



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA  
CURSO DE BACHARELADO EM QUÍMICA INDÚTRIAL**

**KAMILA FREITAS PORTO**

**ESTUDO DA REMOÇÃO DA SÍLICA DISSOLVIDA PARA FINS DE PRÉ-  
TRATAMENTO DE SISTEMAS COM MEMBRANAS**

Campina Grande – PB  
2014

**KAMILA FREITAS PORTO**

**ESTUDO DA REMOÇÃO DA SÍLICA DISSOLVIDA PARA FINS DE PRÉ-  
TRATAMENTO DE SISTEMAS COM MEMBRANAS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentada a Universidade Estadual da  
Paraíba como exigência para obtenção do título  
Bacharel em Química Industrial.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Márcia Izabel Cirne França

Campina Grande – PB  
2014

P853e

Porto, Kamila Freitas.

Estudo de remoção da sílica dissolvida para fins de pré-tratamento de sistemas com membranas [manuscrito] / Kamila Freitas Porto. - 2014.

57 p. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.

“Orientação: Profa. Dra. Márcia Izabel Cirne França, Departamento de Química”.

1. Dessalinização da água. 2. Remoção da sílica. 3. Água sintética. 4. Qualidade da água. I. Título.

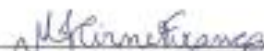
21. ed. CDD 628.167

KAMILA FREITAS PORTO

**ESTUDO DA REMOÇÃO DA SÍLICA DISSOLVIDA PARA FINS DE PRÉ-  
TRATAMENTO DE SISTEMAS COM MEMBRANAS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentada a  
Universidade Estadual da Paraíba como exigência para  
obtenção do título Bacharel em Química Industrial.


Aprovada em 01/08/2014.



Profª Drª Márcia Izabel-Cirne França / UEPB / DQ  
Orientadora



Profª Drª Djane Fátima Oliveira / UEPB / DQ  
Examinadora



Profª Drª Maria Roberta de Oliveira Pinto / UEPB / DQ  
Examinador

## RESUMO

Visando a problemática da disponibilidade hídrica, a dessalinização de águas através de processos com membranas surge como uma das alternativas para amenizar o problema da escassez, produzindo água de boa qualidade para o consumo humano, porém nos processos de separação com membranas, uma das maiores dificuldades são as incrustações (*scaling*) das membranas. De todas as substâncias conhecidas por apresentarem potencial de incrustação, a sílica é a mais preocupante, pois não há um pré-tratamento considerado adequado. Este trabalho descreve os resultados da pesquisa realizada no estudo do pré-tratamento de águas sintéticas para a remoção da sílica, seguido da caracterização destas, tendo em vista que as águas subterrâneas do semiárido brasileiro apresentam este constituinte nocivo para as membranas de osmose inversa, necessitando de pré-tratamentos eficazes para sua remoção e/ou diminuição. O pré-tratamento estudado consiste na adição de hidróxido de sódio à água sintética contendo cálcio, magnésio e sílica para a diminuição da concentração da sílica através da precipitação de silicato de magnésio e hidróxido de magnésio, no qual a sílica é adsorvida. Os parâmetros avaliados foram a concentração inicial da sílica, a dureza total da solução, a relação entre as concentrações de magnésio e cálcio e a temperatura da solução. Os resultados obtidos foram satisfatórios, tendo em vista que foram alcançados até, aproximadamente, 95% de remoção da sílica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pré-tratamento, sílica, dessalinização, água.

## **ABSTRACT**

Aiming at the problem of water availability, water desalination by membrane processes emerges as an alternative to alleviate the problem of scarcity, producing good quality water for human consumption, but in the processes of membrane separation, one of the greatest difficulties is the scaling of membranes. Of all the substances known to have the potential for scaling, silica is the most worrying, because there is no pre-treatment considered appropriate. This paper describes the results of a study on the pre-treatment of synthetic water for the removal of silica, considering that groundwater in the Brazilian semi-arid region contains this harmful constituent in relation to reverse osmosis membranes and thus requires effective pre-treatment for its removal and / or reduction. The pretreatment study comprises adding sodium hydroxide to synthetic water containing calcium, magnesium and silica to reduce the concentration of silica by the precipitation of magnesium silicate and magnesium hydroxide, wherein the silica is adsorbed. The parameters evaluated were the initial concentration of silica, total hardness of the solution, the relationship between the concentrations of calcium and magnesium and the temperature of the solution. The results indicated an approximate removal of silica of ninety five percent (95%).

**KEYWORDS:** Pre-treatment, silica, desalination, water.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	8
1.1 OBJETIVO GERAL.....	9
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	10
2.1 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO COM MEMBRANAS.....	10
2.2 CLASSIFICAÇÃO DE MEMBRANAS.....	11
<b>2.2.1 Membranas Aromáticas Poliamida (Aramida)</b> .....	11
<b>2.2.2 Membranas de Acetato de Celulose (CA)</b> .....	12
<b>2.2.3 Membranas de Compósito de Filme Fino (TFC)</b> .....	12
2.3 OSMOSE INVERSA.....	13
2.4 OSMOSE INVERSA E A DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUAS.....	14
2.5 INCRUSTAÇÕES DE MEMBRANAS .....	15
2.6 O PRÉ-TRATAMENTO DA OSMOSE INVERSA.....	16
2.7 A SÍLICA E A OSMOSE INVERSA .....	17
<b>3 MATERIAIS E METODOS</b> .....	17
3.1 EXPERIMENTOS DE BANCADA.....	18
3.2 EXPERIMENTOS EM ESCALA PILOTO .....	21
3.3 PREPARO DAS SOLUÇÕES .....	21
3.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS .....	22
<b>3.4.1 Determinação da sílica reativa</b> .....	22
<b>3.4.2 Determinação da dureza da água</b> .....	22
<b>3.4.3 Determinação do pH</b> .....	23
<b>4 RESULTADOS</b> .....	24
4.1 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE BANCADA.....	24
4.2. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS EM ESCALA PILOTO .....	29
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	32
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	33

<b>Anexo A – Artigo Publicado em Congresso Internacional .....</b>	<b>35</b>
<b>Anexo B – Resultado de Todos os Experimentos Realizados .....</b>	<b>45</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista a importância da água para a conservação da vida no planeta, surge uma crescente preocupação em relação a sua disponibilidade, uma vez que apenas 3% de todo o volume de água é doce, e destes 3%, 68,9% se encontram nas calotas polares, além disto, a crescente poluição dos rios e lagos e o crescimento populacional, tornam esta escassez ainda mais grave, tornando-se assim, a sua garantia, um dos grandes desafios do novo milênio.

A respeito de ser o Brasil o maior detentor mundial de água potável, com 8% das reservas mundiais, respondendo por 18% do potencial de água de superfície do planeta, ao se considerar, em lugar da disponibilidade absoluta de recursos hídricos renováveis, aquela relativa à população dele dependente, o País deixa de ser o primeiro e passa ao vigésimo terceiro do mundo, visto que, enquanto a Região Amazônica concentra 80% dos recursos hídricos brasileiros, abrigando 7% da população, na Região Nordeste, que abriga 27% da população, apenas estão disponíveis 3,3% desses recursos (PAZ et al., 2000).

Especificamente no semiárido nordestino, este problema é ainda mais grave, apesar de ser considerada uma das regiões semiáridas mais chuvosas do planeta – a Embrapa estima volumes precipitados em sua superfície da ordem de 700 bilhões de m<sup>3</sup>/ano – as descargas anuais de seus rios, em direção ao oceano, registram baixas infiltrações em seus aquíferos (cerca de 58 bilhões de m<sup>3</sup>, apenas), quando comparadas aos volumes anualmente precipitados, desproporção essa causada não apenas pelas características geológicas existentes, mas, e principalmente, pela intensa evaporação reinante no ambiente (o potencial evaporimétrico da região é superior a 2.000 mm/anos, numa região em que chove, em média, até 800 mm) (SUASSUNA,2008).

Embora a carência em recursos hídricos superficiais, poderiam ser extraídos do subsolo da Região Nordeste, sem risco de esgotamento dos mananciais, pelo menos 19,5 bilhões de m<sup>3</sup> de água por ano (40 vezes o volume explorado hoje), segundo a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS). O uso desta água, porém, é limitado por um problema típico dos poços do interior nordestino: a concentração elevada de sais.

Desta forma, a dessalinização de águas salobras ou água salgadas, subterrâneas, de açudes e de poços, pode ser uma solução para combater este problema da falta de água potável.

O método usado para a dessalinização no Nordeste tem sido predominantemente, o processo de osmose inversa, PORTO *et al.* (2004) e AMORIM *et al.* (2004) atribuem o predomínio da osmose inversa à simplicidade e robustez do equipamento, aos baixos custos

de instalação e operação, incluindo o consumo de energia e de mão-de-obra na operação, à capacidade de tratar volumes baixos a moderados de água bruta, à elevada taxa de recuperação, à continuidade do processo e à excelente qualidade da água tratada; entretanto existem alguns obstáculos a serem vencidos, as águas subterrâneas do semiárido brasileiro apresentam alguns constituintes nocivos para as membranas de osmose inversa, necessitando de pré-tratamentos eficazes para a sua remoção e/ou diminuição.

Dentre todas as substâncias conhecidas por apresentarem alto potencial de incrustação, a sílica se destaca em função de não haver, até o presente momento, um pré-tratamento considerado adequado e seus depósitos são caracterizados por extrema dificuldade de remoção. (FRANÇA, 2009)

Incrustações de sílica limita a recuperação do sistema de dessalinização, diminuindo a taxa de produção de água dessalinizada, comprometendo a vida útil das membranas e é praticamente impossível de ser removida ou limpa (SHEIKHOLESLAMI, 2001).

## 1.1 OBJETIVO

### *1.1.1 Objetivos Geral*

Estudar e otimizar métodos de pré-tratamentos químicos que utilizam bases fortes para diminuir o teor de sílica presente em águas salobras para fins de processos de separação com membranas.

### *1.1.2 Objetivos Específicos*

Utilizar em escala de bancada soluções sintéticas contendo diferentes concentrações de sílica para o estudo de algumas condições de pré-tratamento da água, tais como: concentração da base; dureza da solução; razão de concentração de magnésio e cálcio; agitação utilizada.

Utilizar as condições propostas no sistema de dessalinização piloto (SDP) para águas sintéticas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO COM MEMBRANAS

Os processos de separação por membranas com transporte de uma dada espécie, ocorrem devido à existência de uma força motriz. Estes processos estão divididos em cinco categorias:

- microfiltração (MF);
- ultrafiltração (UF);
- nanofiltração (NF);
- osmose inversa (OI);
- eletrodialise (ED).

O que difere cada uma das categorias acima é o diâmetro dos poros das membranas e o tipo e intensidade da força motriz utilizada para separação dos contaminantes.

**Microfiltração:** remove partículas de diâmetro da ordem de 0,1 a 1 micrômetro. Remove colóides, bactérias. Não remove de forma eficiente sólidos em suspensão e dissolvidos.

**Ultrafiltração:** tem a capacidade de separar macro moléculas, de diâmetros de até 0,01 micrômetros. Embora apresente uma remoção completa de sólidos em suspensão e colóides, permite a passagem de sais dissolvidos e moléculas menores. A ultrafiltração tem tido um grande desenvolvimento no campo de tratamento de água para o abastecimento público.

**Nanofiltração:** processo especial de membranas que remove partículas de diâmetros até a ordem de 1 nanômetro. Matéria orgânica e sais com ânions divalentes são eficientemente removidos. É utilizada principalmente para a remoção de cor, carbono orgânico total e sólidos dissolvidos em águas residuárias.

