da EC3 quando se destaca a relevância de se assegurar que a formação do aluno atenda às resoluções dos órgãos regulamentadores da educação superior e dos conselhos profissionais.

### **3.1.2 Universidade como agência prestadora de serviços**

Esse segundo modelo retrata a Universidade como uma instituição complexa ou, talvez, como uma agregação de instituições informalmente reunidas que realiza um conjunto de serviços educacionais, de pesquisa, de consulta e outros para a sociedade como um todo.

A antiga imagem do enclave murado torna-se inapropriada para a Universidade moderna, cujas fronteiras e pontos de comunicação com a sociedade mais ampla são inúmeros e diversos (WOLFF, 1993). A Universidade contemporânea simplesmente se funde com suas cercanias, de modo que, mesmo quanto aos orçamentos e à administração, pode ser de difícil discernir os limites precisos da instituição. Essa diversidade de interesses que governam o ensino superior pode ser identificada pela enorme quantidade de atores que influenciam diretamente a Universidade: o corpo de administrativo da própria instituição, secretarias de educação, as agências governamentais de fomento à pesquisa, fundações e empresas privadas relacionadas ao desenvolvimento de pesquisas. Esse modelo está diretamente relacionado com a visão presente na

premissa da EC3 que indica a necessidade da Escola em responder às demandas da sociedade, no que diz respeito na capacitação de Engenheiros para o desenvolvimento do estado de São Paulo e do Brasil.

Ainda segundo Wolff, esse tipo categórico de Universidade não é um simples polo de desenvolvimento de benefícios sociais. É certamente razoável que os beneficiários do ensino superior público devam devolver parte do valor investido neles à sociedade, na forma de inovação tecnológica, consultoria especializada, treinamento profissional e cooperação em empreendimentos socialmente úteis. Na realidade a própria Universidade é um elemento altamente produtivo da economia por seu treinamento pessoal habilitado, seu desenvolvimento de nova tecnologia e pela acumulação, em seu corpo docente, de rara e muito desejada perícia (WOLFF, 1993).

Mesmo fora desse modelo arquetípico é possível reconhecer o aspecto de relação intrínseca das Universidades em geral com a sociedade. Mesmo antes de adquirir seu caráter moderno de formadora profissional, as Universidades sempre se devotaram a propósitos pelo menos parcialmente definidos por forças sociais (WOLFF, 1993). Numa época democrática e pluralista, é muito natural que essas exigências devam ser muitas, variadas e conflitantes. Para satisfazê-las, a própria instituição deve tornar-se internamente diversificada, muito provavelmente ao preço da unidade e harmonia que favorecia a Universidade clássica.

### **3.1.3 Universidade como centro de pesquisa e formação acadêmica**

Assim como Wolff, Kourganoff reconhece que a Universidade moderna é por excelência caracterizada pelo papel primordial de formação. Mas ao mesmo o autor identifica o desenvolvimento da pesquisa como a outra função primordial da Universidade moderna. Diante desse quadro é importante notar que essas diversas funções nem sempre se complementam de maneira harmoniosa.

O desenvolvimento da pesquisa pode entrar em conflito com a missão

formadora do ensino superior ou vice-versa, tanto no que diz respeito às verbas quanto ao tempo que cada professor universitário consagra a uma ou outra atividade (KOURGANOFF, 1990). A satisfação das necessidades nacionais de quadros altamente qualificados pode, por sua vez, privar a pesquisa de seus melhores elementos, pois em geral trata-se de uma mera diferença de destinação dos mesmos homens.

O autor exemplifica essa disputa interna das instituições de ensino superior através da figura do docente-pesquisador. O conflito surge no momento em que a Universidade propõe um modo de ligação anacrônico e ineficaz entre pesquisa e ensino (KOURGANOFF, 1990). Devido a uma disponibilidade escassa de recursos humanos o professor universitário muitas vezes deve compartilhar sua carga horária entre as atividades de ensino e pesquisa. Isso é problemático devido ao fato dessas duas atividades serem de naturezas bem diferentes. Enquanto a docência requer que um perfil de indivíduo comunicativo e elucidativo, a pesquisa acolhe personalidades cujas competências principais sejam a preocupação com a descoberta e investigação das fronteiras do conhecimento direcionadas por um rigor científico. É sabido que, salvo exceções, a figura do pesquisador excepcional e a do professor extraordinário raras vezes coincidem no mesmo indivíduo (KOURGANOFF, 1990). Ao mesmo tempo as próprias carreiras universitárias distanciam essas duas pontas, na medida em que o pesquisador possui preocupação muito maior com publicações científicas e o educador se devota ao desenvolvimento das aulas e acompanhamento dos alunos.

A preocupação com a formação tanto de docentes quanto de pesquisadores também está presente nas premissas da EC3 que indicam “a necessidade da aproximação entre as formações de graduação e de pós-graduação, de modo a acelerar o processo de titulação dos alunos que se encaminharem para a atividade acadêmica” (PROJETO...,2013).

### **3.2 Definição de um consenso**

A partir dessa breve exposição sobre as diferentes concepções político-pedagógicas que podem orientar o desenvolvimento das atividades universitárias é possível concluir que muitas vezes esses princípios implicam em projetos diversos e até mesmo conflitantes. As influências de alguns desses modelos são refletidas diretamente em propostas específicas da diretriz que define as mudanças almejadas com a Estrutura Curricular 3. A busca por objetivos pragmáticos que orientem a formulação da nova disciplina experimental ministrada pelo departamento de Engenharia Química aos alunos ingressantes da Escola Politécnica deve buscar algum ponto de consenso que contemple esses diversos paradigmas.

Uma maneira eficaz de resolver o problema é identificar um ponto comum que seja útil aos diferentes projetos apresentados. A estratégia de ensino ótima deve ao mesmo tempo privilegiar as metas da formação profissional, da formação de quadros de ensino e pesquisa, e ser capaz de responder às demandas da sociedade. Soma-se a isso a dinâmica do desenvolvimento técnico científico e de mudança da sociedade como um todo. Uma formação que considera essas questões deve privilegiar o ensino dos conhecimentos mais basais, a partir dos quais é possível derivar toda a multiplicidade de investigações científicas e aplicações de conhecimento. Assim é possível transmitir aos alunos ferramentas gerais e poderosas que os possibilitem seguir qualquer um dos caminhos da vida universitária. No caso da Engenharia é possível identificar algumas das ferramentas que compõe esse conjunto de conhecimentos fundamentais.

Devemos iniciar essa busca levantando questionamentos que tratam da natureza da Engenharia. A primeira investigação deve buscar quais são as características do pensamento e dos métodos próprios à Engenharia que a tornam tão efetiva na solução de problemas do mundo real. Desse questionamento deriva a indagação sobre qual é a relação dessa metodologia de solução de problemas com as Ciências Naturais cuja característica principal é descrever os fenômenos do mundo real.

A Engenharia basicamente trata da modificação de sistemas, naturais ou artificiais, a partir da compreensão de certos fenômenos da natureza. Conforme ressalta Sunny Auyang, para modificar a natureza eficientemente como desejado é necessário o domínio das leis e fenômenos naturais, dessa maneira a Engenharia compartilha o conteúdo e os padrões das Ciências Naturais (AUYANG, 2004). A Engenharia também possui caráter científico apesar de não ser idêntica às Ciências Naturais.

A Engenharia pode ser caracterizada como a ciência através da qual as propriedades da matéria e as fontes de energia da natureza são exploradas de forma útil ao homem em estruturas, máquinas e produtos (ADAMS, 1993). Os engenheiros desenvolveram as Ciências da Engenharia, que são corpos de conhecimento coerentes comparáveis às ciências naturais em seu alcance de visão, amplitude de escopo, profundidade de análise, nível de criatividade, rigor de pesquisa e critérios de aceitação (AUYANG, 2004). O engenheiro e o cientista possuem motivações diferentes mas compartilham um conhecimento comum, métodos e maneiras de pensamento, que incluem a formulação de teorias, a modelagem, a matemática, a instrumentação e o método empírico sistematizado.

Dada a íntima relação entre Engenharia e Ciências Naturais, o desenvolvimento da nova disciplina do curso de Engenharia Químicas deve, de alguma forma, privilegiar o domínio dos fundamentos e princípios que regem a generalidade das transformações químicas e físicas. A maneira mais fundamental de responder essa demanda é enfatizar os princípios da Termodinâmica envolvidos nos fenômenos naturais.

A Termodinâmica é uma ferramenta científica muito robusta própria da Engenharia. Como qualquer ciência bem estabelecida ela conseguir endereçar os problemas analisados de maneira bem abrangente e generalizante, sendo capaz de descrever toda a multiplicidade dos estados de um sistema a partir do uso de uma modelagem consistente. A Termodinâmica apresenta também uma linguagem poderosa e clara, que possui uma excelente fundamentação matemática. Sua efetividade na resolução dos problemas físicos é tão grande



que o advento dessa ciência no século XIX foi um dos eventos científicos de maior relevância do mundo moderno e marcou irreversivelmente o desenvolvimento tecnológico desde então (MÜLLER, 2007). O impacto e a significância dessa ciência consolidaram a constatação que a doutrina da energia e da entropia governa a natureza.

A escolha da abordagem adotada ao se conceber uma nova disciplina deve abarcar um ponto consensual dentre as diversas visões existentes sobre o ensino universitário. Essa conciliação pode ser resolvida optando-se por enfatizar princípios e fundamento que são de utilidade comum a esses diferentes projetos. O ponto de convergência mais claro no caso do desenvolvimento de procedimentos experimentais direcionados ao curso de Engenharia Química é a Termodinâmica. Desse modo o desenvolvimento das novas experiências foi orientado pela busca de explicações termodinâmicas para fenômenos observados em montagens simples onde os alunos conseguissem identificar a ocorrência dos fenômenos modelados de maneira mais imediata.

## 4 DESENVOLVIMENTO DOS NOVOS EXPERIMENTOS

A disciplina tradicionalmente oferecida pelo departamento de Engenharia Química durante o primeiro ano (Química Tecnológica Geral – PQI 2110) foi substituída pelas disciplinas descritas na Tabela 1.

Estrutura Curricular 2			Estrutura Curricular 3		
<i>Código</i>	<i>Disciplina</i>	<i>Habilitações</i>	<i>Código</i>	<i>Disciplina</i>	<i>Habilitações</i>
PQI2110	Química Tecnológica Geral (QTG)	Química, Materiais, Metalurgia, Minas, Computação, Elétrica, Mecatrônica, Civil, Mecânica e Naval	PQI2100	Química Tecnológica Geral	Computação (USP-Leste)
			PQI3101	Fundamentos das transformações químicas	Química
			PQI3101	Fundamentos das transformações químicas	Materiais, Metalurgia, Minas
			PQI3110	Laboratório de Química tecnológica	Computação, Elétrica, Mecatrônica
			PQI3110	Laboratório de Química tecnológica	Civil
			PQI3120	Química Tecnológica	Mecânica e Naval

Tabela 1: Disciplinas oferecidas pelo departamento de Eng. Química aos estudantes do primeiro ano e a mudança de estrutura curricular

Diante da divisão da antiga matéria em novas disciplinas a equipe de professores responsáveis pelos ingressantes na habilitação Química decidiu dar um enfoque especial às turmas específicas dessa ênfase a partir da concepção de experimentos novos e diferentes dos ministrados aos alunos dos outros cursos. Essa decisão parte do princípio que a matéria será o primeiro contato desses alunos com conceitos fundamentais profundamente explorados ao longo de suas graduações, além de ser a primeira oportunidade de convívio dos ingressantes com os professores e com as instalações físicas do departamento. Isso, somado ao fato dessas turmas possuírem dimensões menores, que possibilitam melhor acompanhamento dos professores, foi determinante para a decisão de desenvolver-se novos experimentos que explorassem a fundo e consolidassem os conceitos fundamentais das transformações químicas e físicas.

Seguindo o caminho da discussão elaborada nas sessões acima, a equipe de professores da disciplina (*Fundamentos das Transformações Químicas – PQI-3110*) buscou desenvolver experimentos completamente novos que possibilitassem sanar quaisquer deficiências relacionadas ao formato da antiga disciplina. Assim, numa tentativa de consolidar fundamentos conceituais através das montagens experimentais, concentramos nossos esforços em desenvolver experimentos que prezassem pela simplicidade de montagem e clareza conceitual, de modo que o aluno conseguisse entender de forma mais direta os fenômenos empíricos envolvidos. Dessa maneira o estudante consegue se familiarizar mais com o que foi observado (compreendendo melhor o que deve ser medido e quais são possíveis fontes de erro) e desenvolver a modelagem mais adequada ao fenômeno (tendo clareza de quais hipóteses que deve-se admitir e se é razoável adotá-las nas condições observadas).

Para desenvolver a discussão dos fenômenos observados no laboratório em um nível mais conceitual, optamos por conjugar observações experimentais simples com modelagens que buscassem explicar as transformações químicas e físicas sob uma perspectiva termodinâmica.

#### **4.1 Panorama das experiências anteriores**

A matéria anteriormente oferecida pelo departamento aos ingressantes na Escola era nomeada “Química Tecnológica Geral” e possuía um caráter basicamente experimental. Aulas expositivas teóricas acompanhavam seis procedimentos experimentais realizados nos laboratórios do bloco 21 do Conjunto das Químicas. As seis experiências estão indicadas na Tabela 2.

<b>Exp.</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
1	<b>Poder Calorífico de Combustíveis</b>	Determinação do poder calorífico de um combustível sólido ou líquido usando a bomba calorimétrica
2	<b>Viscosidade de Óleos Lubrificantes</b>	Medidas de viscosidade a diferentes temperaturas usando um viscosímetro Saybold
3	<b>Pilhas e Acumuladores</b>	Construção de uma pilha e um acumulador e utilização destes como fonte de tensão para experimentos de eletrólise
4	<b>Série Galvânica // Obtenção e Caracterização de Revestimentos Metálicos</b>	Determinação da série galvânica a partir da medida de potenciais de corrosão; Deposição de Cr e Zn e uso câmaras de névoa salina e de Kesternich para avaliação dos revestimentos
5	<b>Tensoativos</b>	Medidas de tensão superficial utilizando tensiômetro de anel de Du Noüy e teste de espalhamento de gota de corante sobre tecido cru em presença e ausência de tensoativo
6	<b>Polimerização em Emulsão // Fluidez de Polímeros</b>	Obtenção de poliacetato de vinila em polimerização em emulsão; Medida do índice de fluidez de amostras de polipropileno utilizando-se um plastômero

Tabela 2: Experimentos realizados na antiga disciplina de Química Tecnológica Geral

Como o próprio nome indica, a antiga disciplina possuía um viés extremamente voltado para aplicações tecnológicas. O uso de aparelhagens complexas permite ao aluno contato com técnicas e equipamentos frequentemente presentes em instalações industriais e laboratórios de pesquisa, mas, ao mesmo tempo, o distancia de conceitos fundamentais dado o grau de complexidade envolvido em montagens experimentais sofisticadas.

#### **4.2 Montagens experimentais simples**

Conforme levantado anteriormente, as experiências da antiga disciplina envolviam equipamentos muito sofisticados que, apesar aplicarem os mesmos

princípios envolvidos em uma montagem mais simples como em qualquer outra montagem, acabam expondo de maneira mais indireta o fenômeno em estudo. Isso acontece, por exemplo, quando, ao submeter alguma substância a um teste em um tensiômetro digital, o aluno apenas toma nota dos números indicados no mostrador digital do equipamento, sem se preocupar na maioria das vezes se a medida foi realizada por um método direto ou indireto, se o equipamento necessita de calibração, ou até mesmo se é plausível confiar naquele resultado. Alternativamente, se esse mesmo fenômeno for explorado em um experimento que correlacione de maneira visível a força e trabalho associados a determinado aumento de área de uma bolha (num procedimento, aliás, muito próximo do que ocorre em um tensiômetro de anel comercial) o aluno consegue apreender com muito mais clareza o conceito de tensão superficial.

Uma estratégia para buscar tal simplicidade é explorar fenômenos cotidianos ou próximos da realidade imediata dos alunos e utilizar, sempre que possível, apenas instrumentos com os quais o aluno tenha familiaridade (Por exemplo: com um par de termômetros e duas substâncias cuja mistura é exotérmica – álcool e água – já é possível propor um experimento interessante se guiado de maneira adequada). Outro paradigma importante ao se pesquisar possíveis montagens que estimulem o desenvolvimento conceitual, é dar preferência a experiências que um aluno mais virtuoso seja capaz de replicar em casa ou propor modificações. Não se busca aqui a complexidade em um fenômeno, mas sim a capacidade do aluno dominar o fundamento e ter bases sólidas para prosseguir suas investigações científicas.

Outra vantagem de se adotar procedimentos experimentais simples em detrimento de procedimentos muito sofisticados, é evitar o uso expedientes práticos e vícios conceituais dos quais inevitavelmente se faz uso para explicar algum fenômeno muito complexo, o que pode ser bastante recorrente ao ter de se lidar com alunos recém-egressos do ensino médio. A relativa imaturidade conceitual dos ingressantes na Escola não deve ser encarada como empecilho e sim como uma oportunidade para evitar que o aluno reproduza vícios conceituais e confusões teóricas observadas em estudantes mais avançados

no curso ou mesmo em profissionais graduados. Essa oportunidade, aliada ao entusiasmo comum aos ingressantes na vida universitária, fizeram dessa abordagem mais conceitual a opção escolhida ao se desenvolver os novos experimentos.