**Osmose Reversa:** é o mais seletivo processo de filtração disponível. A membrana de osmose reversa atua como uma barreira seletiva a todos os sais dissolvidos, moléculas orgânicas e inorgânicas. A rejeição típica de sais no processo de OR vai de 95% a 99% (DOW CHEMICAL, 2005).

**A eletrodialise:** é um processo de separação de massa em que membranas eletricamente carregadas e uma diferença de potencial são usadas para separar espécies iônicas de uma solução aquosa e outros componentes sem carga, envolvendo, portanto, a

separação e concentração de eletrólitos com base na eletromigração de íons através de membranas de troca iônica seletivas para cátions e ânions. (BENVENUTI, 2012).

Em todos os processos de separação por membranas são produzidas duas correntes:

- Permeado: fração de líquido que passou através da membrana (MF; UF; NF e OR) e Purificado no caso da Eletrodialise;
- Concentrado: corrente que contém os contaminantes inicialmente presentes na corrente de alimentação;

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DE MEMBRANAS

De acordo com FRANÇA (2009), a membrana ideal deve apresentar as seguintes características:

- alta taxa de fluxo de água;
- alta rejeição de sais;
- tolerância ao cloro e a outros oxidantes;
- resistência ao ataque biológico;
- resistência à formação de incrustações coloidais e materiais em suspensão;
- baixo custo;
- fácil de formar um filme fino ou fibra oca;
- mecanicamente resistente;
- quimicamente estável;
- resistente a altas temperaturas.

### *2.2.1 Membranas Aromáticas Poliamida (Aramida)*

As Membranas Aromáticas de Poliamida são membranas de películas finas composta, e são exemplos de membranas simétricas.

As membranas simétricas ou isotópicas ou ainda membranas orgânicas de primeira geração são membranas com poros regulares, quase cilíndricos que atravessam toda a espessura da membrana, podem ser porosas, não-porosas ou densas. Apresentam uma espessura entre 10 a 200  $\mu\text{m}$ . A porosidade e a produtividade dessas membranas são muito pequenas pela necessidade de limitar o volume ocupado pelos poros, para evitar o colapso das membranas quando pressurizadas. As membranas densas simétricas não apresentam nenhum

interesse do ponto de vista comercial. São filmes poliméricos de espessura relativamente elevada e, por este motivo, apresentam um fluxo do permeado muito baixo, fora da faixa de interesse comercial

### ***2.2.2 Membranas de Acetato de Celulose (CA)***

As membranas de Acetato de Celulose são exemplos de membranas assimétricas. As membranas assimétricas ou anisotrópicas ou membranas de segunda geração são caracterizadas por um gradiente de porosidade interno, gerado pelo controle das condições de polimerização da membrana, onde estas são constituídas por uma camada densa homogênea, muito fina (camada ativa ou "pele"), cuja espessura pode variar entre 0.1 a 0.5  $\mu\text{m}$ , suportada por uma camada porosa com uma espessura entre 50 a 150  $\mu\text{m}$ . A reduzida espessura da película filtrante diminui consideravelmente a resistência à filtração, que é proporcional à espessura da membrana. As membranas assimétricas são constituídas de um único tipo de polímero.

Este tipo de membrana possui custos de fabricação mais baixos por ser fabricada em apenas uma etapa de produção. Por este método de fabricação, torna-se muito difícil à obtenção de um produto de elevada qualidade, devido à existência de pequenos poros formados na superfície da membrana. Este problema só pode ser resolvido com a utilização de práticas que acabam por determinar o aumento da espessura da película fina, reduzindo, conseqüentemente, o fluxo de água permeado.

Outro problema que ocorre durante a utilização de tal tipo de membrana é a sua tendência a compactar-se em uma estrutura cada vez mais densa sob a aplicação de elevadas pressões de modo contínuo durante o regime de operação. Este fenômeno é conhecido como compactação da membrana e seus efeitos durante a vida útil da mesma devem ser levados em conta na fase do projeto do sistema.

### ***2.2.3 Membranas de Compósito de Filme Fino (TFC)***

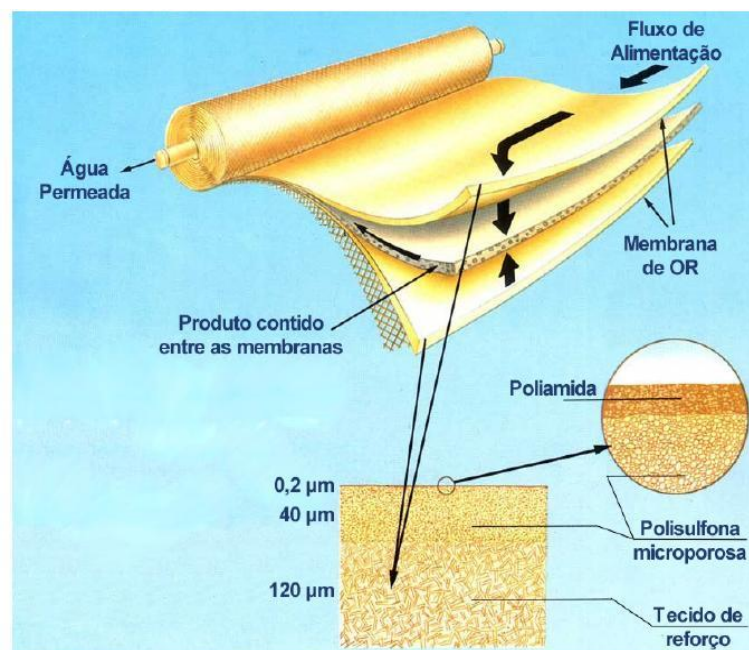
As membranas compostas que veio com o aperfeiçoamento do processo de construção das membranas assimétricas são conhecidas também como membranas da terceira geração.

Os cartuchos de membranas espirais são os mais utilizados em aplicações de osmose inversa, normalmente são do tipo TFC fabricados em poliamida, com rejeição de sais superior a 99%. Na Figura 2.1 pode-se observar a representação de uma membrana em poliamida TFC.

As membranas em poliamida TFC (Thin Film Composite) consistem de uma camada suporte (porosa) e uma camada densa de um filme fino que é uma pele de membrana trançada, formada no local sobre a camada suporte, normalmente feita em polisulfona. Este processo de fabricação das membranas possibilita o aproveitamento das propriedades do suporte e da pele (rejeição de sais).

A membrana TFC é caracterizada pela grande vazão específica de água e maior rejeição de sais que as membranas de acetato de celulose. Cada elemento de membrana consiste de um envelope de filme e espaçador, enrolado ao redor de um tubo central que é o coletor da água permeada.

Figura 2.1 - Membranas em poliamida TFC

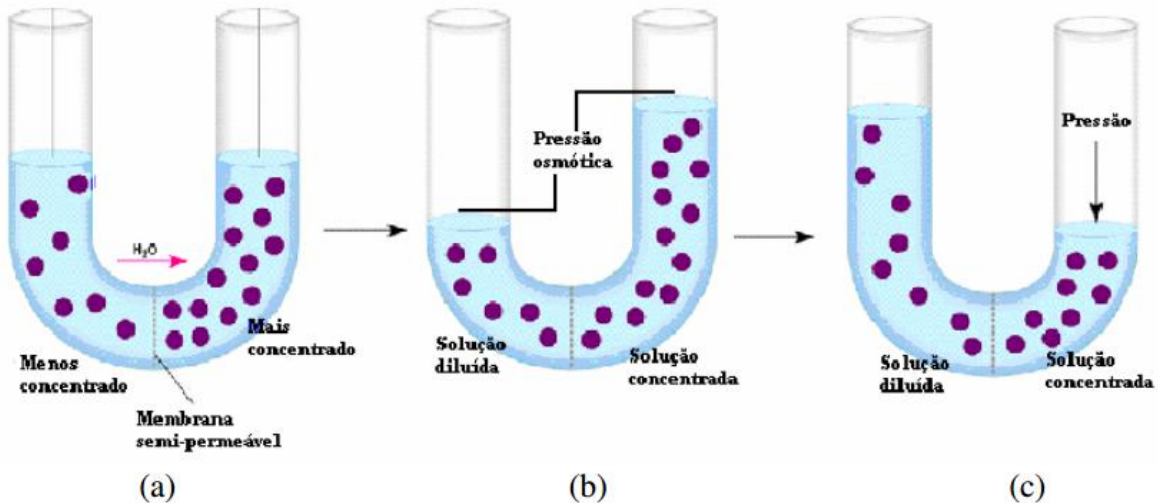


Fonte: Dow (2004)

### 2.3 OSMOSE INVERSA

A Osmose é uma Propriedade Coligativa conceituada como a passagem de solvente através de membranas semipermeáveis. Neste método, há a difusão de solvente da solução menos concentrada para a mais concentrada, igualando assim a concentração de ambas as soluções. No entanto, existe a osmose reversa ou osmose invertida (osmose inversa), neste processo, o solvente passa pela membrana semipermeável no sentido da solução mais concentrada para a menos concentrada. A etapa da dessalinização mais importante é a etapa da osmose inversa, a Figura 2.1 apresenta o que ocorre durante esta etapa.

Figura 2.1 – Representação do processo de osmose e osmose inversa: a) duas soluções, uma mais salina do que a outra, separadas por uma membrana semipermeável; b) a água menos concentrada dissolve a concentrada até atingir o equilíbrio osmótico; c) a aplicação de uma pressão superior a diferença de pressão hidrostática inverte o processo.



Fonte: CARTAXO et al. (2006).

Na osmose inversa, as membranas são um dos elementos mais importantes, sua função característica de seletividade induz ao desenvolvimento de membranas para a dessalinização em escala industrial (MOURA et al., 2001).

A taxa de transporte de água através da membrana depende fatores como: temperatura da solução, diferença de pressão aplicada a membrana e a baixa diferença de pressão osmótica entre a solução mais concentrada e a de menor concentração.

#### 2.4 OSMOSE INVERSA E A DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUAS

Atualmente, a osmose inversa é considerada uma saída para o problema previsto da escassez vindoura de água. E no presente momento, a ausência de água potável em diversas regiões do globo estimula a utilização desta técnica.

Os principais empregos da osmose inversa são as seguintes:

- Na dessalinização de águas salobras;
- Na indústria, é utilizada na fabricação de alguns tipos de bebidas, como certas águas minerais;
- Na área da saúde, recebe destaque, principalmente, nos processos de hemodiálise;
- Na agropecuária utiliza-se a osmose reversa na dessedentação de animais, na irrigação e hidroponia. Embora neste setor, ainda haja pouca difusão da técnica.
- Atua ainda em outras áreas distintas como geração de energia e biotecnologia.

A osmose inversa é um processo bastante eficiente para remover sólidos dissolvidos (TDS) com concentrações acima de 45.000 mg/L (Younos T. e Tulou K. E. 2005), podendo ser aplicada tanto na dessalinização de água salgada como salobra. O processo ocorre à temperatura ambiente, no entanto não se realiza se não tiver energia eléctrica, que é necessária para ativar os dispositivos que vão conferir a pressão necessária para que a água se escoe pelas membranas.

Na osmose inversa a pressão a aplicar no sistema terá que ser igual ou superior à pressão osmótica, para conseguir uma pressão superior à pressão osmótica recorre-se a uma bomba de alta pressão especialmente desenhada e revestida para o efeito. Conseguida essa pressão a água salgada é pressionada contra as membranas de modo a que a osmose inversa aconteça.

Apenas uma parte da água é que é convertida em água doce (cerca de 40%) enquanto que o concentrado é enviado ao meio receptor, caso contrário a água continuaria a aumentar a sua salinidade. Na osmose inversa há necessidade de se fazer um pré-tratamento à água salgada.

## 2.5 INCRUSTAÇÕES DE MEMBRANAS

De acordo com SCHNEIDER (2001), o fenómeno de incrustações em membranas, conhecido em inglês como *fouling*, pode ser entendido como um acúmulo de material na superfície de membranas e nos espaçadores, que muitas vezes pode ser irreversível.