### **4.3 Transformações químicas e físicas sob a perspectiva termodinâmica**

Dado que a abordagem conceitual foi avaliada como a mais apropriada para formulação da nova disciplina, nada mais adequado que partir de uma perspectiva termodinâmica para modelar as transformações químicas e físicas observadas nos experimentos. Já ressaltamos que a Termodinâmica é uma linguagem muito robusta que sempre acompanhará os alunos durante seus estudos em Engenharia. Como não se trata de um curso de Termodinâmica propriamente dita, e tendo em vista que a grade de Engenharia Química retomará essa ferramenta extensivamente, é interessante que essa abordagem termodinâmica seja simples, mas, ao mesmo tempo, proporcione um acréscimo qualitativo com relação às discussões que os alunos já tiveram no ensino médio sobre o tópico. Para abordar as transformações física e químicas segundo uma perspectiva termodinâmica dois excelentes pontos de partida são a 1ª Lei da Termodinâmica e a Equação Fundamental da Termodinâmica. Na apresentação dessas leis aos alunos será enfatizado a relação entre os pares de variáveis conjugadas.

#### **4.3.1 1ª Lei e a equação fundamental da Termodinâmica**

A primeira lei da termodinâmica é uma versão da lei de conservação da energia. Este postulado admite que diversas formas de trabalho podem ser convertidas umas nas outras, elucidando que a energia total transferida para um sistema é igual à variação de sua energia interna. Em outras palavras essa lei atesta que todo processo natural, a energia do universo se conserva sendo que a energia do sistema isolado se mantém. A formulação matemática da

primeira lei é apresentada na equação a seguir.

$$\Delta U = Q - W \quad (1)$$

A equação fundamental da Termodinâmica deriva da combinação entre a primeira e a segunda lei da Termodinâmica. Essa equação é geralmente expressa como uma mudança infinitesimal da energia interna em termos de mudanças infinitesimais de propriedades extensivas do sistema como entropia e volume. Mais termos de variação infinitesimal podem ser adicionados à equação conforme se definem variáveis coerentes com o modelo proposto para o sistema em estudo. A equação fundamental da Termodinâmica é apresentada abaixo.

$$dU = TdS - pdV + \sum_i \mu_i dN_i + Edq + \sigma dA + \dots \quad (2)$$

Uma maneira interessante de explorar as equações essenciais da Termodinâmica é trabalhar com experiências que explicitem a relação entre os pares conjugados de propriedades intensivas e extensivas (por exemplo:  $p \rightarrow$  intensiva;  $V \rightarrow$  extensiva) e relação desses pares com as noções de trabalho e energia. É fundamental que os alunos compreendam com clareza que o produto desse pares de variáveis sempre resulta em uma grandeza com dimensão de trabalho e energia (Joules, no Sistema Internacional) e que produtos de diferentes pares de propriedades conjugadas estão diretamente relacionados entre si pelas mesmas equações, eqs. (1) e (2).

#### 4.3.2 Pares de variáveis conjugadas

Propriedades termodinâmicas, tais como a energia interna  $U$ , a entropia  $S$ , a temperatura  $T$ , a pressão  $P$  e volume  $V$  se comportam como funções matemáticas. A equação fundamental da Termodinâmica para a energia interna  $U$ , eq. (2), pode incluir termos para vários tipos de trabalho e envolve apenas diferenciais de variáveis extensivas e potenciais descritos por variáveis intensivas. Equações fundamentais para outros potenciais termodinâmicos podem ser obtidas por utilização de transformadas de Legendre que definem

estes outros potenciais termodinâmicos em termos da energia interna menos o produto dos pares conjugados das variáveis intensivas e extensivas envolvidas (ALBERTY, 2001). A equação fundamental para U considera as variáveis intensivas como derivadas parciais da energia interna em relação a outras propriedades extensivas. Essas relações são mostradas nas equações a seguir.

$$T = \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_{V, n_i} \quad (3)$$

$$P = - \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_{S, n_i} \quad (4)$$

$$\mu_i = \left( \frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{S, V, n_i} \quad (5)$$

As variáveis independentes representadas por diferenciais de uma equação fundamental são referidas como variáveis naturais. As variáveis naturais de um potencial termodinâmico são importantes porque, se um potencial termodinâmico pode ser determinado como uma função das suas variáveis naturais, todas as propriedades termodinâmicas do sistema podem ser obtidas tomando derivadas parciais da potencial termodinâmico com respeito às variáveis naturais (ALBERTY, 2001). As variáveis naturais também são importantes porque são mantidas constantes segundo os critérios de uma mudança espontânea e de equilíbrio baseado nesse potencial termodinâmico

O uso de uma perspectiva que tente, sempre que possível, modelar os fenômenos segundo as leis fundamentais da Termodinâmica é benéfico pois traz a discussão para o nível conceitual mais básico, facilitando a apreensão dos conceitos primordiais envolvidos nas transformações químicas e físicas. Partindo desse princípio foram elaboradas experiências que exploram a relação entre pares conjugados de propriedades intensivas e extensivas e o trabalho e calor envolvidos (por exemplo  $T \times S$ ,  $p \times V$ ,  $E \times q$  ou  $\sigma \times A$ ).



## 5 EXPERIMENTOS REALIZADOS

Dado a ocorrência de uma greve dos servidores técnico-administrativos da Universidade não foram realizadas todas as seis experiências tradicionalmente previstas. Apenas cinco experiências foram realizadas até o final do semestre letivo:

- Calorímetro (**Experiência T×S**): calorimetria em reação exotérmica;
- Comportamento de Gases Ideais (**Experiência p×V**): compressão e expansão de um gás ideal;
- Pilha e Eletrólise (**Experiência E×q**): montagem de pilha de Leclanché e eletrólise;
- Tensão superficial (**Experiência p×V**): medida de tensões superficiais e estudos sobre capilaridade;
- Diferenças de Potencial (**Experiência Fluxos Difusivos**): estudo da relação das diferenças de potencial com os fluxos difusivos térmicos, mecânicos e químicos;

## 5.1 Calorímetro (Experimento T×S)

O primeiro experimento elaborado procurou explorar o fenômeno de aumento de temperatura do meio onde ocorre uma reação exotérmica e o fenômeno de dissipação de calor. Dessa maneira é possível abordar a relação entre as propriedades conjugadas do par **Temperatura e Entropia** (T×S) uma vez que essas grandezas estão diretamente ligadas aos processos de transferência de calor. A experiência permite estimar a dissipação de calor e especular sobre a variação de energia interna do sistema.

### 5.1.1 Montagem

O experimento utilizou apenas equipamentos simples, com os quais qualquer aluno está familiarizado, mesmo que não tenha tido muito contato com procedimentos de laboratório anteriormente. Além de béqueres e provetas para medir os volumes de reagentes (água e anidrido acético) e servir de meio reacional, foram utilizados termômetros comuns (graduados de 0 °C – 100 °C), calorímetros simples (algo similar a um porta-latas de bebidas isolado por isopor com tampa perfurada para entrada do termômetro), e um agitador magnético para garantir a homogeneização do meio reacional. Dada a volatilidade do produto de reação (ácido acético), o procedimento foi realizado em capela com exaustão. Os instrumentos da montagem estão indicados nas Figuras 2 e 3.



Figura 2: Kit experimental para a experiência T×S

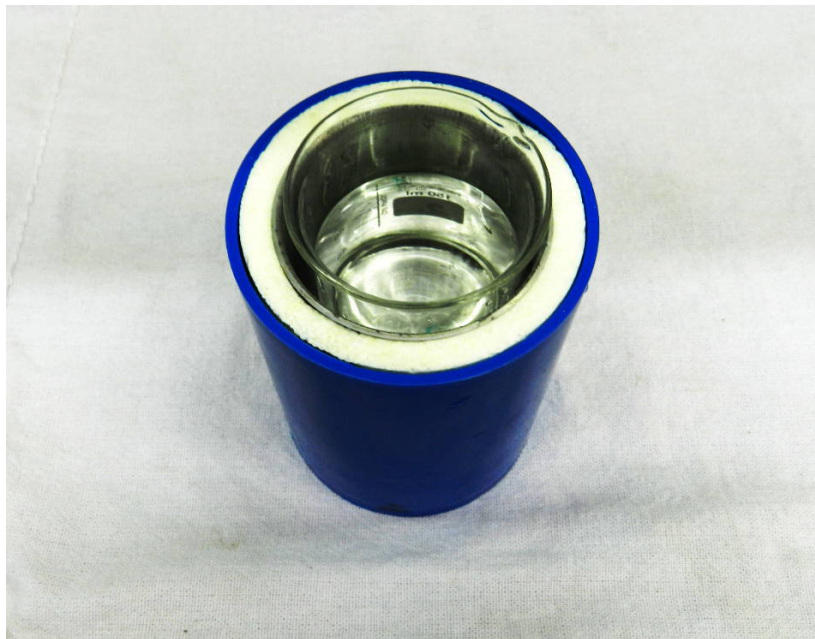


Figura 3: Calorímetro com Béquer em seu interior

Durante o procedimento foram realizados três ensaios com ocorrência de reação em condições distintas (béquer sem calorímetro em baixa agitação, béquer com calorímetro a baixa agitação e béquer com calorímetro em alta agitação) contendo a mesma quantidade inicial de reagentes. Também foram realizados dois ensaios na ausência de reação para avaliar a perda de calor dos sistemas para o ambiente (béquer sem calorímetro em baixa agitação, béquer com calorímetro em baixa agitação), onde foi utilizado apenas um volume de água equivalente a quantidade total de reagentes dos ensaios com ocorrência de reação. Em todos os ensaios foram medidos o tempo decorrido e a temperatura da solução. Dessa maneira os alunos puderam avaliar o aumento de temperatura do meio devido à reação exotérmica e uma estimativa razoável da taxa de transferência de calor do sistema para a vizinhança.



Figura 4: Béquer com calorímetro reagindo a baixa agitação



Figura 5: Béquer sem calorímetro reagindo a baixa agitação

### 5.1.2 Fenômenos envolvidos

A reação exotérmica explorada nesse experimento é a hidrólise do anidrido acético resultando em ácido acético, conforme indicado na Figura 6. Trata-se de uma reação de mecanismo bastante simples, onde os reagentes e produtos envolvidos são de conhecimento de um aluno recém-egresso do ensino médio. Um complicador possível seria o fato de anidrido acético e água serem imiscíveis, resultando em um sistema heterogêneo no qual a cinética da reação não será completamente trivial. Mas isso não representou nenhum impedimento maior pois a hipótese de meio homogêneo foi discutida com os alunos e as taxas de agitação garantiam alguma homogeneização do sistema.

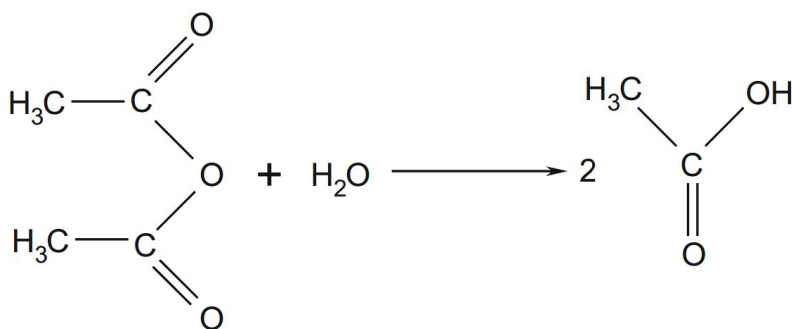


Figura 6: Hidrólise do ácido acético

A discussão termodinâmica mais interessante sobre essa montagem acontece ao se tentar modelar o que acontece dentro do sistema em termos da 1ª lei da Termodinâmica, indicada em eq. (1). Os alunos se deparam com uns dos pontos de grande confusão ao se estudar um sistema que aumentou a temperatura ao serem questionados se esse aumento de temperatura do meio representou ou não um aumento de energia interna do sistema. Dentro ainda da discussão abrangendo a 1ª lei os alunos são estimulados a avaliar se a hipótese de sistema adiabático é válida, o que está diretamente relacionado à eficiência do isolamento proporcionado pelos calorímetros, e se o trabalho de eixo imprimido pelo agitador magnético é relevante ou não comparado às trocas térmicas envolvidas na reação.

### 5.1.3 Relatório

O relatório experimental sugerido aos alunos pela equipe buscou explorar as discussões expostas anteriormente. Além da discussão sobre as hipóteses (adiabático, influência de agitação desprezível), foi pedido aos alunos que classificassem as transformações ocorridas (em isotérmica, isobárica ou isocórica). Também foi solicitada uma análise da relação entre o aumento de temperatura graças à reação e a alteração da energia interna do sistema. A partir dos dados de temperatura e tempo os estudantes foram orientados a plotar dois conjuntos de gráficos: um conjunto para as três condições de ensaio com reação; e um conjunto para os dois ensaios sem reação, relacionados à troca de calor do sistema com o ambiente. Os resultados obtidos possuem o aspecto dos gráficos indicados nas Figuras 7 e 8.

#### Evolução das Temperaturas na ocorrência de reação em diferentes condições

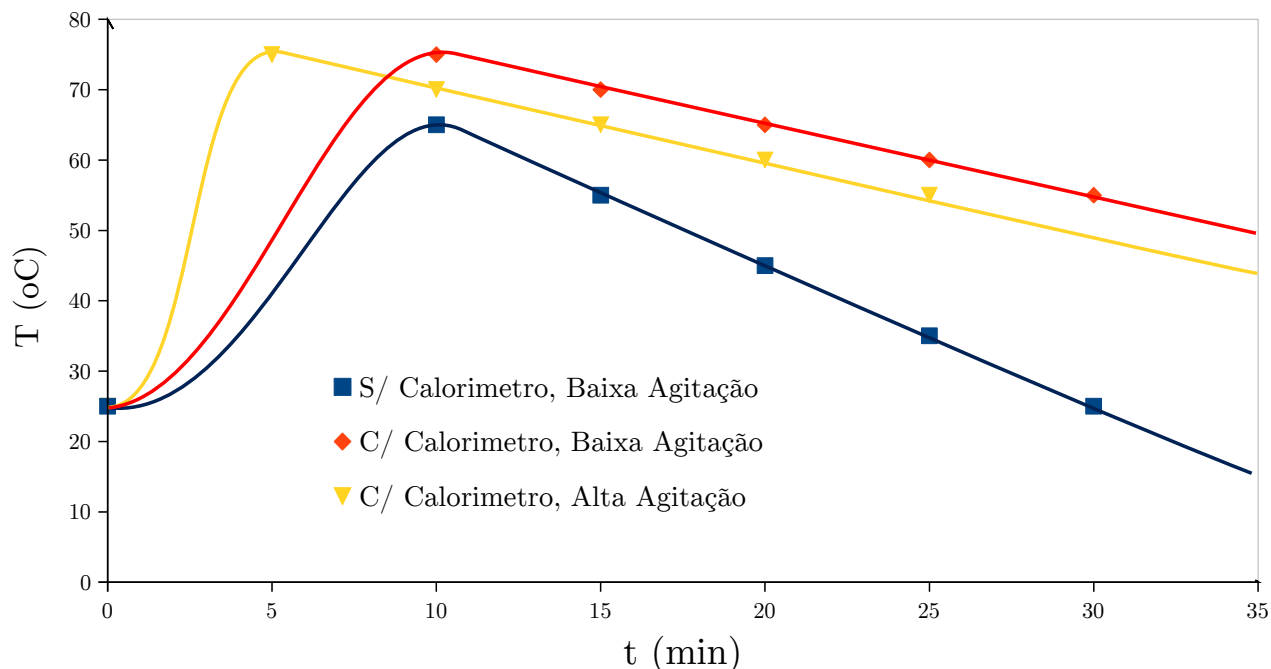


Figura 7: Conjunto de ensaios com ocorrência de reação exotérmica

## Evolução das Temperaturas na ausência de reação em diferentes condições

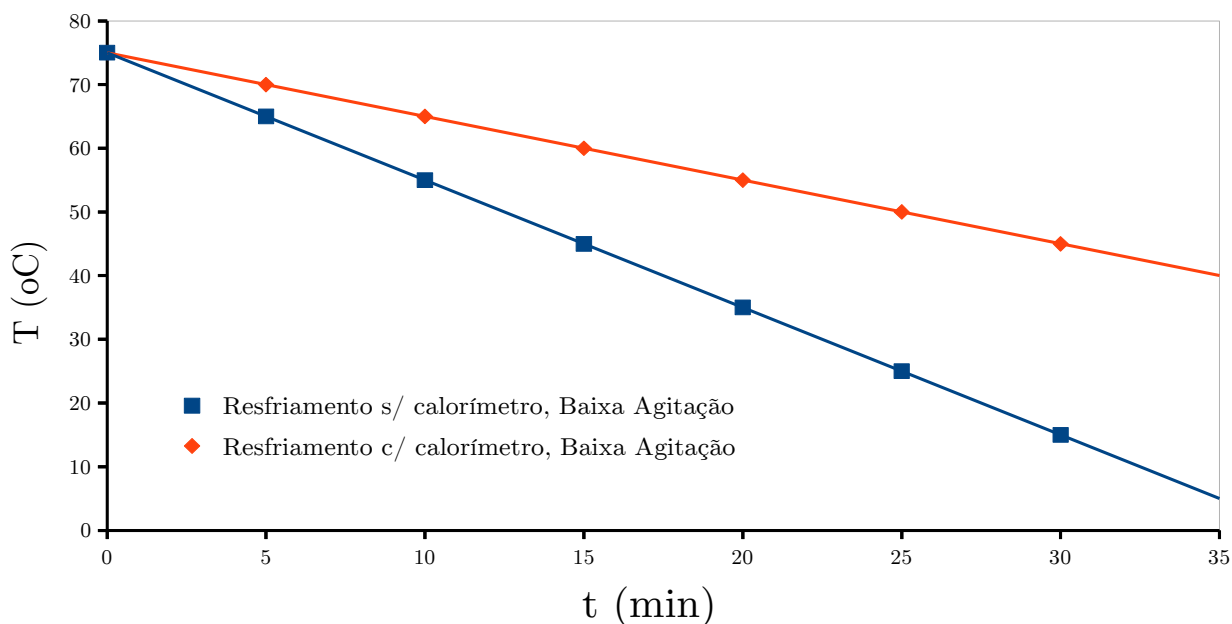


Figura 8: Estudo das perdas térmicas dos béqueres contendo água com e sem calorímetro

Ao plotar os gráficos os alunos conseguiram identificar algumas questões interessantes sobre as transformações químicas e físicas envolvidas. No caso do conjunto de ensaios com reação, é possível notar que nos procedimentos realizados com o uso do calorímetro a temperatura máxima observada foi praticamente a mesma e mais alta que no caso do procedimento realizado sem uso do calorímetro. Isso se deve ao fato dos béqueres isolados pelos calorímetros apresentarem menor perda de calor para o ambiente. Ao mesmo tempo nota-se que as inclinações das retas após fim da reação (que ocorre um pouco depois do ponto de temperatura máxima) são praticamente as mesmas, o que é explicado novamente pelo isolamento do calorímetro. Também é possível inferir a partir do tratamento de dados que o efeito do agitador magnético é apenas cinético, isto é, não influencia nos valores máximos de temperatura obtidos mas faz com que, no caso do béquer com calorímetro em alta agitação, o patamar máximo de temperatura seja atingido em menos tempo.

## 5.2 Comportamento de Gases Ideais (Experimento $p \times V$ )

O próximo experimento proposto explora o par de propriedades provavelmente mais lembrado nos estudos de Termodinâmica: **Pressão** e **Volume** ( $p \times V$ ). O procedimento explora duas montagens diferentes onde são tomadas medidas de pressão e volume (um tubo associado a um manômetro e a um pistão acoplado em uma rosca – *Boyle-Mariotte*; e uma seringa vedada cuja base do êmbolo é carregada com blocos de chumbo de massa conhecida). A experiência foi dividida em etapas nas quais os alunos calculavam a pressão atmosférica de maneira indireta e calculavam os trabalhos realizados através do carregamento ou descarregamento de diferentes quantidades de massa.

### 5.2.1 Montagem

Novamente os princípios que nortearam a escolha da montagem experimental adequada foram o da simplicidade de aparelhagem e o da identificação direta e clara dos fenômenos envolvidos. A primeira parte foi realizada em um equipamento comercial (*Boyle-Mariotte*) manufaturado por uma empresa dedicada à construção de kits laboratoriais didáticos. A segunda parte foi montada pela própria equipe da disciplina utilizando seringas de vidro que podem ser adquiridas sem muita dificuldade em casas de equipamentos cirúrgicos.

O primeiro equipamento era um dispositivo de operação muito simples e intuitiva: a rosca ao ser girada faz o êmbolo percorrer o tubo de acrílico (onde existe uma escala de volume relativa), variando a pressão interna relativa que é indicada em um manômetro acoplado. Além disso existe na extremidade do tubo uma válvula vedada por uma rosca cuja abertura permite a entrada ou saída de gás. O instrumento pode ser observado nas Figuras 9 e 10.



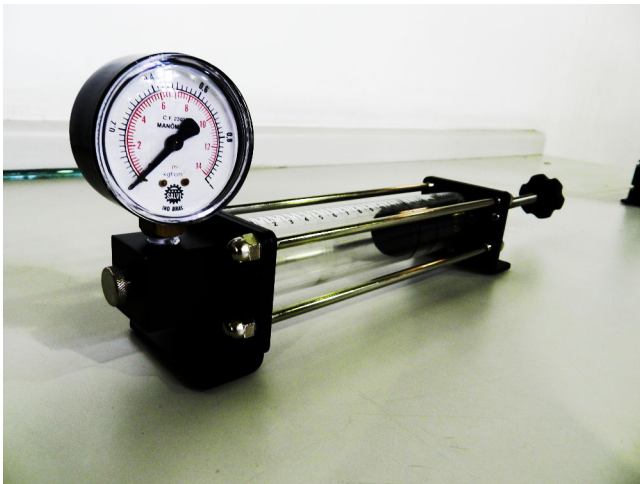


Figura 9: Boyle-Marriote em determinado volume inicial, com pressão relativa zero



Figura 10: Boyle-Marriote comprimido em volume menor que inicial, com pressão relativa máxima dentro da escala de leitura

Nessa parte do procedimento foi pedido a cada grupo de alunos da turma que abrissem a válvula e alterassem o volume inicial para diferentes valores (10, 12 e 15 unidades de volume indicadas na escala relativa). Uma vez configurado o volume inicial a válvula era fechada e os alunos apertavam a rosca comprimindo o volume até que o valor máximo da escala do manômetro fosse atingido. Durante o procedimento os alunos tomaram nota dos valores de pressão e volume obtidos em cada ponto.

A segunda parte da experiência foi realizada no dispositivo montado pela equipe. O dispositivo constitui em uma seringa de vidro (cujo atrito entre paredes e êmbolo é consideravelmente menor do que em uma seringa de plástico) engastada, na posição vertical, em uma base de madeira (Figura 11). Um gancho foi fixado com abraçadeiras ao fundo do êmbolo e a ele foi amarrado um cordão que pode ser ligado a um suporte para os pesos (Figura 12). Blocos de chumbo de diferentes massas foram cortados de modo a encaixarem no suporte (Figura 13) e assim forçar um deslocamento do êmbolo e conseqüentemente causar variação do volume interno da seringa.



Figura 11: Seringa de vidro na posição vertical fixada em uma base de madeira



Figura 12: Suporte para os blocos de chumbo



Figura 13: Blocos de chumbo e suas respectivas massas médias



Figura 14: Blocos de chumbo carregados no suporte



Figura 15: Suporte de pesos acoplado à seringa

A segunda etapa foi subdividida em duas partes distintas. Na primeira parte foram carregados pesos a partir de um volume inicial pré-definido pelos professores, e os alunos tomavam nota da massa acumulada e dos respectivos volumes internos em cada ponto. Já a segunda parte consistia em carregamentos e descarregamentos por diversos caminhos (isto é, diferentes quantidades de pesos eram carregadas e descarregadas em várias etapas) e os alunos anotavam novamente a massa acumulada sobre o suporte e os respectivos volumes internos em cada ponto. A massa acumulada podia então ser facilmente transformada em uma força distribuída pela área do êmbolo e dessa forma os alunos obtinham o valor da pressão interna relativa.

### 5.2.2 Fenômenos envolvidos

Nesse experimento foi explorada a equação dos gases ideais, eq. (6), para o caso particular onde admite-se a hipótese de transformação isotérmica -

*Lei de Boyle-Mariotte*, eq. (7). Além disso admite-se a hipótese de que o ar possui um comportamento de gás ideal nas condições de temperatura ambiente.

$$\frac{PV}{T} = nR \quad (6)$$

$$PV = k \quad (7)$$

É interessante observar que esse experimento explicita a relação entre pressão relativa, pressão absoluta e pressão atmosférica, que costuma ser fruto de confusão mesmo para alunos mais avançados no curso.

A segunda parte da segunda etapa do experimento envolvia o cálculo do trabalho realizado pelo sistema seringa/gás. Nesse ponto a discussão novamente ocorre dentro dos termos da 1ª Lei e da Equação Fundamental da Termodinâmica. O trabalho realizado está diretamente relacionado com um produto de pressão por volume, mas a discussão deve ser cuidadosa para se esclarecer bem qual pressão e volume devem ser utilizados. Geralmente os alunos trazem uma visão pré-concebida do ensino médio que o trabalho é simplesmente o produto da pressão pela variação do volume, mas não têm claro se essa pressão é a pressão interna ou externa, ou ainda se é a pressão relativa ou absoluta. O uso dessa montagem permite esclarecer qual o mecanismo físico responsável pelo trabalho conforme demonstrado na eq. 10.

$$W_{seringa} = W_{pesos} \quad (8)$$

$$W_{seringa} = mg\Delta h \quad (9)$$

$$W_{seringa} = \frac{mg}{A}\Delta hA \quad (10)$$

$$W_{seringa} = P_{externa}\Delta V \quad (11)$$

### 5.2.3 Relatório

Nesse procedimento os alunos tiveram de realizar dois tipos de tratamento dados. O primeiro diz respeito às medidas de pressão e volume tomadas no equipamento *Boyle-Mariotte* e na primeira etapa dos carregamentos na seringa. O segundo diz respeito ao cálculo dos trabalhos nos diferentes caminhos de carregamento e descarregamento na seringa de vidro.

A primeira etapa do tratamento de dados envolve a discussão sobre pressão interna relativa, pressão interna absoluta e pressão atmosférica. Foi pedido aos alunos que linearizassem a equação geral dos gases, eq. (12) de forma a obter uma reta para qual fosse mais fácil encontrar parâmetros e extrapolar valores do que para a hipérbole relacionada à equação na sua forma tradicional.

$$P_{absoluta} = k \frac{1}{V} \quad (12)$$

$$P_{relativa} = -P_{atmosferica} + k \frac{1}{V} \quad (13)$$

O resultado mais interessante dessa discussão é que a extrapolação dessa reta até a intersecção com o eixo das ordenadas ( $1/V = 0$ ) nos fornece de maneira indireta o valor da pressão atmosférica local. Essa constatação esclarece bastante a relação entre pressão absoluta e pressão relativa, eq. (13). Os alunos puderam comparar o valor assim calculado com a pressão atmosférica indicada por um barômetro do laboratório e calcular o desvio relativo entre essas medidas. A Figura 16 ilustra o tratamento de dados realizado nessa etapa para o caso da compressão (*Boyle-Mariotte*). Para o caso da seringa a discussão conceitual é exatamente a mesma e o gráfico completamente análogo, só que nesse último caso a reta é decrescente por se tratar de uma expansão volumétrica.

## Pressão relativa em função de $1/V$

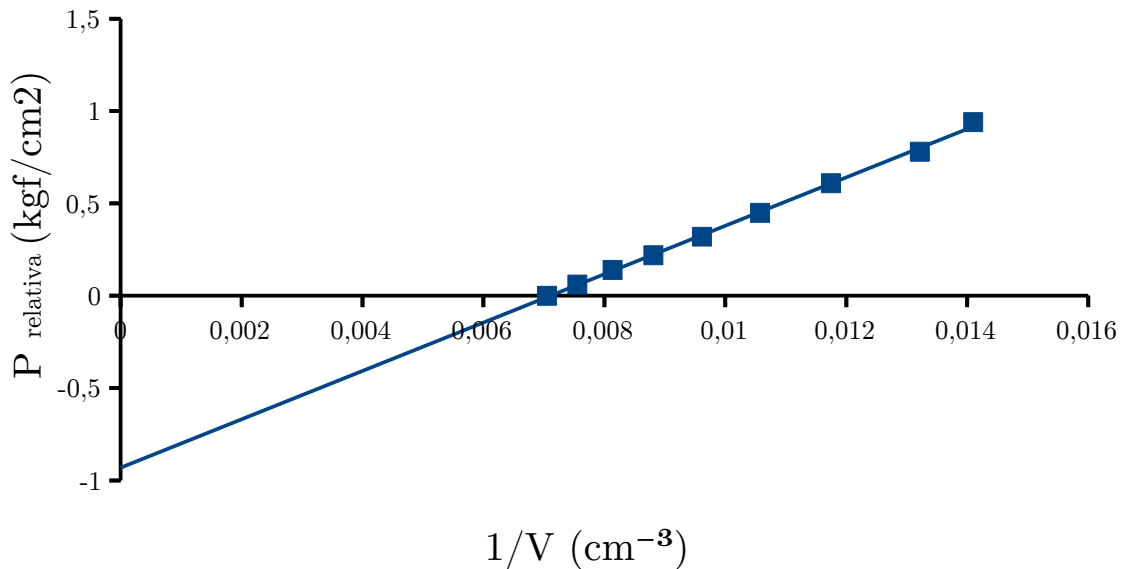


Figura 16: Gráfico da pressão relativa linearizada em função do inverso do volume para o caso de compressão no aparelho Boyle-Mariotte

A segunda etapa do tratamento de dados envolve a discussão sobre o trabalho realizado pelo gás, eq. (11). Além de calcular os valores dos trabalhos, os alunos devem identificar na curva  $p \times V$  usual qual o significado gráfico desses valores. Antes de construir a curva  $p \times V$  é essencial que os alunos se atentem para a correção dos valores de pressão relativa usados anteriormente para valores de pressão absoluta. Daí em diante segue que o trabalho é numericamente igual à área sob o caminho realizado na transformação (Figura 18). A realização do processo em várias etapas deixa claro para os alunos que trabalhos distintos serão realizados quanto menor forem os pesos carregados ou descarregados (Figura 19). Esse comportamento, no limite, corresponderá exatamente à área sob a curva da equação de estado (Figura 17). Nesse ponto é interessante explorar com a turma a relação do processo com o cálculo diferencial e integral, além de iniciar a discussão sobre trabalho reversível e dissipação de energia, tópicos que serão extensivamente retomados nas disciplinas de Termodinâmica do restante do curso.

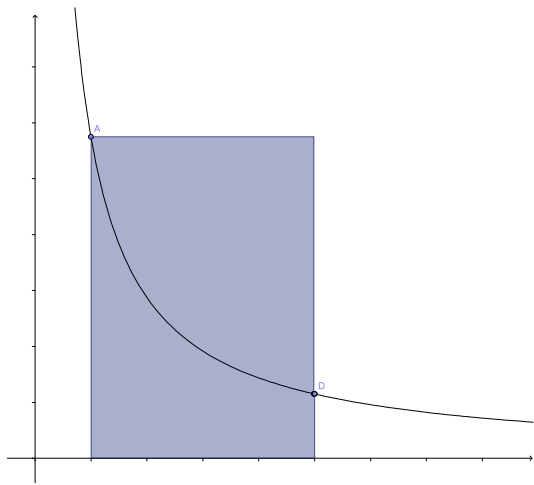


Figura 17: Trabalho realizado no descarregamento de pesos realizado em uma etapa

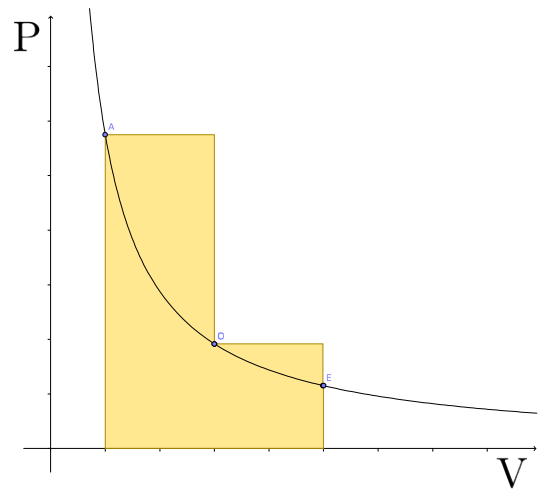


Figura 18: Trabalho realizado no descarregamento de pesos realizado em duas etapas

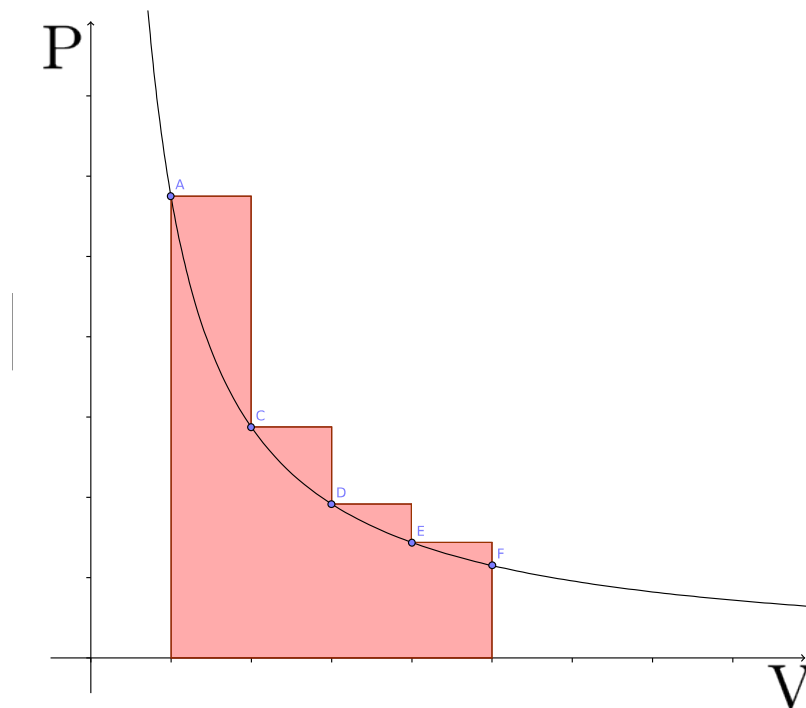


Figura 19: Trabalho realizado no descarregamento de pesos realizado em quatro etapas

### 5.3 Pilha e Eletrólise (Experimento E×q)

O terceiro experimento realizado é o que mantém mais semelhanças com os experimentos realizados anteriormente. Praticamente conservou-se o mesmo procedimento experimental (construção de uma pilha e uso da mesma para reações de eletrólise) sendo que as diferenças básicas se devem à montagem ser um pouco simplificada (redução de etapas) e à tentativa de estabelecermos mais explicitamente a relação entre os fenômenos observados e a linguagem termodinâmica. Assim é possível identificar as propriedades **Potencial Elétrico** e **Carga Elétrica** (E×q) como variáveis associadas ao processo. O procedimento constitui-se de três etapas diferentes feitas em sequência: construção de uma pilha, verificação das características da pilha e realização de reações de eletrólise. Nesse procedimento espera-se dos alunos uma avaliação basicamente qualitativa das transformações ocorridas. As únicas medidas quantitativas realizadas são aquelas relacionadas às características da pilha (f.e.m. e corrente de curto circuito).