Este acúmulo leva à deterioração física e química das membranas pela abrasão e oxidação das camadas poliméricas, pelo o aumento das pressões (gerando uma demanda maior de energia) em virtude da maior resistência da água em atravessar a membrana, que leva a aumento da passagem de sais uma vez que a concentração no interior dos módulos passa a ser maior.

A incrustação das membranas depende da qualidade da água de alimentação no sistema sendo, na grande maioria das vezes, ocasionado por sais insolúveis (*scaling*), substâncias coloidais e matéria orgânica. Este problema pode ser classificado como: incrustação por deposição de sólidos suspensos, incrustação por precipitação de compostos solúveis e bioincrustações.

A incrustação por precipitação ocorre devido à precipitação de compostos solúveis presentes na alimentação, quando estes atingem o limite de solubilidade. Como o permeado consiste de água com baixa concentração de sal, a concentração de íons na alimentação



umenta. Devido à polarização de concentração, este efeito se intensifica próximo à superfície da membrana, podendo atingir o limite de solubilidade dos sais e ocorrer a precipitação. Os sais mais comuns de precipitar, em ordem de importância são: carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, complexos de sílica, sulfato de bário, sulfato de estrôncio e fosfato de cálcio (VROUWENVELDER et al., 2003).

## 2.6 O PRÉ-TRATAMENTO DA OSMOSE INVERSA

Existem métodos convencionais de pré-tratamento para membranas não serem incrustadas, os mesmos consistem na adição de um coagulante na água a ser tratada, seguido da floculação, sedimentação das partículas maiores e, finalmente, da passagem por filtros de areia, antracito ou granada, para remover partículas menores. Este sistema mais antigo é amplamente difundido em diversos campos do tratamento de água e dominado por projetistas de sistemas de tratamento de água, é eficiente na remoção de matéria coloidal, e demonstra-se pouco eficiente na remoção de bactérias e compostos orgânicos ou inorgânicos dissolvidos. As principais desvantagens do método convencional podem ser apontadas como a necessidade de áreas de instalação superiores à de sistemas mais modernos, altos custos de operação e a baixa eficiência na remoção de partículas dissolvidas, microrganismos e carbono orgânico, mesmo quando bem operados (REDONDO, 2001).

Sistemas de microfiltração e ultrafiltração, opções mais modernas no pré-tratamento para sistemas de osmose reversa, possuem uma alta eficiência na remoção de sólidos em suspensão e colóides. Os sistemas de micro e ultrafiltração também são baseados em membranas, assim como a Osmose Reversa, apresentam diversas opções de configurações, desde o formato de placas com operação por sucção até o uso de fibras ocas em vasos pressurizados.

O condicionamento químico, utilizado em combinação ou como parte dos sistemas de pré-tratamento citados anteriormente, é uma prática comum no controle dos agentes causadores de depósitos em membranas. Dentre os compostos químicos mais empregados estão os anti-incrustantes, cujo objetivo é reduzir a colmatação por deposição de sulfatos e carbonatos. Os anti-incrustantes são substâncias químicas, do grupo dos fosfonatos, dosadas na alimentação da osmose reversa em concentrações muito pequenas (da ordem de 3ppm). Apresentam como característica negativa o potencial incremento do depósito biológico por possuírem em sua composição, nutrientes para o crescimento bacteriano (VROUWENVELDER, 2000).

## 2.7 A SÍLICA E A OSMOSE INVERSA

Dentre todas as substâncias conhecidas por apresentarem potencial de incrustação, a sílica se destaca em função de não haver, até o presente momento, um pré-tratamento considerado adequado e seus depósitos são caracterizados por extrema dificuldade de remoção.

Segundo SHEIKHOLESLAMI et al (2000), a incrustação da sílica tem sido descrita como “o maior problema sem solução” nas unidades de dessalinização via osmose inversa. A presença de sílica na água é devido à dissolução da sílica baseada na seguinte reação:



A solubilidade da sílica é comprometida pela temperatura, pH e presença de sais. A 25°C e pH neutro, a solubilidade da sílica está em torno de 96 mg/L. Em concentrações maiores que 96 mg/L é possível que a sílica comece a precipitar, porém sua cristalização é lenta e o baixo tempo de residência da solução de alimentação no sistema de OI permite exceder ligeiramente este limite.

O método mais comum para remoção da sílica da água bruta é por precipitação com hidróxidos metálicos polivalentes, como por exemplo, os hidróxidos de ferro III, alumínio e magnésio, que são efetivos tanto na remoção da sílica reativa como na sílica coloidal (SHEIKHOLESLAMI et al, 2000).

Acredita-se que essa remoção justifica-se pela adsorção da sílica na superfície do precipitado de hidróxido de magnésio ou por reações químicas, formando, por exemplo, silicato dos metais ou ainda por uma combinação das duas opções. (FRANÇA, 2009).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No desenvolvimento deste trabalho, as fases de coletas de dados em escala de bancada e em escala piloto foram realizadas no âmbito do Laboratório de Referência em Dessalinização – LABDES, da Unidade Acadêmica de Engenharia Química – UAEQ, da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

Os primeiros experimentos realizados foram em escala de bancada os quais se trabalhou com soluções sintéticas e utilizaram béqueres de plástico de 500 mL. Os melhores resultados obtidos foram repetidos em escala piloto onde foi empregado um tanque com capacidade volumétrica de 200 L.

Para analisar a quantidade de sílica que o pré-tratamento removeu da água a ser estudada foram feitas análises físico-químicas, nas mesmas, antes e depois do pré-tratamento. Os métodos analíticos usados para detecção da concentração de sílica, cálcio, magnésio, entre outros, seguiram a proposta do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHOA/AWWA/WEF, 1998).

#### 3.1 EXPERIMENTOS DE BANCADA

Os experimentos de bancada foram feitos com soluções sintéticas, as quais tem o objetivo de simular uma água salobra com uma determinada concentração de sílica e dureza predeterminada, preparadas no laboratório através da adição de sais em água deionizada.

Em cada experimento, após o preparo da solução de 5L dividiu a mesma em alíquotas de 500 mL, sendo a primeira alíquota utilizada para determinação de concentrações iniciais de sílica, cálcio, magnésio, pH e condutividade da solução. As alíquotas restantes ficaram acondicionadas em béqueres de plástico.

Em cada alíquota foi adicionado um determinado volume de hidróxido de sódio, NaOH à 1,25mol/L, para verificar seu efeito na remoção da sílica. O NaOH foi preparado com concentração de 1,25 mol/L com o objetivo de que cada incremento de 1,0 mL represente 100 mg/L de NaOH.

Foram realizados experimentos de dois tipos: experimentos que o volume de NaOH adicionado foi variável de acordo com o número da alíquota, que é possível verificar o volume que cada alíquota recebeu de acordo com a Quadro 3.1; experimentos em que o

volume de NaOH foi fixo para todas as alíquotas, neste tipo de experimento manipulou a temperatura de cada alíquota.

Quadro 3.1 – Variação da concentração de hidróxido de sódio em cada alíquota.

ALÍQUOTA	V NaOH (mL)	Conc. NaOH (mg/L)
01	1,0	100
02	2,0	200
03	3,0	300
04	4,0	400
05	5,0	500
06	6,0	600
07	7,0	700
08	8,0	800
09	9,0	900

Fonte: própria (2014)

Nos experimentos que tiveram um controle de temperatura, as alíquotas foram levadas ao banho-maria, quando chegou à temperatura desejada retirou o bequer da água quente e levou ao agitador. De acordo com o número da alíquota a temperatura estabelecida foi diferente, como observa-se na Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Variação da temperatura em cada experimento.

ALÍQUOTA	Temperatura (°C)
01	30
02	40
03	50
04	60
05	70
06	77

Fonte: própria (2014)

Após a introdução de NaOH à solução foi realizada a agitação, que foi dividida em duas partes, a primeira parte foi uma agitação rápida que durou 3 minutos e de acordo com o experimento pode ser de 200, 400 ou 600 rpm e a segunda parte foi uma agitação lenta com

duração de 15 minutos e com rotação fixa para todos os experimentos de 30 rpm. A Figura 3.1 mostra a solução sendo homogeneizada pelo agitador eletrônico.

A decantação para todos os experimentos foi dada da mesma forma, o bequer ficou tampado com papel alumínio durante o tempo de decantação, que foi de 1 hora. Após a decantação retirou-se o sobrenadante, que foi filtrado, e feito análises para ver o quanto foi removido, com o pré-tratamento.

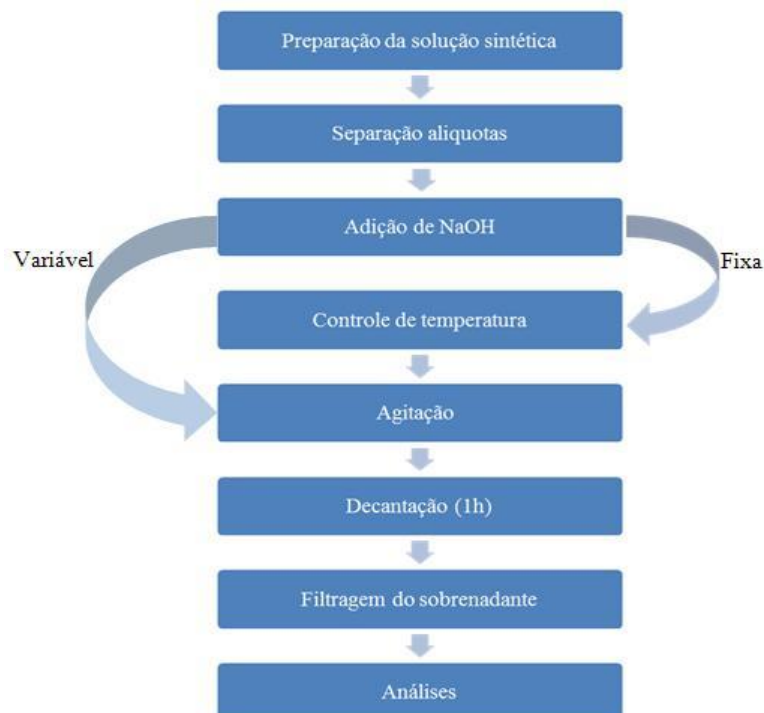
Figura 3.1 – Agitação da amostra no experimento.



Fonte: própria (2014)

As etapas dos experimentos em escala piloto são mostradas no fluxograma a seguir:

Figura 3.2 – Etapas dos experimentos em escala de bancada.



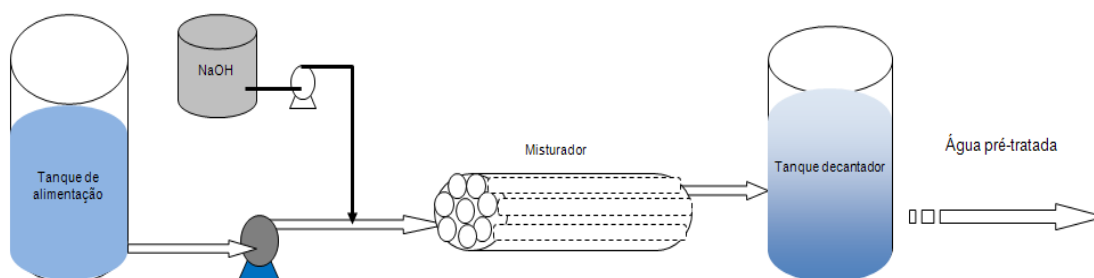
Fonte: própria (2013)

### 3.2 EXPERIMENTOS EM ESCALA PILOTO

Para os experimentos em escala piloto foi necessário um sistema de dessalinização piloto (SDP) com a finalidade de simular os equipamentos encontrados nas pequenas comunidades da Região Nordeste.