#### 5.3.1 Montagem

Diferentemente das outras duas experiências, esse procedimento não foi desenvolvido pela equipe desde sua concepção inicial. Na realidade foi aproveitado como ponto de partida a experiência laboratorial relacionada a eletroquímica que já existia antes. Dessa maneira tivemos apenas que adequar a antiga montagem aos princípios que orientam a reformulação da disciplina. Para privilegiar a simplicidade de construção diminuimos o número de etapas do experimento eliminando a parte que tratava de acumuladores de chumbo. Já o vínculo do fenômeno com a discussão em termos termodinâmicos é realizado direcionado-se a abordagem das observações segundo o modelo e equacionamento geral que considera os pares de propriedades correlacionadas potencial (intensiva) e carga elétrica (extensiva).



Primeiramente os alunos são orientados a montar uma pilha seca de Leclanché. Essa pilha é um dispositivo extremamente simples que consiste literalmente no empilhamento de camadas de carvão de retorta, pasta de  $\text{MnO}_2$ , algodão umedecido com solução de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  e placa de zinco, conforme mostram as Figuras 20 e 21. Fios metálicos são acoplados com elásticos às extremidades da pilha formada e funcionarão como os terminais elétricos. É importante notar que as partes metálicas devem estar devidamente lixadas para remover impurezas ou produtos de oxidação. De um modo geral a construção é bem simples e, a não ser por uma possível dificuldade em adquirir alguns reagentes envolvidos, poderia ser reproduzida pelos alunos fora do laboratório.

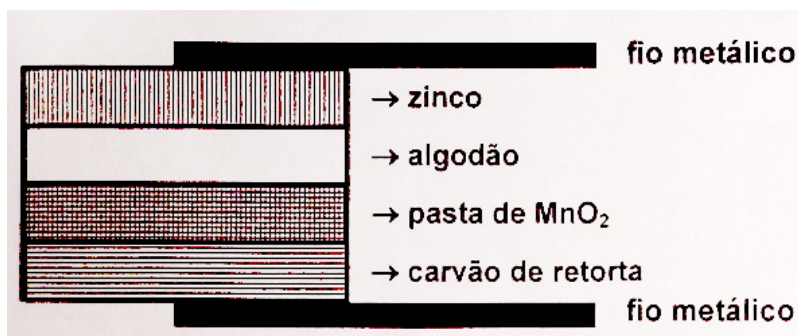


Figura 20: Esquema de montagem da pilha seca

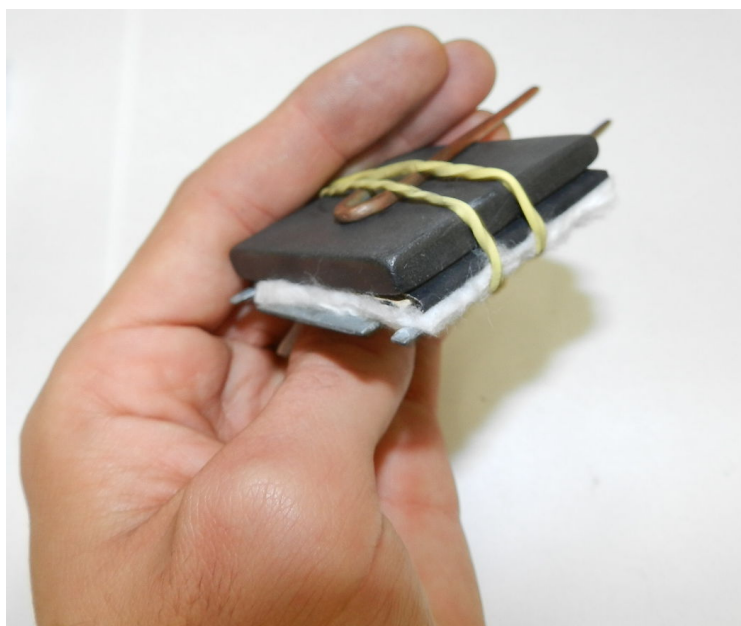


Figura 21: Pilha de Leclanché montada

Depois de fabricarem a pilha os alunos verificam o potencial elétrico (força eletromotriz) e a corrente de curto-circuito da mesma através de um multímetro, mostrado na Figura 22. Essa é a única etapa do procedimento onde se realizam medidas quantitativas. Indicar o uso de um multímetro simples para avaliar uma pilha construída pelos próprios alunos favorece o contato mais direto e imediato deles com o fenômeno pois percebem que é possível analisar essas transformações usando ferramentas triviais. Uma maneira indireta e alternativa de se evidenciar a ocorrência do fenômeno em estudo seria ligar as extremidades da pilha a algum tipo de lâmpada ou LED. Apesar de ser um modo de visualização bem explícito, existe, nesse caso, a desvantagem do fluxo de energia ser indicado apenas de maneira qualitativa (o acender da lâmpada não é capaz de quantificar esse fluxo).

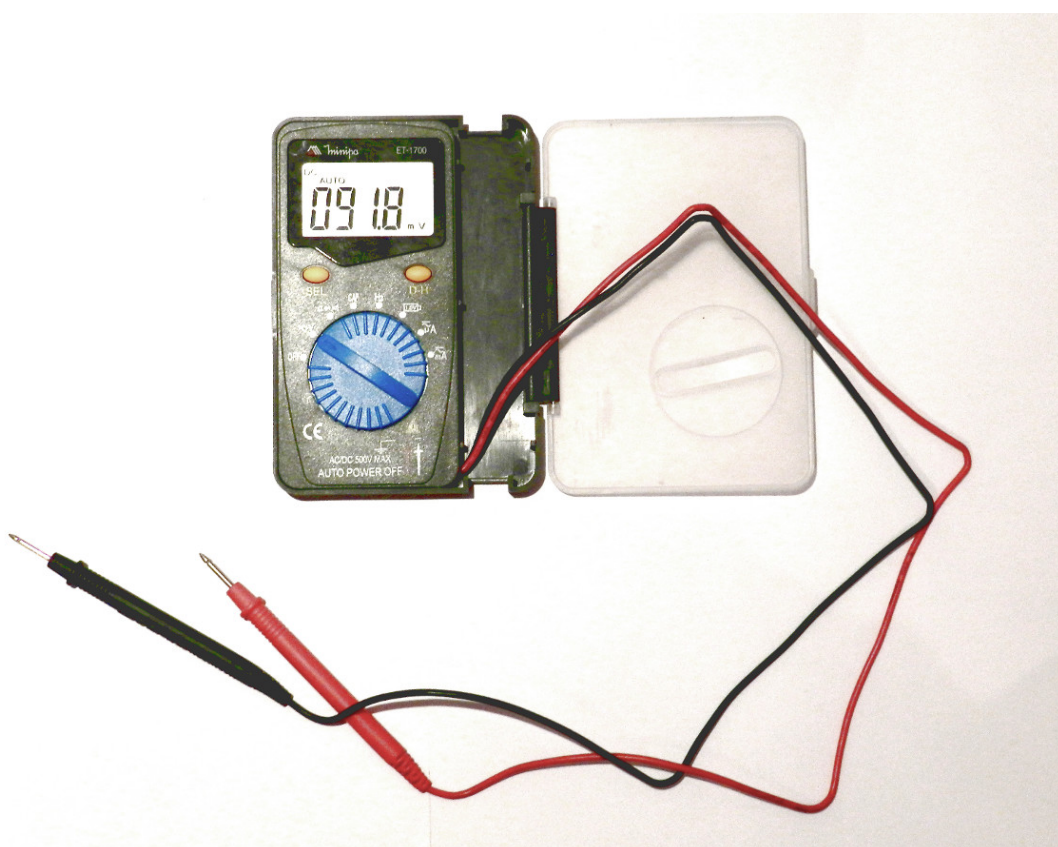


Figura 22: Multímetro utilizado para medições de diferença de potencial e corrente

Por fim utiliza-se a pilha verificada e uma fonte estabilizada para se realizar reações de eletrólise em três soluções aquosas diferentes: uma contendo NaCl e indicador Fenolftaleína; outra contendo HCl; e uma última contendo CuSO<sub>4</sub>. Os alunos devem realizar as eletrólises (Figura 23), observando cuidadosamente os polos e os eletrodos conectados e tomar notas de que fenômenos são observados em cada situação (mudança de coloração da solução, escurecimento dos eletrodos, desprendimento de gases).

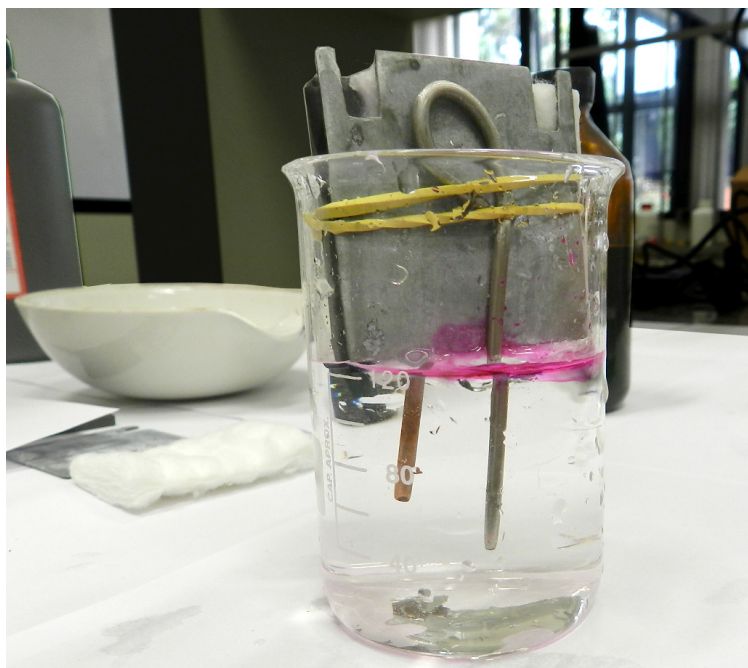


Figura 23: Eletrolise em solução aquosa e NaCl contendo indicador de base Fenolftaleína

### 5.3.2 Fenômenos envolvidos

O procedimento explora a troca de energia e a transformação de espécies químicas através da transferência de carga por meio de uma corrente induzida por uma diferença de potencial. Os processos eletroquímicos estão relacionados com duas propriedades fundamentais: o movimento da carga elétrica (propriedade extensiva) é governado pelo potencial elétrico (propriedade intensiva). A relação pode ser descrita segundo equações que o

aluno já está familiarizado desde o ensino médio, eq. (16), conforme mostrado abaixo.

$$W = E.q \quad (14)$$

$$\frac{W}{t} = E.\frac{q}{t} \quad (15)$$

$$P = E.i \quad (16)$$

Ao direcionar a discussão segundo a perspectiva generalizante que a Termodinâmica possibilita fica mais evidente a relação entre potencial e carga e qualquer forma de energia. A energia química armazenada nos componentes da pilha é liberada através das reações de oxi-redução em um dos eletrodos e então é transferida através de um circuito por meio de corrente que flui entre uma diferença de potencial para o outro dos eletrodos. É importante esclarecer que o processo pode ocorrer em ambos os sentidos, tanto no sentido de liberação de energia quanto no consumo de energia externa, mas em ambos casos as transformações elétricas e químicas são intermediadas pela transferência de energia. Esse comportamento pode novamente ser modelado segundo a equação fundamental da Termodinâmica.

As mudanças de estado macroscópicas observadas no sistema como o desprendimento de bolhas, alteração da cor do meio da solução podem ser explicadas considerando o fato que a diferença de potencial é a força motriz para a ocorrência de determinadas reações. A grosso modo, se a diferença de potencial elétrico for favorável, um conjunto específico de reações eletroquímicas pode ocorrer, resultando nos indícios observados a olho nu. Para determinar qual par de reações tende a ocorrer em uma situação particular de montagem (eletrodos utilizados, substâncias em solução, aplicação ou não de diferença de potencial externa) é possível recorrer a uma lista de potenciais de redução padrão como a indicada na Tabela 3.

Reação	E° red. (V)
$\text{Na}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Na}$	-2,71
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0,25
$2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_{2(g)}$	zero
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	+0,347
$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightleftharpoons 4\text{OH}^-$	+ 0,401 (solução neutra)
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	+ 0,815 (solução ácida)
$\text{Cl}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	+1,36
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{SO}_4^{2-}$	+ 1,96
$2\text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightleftharpoons \text{SO}_3^{2-} + 2\text{OH}^-$	-0,940

Tabela 3: Lista dos potenciais de redução padrão

É essencial ressaltar que a abordagem desses fenômenos com os alunos ingressantes depende de uma série de simplificações e hipóteses que mesmo assim não impedem a compreensão do fenômeno de uma maneira generalizante e suficientemente coerente com o observado. A primeira simplificação é o fato de, num primeiro momento serem desprezados os fenômenos de polarização. A polarização é um efeito de ordem cinética recorrente em eletroquímica e é responsável pela ocorrência de fenômenos que não seriam esperados apenas do ponto de vista termodinâmico. A existência e a influência da polarização são apresentadas aos alunos mas como nesse caso os efeitos podem ser negligenciado, esse tópico não é explorado detalhadamente. Uma maneira de assegurar essa hipótese e considerar que a condição de estado estacionário é atingida rapidamente assegurando a minimização dos efeitos de polarização.

### 5.3.3 Relatório

Apenas durante a etapa de verificação do funcionamento e aferição das características da pilha são realizadas medidas quantitativas. Os alunos devem medir a corrente de curto circuito entre os terminais da pilha e a diferença de potencial entre os terminais. O valor de ddp lido não deve estar muito longe da força eletromotriz teórica da pilha (1,73 V). Com base nos resultados obtidos os alunos devem discutir qual o significado desses valores, como eles se

relacionam com o modelo teórico que utilizamos para descrever o experimento e quais são os desvios com relação ao resultado teórico esperado.

A segunda etapa do relatório é de caráter qualitativo e está relacionada com as reações de eletrólise. Pede-se que os alunos descrevam o que é visualmente observado no sistema em cada uma das situações. Depois, usando como base a tabela de potenciais de redução padrão (Tabela 3), os alunos são orientados a identificar que reação ocorre em cada eletrodo imerso em uma determinada solução. Assim espera-se que o aluno seja capaz de associar que o gás despreendido no eletrodo de platina em uma solução de HCl é devido à semi-reação de redução dos íon cloro a gás cloro; ou então identificar que a mudança de cor na solução de NaCl em presença de fenolftaleína é devida à mudança de pH ocasionada pela liberação de hidroxilas em uma semi-reação de redução envolvendo o oxigênio dissolvido na solução.

#### **5.4 Tensão Superficial (Experimento $\sigma \times A$ )**

O objetivo dessa experiência é apresentar e discutir fenômenos que explicitem relevância da propriedade da tensão superficial bem como ilustrar fenômenos interfaciais. O conceito de interface é muito importante para a Engenharia Química, pois são incontáveis as transformações físicas e químicas que ocorrem nas superfícies entre dois sistemas. Esses fenômenos podem igualmente ser descritos em termos de um par de propriedades conjugadas que se relacionam com a equação fundamental da Termodinâmica. Nesse caso o par de variáveis intensiva e extensiva é dado, respectivamente, pela **Tensão Superficial** e pela **Área** ( $\sigma \times A$ ). O procedimento pode ser dividido em duas partes, sendo a primeira mais orientada a resultados quantitativos enquanto a segunda aborda resultados predominantemente qualitativos.

### 5.4.1 Montagem

Da mesma maneira que ocorreu com os outros experimentos, buscamos uma abordagem que privilegiasse a exposição dos conceitos mais fundamentais através de uma montagem que utilize apenas instrumentos bem simples. Para esse procedimento utilizamos apenas buretas, placas e cubas, capilares de vidro de diferentes diâmetros, água, etanol, acetona e alguns corantes para facilitar a visualização. Todos os itens são de fácil acesso aos alunos e eles já tem familiaridade suficiente com os mesmos para enxergar de forma imediata os fenômenos que ocorrem. A primeira parte do procedimento é dedicada à determinação de valores de tensão superficial de líquidos por meio de dois métodos: queda de gota e ascensão capilar. A segunda parte apresenta vários experimentos demonstrativos das interações interfaciais em diferentes fluidos.

O método da queda da gota é preparado a partir do preenchimento de água destilada em uma bureta que é posicionada sobre um béquer responsável por recolher as gotas caídas (Figura 24). Antes de iniciar qualquer medição, a abertura da válvula da bureta é regulada até que cada gota caia com o intervalo mínimo de 30 s, garantindo que a formação da gota ocorreu de forma suficientemente lenta para que o efeito da tensão superficial seja preponderante sobre a influência da quantidade de movimento. O fenômeno do desprendimento da gota pode ser observado na Figura 25.



Figura 24: Montagem experimental do método da queda de gota

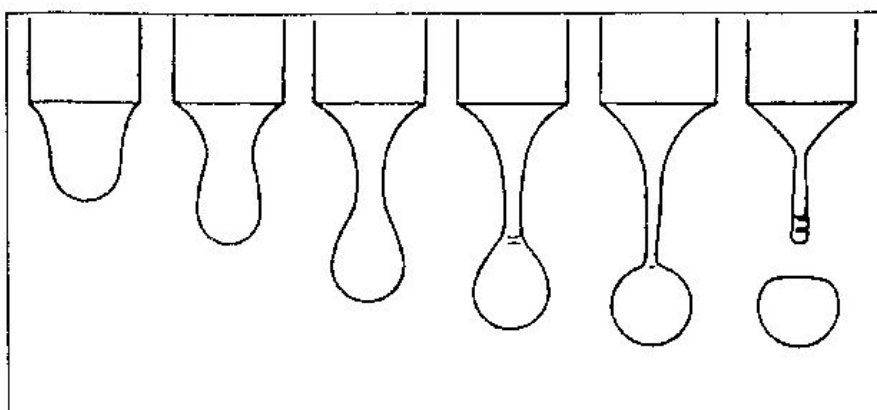


Figura 25: Representação das etapas de desprendimento da gota



Uma vez estabelecida essa condição efetua-se a contagem do número de gotas por volume dispendido pela bureta, de modo a se calcular, através da densidade do líquido, o peso médio de cada gota. Os alunos realizam medições usando água e etanol.

A segunda parte que envolve medições é o experimento de ascensão capilar. Três tubos capilares de diferentes diâmetros são colocados em uma cuba cheia de água, conforme consta na Figura 26. A temperatura da água é medida para efeitos de correção. Diferentes alturas do menisco interno são observadas nos capilares (Figura 27). Os alunos devem tomar notas das diferenças de altura entre a superfície d'água e o nível do menisco (Figura 28). Assim é possível calcular a diferença de pressão na superfície do menisco, entre a interface em contato com o ar e a interface em contato com a água. Essa informação será utilizada para a estimativa do valor da tensão superficial.

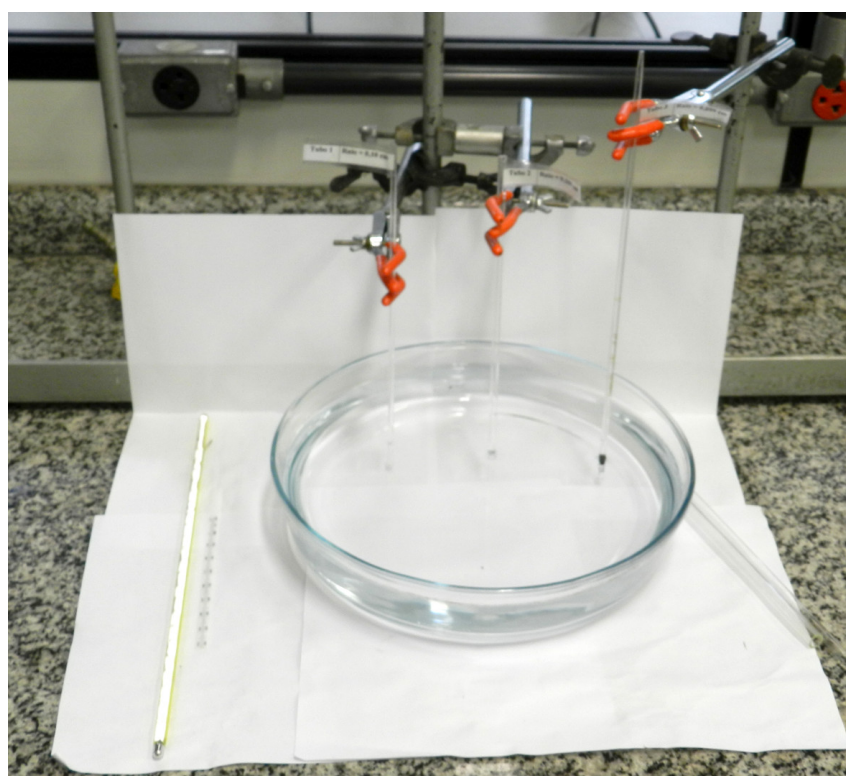


Figura 26: Cubas e capilares na montagem do experimento da ascensão capilar

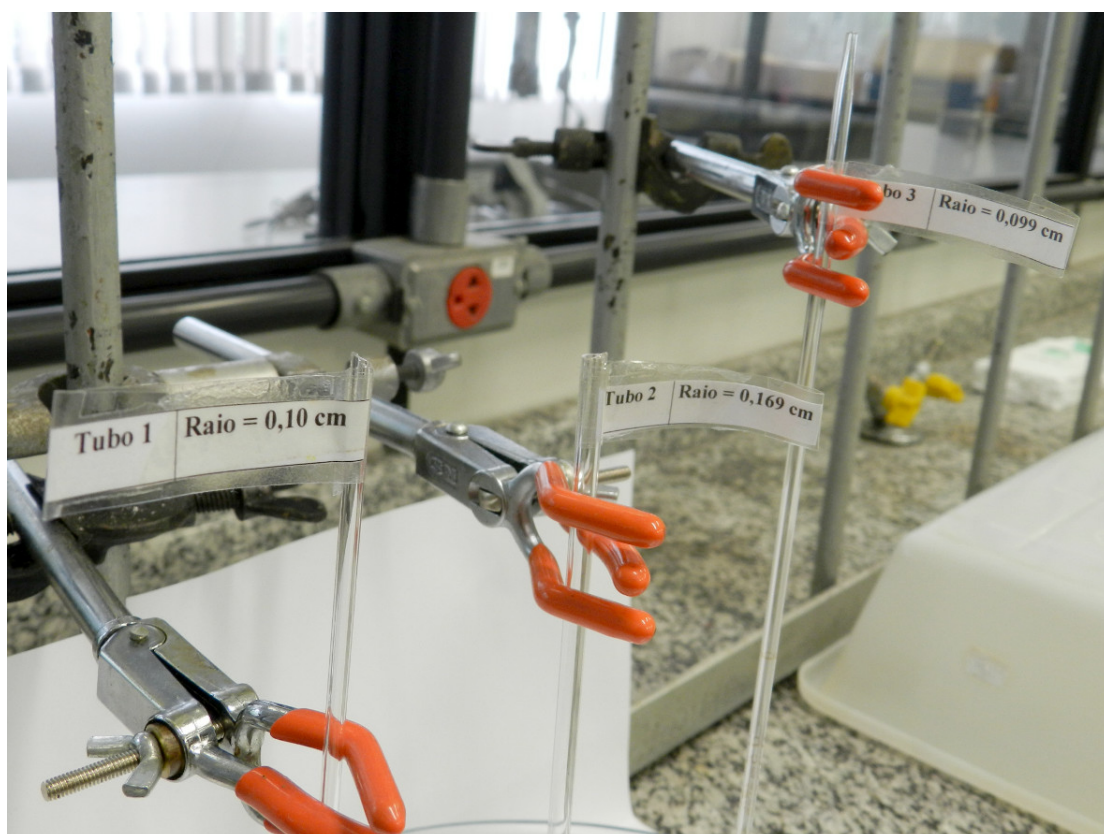


Figura 27: Indicação do raio dos três capilares usados



Figura 28: Leitura da diferença de altura entre a superfície da água e o do menisco interno do capilar

A última parte do procedimento foi realizada de maneira demonstrativa e consiste na apresentação de três situações onde fenômenos interfaciais estão envolvidos.

A primeira das demonstrações envolve um fenômeno conhecido como efeito Marangoni. São utilizados dois líquidos de tensão superficial razoavelmente diferentes, água e acetona em nosso caso. À água é adicionado um corante vermelho, enquanto à acetona é adicionado um corante azul. A água tingida é colocada no fundo de um vidro de relógio côncavo e então uma gota da acetona tingida é sutilmente colocada na parte superior do vidro (Figura 29). Dessa forma a gota escorre suavemente pela borda do vidro até encontrar a superfície da água, e nesse momento é possível identificar um processo difusivo entre as duas interfaces, visualizado por meio do gradiente de cores que se estabelece (Figura 30).

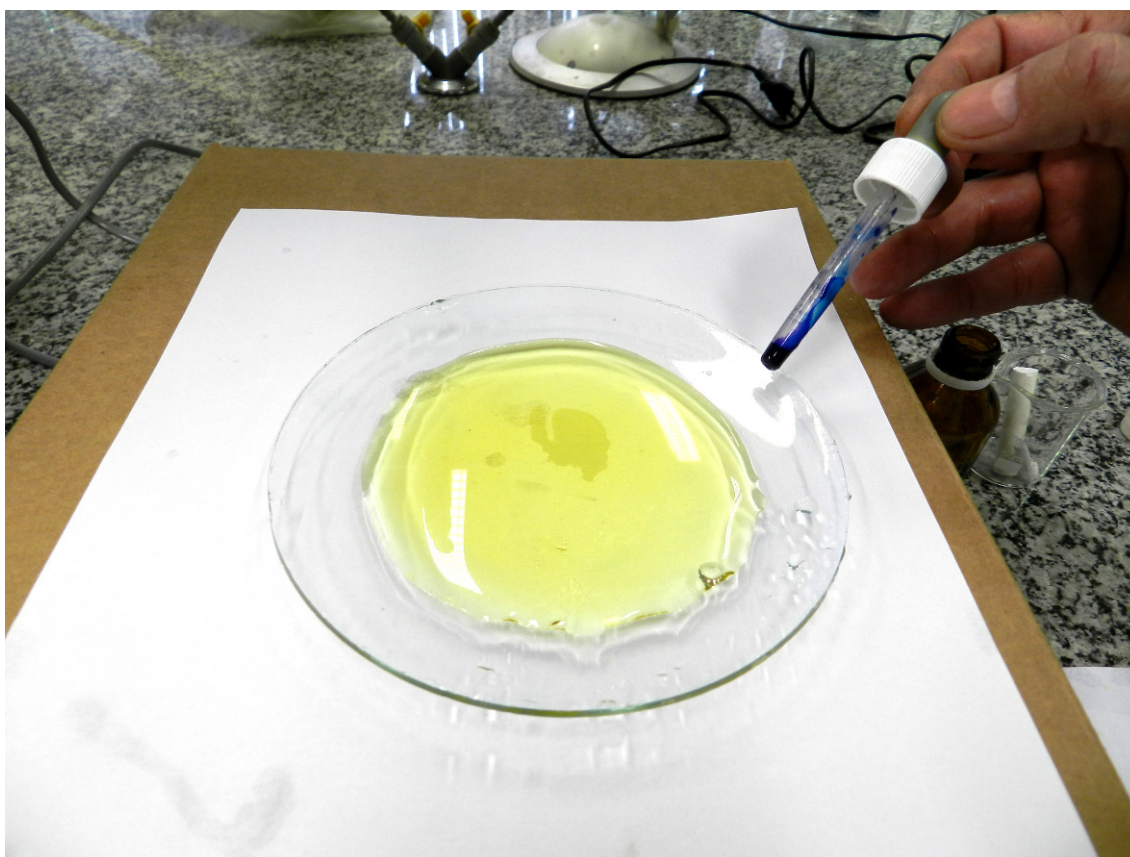


Figura 29: Montagem experimental do efeito Marangoni

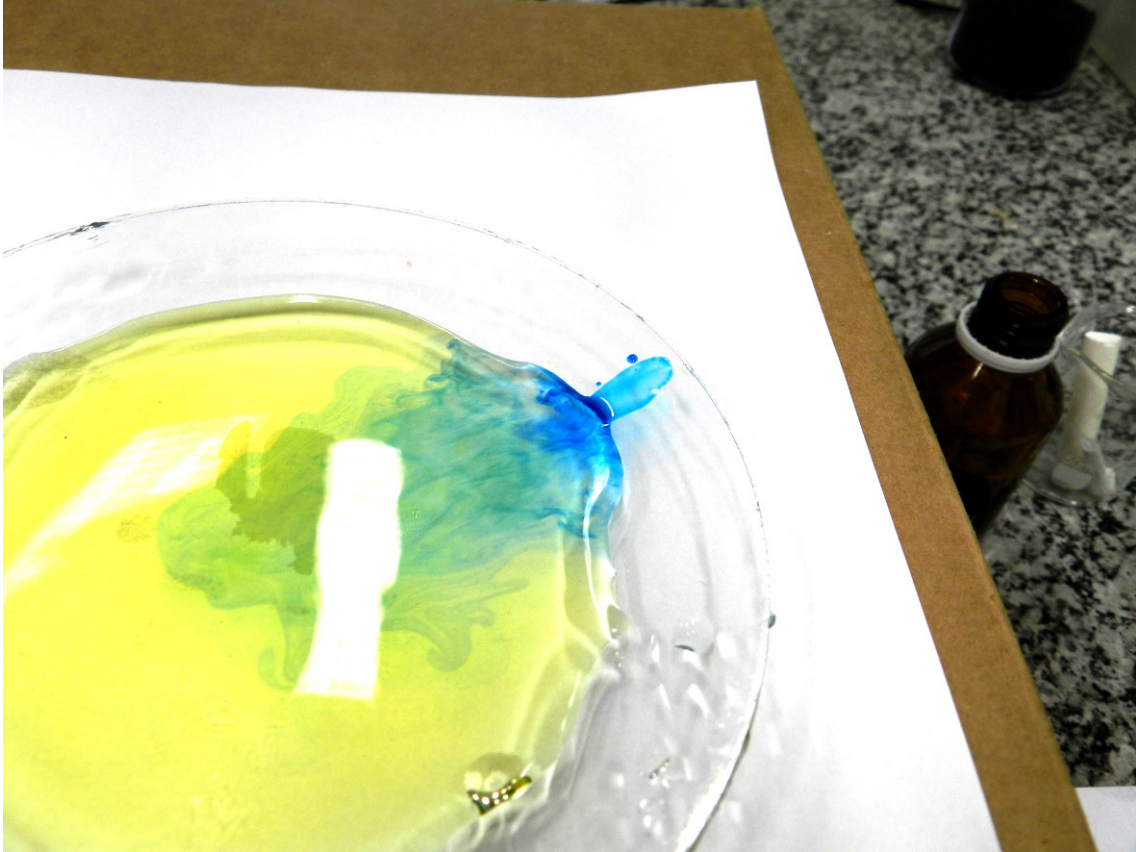


Figura 30: Efeito de difusão observado na interface entre dois líquidos diferentes marcados com corante

A segunda demonstração é preparada adicionando um pouco de água em uma placa de Petri. Espalha-se então pó de giz finamente dividido sobre a superfície da água de modo que o mesmo permaneça flutuando (Figura 31). Por fim, quando uma quantidade muito pequena de detergente (tensoativo) é gotejada no centro da placa, observa-se que o pó de giz que marcava a superfície anterior foi todo disperso para as bordas da placa (Figura 32)