O SDP possui tanque de alimentação, bomba auxilio, reservatório de hidróxido de sódio com uma bomba dosadora, misturador e tanque decantador como ilustra a Figura 3.2.

Figura 3.2 – Representação do sistema usado no pré-tratamento.



Fonte: FRANÇA (2009).

O tanque de alimentação do sistema possui uma capacidade volumétrica de 200 L, possui uma válvula de saída na parte inferior, que é acoplada em uma bomba auxiliar, responsável por captar a água e transporta-la ao misturador após o tratamento químico com hidróxido de sódio.

O reservatório de hidróxido de sódio tem capacidade volumétrica de 50 L e é acoplado a uma bomba dosadora.

O agitador propicia a homogeneização da solução, a qual recebe uma quantidade específica e constante de hidróxido de sódio.

Após a homogeneização ocorrida no misturador a mistura resultante vai para o tanque decantador, constituído por um reservatório de capacidade volumétrica de 200 L, no qual ocorre a sedimentação do precipitado formado pela reação da água com a solução de hidróxido de sódio.

### 3.3 PREPARO DAS SOLUÇÕES

Foram realizados 26 experimentos em escala de bancada e 4 experimentos em escala piloto. Em cada experimento em escala de bancada o volume da solução preparada foi de 5 L

(cinco litros), já em escala piloto foram utilizados 200 L (duzentos litros) de água para cada batelada. Os reagentes utilizados foram:

- Metassilicato de sódio nonohidratado,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ;
- Cloreto de cálcio anidro,  $\text{CaCl}_2$ ;
- Sulfato de magnésio heptahidratado,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

Para todos os experimentos, inicialmente mediu-se o volume de água deionizada, que de acordo com o tipo de experimento é de 5 L ou 200 L, com condutividade em torno de 1,0 e 2,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e pesou-se todos os sais (que variou com cada experimento, de acordo com a concentração inicial escolhida), após serem dessecados, em uma balança analítica da SHIMADZU, modelo AUY220.

Adicionou o primeiro sal, o metassilicato de sódio monohidratado, após a agitação para homogeneização da solução, é medido o pH e então é ajustado com uma solução de HCl para ficar em torno de 5,0 e 7,0, após o ajuste do pH adicionou o cloreto de cálcio anidro e o sulfato de magnésio heptahidratado, homogeneizou-se a solução durante 15 minutos. O ajuste do pH é necessário para evitar a precipitação de hidróxidos metálicos.

### 3.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

#### *3.4.1 Determinação da sílica reativa*

A determinação da concentração da sílica, a mais importante deste trabalho, foi feita pelo método do molibdo-silicato, que determina a concentração da sílica reativa.

As leituras das absorvâncias correlacionadas à concentração de sílica reativa na solução foram feitas em um espectrofotômetro, fabricante JENWAY, modelo 6405 uv/visível. Através de uma curva de calibração feita com comprimento de onda de 410 nm, conforme o Standard Methods (APHA/AWWA/WEF, 1998). A curva de calibração foi feita através de soluções padrões de metassilicato de sódio monohidratado,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , com concentrações de 0,5 mg/L à 50 mg/L.

#### *3.4.2 Determinação da dureza da água*

Para a determinação de concentrações de cálcio e magnésio foi utilizado o método de titulação de complexação com EDTA.

### ***3.4.3 Determinação do pH***

O pH das águas foram medidos pelo método potenciométrico, utilizando o pHmetro digital da GEHAKA, modelo PG 2000.



## 4 RESULTADOS

O pré-tratamento empregado neste trabalho é composto por dosagem de hidróxido de sódio, eliminação do precipitado formado e consequentemente diminuição da concentração da sílica dissolvida na solução em estudo.

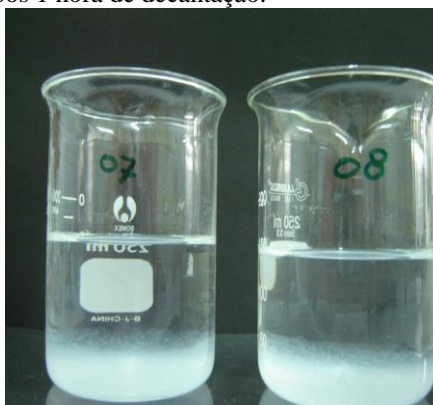
Serão avaliados e discutidos os resultados obtidos no processo de remoção da sílica na água, pelo meio da adição do hidróxido de sódio na mesma, e sua aplicabilidade a sistemas de dessalinização de capacidade volumétrica baixa via osmose inversa.

Inicialmente serão discutidos os resultados dos experimentos realizados em escala de bancada, os quais apresentam variáveis controladas como concentração de sílica, dureza total da água, relação existente entre o cálcio e o magnésio, agitação rápida e temperatura. Posteriormente, serão comentados os resultados dos experimentos realizados em escala piloto, utilizando soluções sintéticas e posteriormente águas in natura, proveniente de poços encontrados próximo ou na cidade de Campina Grande.

### 4.1 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE BANCADA

Os resultados obtidos são pertinentes à realização do processo de pré-tratamento em um sistema de pequena capacidade (análise de bancada). Nos experimentos realizados de 01 a 14 adicionou-se em cada alíquota uma variação de concentração de hidróxido de sódio de 100-900 ppm de NaOH. Utilizou-se o agitador magnético com agitação não controlada durante o tempo de cinco minutos. Após a agitação, a solução ficou em repouso durante uma hora e retirou-se o sobrenadante para ser realizada uma caracterização físico-química, na Figura 4.1 é possível diferenciar o precipitado onde se encontra a sílica e o sobrenadante.

Figura 4.1 – Precipitado formado após 1 hora de decantação.

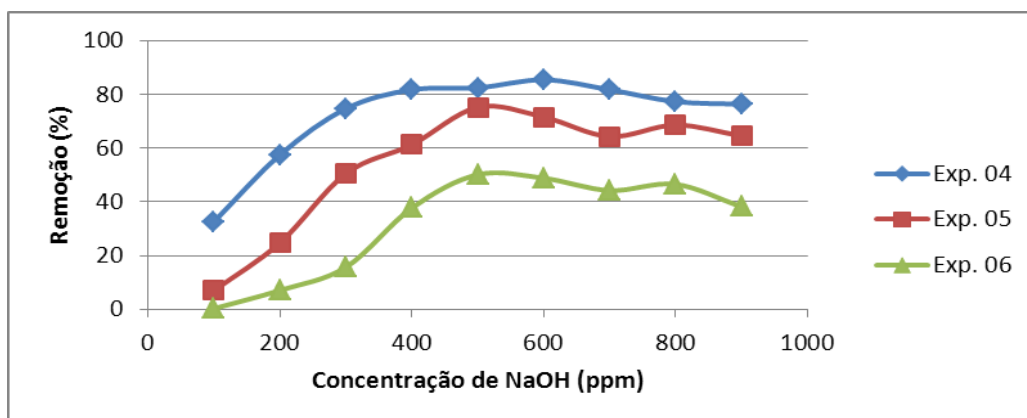


Fonte: própria (2013)

Através destes experimentos pode-se estudar a variação de alguns parâmetros modificados a cada experimento, tais como: concentração de sílica  $[\text{SiO}_2]$ , concentração de dureza [D.T.], relação da concentração de magnésio e cálcio  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$ , pH e condutividade.

De todos os experimentos realizados, pode-se comparar alguns entre si para verificar a influencia de cada parâmetro que foi variado durante de todo o trabalho. A exemplo da variação da remoção da  $[\text{SiO}_2]$  nos experimentos 04, 05 e 06, onde manteve-se constante a [D.T.] de 500 ppm de  $\text{CaCO}_3$ , inicial, e variou-se em 50, 100 e 150 ppm, respectivamente, a  $[\text{SiO}_2]$  inicial. Pode-se verificar que no experimento 04, a remoção foi maior que a dos outros experimentos, como mostra a Figura 4.2. Isso se dá por conta da concentração da dureza da água de 500 ppm de  $\text{CaCO}_3$  não foi suficiente para remover a mesma quantidade de sílica nos experimentos 05 e 06, que continham mais sílica, como no experimento 04 que concentração inicial de sílica era igual a 50ppm. Para remover a mesma quantidade, os experimentos que a  $[\text{SiO}_2] = 100$  e 150 ppm, a [D.T.] também teria que ser maior, para ter quantidade suficiente de Mg e poder precipitar com NaOH e assim remover a sílica da água.

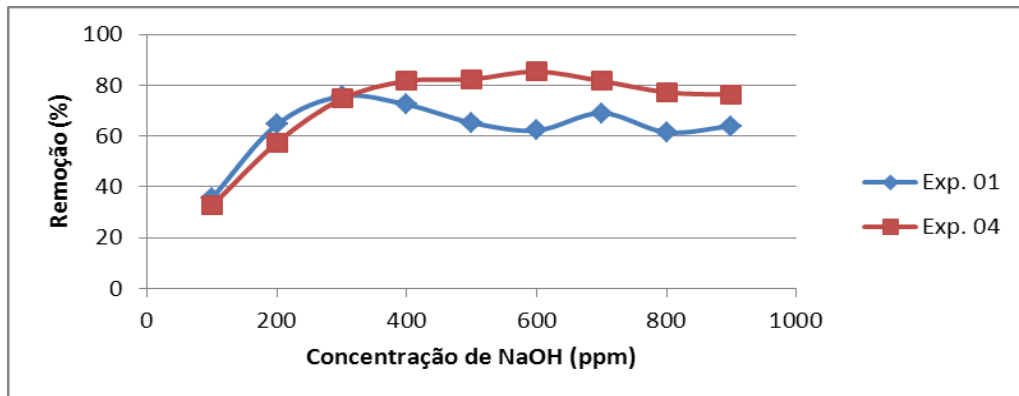
Figura 4.2 – Comparação da remoção da  $[\text{SiO}_2]$  em função variação de [NaOH] para diferentes  $[\text{SiO}_2]$ . Condições iniciais dos exp. 04, 05 e 07:  $[\text{SiO}_2] = 50, 100$  e 150ppm respectivamente; [D.T.] = 500 ppm de  $\text{CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.)



Fonte: própria

Na Figura 4.3 é possível compararmos a variação da [D.T.] dos experimentos 01 e 04, que foi 300 e 500 ppm de  $\text{CaCO}_3$ , iniciais, respectivamente, podemos verificar que no experimento 04, que possui uma concentração de dureza total inicial maior, a remoção da sílica reativa também foi maior que a do experimento 01 que justificada a maior remoção, uma vez que no método estudado a sílica é removida através da adsorção da mesma no precipitado de hidróxido de magnésio ou como silicato de magnésio.

Figura 4.3 – Comparação remoção da  $[\text{SiO}_2]$  em função variação de  $[\text{NaOH}]$  para diferentes  $[\text{D.T.}]$ . Condições iniciais do exp. 01 e exp. 04:  $[\text{SiO}_2] = 50 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 300$  e  $500 \text{ ppm}$  de  $\text{CaCO}_3$ , respectivamente;  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.).