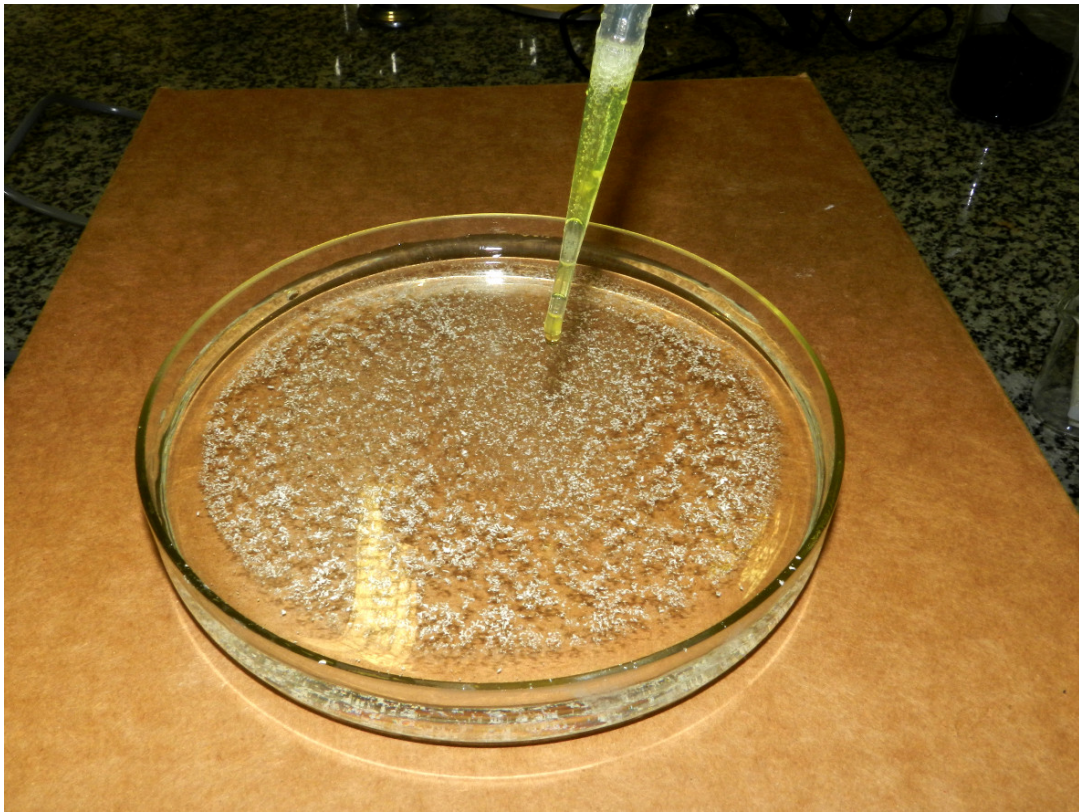


Figura 31: Pó de giz espalhado sobre a superfície de água



Figura 32: Dispersão do pó de giz após o derramamento de uma gota de tensoativo

A última demonstração tem caráter bem lúdico e explora o fenômeno das diferenças de tensão superficial de uma maneira interessante. Enche-se uma cuba de grande área com água. Pedacos de plástico (garrafas PET) capazes de flutuar sobre a superfície da água são cortados em um formato hidrodinâmico que se assemelha a um barco, com um rasgo na parte traseira (Figura 33). Uma gota de tensoativo é dispensada na parte de trás do barco que então é colocado sobre a água. A partir do momento em que o tensoativo entra em contato com a água da cuba o barco adquire movimento (Figura 34)



Figura 33: Barco de plástico PET com gota de tensoativo em sua traseira

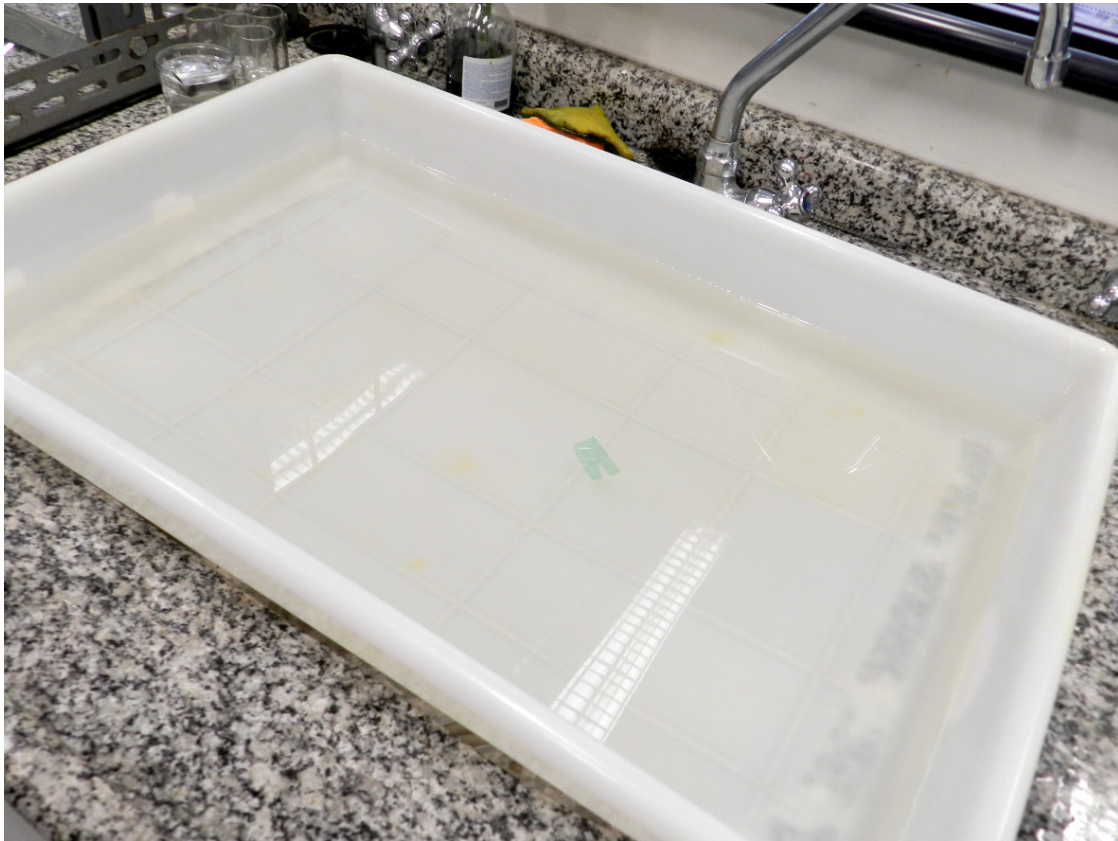


Figura 34: Movimentação do barquinho ao ser colocado na cuba de água

#### 5.4.2 Fenômenos envolvidos

Todos os fenômenos estão diretamente relacionados à tensão superficial e de alguma maneira às áreas interfaciais associadas. No estado líquido, as moléculas se atraem mutuamente. Já moléculas na fronteira com o ar, por exemplo, são mais atraídas pelo meio líquido do que pelo meio gasoso. Conseqüentemente há uma força resultante para o interior que tende a minimizar a área superficial do meio líquido (Figura 35). Sem a ação da gravidade a tendência é de formação de gotas esféricas.

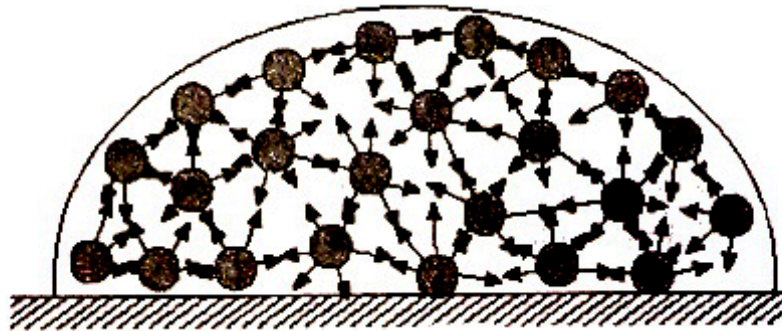


Figura 35: Representação da interação entre as diferentes tensões superficiais de um líquido e um gás

Os efeitos de superfície podem ser expressos termodinamicamente pelo trabalho necessário para modificar isotermicamente a área superficial do sistema. A relação entre os pares de variáveis correlacionadas, pode ser descrita pela eq. (17).

$$W = \sigma \cdot A \quad (17)$$

O método de determinação de tensão superficial pela queda da gota parte da determinação do peso da gota pendente em um tubo capilar no momento do destacamento da mesma. Numa primeira aproximação, a força associada à tensão superficial é expressa pelo produto da tensão pelo perímetro do pescoço da gota (Figura 36). Na situação limite do destacamento, o peso do líquido é igual à tensão superficial, conforme indicado nas equações que se seguem.

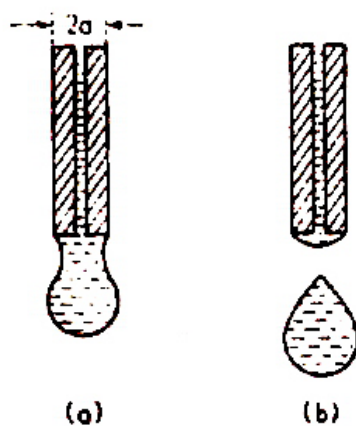


Figura 36: Formação do pescoço da gota (a) e seu desprendimento (b)



$$M.g = V.\rho.g = \sigma.(2.\pi.a) \quad (18)$$

$$\sigma = \frac{M.g}{2.\pi.a} = \frac{V.\rho.g}{2.\pi.a} \quad (19)$$

$$\sigma = \varphi.\frac{M.g}{2.\pi.a} = \varphi.\frac{V.\rho.g}{2.\pi.a} \quad (20)$$

A tensão superficial do líquido também pode ser determinada pela observação do fenômeno de ascensão capilar conforme indicado na Figura 37.

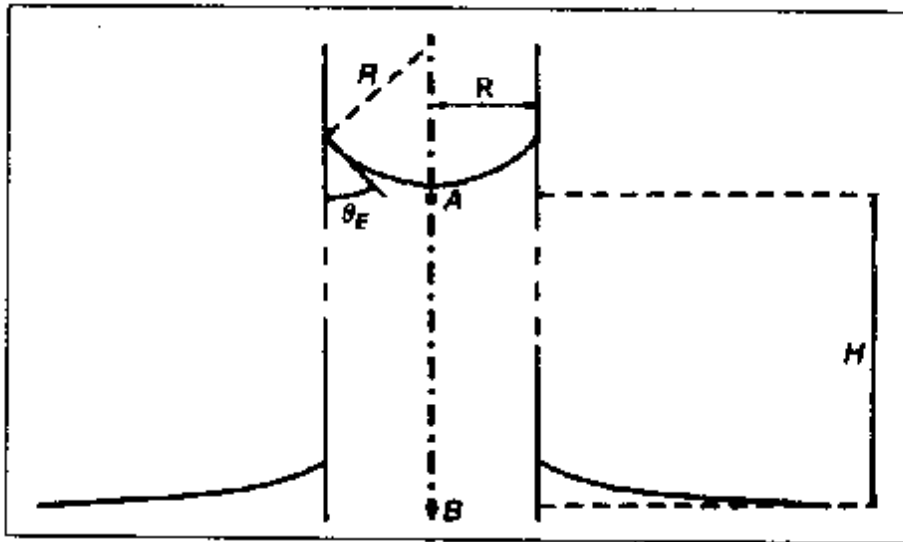


Figura 37: Fenômeno da ascensão capilar

O ângulo  $\Theta_E$  é denominado ângulo de contato e depende da interação entre sólido e líquido. Esse ângulo está relacionado ao fenômeno da molhabilidade da superfície e à relação entre adesão e coesão. Considerando que o vidro tem alta molhabilidade ( $\Theta_E \approx 0$ ), no topo do menisco há uma linha de força ao longo do perímetro interno do capilar sustentando o peso da coluna de líquido de altura  $H$ . Desta forma o balanço de forças fica:

$$F_\sigma = M.g \quad (21)$$

$$\sigma.(2.\pi.R) = \rho.(\pi.R^2).H.g \quad (22)$$

A ascensão do líquido no capilar pode ser interpretada como o resultado

de uma queda de pressão no líquido sob o menisco. A pressão externa em excesso consegue impulsionar o líquido para cima até atingir o equilíbrio hidrostático. A diferença de pressão no menisco é dada pelas equações indicadas abaixo.

$$P_{ar} - P_l = \rho \cdot H \cdot g = 2 \cdot \frac{\sigma}{R} \quad (23)$$

### 5.4.3 Relatório

Foi pedido aos alunos que fossem calculadas tensões superficiais para água e álcool usando os métodos apresentados. As relações matemáticas apresentadas estão intrinsecamente ligadas com a relação entre tensão superficial e área presentes na equação fundamental da Termodinâmica, eq. (2). Ao identificar o produto entre propriedades extensivas e intensivas como uma relação de importância recorrente, os alunos conseguem compreender que os fenômenos interfaciais são regidos por uma compensação entre área e tensão superficial. Assim é possível tanto mensurar qual o valor da tensão superficial quanto explicar qualitativamente o mecanismo de formação de uma gota.

O uso de balanços de forças simples permite aos alunos estimar com precisão aceitável quais os valores das tensões superficiais, a partir de dados coletados nas montagens propostas. A extrapolação desse tipo de abordagem matemática os permitirá prever em diversas situações como a área de superfície entre sistemas reagirá diante de diferentes condições de tensão superficial e como o trabalho envolvido pode estar relacionado com outras formas de energia.

## 5.5 Diferenças de Potencial (Experimento Fluxos Difusivos)

O último dos cinco experimentos realizados tem como objetivo ilustrar, discutir e analisar os fundamentos dos fenômenos de transporte de calor,

massa e quantidade de movimento e associar esses fluxos difusivos às equações fenomenológicas que os regem (conhecidas respectivamente como “leis” de Fourier, Fick e Newton). Ao contrário das outras experiências realizadas, o foco de análise aqui não são as leis da Termodinâmica. Apesar de descreverem os fluxos em função do gradiente de propriedades intensivas (por exemplo, o fluxo de calor é governado pelo gradiente de temperatura), as equações dos fenômenos dos transportes se preocupam com a cinética da transferência e não com o estado de equilíbrio atingido após transferências ocorrerem. Dadas as circunstâncias o experimento foi ministrado de maneira demonstrativa e não foi requisitado um relatório sobre o experimento.

### **5.5.1 Montagem**

Como se tratava do último experimento de um semestre cuja metade final foi marcada por uma greve de funcionários, o procedimento laboratorial, nesse caso, foi completamente demonstrativo e a abordagem das análises foi qualitativa. Os alunos apenas observaram os fenômenos que ocorriam nas montagens propostas enquanto a discussão sobre os princípios envolvidos era orientada pelos professores. Por mais que os alunos não participassem diretamente da montagem do procedimento ou fizessem qualquer medida quantitativa a exposição e discussão dos fenômenos difusivos foi introduzida satisfatoriamente. O experimento foi dividido em três etapas, cada uma envolvendo uma categoria de fluxo difusivo diferente.

Na primeira etapa foi analisado o fenômeno de transporte de massa. Para tal preparou-se um longo tubo de acrílico e colocou-se em uma de suas extremidades um chumaço de algodão embebido com solução aquosa de HCl e na outra um chumaço de algodão embebido com solução aquosa de  $\text{NH}_4\text{OH}$ . (Figuras 38, 39 e 40)



Figura 38: Montagem geral do tubo contendo algodões embebidos com reagentes em suas extremidades

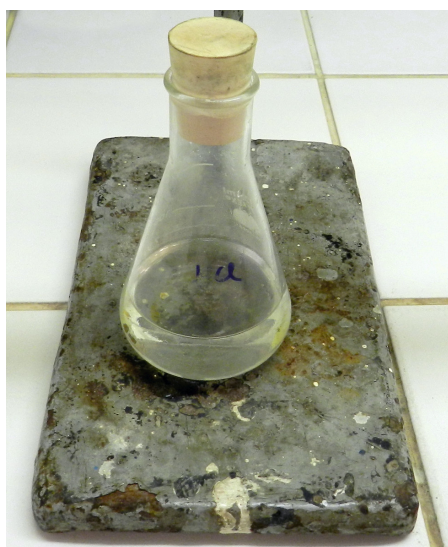


Figura 39: A extremidade esquerda do tubo continha HCl



Figura 40: A extremidade direita do tubo continha  $\text{NH}_4\text{OH}$

O tubo foi deixado em repouso e após algum tempo observou-se a formação de uma névoa branca em um ponto intermediário de seu comprimento. Os alunos observaram e compararam a diferença de distância entre a névoa e cada uma das extremidades. Paralelamente foi observado um outro experimento que consistia em deixar uma gota de corante (azul de metileno) difundir-se no fundo de um béquer cheio de água em repouso, para garantir que não houvesse transferência de massa por convecção.

A segunda parte procurou apresentar o transporte de calor através dos mecanismos de condução e convecção térmica. Nessa etapa utilizou-se um bico de Bunsen, um copo plástico e água. Primeiro se aproximava o copo vazio até o bico de Bunsen (Figura 42). Depois repetia-se o processo enchendo o copo d'água (Figura 41). Após o procedimento os alunos discutiam com o professor a diferença entre os dois casos.



Figura 42: Exposição de um copo plástico vazio à chama de um bico de Bunsen



Figura 41: Exposição de um copo plástico cheio de água à chama de um bico de Bunsen

A terceira parte dizia respeito ao transporte de quantidade de movimento. Para demonstrar os efeitos desse tipo de fenômeno utilizou-se um viscosímetro Saybolt, equipamento que também era utilizado nas experiências da antiga disciplina laboratorial. O viscosímetro era operado em uma temperatura pré-fixada, inserindo-se um óleo térmico no recipiente para óleo do aparelho até que as temperaturas se estabilizassem. Uma vez estabilizada a temperatura era dado início à descarga do óleo e se contabilizava o tempo até que o líquido se esgotasse.