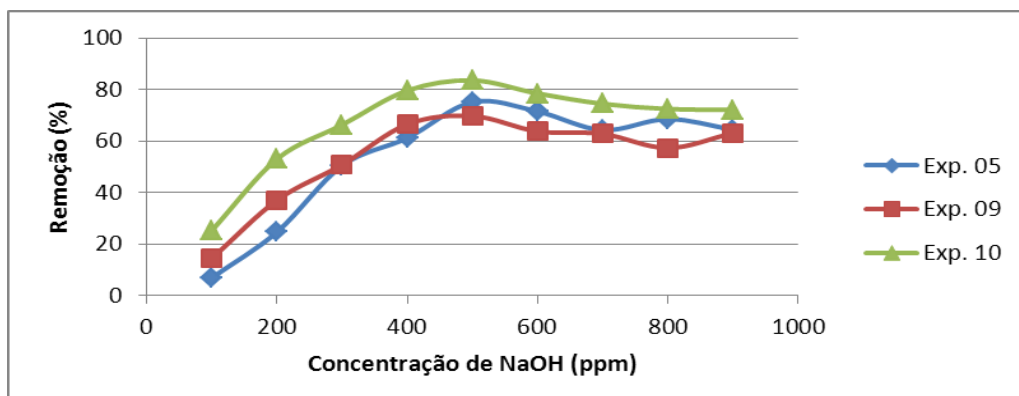


Fonte: própria (2014).

Do experimento 01 ao 10 podemos comparar a variação da relação de  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$ .

Na Figura 4.4 mantiveram-se constantes a  $[\text{SiO}_2] = 100 \text{ ppm}$  e  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm}$  de  $\text{CaCO}_3$ , iniciais, para os experimentos 05, 09 e 10 variando-se apenas a relação de  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$  que foi 2, 3 e 4, respectivamente, para cada experimento, em que obtiveram-se melhores resultados no experimento 10. Como a remoção da sílica é devido a adsorção da mesma no precipitado de hidróxido de magnésio ou a formação do precipitado de magnésio, quanto maior a relação  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$ , maior a concentração de magnésio, conseqüentemente maior a remoção da sílica.

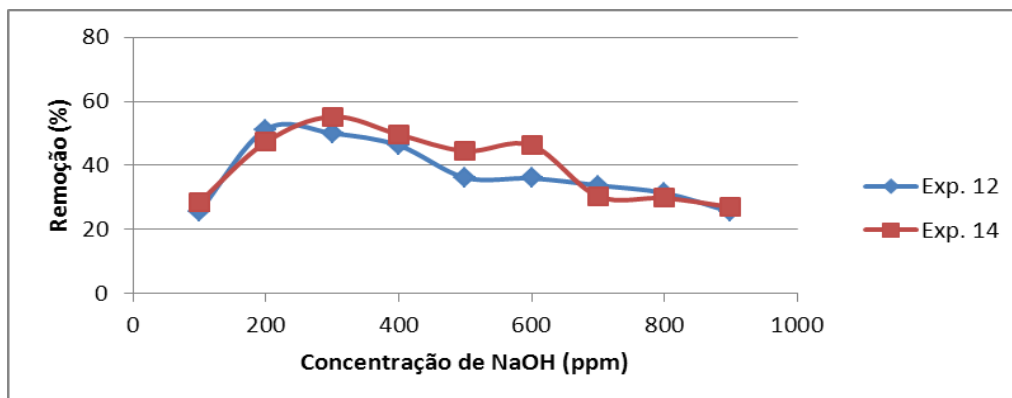
Figura 4.4 – Comparação de remoção de  $[\text{SiO}_2]$  em função variação de  $[\text{NaOH}]$  para diferentes relações  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$ . Condições iniciais do exp. 05, exp. 09 e 10:  $[\text{SiO}_2] = 100 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm}$  de  $\text{CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}] = 2,0/3,0/4,0$ , respectivamente; agitação não controlada (durante 5 min.).



Fonte: própria (2014).

Essa observação pode também ser notada nos experimentos 12 e 14, os quais apresentam  $[\text{SiO}_2] = 25 \text{ ppm}$  e  $[\text{D.T.}] = 300 \text{ ppm}$  de  $\text{CaCO}_3$ , iniciais, variando-se a relação  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$  que foi de 2 e 4, respectivamente, como vemos na figura abaixo.

Figura 4.5 – Comparação de remoção de  $[\text{SiO}_2]$  em função variação de  $[\text{NaOH}]$  para diferentes relações  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$ . Condições iniciais do exp. 12 e 14:  $[\text{SiO}_2] = 25 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 300 \text{ ppm}$  de  $\text{CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}] = 2,0$  e  $4,0$ , respectivamente.

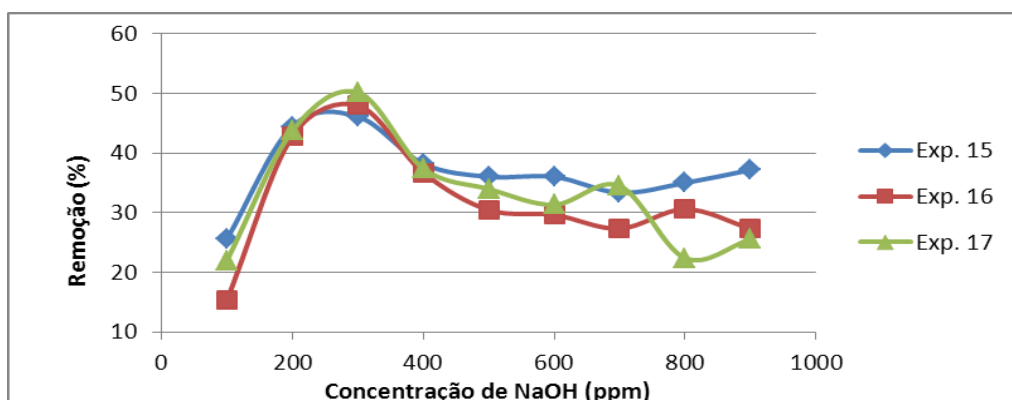


Fonte: própria (2014)

Do experimento 15 ao 23 o estudo feito foi em relação à agitação, no qual utilizou-se um agitador mecânico para uma agitação que foi dividida em duas etapas a primeira rápida, na qual variou entre 200 e 600 rpm e uma segunda lenta, na qual fixou-se em 30 rpm.

Mantendo-se constante a  $[\text{SiO}_2] = 50 \text{ ppm}$ ,  $[\text{D.T.}] = 300 \text{ ppm}$  de  $\text{CaCO}_3$  e a relação  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2$ , para os experimentos 15, 16 e 17 e variando-se apenas a agitação rápida em 200, 400 e 600 rpm, respectivamente, observa-se que a influência da agitação rápida não é tão significativa, como mostra a figura abaixo.

Figura 4.6 – Comparação de remoção de  $[\text{SiO}_2]$  em função variação de  $[\text{NaOH}]$  para diferentes velocidades da agitação rápida. Considerações iniciais do exp. 15, 16 e 17:  $[\text{SiO}_2] = 50 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 300 \text{ ppm}$  de  $\text{CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação rápida = 200, 400 e 600 rpm, respectivamente (durante 3 min.); agitação lenta = 30 rpm (durante 15 min.);

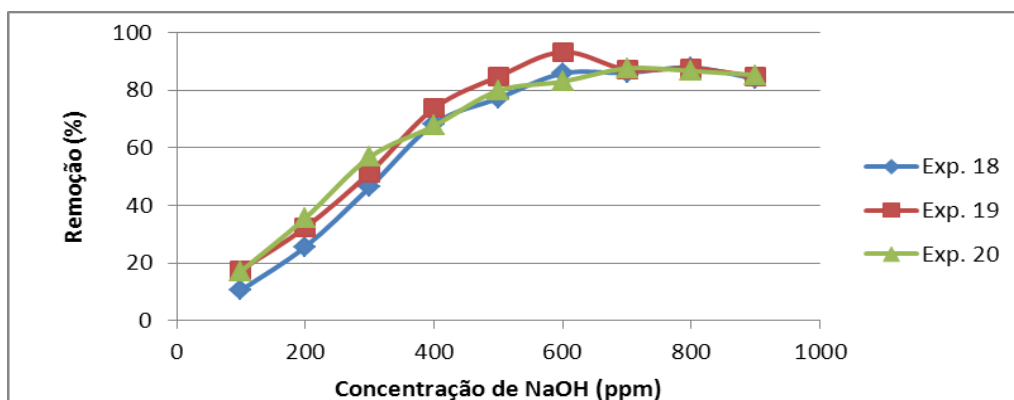


Fonte: própria (2014)

Do mesmo modo foi feito para os experimentos 18, 19 e 20, mantendo-se constante a  $[\text{SiO}_2] = 50 \text{ ppm}$ ,  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm}$  de  $\text{CaCO}_3$ , iniciais, e a relação  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}] = 2$ , e para

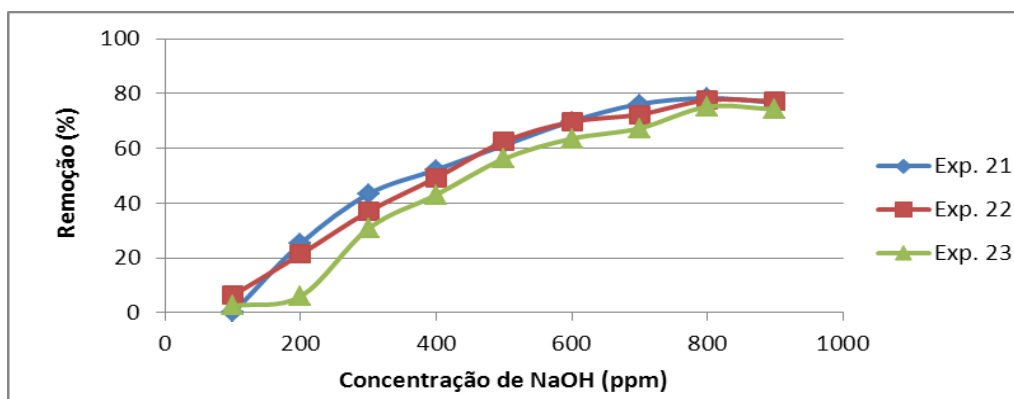
os experimentos 21, 22 e 23, com constante a  $[\text{SiO}_2] = 100 \text{ ppm}$ ,  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm}$  de  $\text{CaCO}_3$ , iniciais, e a relação  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}] = 2$ , como demonstram a Figuras 4.7 e Figura 4.8 abaixo.

Figura 4.7 – Comparação de remoção de  $[\text{SiO}_2]$  em função variação de  $[\text{NaOH}]$  para diferentes velocidades da agitação rápida. Considerações iniciais do exp. 18, 19 e 20:  $[\text{SiO}_2] = 50 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm}$  de  $\text{CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação rápida = 200, 400 e 600 rpm, respectivamente (durante 3 min.); agitação lenta = 30 rpm (durante 15 min.).



Fonte: própria (2014)

Figura 4.8 – Comparação de remoção de  $[\text{SiO}_2]$  em função variação de  $[\text{NaOH}]$  para diferentes velocidades da agitação rápida. Considerações iniciais do exp. 21, 22 e 23:  $[\text{SiO}_2] = 50 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm}$  de  $\text{CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação rápida = 200, 400 e 600 rpm, respectivamente (durante 3 min.); agitação lenta = 30 rpm (durante 15 min.).



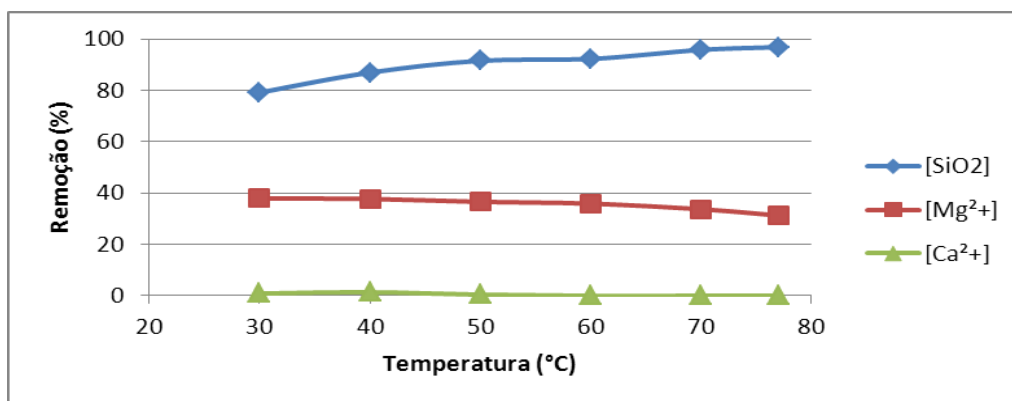
Fonte: própria (2014)

Do experimento 24 ao 26, o estudo realizado foi referente a variação de temperatura. Para estes experimentos fixou-se a concentração de hidróxido e variou-se a temperatura da solução. A solução foi mantida em banho-maria para o ajuste da temperatura e quando a temperatura desejada era atingida adicionava-se o hidróxido de sódio.