Figura 43: Viscosímetro Saybolt

### 5.5.2 Fenômenos envolvidos

A Termodinâmica é uma ciência que por excelência se preocupa com estados de equilíbrio, identificando se um sistema está ou não em equilíbrio e qual será a configuração desse sistema quando a situação de equilíbrio for atingido. Se quisermos modelar os fluxos das propriedades de um sistema em um momento que não necessariamente o equilíbrio, deveremos recorrer à ciência dos Fenômenos de Transporte. Dentro dessa perspectiva, os fluxos difusivos são modelados por equações fenomenológicas são descritas em termos do produto de gradientes de propriedades intensivas por coeficientes de difusividades específicos para cada caso. As equações de difusão dos fenômenos de transportes estudados são apresentadas nas equações que se seguem. É interessante observar como o transporte de massa, eq. (24), o transporte de quantidade de movimento, eq. (25), e o transporte de calor, eq (26), são modelados matematicamente de maneira análoga.

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (24)$$

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (25)$$

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (26)$$

As transformações são promovidas pela existência de forças motrizes e são regidas por fenômenos dinâmicos, pois o sistema está fora do equilíbrio. Essas forças motrizes geralmente são expressas como diferenças de potencial e a dinâmica da transformação enquanto velocidades.

## 6 CONCLUSÃO

A reestruturação curricular que está se iniciando esse ano na Escola Politécnica desencadeou o desenvolvimento de uma nova disciplina ministrada pelo departamento de Engenharia Química. Essa é uma oportunidade propícia para, ao mesmo tempo, discutir quais princípios orientam a educação superior e pesquisar novos formatos didáticos para as atividades laboratoriais. Nosso projeto buscou conciliar essas duas tarefas a partir da noção de que a definição de princípios e fundamentos é um passo importante para progredir em ambas as tarefas.

Uma análise um pouco mais cuidadosa sobre as premissas que regem a mudança curricular EC3 nos indicam que muitas são as vozes ativas nas orientações pedagógicas elaboradas. Essas diretrizes representam alguns princípios que implicam em diferentes modelos de ensino superior e Universidade. Muitas vezes falta explicitar esses projetos político-pedagógicos prejudicando assim o debate sobre o tema e a elaboração de um consenso entre os diferentes interesses em disputa. Ao descrever e confrontar os vários ideais de Universidade possibilitamos a identificação de pontos comuns entre as diferentes visões. No contexto do ensino de Engenharia o ponto de consenso mais seguro encontrado após a acareação entre os diferentes interesses e objetivos é a robustez das abordagens mais fundamentais e conceituais.

Buscamos elaborar experiências que explorassem fenômenos empíricos da maneira mais clara e objetiva possível. Comparados às montagens experimentais da matéria anteriormente oferecida, os experimentos desenvolvidos para esse primeiro semestre de oferecimento da disciplina possuem uma abordagem muito mais conceitual do que tecnológica. Como esperado, essa estratégia consegue consolidar com mais clareza os fundamentos que governam os fenômenos de transformação física e química. Isso se deve, em grande parte, ao fato das montagens simples proporcionarem



a compreensão dos fenômenos em um nível muito mais próximo da realidade imediata dos ingressantes. Isso lhes permite lidar com os conceitos envolvidos com mais propriedade e confiança.

A opção pelo uso da linguagem termodinâmica como fio condutor das discussões também surtiu resultados. A cada novo ciclo de experiências os estudantes indicaram maior familiarização com discussões elaboradas nesses termos, e já conseguiam relacionar as diferentes transformações dentro de um mesmo contexto geral. Assim os ingressantes já começaram a se habituar desde o primeiro semestre a esse nível de discussão, que os acompanhará em todo o restante de seu percurso pela graduação.

Ainda é cedo para avaliar a efetividade desse no novo método de disciplina laboratorial. Esse foi o primeiro semestre de oferecimento dessa disciplina experimental. Os procedimentos ainda podem ser aprimorados e novas ideias de experiências podem surgir. De qualquer maneira a abordagem dos fundamentos dos fenômenos físicos e químicos segundo uma perspectiva termodinâmica é bem promissora, pois oferece ferramentas poderosas para que o aluno possa seguir com autonomia e segurança seu percurso acadêmico.

## 7 BIBLIOGRAFIA

ADAMS, J. L. **Flying buttresses, entropy, and O-rings: the world of an engineer**. Cambridge: Harvard University Press, 1993.

ALBERTY, R. A. **Use of Legendre transforms in chemical thermodynamics**. Pure Appl. Chem., Vol 73, No. 8, pp. 1349-1380, 2001.

AUYANG, S. Y. **Engineering – an endless frontier**. Cambridge: Harvard University Press, 2004.

CREMASCO, M. A. **Vale a pena estudar Engenharia Química**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

KOURGANOFF, W. **A face oculta da universidade**. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1990.

MÜLLER, I. M. **A History of Thermodynamics: the Doctrine of Energy and Entropy**. Berlin: Springer, 2007.

**PROJETO Político Pedagógico - Estrutura Curricular 3: Habilitação em Engenharia Química da Escola Politécnica**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2013. Disponível em: <[http://ec3.polignu.org/wp-content/uploads/2013/04/U\\_EngQuimCoop\\_1\\_PPP-EC3-2014-Engenharia-Química.pdf](http://ec3.polignu.org/wp-content/uploads/2013/04/U_EngQuimCoop_1_PPP-EC3-2014-Engenharia-Química.pdf)> . Acesso em: 07 .abr.2014

WOLFF, R. P. **O ideal de universidade**. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1993.

## 8 ANEXOS

### 8.1 Roteiro da experiência T×S

Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Química  
PQI- 3101: Fundamentos das Transformações Químicas  
Curso de Engenharia Química

#### RELATÓRIO EXPERIÊNCIA 1: CALORÍMETRO - TS

NOME	NUSP

1. Faça o gráfico da Temperatura do meio reacional em função do Tempo de reação para as diferentes condições avaliadas em laboratório (primeira etapa).
2. Faça o gráfico da Temperatura da água em função do Tempo para o texto de perda de calor (segunda etapa).
3. Responda às questões:
  - a) Na primeira etapa, a transformação observada com sistema pode ser considerada: Isotérmica? Justifique.  
Isobárica ? Justifique.  
Isocórica ? Justifique.
  - b) O sistema é adiabático? Justifique.
  - c) Trabalho foi realizado no sistema ou pelo sistema? O agitador realiza trabalho? Justifique.
  - e) Houve variação de energia interna da fase líquida no intervalo de 0 – 15 min. ? Houve variação de entalpia da fase líquida no intervalo de 0 – 15 min. ? Justifique.
  - f) Comparar os gráficos obtidos pelos outros grupos, discutindo e analisando as eventuais diferenças.
  - g) Estime a taxa de troca de calor (em J/min) no início do processo da segunda etapa? Esta taxa é constante?
  - h) Na segunda etapa, comparar os gráficos obtidos pelos outros grupos, discutindo e analisando as eventuais diferenças.
  - i) Apresente uma tabela com as quantidades (em gramas e gmols) dos reagentes e produtos para o início e término da transformação, considerando-se que os reagentes inicialmente estão puros e que a reação é completa.
  - j) Considerando-se reação completa, estime qual seria a temperatura final do sistema a partir dos calores específicos dos reagentes e produtos e da entalpia de reação. Discuta os resultados com base nos gráficos elaborados.

## 8.2 Roteiro da Experiência $p \times V$

Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Química  
PQI- 3101: Fundamentos das Transformações Químicas

### EXPERIÊNCIA 2: Diagrama PV de um gás

#### 1. OBJETIVO

Este experimento tem como objetivo ilustrar, discutir e analisar interações na forma de trabalho de expansão e compressão de um gás.

#### 2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO E EQUIPAMENTO

Este experimento consiste no estudo de processos de compressão e expansão de gás em sistema fechado. Estes processos serão realizados em dois dispositivos, a saber: 1) cilindro acrílico graduado, fechado, com êmbolo (pistão) e medidor de pressão; 2) seringa de vidro com êmbolo deslizante acoplada a sistema de pesos.

Serão utilizados os seguintes aparelhos e equipamentos:

- Balança
- Pesos calibrados
- Termômetro
- Seringa de vidro com êmbolo deslizante
- Cilindro graduado com êmbolo – AZEHEB

#### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os procedimentos apresentados nos itens de (a) a (g) devem ser realizados usando óculos de segurança e sob supervisão do técnico ou professor.

Primeira etapa – Verificação da Lei de Boyle-Mariote usando o cilindro graduado com êmbolo:

- (a) Ajustar o êmbolo para um volume inicial a ser especificado pelo professor.
- (b) Abrir a válvula do aparelho com êmbolo para atingir a condição de pressão atmosférica no interior do cilindro. Fechar a válvula, e registrar o valor da pressão medida pelo manômetro.
- (c) Iniciar o processo de compressão acionando-se a rosca acoplada ao êmbolo até atingir volume desejado. Aguardar para que a temperatura se estabilize e depois, efetuar a leitura da pressão.
- (d) Repetir o procedimento descrito no item (c) até a máxima pressão mensurável.
- (e) Construir uma tabela com os resultados de volume medido em função da pressão.
- (f) Construir um gráfico de  $1/V$  em função de  $P$ . Avaliar a correlação obtida.
- (g) Determinar o valor da Pressão obtida a partir da extrapolação do gráfico, considerando-se  $1/V = 0$ .

Segunda etapa – Obtenção do diagrama PV usando a seringa de vidro com êmbolo:

- (h) Determinar as massas dos pesos a serem utilizados.
- (i) Determinar o diâmetro do êmbolo.
- (j) Ajustar o êmbolo para um volume inicial a ser especificado pelo professor.
- (k) Adicionar um peso de cada vez ao suporte acoplado ao êmbolo, de forma cuidadosa.
- (l) Aguardar para que o êmbolo se estabilize, assim como a temperatura. Efetuar a leitura do volume de ar na seringa e registrar os valores da massa adicionada.
- (m) Repetir o procedimento descrito nos itens (k) e (l) até atingir o volume especificado pelo professor.
- (n) Construir uma tabela com os resultados de volume medido em função da massa dos pesos.
- (o) Calcular a força e a pressão exercidas pelos pesos para os volumes medidos. Construir uma tabela com estes resultados.
- (p) Construir um gráfico de  $1/V$  em função de  $P$ . Avaliar a correlação obtida.
- (q) Determinar o valor da Pressão obtida a partir da extrapolação do gráfico, considerando-se  $1/V = 0$ . Comparar este resultado com o obtido no item (g).
- (r) Construir um gráfico da pressão absoluta em função do volume.
- (s) Obter o valor do produto PV, sendo  $P$  a pressão absoluta, para as medidas efetuadas. Analisar os resultados.

Terceira etapa – Cálculo de trabalhos usando a seringa de vidro com êmbolo:

- (t) Realizar um processo de uma única etapa que leve o gás da condição do item (j) para a condição do item (m). Registre o volume do gás e os pesos utilizados nas duas condições.
- (u) Realizar um processo de duas etapas que leve o gás da condição do item (j) para a condição do item (m). Registre o volume do gás e os pesos utilizados nas três condições.
- (v) Identifique no gráfico PV os dois processos.
- (w) Calcule o trabalho realizado pelo gás na expansão nos processos (t) e (u). Compare os valores. Como fazer para maximizar o trabalho realizado pelo gás?

#### 4. RELATÓRIO

O relatório deve ser elaborado em aula conforme orientações específicas do professor.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- Atkins, P. W., Paula, *Físico-química*, v.1, 9 ed., LTC, 2012.
- Atkins, P.; Loretta, J. *Princípios de Química: Questionando a vida moderna e o meio ambiente*. 2ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

### 8.3 Roteiro da Experiência E×q

Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Química  
PQI- 3101: Fundamentos das Transformações Químicas

#### EXPERIÊNCIA 3: Pilha e Eletrólise

Profa. Idalina V. Aoki e Prof. Hercílio G. de Melo

##### 1. OBJETIVO

Este experimento tem como objetivo ilustrar, discutir e analisar processos eletroquímicos.

##### 2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

###### 2.1 Pilha e eletrólise

A primeira parte do experimento consiste em construir uma **pilha primária** (Figura 1), ou de Leclanché, para posterior utilização das mesmas como fonte de energia provocando reações em soluções com composições conhecidas. Ambos serão utilizados como fontes de energia para experimentos de eletrólise, de acordo com esquema representado na Figura 2, para o caso da pilha.

A energia fornecida pelos dispositivos construídos provocará a ocorrência de reações de oxidação e de redução, não espontâneas, sobre os eletrodos imersos nas soluções. A natureza destas reações deverá ser determinada após as observações experimentais.

###### 2.2.1 Construção da pilha seca

O objetivo desta etapa é montar uma pilha seca, segundo o esquema da Figura 1, com o seguinte material: carvão de retorta, zinco,  $MnO_2$ , solução de  $NH_4Cl$ , e algodão;

###### Procedimento:

- Inicialmente lixe a placa de Zn e os fios metálicos disponíveis na bancada (estes últimos servirão de eletrodos para a observação das reações na solução);
- Num vidro de relógio, e com uma espátula, **juntar ao  $MnO_2$  algumas gotas de solução de  $NH_4Cl$**  (a quantidade de  $NH_4Cl$  a ser adicionada deve permitir formar uma pasta úmida, porém consistente, de  $MnO_2$ ; para isto é suficiente a adição de apenas algumas gotas da solução);
- Cobrir uma das faces do carvão com uma camada uniforme, de aproximadamente 2 mm de espessura, da pasta obtida;
- Cobrir a pasta com um retângulo de algodão, umedecendo-o levemente com a solução de  $NH_4Cl$  (**são necessárias apenas algumas gotas**);
- Colocar a placa de Zn, devidamente lixada, sobre o algodão;
- Juntar levemente, com o indicador e o polegar, os dois fios metálicos de cobre disponíveis, um contra o carvão e o outro contra o zinco, amarrando-os com um elástico.

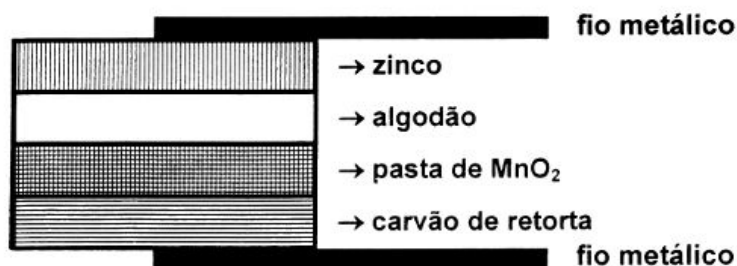


Figura 1 – Esquema de montagem da pilha seca

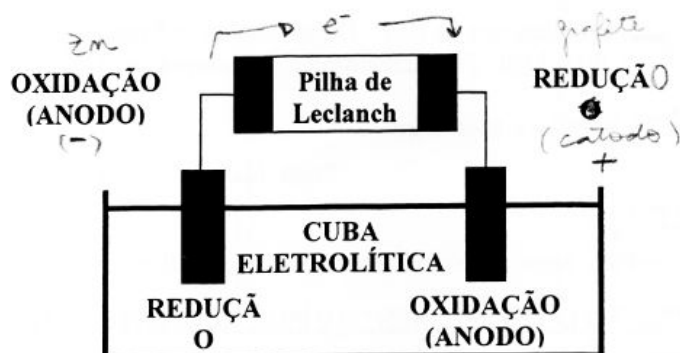


Figura 2 – Eletrólise utilizando uma pilha como fonte

### 2.2.2 Experiências com a pilha construída

#### I. Verificação das características da pilha

a. Medir a voltagem da pilha construída utilizando um voltímetro, o qual possui uma resistência interna muito elevada, fato que impede a passagem de corrente através do circuito externo, o que traz duas conseqüências para o funcionamento da pilha:

- Impede a polarização excessiva dos eletrodos, logo o valor de ddp lido não deve estar muito longe da fem teórica da pilha (1,73 V);
- Como o sistema atinge rapidamente um estado estacionário (pela pouca passagem de corrente), a leitura no voltímetro é estável (o sistema está descarregando muito lentamente).

✗ Verificar se a pilha acende uma lâmpada de 2V disponível na bancada (verificar a intensidade da luz);

c. Medir a corrente de curto-circuitamento da pilha utilizando um amperímetro, o qual possui resistência interna nula. A corrente **anotada deverá ser a corrente de pico**. O fato do amperímetro possuir resistência nula permite uma rápida passagem de elétrons através do circuito externo, trazendo duas conseqüências para a pilha: i) Rápida polarização dos eletrodos, o que leva a ddp entre os eletrodos para um valor próximo a zero, e também ocasiona a rápida diminuição no valor da corrente verificada no leitor; ii) Rápido descarregamento da pilha.

#### II. Verificação dos pólos da pilha – experiências de eletrólise

Será descrito detalhadamente apenas o procedimento para a investigação a ser realizada na solução de NaCl. Para as outras soluções serão frisadas apenas as etapas diferentes.

**Após a realização de cada um dos testes**, lavar os dois eletrodos metálicos com água destilada (disponível sobre a bancada) a fim de evitar contaminação da solução a ser utilizada no procedimento posterior.