Os experimentos realizados resultaram em uma maior remoção da  $[\text{SiO}_2]$  de acordo com que a temperatura aumentava. A Figura 4.9 demonstra a remoção que ocorreu no experimento 24, o qual foi adicionado um volume de 4 ml de  $\text{NaOH}$  a todas alíquotas

(resultando numa concentração de 400 ppm de NaOH), cujas concentrações iniciais foram de  $[\text{SiO}_2] = 50$  ppm, D.T. = 500 ppm de  $\text{CaCO}_3$ ,  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ .

Figura 4.9 – Remoção de  $[\text{SiO}_2]$ ,  $[\text{Mg}^{2+}]$  e  $[\text{Ca}^{2+}]$  em função da temperatura no experimento 24. Condições operacionais:  $[\text{SiO}_2] = 50$  ppm; [D.T.] = 500 ppm de  $\text{CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ;  $[\text{NaOH}] = 400$  ppm.



Fonte: própria (2014)

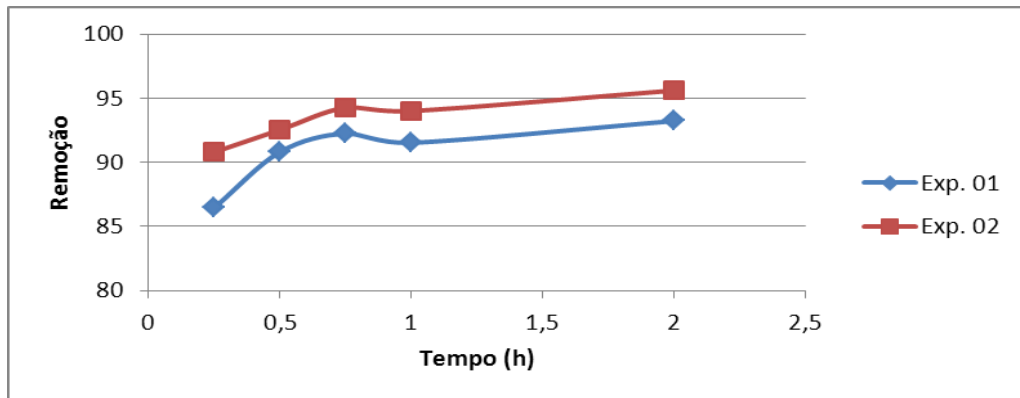
## 4.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS EM ESCALA PILOTO

Após a preparação de 200 litros da solução sintética, o sistema foi acionado com vazões predeterminadas, após 45 minutos é concluído o processo de adição de hidróxido e mistura do mesmo à água, após seu término a solução ficou em repouso durante duas horas, durante este tempo foram retiradas alíquotas do sobrenadante para ser realizada uma caracterização físico-química. Através destes experimentos podemos estudar a variação de alguns parâmetros modificados a cada experimento, tais como: concentração de sílica  $[\text{SiO}_2]$ , concentração de dureza [D.T.], relação da concentração de magnésio e cálcio  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$ , pH e condutividade.

Nos experimentos realizados em escala piloto de 01 a 04 manteve-se uma vazão da água de alimentação de 66,67 mL/s e uma vazão de hidróxido de sódio de 0,53 mL/s, dando uma concentração final de 400 ppm de NaOH na solução.

Nos experimentos 01 e 02 com concentração inicial de  $[\text{SiO}_2] = 50$  ppm, o parâmetro inicial que foi alterado entre os mesmos foi apenas a concentração da dureza total [D.T.], com seus valores igual a 300 e 500 ppm de  $\text{CaCO}_3$ , respectivamente. Através da Figura 4.10 é possível verificar que obteve uma remoção pouco maior de sílica no experimento 02, o qual tem uma concentração maior da D.T., concluindo assim que com uma dureza maior é possível remover mais sílica da solução.

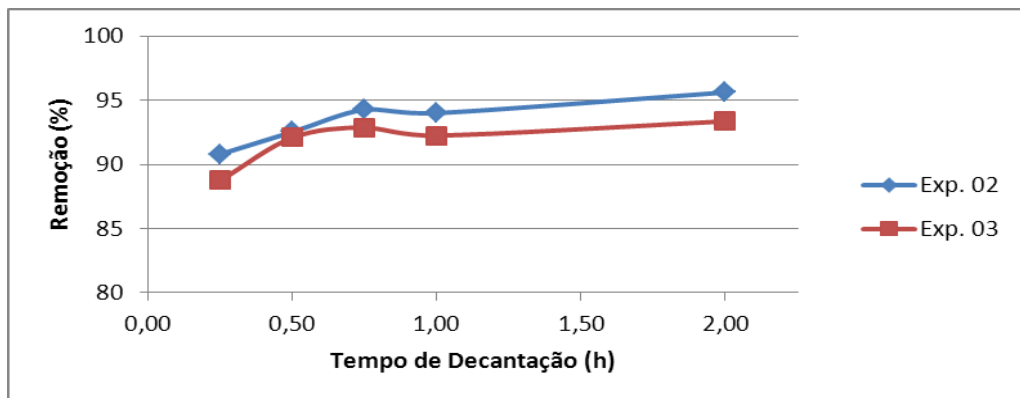
Figura 4.10 - Comparação da remoção da  $[\text{SiO}_2]$  para diferentes [D.T.]. Considerações iniciais do exp. 01 e 02:  $[\text{SiO}_2] = 50$  ppm; [D.T.] = 300 e 500ppm de  $\text{CaCO}_3$ , respectivamente;  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ;  $Q_{\text{água}} = 66,67$  mL/s;  $Q_{\text{NaOH}} = 0,53$  mL/s.



Fonte: própria (2014)

Ao compararmos a variação da remoção da  $[\text{SiO}_2]$  nos experimentos 02 e 03, onde manteve-se constante a [D.T] de 500 ppm de  $\text{CaCO}_3$ , inicial, e variou-se em 50 e 100 ppm, respectivamente, a  $[\text{SiO}_2]$  inicial, podemos verificar que no experimento 02, a remoção foi pouco maior que a do experimento 03, como mostra a Figura 4.11.

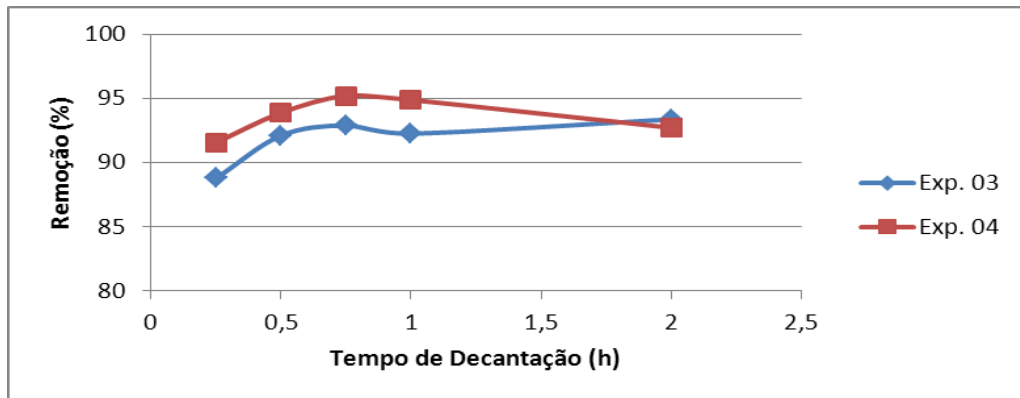
Figura 4.11 – Comparação da remoção da  $[\text{SiO}_2]$  para diferentes  $[\text{SiO}_2]$ . Considerações iniciais do exp. 02 e 03, respectivamente são:  $[\text{SiO}_2] = 50$  e 100 ppm; [D.T.] = 500 ppm de  $\text{CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ;  $Q_{\text{água}} = 66,67$  mL/s;  $Q_{\text{NaOH}} = 0,53$  mL/s.



Fonte: própria (2014)

Mantendo-se constante a  $[\text{SiO}_2] = 100$  ppm, [D.T] = 500 ppm de  $\text{CaCO}_3$  para os experimentos 03 e 04, e variando-se apenas a relação  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$  igual a 2 e 4, respectivamente, observa-se na Figura 4.12 que a remoção da sílica no experimento 04 foi maior do que no experimento 03, percebendo-se que quanto maior esta relação, maior a concentração de magnésio, conseqüentemente maior a remoção da sílica.

Figura 4.12 - Comparação da remoção da [SiO<sub>2</sub>] para diferentes relações [Mg<sup>2+</sup>]/[Ca<sup>2+</sup>]. Considerações iniciais do exp. 03 e 04, respectivamente são: [SiO<sub>2</sub>] = 100 ppm; [D.T.] = 500 ppm de CaCO<sub>3</sub>; [Mg<sup>2+</sup>]/[Ca<sup>2+</sup>] = 2,0 e 4,0 ; Q<sub>água</sub> = 66,67 mL/s; Q<sub>NaOH</sub> = 0,53 mL/s.



Fonte: própria (2014)



## 5 CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos para um sistema de pré-tratamento, onde se fez o uso de uma água sintética, pode-se concluir que:

- A influência de bases fortes para o pré-tratamento da água sintética para a remoção da sílica em escala de bancada, utilizando soluções sintéticas contendo diferentes teores de sílica, foi significativa tendo em vista que as diferentes concentrações do hidróxido de sódio nas alíquotas contendo as soluções removeram consideravelmente e gradativamente a sílica.
- A influência da dureza da solução e a razão da concentração de magnésio e cálcio no processo de remoção da sílica foram consideravelmente satisfatórias, tendo em vista que a remoção da dureza seguiu uma linearidade com a remoção da sílica, percebendo-se que enquanto há remoção de magnésio, há a remoção de sílica e quando esta cessa a outra cessa também.
- A influência da temperatura foi significativa no tocante da remoção de sílica, onde quanto maior a temperatura para um mesmo experimento, nas mesmas condições de incremento de hidróxido, maior a remoção da sílica.
- De acordo com os experimentos onde a variável foi a velocidade da agitação rápida, pode-se notar que não se diferenciaram muito, mostrando que a velocidade da agitação rápida nos experimentos de bancada não tiveram muita influencia na remoção da sílica na água;
- O pré-tratamento aplicado a um sistema piloto de dessalinização pode ser considerado viável, tendo em vista que ao modificar cada parâmetro que foi realizado anteriormente no sistema de bancada e obteve a mesma resposta, a exemplo da influência da razão dos ions de cálcio e magnésio, ao aumentar esta relação obteve-se um resultado melhor na remoção da sílica na água estudada, além do baixo custo que apresenta este método de remoção, evitando maiores problemas com incrustações da sílica na membrana utilizada na osmose inversa.

## 6 REFERÊNCIAS

APHA, AWWA, WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th ed., Washington, D.C: American Public Health Association/ American Water Works Association/ Water Environment Federation, 1998.

AMORIM, M. C. C.; PORTO, E. R.; SILVA JÚNIOR, L. G. A. **Evaporação solar como alternativa de reuso dos efluentes da dessalinização por osmose inversa**. <<http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/aresidua/i-007.pdf>> Acessado em 02 jul. 2014.

BENVENUTI, T. **Avaliação da eletrodialise no tratamento de efluentes de processos de eletrodeposição de níquel**. 2012. 20 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

CARTAXO J. de M.; FERREIRA W. B.; SILVA S. K. da S.; PEREIRA M. L. F.; SILVA J. N. da S.; MONTEIRO G. de S.; FRANÇA K. B. **Avaliação de técnicas de pré-tratamentos de águas salobras para fins de dessalinização via osmose inversa**. 2006.

DOW Liquid Separations: 2004. **FILMTEC Reverse osmosis membranes technical manual**. Disponível em: <<http://www.dow.com/liquidstep/lit/dow-lit.htm>> Acessado em 02 jul. 2014.

DOW CHEMICAL; **Filmtec Reverse Osmosis Technical Manual**. 2005.

FRANÇA, I. C. F. **Avaliação da redução de sílica em pré-tratamento de águas para sistemas de pequeno porte por osmose inversa**. 2009. 7 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

FOGAÇA, J. **Osmose Reversa na dessalinização das águas dos mares**. Disponível em <<http://www.brasilecola.com/quimica/osmose-reversa-na-dessalinizacao-das-aguas-dos-mares.htm>> Acessado em: 08 jul. 2014.

MOURA, J.P., MONTEIRO, G.S., SILVA, J.N., PINTO, F.A., FRANÇA, K.P.. **Aplicações do processo de osmose reversa para o aproveitamento de água salobra do semi-árido nordestino**. Campina Grande, 2001.

PAZ, V. P. da S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. **Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.4, n.3, p.465-473, 2000.

REDONDO, J. Brackish - **Sea and wastewater desalination**. 2001.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso**. 2001.

SHEIKHOESLAMI, R., ZHOU, S., **Performance of RO membranes in sílica bearing waters**, *Desalination*, vol 132, pp 337-344, 2000.

SUASSUNA, J. **A verdadeira segurança hídrica do Semi-árido nordestino.** Disponível em <<http://www.remabrazil.org/Members/suassuna/artigos/a-verdadeira-seguranca-hidrica-do-semi-arido-nordestino-artigo-de-joao-suassuna-2/view>> Acessado em: 02 jul. 2014.

VROUWENVELDER, J.S.; MANOLARAKIS, S.A.; VEENENDAAL, H.R.; VAN DER KOOIJ, D. **Biofouling potential of chemicals used for scale control in RO and NF membranes.** 2000.

VROUWENVELDER, J.S., KAPPELHOF, J. W. N. M, HEIJMAN, S. G. J. et al. **Tools for fouling diagnostics of NF and RO membranes and assessment of the fouling potential of feed water.** Desalination, v. 157, p. 361-365, 2003.

YOUNOS T., TULOU K. E. **Overview of Desalination Techniques.** *Journal of Contemporary Water*, 2005.

**Anexo A**  
**Artigo Publicado em Congresso Internacional**

**APÊNDICE A – Trabalho apresentado no 12º SIBESA (Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental).**

**I-171 - ESTUDO DA REMOÇÃO DA SÍLICA NO PRÉ-TRATAMENTO DE ÁGUA PARA FINS DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO COM MEMBRANAS**

**Kamila Freitas Porto<sup>(1)</sup>**

Graduanda em Química Industrial pela Universidade Estadual da Paraíba.

**Ynis Thaciane Felix da Silva**

Graduanda em Química Industrial pela Universidade Estadual da Paraíba.

**Márcia Izabel Cirne França**

Engenheira Química pela Universidade Federal da Paraíba. Mestre em Engenharia de Processos pela Universidade Estadual de Campinas. Doutora em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande. Professora Doutora do Departamento de Química da Universidade Estadual da Paraíba.

**Tereziana Silva da Costa**

Química Industrial pela Universidade Estadual da Paraíba. Mestranda em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande.

**Kepler Borges França**

Engenheiro Químico pela Universidade Federal da Paraíba. Doutor em Chemical Engineering pela University of Kent. Professor Associado à Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Compositor Rosil Cavalcante, nº 855, Novo Bodocongó, Apto 004, Bloco O, Residencial Dona Lindu I, Campina Grande - PB, CEP: 58431-070 - Brasil - Tel: (83) 9942-8182 - e-mail: milafreitasporto@hotmail.com

**RESUMO**

Tendo conhecimento da carência hídrica em consequência, principalmente, da complexidade dos usos múltiplos da água pelo homem, produzindo enorme conjunto de degradação e poluição, o que contribui consideravelmente na diminuição da disponibilidade de água, a

dessalinização de águas através de processos com membranas surge como uma das alternativas tecnicamente viáveis que visa contribuir com a problemática da seca. No entanto, algumas substâncias presentes na água dificultam a utilização de membranas, a exemplo da sílica que provoca incrustações nas mesmas. Diante disso, este trabalho teve como objetivo estudar processos de remoção da sílica para aplicação no pré-tratamento de águas antecedente à separação por membranas. Para isso, estudou-se a atuação do hidróxido de sódio, em escala de bancada, como agente anti-incrustante em soluções sintéticas contendo alto teor de sílica. Os experimentos foram realizados sob diferentes condições operacionais, variando concentrações de hidróxido de sódio, temperatura e velocidade de agitação no sistema. O hidróxido de sódio precipita inicialmente o magnésio e neste precipitado a sílica é adsorvida, o que gera sua remoção a partir da decantação. Em todos os casos observou-se a eficiência do hidróxido de sódio como agente químico a ser usado em etapas de pré-tratamento de sistemas de membranas, pois houve redução na concentração inicial da sílica em todos os casos averiguados. A remoção da sílica é proporcional à concentração de hidróxido de sódio. As diferentes condições operacionais referentes à velocidade de agitação no sistema e, principalmente, variação da temperatura da solução em estudo tiveram grandes influências para esse índice de remoção. Quanto maior a velocidade de agitação, maior a quantidade de sílica removida. No experimento no qual foi realizado o controle da temperatura observou-se um aumento ainda mais significativo na remoção, concluindo que a sílica é adsorvida melhor ao precipitado de magnésio ao adicionar o hidróxido em temperaturas elevadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tratamento, Osmose Inversa, Incrustação.

## **INTRODUÇÃO**

A problemática da disponibilidade hídrica tem aumentado ao longo dos anos principalmente devido à poluição provocada pelo ser humano. Segundo Tundisi (2003), a complexidade dos usos múltiplos da água pelo homem aumentou e produziu enorme conjunto de degradação e poluição, o que contribui consideravelmente na diminuição da disponibilidade de água e produz inúmeros problemas de escassez hídrica em muitas regiões e países.

No Brasil, a escassez de água ocorre principalmente no chamado polígono das secas, região semiárida do Nordeste e parte do estado de Minas Gerais. Essa área é constituída por rochas

crystalinas e possui potencial hídrico subterrâneo limitado. A faixa de vazão de poços é de 1.000 a 3.000 L/h, a maior parte apresenta uma concentração de sais dissolvidos acima de 1.000 mg/L, tornando-as impróprias para o consumo humano.

De acordo com Soares et al. (2006) os Governos Federal e Estaduais têm procurado instalar equipamentos de dessalinização das águas salobras subterrâneas, objetivando a geração de água doce no Nordeste, sendo este processo uma das alternativas tecnicamente viáveis que visa contribuir com a problemática da seca.

Quando ocorre difusão através de uma membrana semi-permeável, ou seja, movimentação de água pura em direção à uma solução concentrada, chama-se de osmose. A pressão necessária a ser aplicada para evitar a osmose, é chamada pressão osmótica. Como o objetivo da dessalinização é aumentar o volume da água pura, aplica-se uma pressão extra, superior à pressão osmótica, capaz de suplantar o potencial osmótico da solução mais concentrada, fazendo sair dela água pura em direção à solução menos concentrada. Como a água pura se movimenta em sentido contrário ao sentido natural da osmose dá-se, a este processo, o nome de osmose reversa ou osmose inversa (SOARES et al. 2006) .

A osmose inversa vem sendo utilizada para resgatar o uso de águas salobras e salinas, sendo de essencial importância para o desempenho econômico e produtivo do processo a utilização de pré-tratamentos adequados.

O pré-tratamento pode ser simples ou complexo em função direta da qualidade física, química e microbiológica da água a ser alimentada nos elementos de membrana (ELGUERA e PÉREZ BÁEZ, 2005).

As águas subterrâneas do semiárido brasileiro apresentam alguns constituintes nocivos para as membranas de osmose inversa, necessitando de pré-tratamentos eficazes para sua remoção e/ou diminuição. Observa-se que a presença de carbonato de cálcio, sulfato de cálcio e sílica é predominante nas águas da região Nordeste, os quais são os principais componentes responsáveis pelas incrustações nos elementos de membrana. Além destes sais, há outros agentes incrustantes como: sulfato de bário, sulfato de estrôncio e fluoreto de cálcio (AMJAD,1993).

O emprego de anti-incrustantes vem sendo muitas vezes irregular e de interesse estritamente comercial. Observa-se que não há nenhum estudo prévio de mercado para facilitar o uso do produto, bem como de lançamento de produtos químicos, através do concentrado, no meio ambiente. Estes e outros fatores vêm sendo um dos gargalos da aquisição dos produtos, em função dos seus altos custos e utilização inadequada à situação do local. Isso vem levando a um maior número de perdas de membranas antes do tempo, devido às incrustações precoces de sais.

Dentre todas as substâncias conhecidas por apresentarem alto potencial de incrustação, a sílica se destaca em função de não haver, até o presente momento, um pré-tratamento considerado adequado e seus depósitos são caracterizados por extrema dificuldade de remoção. Segundo Sheikholeslami (2001), a presença das incrustações de sílica limita a recuperação do sistema de dessalinização, diminuindo a taxa de produção de água dessalinizada, compromete a vida útil das membranas e é praticamente impossível de ser removida ou limpa.

Segundo Ning (2002), a sílica presente nas águas pode ser classificada em três formas: (1) dissolvida e reativa, (2) dissolvida e não reativa também conhecida como sílica coloidal e (3) não dissolvida e não reativa ou sílica particulada. O tipo de sílica presente na água é primordial para entender os tipos de *fouling* (incrustações) que podem vir a ser formados.

Existe uma grande necessidade de se conhecer os fenômenos que regem as incrustações por sílica e de como evitá-las, em função dos graves problemas que causam nas operações via osmose inversa. Diante disso, este trabalho tem como objetivo estudar processos de remoção da sílica para aplicação no pré-tratamento de águas antecedente à separação por membranas.

## **METODOLOGIA**

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Departamento de Química da Universidade Estadual da Paraíba e do Laboratório de Referência em Dessalinização – LABDES, da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande.