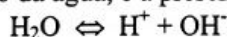
##### a. Eletrólise do NaCl

- i. Em um béquer de pequena capacidade, contendo solução de NaCl, colocar, aproximadamente, 3 gotas de fenolftaleína (indicador ácido-base);
- ii. Mergulhar os dois fios de cobre conectados aos pólos da pilha, levemente afastados um do outro, na solução eletrolítica;
- iii. Devido à energia fornecida pela pilha, haverá eletrólise da solução;

- iv. No catodo, haverá desprendimento do gás hidrogênio (após a redução de todo o oxigênio dissolvido na solução e presente nas proximidades do eletrodo nos primeiros segundos). Este processo causa um aumento da alcalinidade nas proximidades do eletrodo (falta H<sup>+</sup> e sobra OH<sup>-</sup>), provocando a mudança de cor do indicador de incolor para rosa, acima de pH 8,3;
  - **IMPORTANTE:** como as reações que ocorrem na solução eletrolítica não são espontâneas, o que verificamos é o funcionamento de uma célula eletrolítica. Em tais dispositivos **o catodo será o pólo negativo do sistema.**
  - Identificar as meia-reações que ocorrem em cada um dos pólos (utilize a tabela disponível na apostila).
- b. Eletrólise da água acidulada (contendo HCl)**
- i. Mergulhar os dois eletrodos de Cu na solução de HCl durante alguns minutos;
  - ii. Verificar os fenômenos que acontecem;
  - iii. Identificar as meia-reações que ocorrem em cada um dos pólos.
- c. Eletrodeposição do cobre**
- i. Trocar o eletrodo de cobre ligado ao zinco por um de níquel-cromo lixado (fio prateado disponível na bancada);
  - ii. Mergulhar os dois eletrodos em uma solução de CuSO<sub>4</sub> durante alguns minutos;
  - iii. Retirar os eletrodos e verificar sobre qual deles ocorre deposição de cobre;
  - iv. Identificar as meia-reações que ocorrem em cada um dos pólos.

#### Roteiro para chegar às reações de eletrólise

Para se chegar às reações que irão ocorrer durante a eletrólise, deve-se, inicialmente, verificar quais são as espécies presentes na solução e que podem participar das reações eletroquímicas, ou seja, que podem ganhar ou perder elétrons, reduzindo-se ou oxidando-se, respectivamente. Deve-se considerar apenas as espécies presentes inicialmente na solução, não devendo ser consideradas espécies formadas em virtude das reações eletroquímicas que ocorrem nos eletrodos. Como todas as soluções utilizadas são aquosas, deve-se sempre considerar o equilíbrio de dissociação da água, e a presença dos íons H<sup>+</sup> e OH<sup>-</sup>:



Para descobrir a **reação de oxidação** devem ser consideradas todas as **espécies que, potencialmente, podem ceder elétrons, ou serem oxidadas, incluindo o próprio metal do qual é constituído o eletrodo.** Será oxidada a espécie que tiver o menor potencial de redução, pois isto significa que a mesma pode ser oxidada mais facilmente (tem menor afinidade por elétrons). **O metal constituinte do anodo deve ser sempre considerado como um potencial doador de elétrons, com os íons metálicos indo para a solução.**

Para identificar a **reação de redução**, devem ser consideradas todas as espécies que podem ganhar elétrons, sendo que a reação que ocorre é a da **espécie que possui maior potencial de redução**, pois isto significa que a mesma tem maior tendência a ganhar elétrons. No caso do **metal que constitui o catodo, não deve ser considerada a hipótese de o mesmo participar das reações eletroquímicas de redução, pois o metal já está na forma reduzida**, e funcionará apenas como um condutor eletrônico sobre o qual ocorrem as reações de redução, devendo ser considerado inerte.

A seguir está apresentada uma tabela de potenciais padrão de redução (E<sup>0</sup>) para diversas espécies. Para uma avaliação rigorosa, os potenciais de equilíbrio deveriam ser calculados, para cada situação, pela equação de Nernst. Quando os valores são muito distantes entre si, contudo, o cálculo pode ser desnecessário:



Reação	E° red. (V)
$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Na}$	-2,71
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0,25
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_{2(\text{g})}$	zero
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	+0,347
$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightleftharpoons 4\text{OH}^-$	+ 0,401 (solução neutra)
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	+ 0,815 (solução ácida)
$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	+1,36
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{SO}_4^{2-}$	+ 1,96
$2\text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{SO}_3^{2-} + 2\text{OH}^-$	-0,940

### III. Desprendimento do gás cloro

Este procedimento será realizado de maneira demonstrativa pelo professor. A solução utilizada para a realização do experimento será a de HCl. Para a realização deste experimento será utilizada uma fonte de tensão disponível no laboratório. **Antes de usar a fonte de tensão, tente trocar o eletrodo de cobre por um de titânio (ligado no anodo da pilha) e veja o que ocorre usando a pilha construída como fonte de tensão.** Depois, siga as instruções abaixo;

- i. Colocar a fonte no modo de funcionamento de tensão;
- ii. Tome um fio de Pt ou de titânio (o importante é que o material seja inerte);
- iii. Conecte este fio ao pólo positivo da fonte de tensão;
- iv. Ao pólo negativo da fonte conecte um dos eletrodos de Cu;
- v. Imergir os dois eletrodos, levemente separados, na solução eletrolítica;
- vi. Girar, lentamente, o botão de regulagem da voltagem aplicada;
- vii. Verificar o que ocorre na superfície de cada um dos eletrodos;
- viii. Identificar as meia-reações que ocorrem em cada um dos pólos e tensão mínima para que ocorram.

#### Fundamentação teórica para esta etapa do procedimento experimental

O objetivo desta etapa é a produção de gás cloro a partir de uma solução de HCl.

Se você observar a tabela de potenciais disponível nesta apostila, verá que o par  $\text{Cl}_2/\text{Cl}^-$  possui o maior valor de potencial de redução. Ao forçarmos reações de oxidação, ocorrerá primeira a reação que apresentar o menor potencial de redução.

Entre todas as espécies presentes no béquer, há duas que podem sofrer oxidação: o ânion cloreto,  $\text{Cl}^-$  e o ânion hidroxila,  $\text{OH}^-$ . Observando a tabela de potenciais padrão de redução para essas espécies, verifica-se que a hidroxila tem maior tendência a sofrer oxidação (menor potencial de redução) e formar o gás oxigênio.

$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	+ 0,815 (solução ácida)
$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	+1,36

A pergunta que fica é porquê ao aplicarmos potenciais anódicos mais elevados só verificamos a produção do gás cloro (cheiro) e não o de oxigênio? Isso ocorre devido a uma maior polarização na reação de produção de oxigênio sobre titânio em comparação com a produção de cloro. A cinética fez inverter o que se esperaria do ponto de vista apenas termodinâmico.

Afinal, a indústria de soda cloro não conseguiria produzir o gás cloro, e sim, apenas oxigênio, se isso não ocorresse.

No cátodo também ocorre a evolução de um gás, mas esse você já sabe: é o hidrogênio. Afinal estamos num meio ácido e polarizando catodicamente, só podemos ter a formação do gás hidrogênio pela reação abaixo:

$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_{2(\text{g})}$	0,0V
---	------

Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Química  
PQI- 3101: Fundamentos das Transformações Químicas

RELATÓRIO - 3: Pilha e Eletrólise

NOME: \_\_\_\_\_ N USP \_\_\_\_\_  
 NOME: \_\_\_\_\_ N USP \_\_\_\_\_  
 NOME: \_\_\_\_\_ N USP \_\_\_\_\_

1. **PILHA:** Medida da f.e.m. da pilha

Voltagem = \_\_\_\_\_

2. **ELETRÓLISES** (usando pilha ou fonte estabilizada como alimentação)

referência à eletrólise

- |    |                                |                          |                         |                               |
|----|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| a) | Solução de NaCl,               | Anodo de cobre,          | Catodo de cobre,        | Usando a pilha                |
| b) | Solução de CuSO <sub>4</sub> , | Anodo de cobre,          | <u>Catodo de Cr-Ni.</u> | Usando a pilha                |
| c) | Solução de HCl,                | Anodo de cobre,          | Catodo de cobre,        | Usando a pilha                |
| d) | Solução de HCl,                | <u>Anodo de platina.</u> | Catodo de cobre,        | Usando a pilha                |
| e) | Solução de HCl,                | <u>Anodo de platina.</u> | Catodo de cobre,        | <u>Usando fonte (&gt; 2V)</u> |

Ao usar a pilha como fonte nas eletrólises:

	Haste do lado do carvão	Haste do lado do zinco
Pólo positivo ou negativo?	+	-
Nas eletrólises, este lado é o anodo ou o catodo	<u>anodo</u>	<u>catodo</u>

Fatos observados nas eletrólises:

eletrólise	anodo	catodo
a	$Cu^0 \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
b	$Cu^0 \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$	$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu^0$
c	$Cu^0 \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
d	—	—
e	$2Cl^- + 2e^- \rightarrow Cl_2$	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

Reações sugeridas nas eletrólises (veja os fatos acima e os potenciais-padrão de equilíbrio na apostila):

Eletrólise	Reação no anodo da eletrólise	Reação no catodo da eletrólise
a		
b		
c		
d		
e		

Para comentários adicionais, use o verso da folha

## 8.4 Roteiro da Experiência $\sigma \times A$

Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Química  
PQI- 3101: Fundamentos das Transformações Químicas  
Curso de Engenharia Química

### **EXPERIÊNCIA 4: TENSÃO SUPERFICIAL – $\sigma A$**

#### **1. OBJETIVO**

Este experimento tem como objetivos ilustrar, discutir e analisar:

- tensão superficial
- fenômenos interfaciais gás-líquido e líquido-líquido

#### **2. DESCRIÇÃO DA EXPERIÊNCIA E EQUIPAMENTOS**

Serão desenvolvidas atividades para determinação da tensão superficial de água e de etanol e algumas demonstrações para ilustração e discussão de fenômenos de superfície.

Para determinação de tensão superficial serão considerados dois procedimentos: método da queda de gota e ascensão capilar.

Serão utilizados os seguintes aparelhos e equipamentos:

- Buretas
- Vidraria
- Tubos de vidro de diferentes diâmetros
- Reagentes químicos: etanol, acetona e água

#### **3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Primeira etapa - Método da queda de gota:

- Adicionar água destilada à uma bureta para medição do número de gotas dispensadas e o respectivo volume.
- O gotejamento deve ser feito lentamente, ajustando-se a válvula da bureta para ter um intervalo de no mínimo 30 s entre gotas.
- Observe atentamente a formação da gota e o seu destacamento.
- Efetuar a contagem do número de gotas e medir precisamente o volume dispensado pela bureta (em torno de 1 mL).
- Medir a temperatura da água.
- Dispensar toda a água e lavar a proveta com um pouco de etanol.
- Repetir o procedimento descrito nos itens (a)-(e), empregando-se etanol ao invés de água.
- A partir das medidas efetuadas e das densidades dos líquidos, calcular a massa média de cada gota (água e etanol).
- Determinar a tensões superficial do etanol, conforme orientação do professor.

Segunda etapa - experimento de ascensão capilar:

- Medir a temperatura da água na cuba contendo água destilada.

- (k) Observar os meniscos formados nos diferentes tubinhos que estão parcialmente imersos na cuba.
- (l) Medir o altura da coluna de água no tubinho em relação à superfície da água na cuba, para os diferentes tubinhos.
- (m) Relacionar o raio interno do tubinho com a altura da coluna de líquido.
- (n) A partir das medidas efetuadas, calcular a diferença de pressão na superfície do menisco, entre a interface em contato com o ar e a interface em contato com a água, para cada um dos tubinhos.
- (o) A partir destas diferenças de pressões, determinar a tensão superficial da água, conforme orientação do professor.

Terceira etapa - experimentos demonstrativos relacionados aos fenômenos interfaciais líquido-líquido.

- (p) Efeito Marangoni: escoamento junto a uma interface devido gradiente de tensão superficial.
- (q) Alteração da tensão superficial da água na presença de surfactante.

#### 4. RELATÓRIO

Primeira etapa - Método da queda de gota:

- a) Apresentar os seguintes resultados para os sistemas água e álcool: número de gotas/volume dispensado, volume e massa de cada gota e temperatura.
- b) Apresentar a relação entre as tensões superficiais e calcular a tensão superficial do etanol.
- c) Comparar o resultado obtido com os dados da literatura, apresentados na tabela anexa.
- d) Avaliar e discutir os erros experimentais.

Segunda etapa - experimento de ascensão capilar:

- e) Apresentar uma tabela com os seguintes resultados: diâmetro do tubinho, altura da coluna de líquido e temperatura.
- f) Apresentar, nesta tabela, os resultados calculados da diferença de pressão no menisco e da tensão superficial.
- g) Comparar o resultado obtido com os dados da literatura, apresentados na tabela anexa.
- h) Avaliar e discutir os erros experimentais.

Terceira etapa - experimentos demonstrativos relacionados aos fenômenos interfaciais líquido-líquido.

- i) Relatar e discutir, brevemente, os fenômenos observados.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- Atkins, P. W., Paula, *Físico-química*, v.1, 9 ed., LTC, 2012.
- De Gennes, P. G., Brochard-Wyart, F., Quéré, D. *Capillarity and Wetting Phenomena- Drops, Bubbles, Pearls, Waves.* Springer, 2010.
- Adamson, A. W. *Physical Chemistry of Surfaces.* John Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> ed. 1967
- Vázquez G., Alvarez, E., Navaza, J. M. *Surface Tension of Alcohol + Water from 20 to 50 C.* J. Chem. Eng. Data, 40, 611-614, 1995.

## 8.5 Roteiro da Experiência Fluxos Difusivos

Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Química  
PQI- 3101: Fundamentos das Transformações Químicas  
Curso de Engenharia Química

### **EXPERIÊNCIA 5: DIFERENÇAS DE POTENCIAL: térmico, mecânico e químico**

#### 1. OBJETIVO

Este experimento tem como objetivos ilustrar, discutir e analisar:

- fundamentos dos fenômenos de transporte de calor, massa e quantidade de movimento
- fenômenos difusivos expressos pelas "leis" de: Fourier, Fick e Newton.

#### 2. DESCRIÇÃO DA EXPERIÊNCIA E EQUIPAMENTOS

Serão desenvolvidas atividades para demonstrações dos fundamentos dos fenômenos de transporte a partir de experimentos de transporte de calor, de massa e de quantidade de movimento. Apresentando-se, assim, as propriedades: condutividade térmica, difusividade mássica e viscosidade.

Serão utilizados os seguintes aparelhos e equipamentos:

- Bico de Bunsen
- Tubos de vidro
- Vidraria de laboratório
- Reagentes químicos: HCl, NH<sub>4</sub>OH e azul de metileno.
- óleo mineral
- viscosímetro Saybolt

#### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Primeira etapa - Transporte de massa - Difusividade mássica:

Neste experimento, todo o processo de preparação será conduzido em uma capela, diretamente pelo professor e pelo técnico de laboratório.

- Embeber um chumaço de algodão com solução aquosa de HCl.
- Embeber um chumaço de algodão com solução aquosa de NH<sub>4</sub>OH.
- Inserir cada um dos chumaços em cada uma das extremidades de um longo tubo, tampando-as com rolhas.
- Observar o que ocorre no interior do tubo ao longo do tempo.
- Determinar de forma aproximada a distância da "frente" de reação em relação a cada uma das extremidades.
- Paralelamente observar um outro experimento, no qual inserem-se algumas gotas de azul de metileno em um béquero contendo água destilada.

Segunda etapa - Transporte de calor - Condução e convecção térmica:

Neste experimento, todo o processo de preparação e operação será conduzido pelo professor e pelo técnico de laboratório.

- (g) Acender o bico de Bunsen.
- (h) "Aquecer" um copo plástico vazio com o bico de Bunsen.
- (i) Observar o fenômeno.
- (j) Repetir o procedimento para o aquecimento de um copo plástico contendo água.
- (k) Observar o fenômeno, medindo-se a temperatura da água ao longo do tempo.

Terceira etapa - Transporte de quantidade de movimento - Viscosidade:  
Neste experimento, todo o processo de preparação e operação será conduzido pelo professor e pelo técnico de laboratório.

- (l) Ajustar a temperatura do viscosímetro Saybolt em valor pré-determinado pelo professor. Aguardar a estabilização da temperatura.
- (m) Inserir o óleo térmico no recipiente de óleo do viscosímetro.
- (n) Medir a temperatura deste óleo com o decorrer do tempo, e aguardar a estabilização da temperatura.
- (o) Iniciar a descarga do óleo, registrando o instante inicial.
- (p) Determinar o tempo para descarga do volume especificado.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- Atkins, P. W., Paula, *Físico-química*, v.1, 9 ed., LTC, 2012.
- Brodkey, R. S.; Hershey, H. C. *Transport phenomena. A unified approach*. New York. McGraw Hill. 1989.

As transformações são promovidas pela existência de forças motrizes e são regidas por fenômenos dinâmicos, neste caso deve-se observar que o sistema está fora do equilíbrio. Essas forças motrizes geralmente são expressas como de diferenças de potenciais e a dinâmica da transformação como velocidades. Da mesma forma que no caso da relação entre um fluxo de elétrons (corrente elétrica I) e um diferença de potencial elétrico (U):

$$\text{VELOCIDADE} = \text{FORÇA MOTRIZ}/\text{RESISTÊNCIA}$$