Os procedimentos metodológicos seguidos a fim de viabilizarem a concretização dos objetivos propostos neste estudo partem da realização de experimentos em escala de bancada

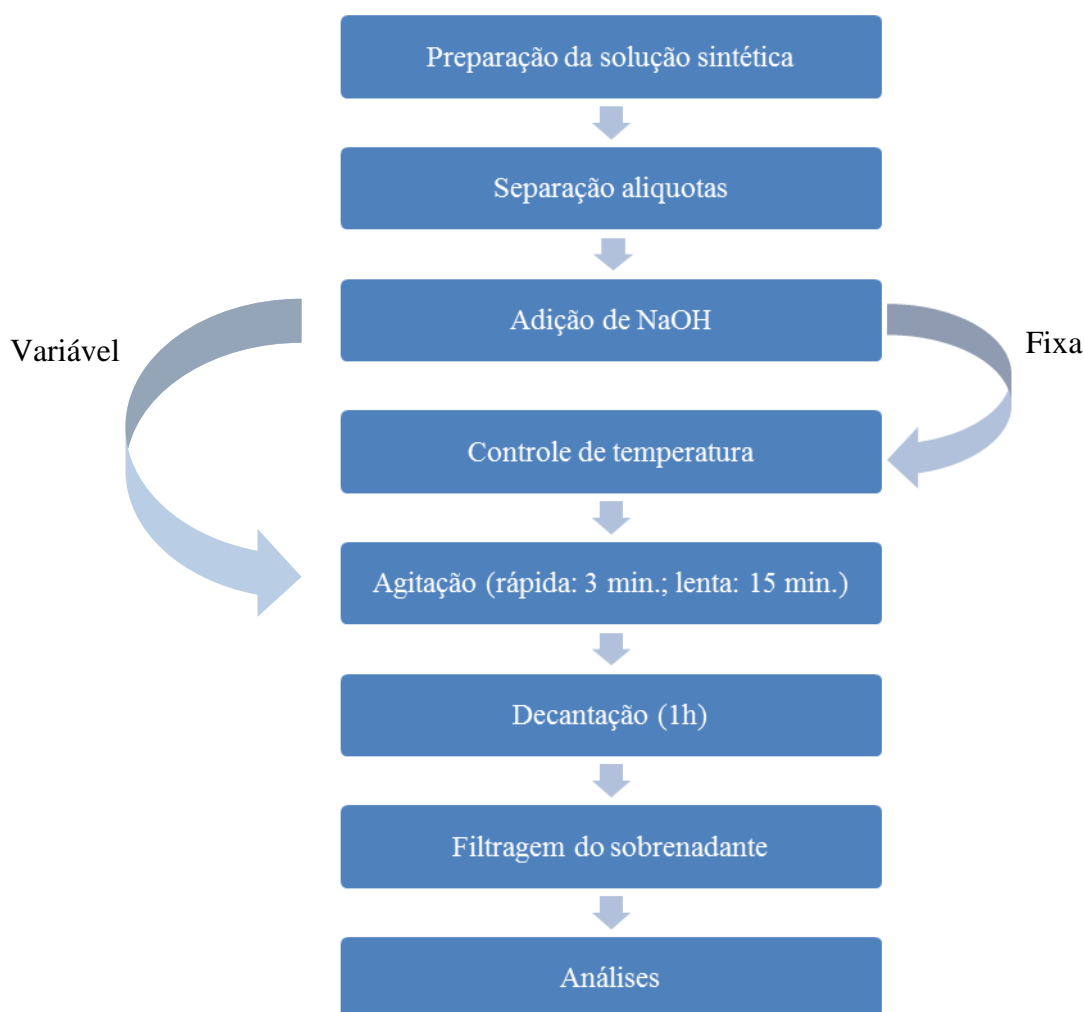


com soluções sintéticas, com o propósito de estudar a atuação do hidróxido de sódio como agente anti-incrustante.

Os reagentes utilizados na preparação da solução sintética com 50 mg/L de sílica e 500 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , sendo  $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}] = 2$ , foram:

- Metassilicato de sódio nonohidratado,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ;
- Cloreto de cálcio anidro,  $\text{CaCl}_2$ ;
- Sulfato de magnésio heptahidratado,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

Os experimentos foram realizados sob diferentes condições operacionais, variando concentrações de hidróxido de sódio, temperatura e velocidade de agitação no sistema. As etapas são apresentadas no Fluxograma 01.



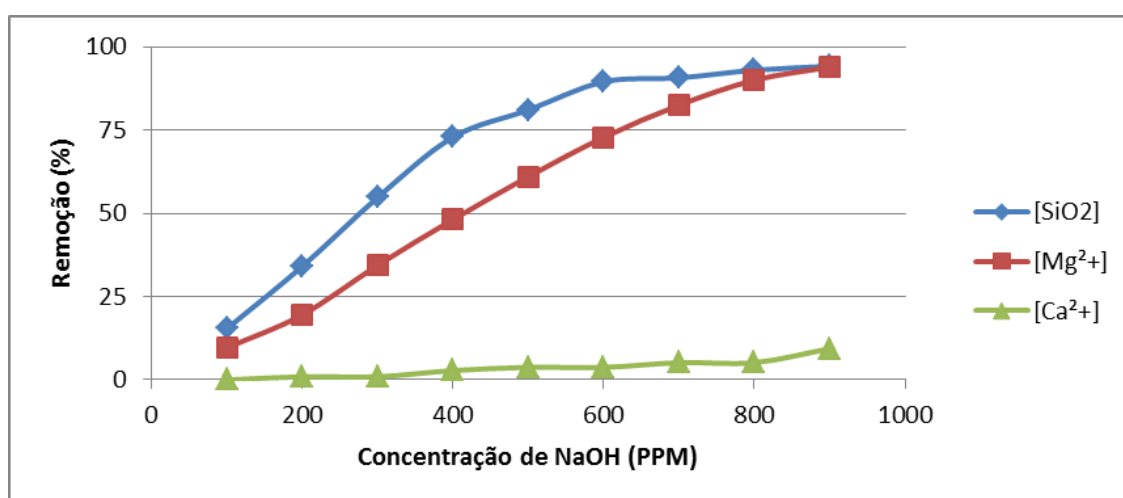
**Fluxograma 01 - Etapas dos experimentos realizados.**

Os parâmetros analisados foram sílica, cálcio e magnésio na solução filtrada sendo determinados de acordo com a metodologia descrita no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA/AWWA/WPCF, 1998).

## RESULTADOS

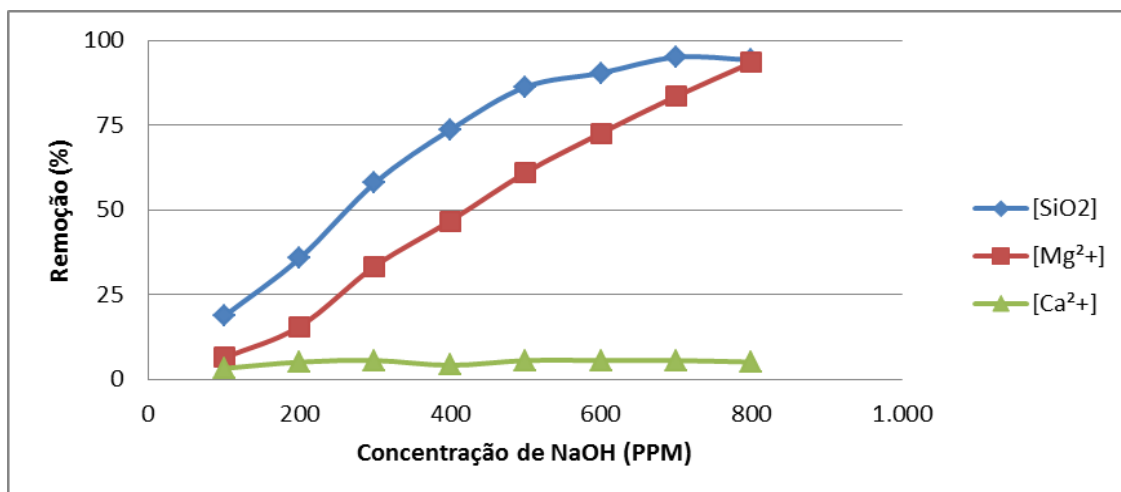
Em todos os casos observou-se a eficiência do hidróxido de sódio como agente químico a ser usado em etapas de pré-tratamento de sistemas de membranas, pois houve redução na concentração inicial da sílica em todos os casos averiguados. O hidróxido de sódio precipita inicialmente o magnésio e neste precipitado a sílica é adsorvida, o que gera sua remoção a partir da decantação.

Na Figura 01 são apresentados os resultados do experimento 01, onde se variou a concentração de NaOH utilizando agitação rápida de 200 RPM, sendo observado ao final do experimento a remoção de 93% da sílica.



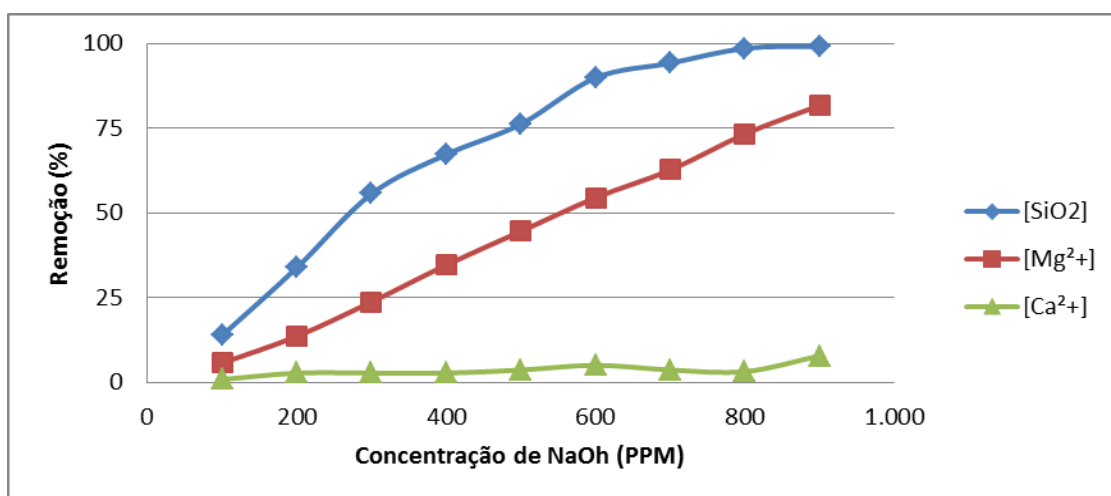
**Figura 01 - Resultados obtidos com a variação da [NaOH], agitação rápida = 200 RPM; agitação lenta = 30 RPM.**

Na Figura 02 são apresentados os resultados do experimento 02, onde se variou a concentração de NaOH utilizando agitação rápida de 400 RPM, sendo observado a remoção de 95% da sílica.



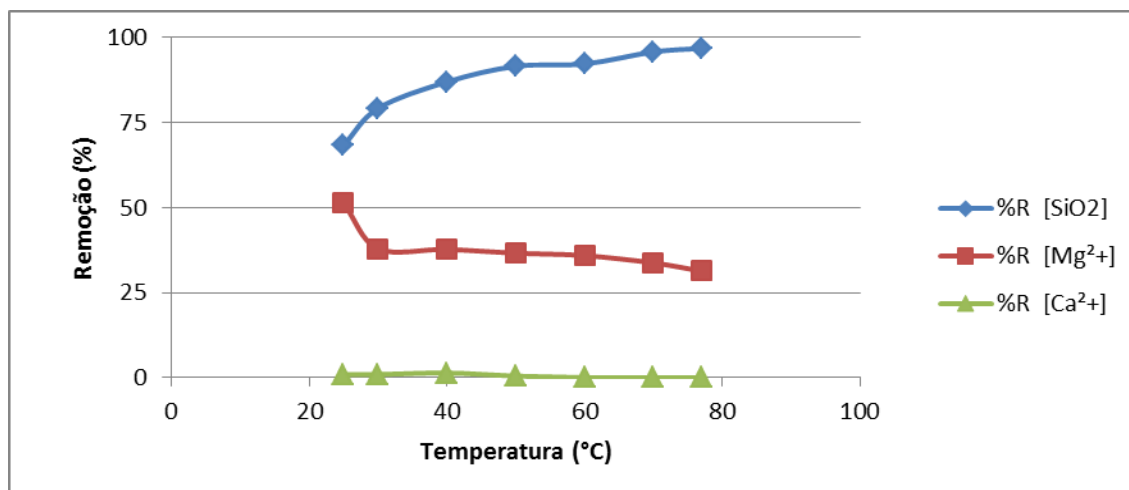
**Figura 02 - Resultados obtidos com a variação da [NaOH], agitação rápida = 400 RPM; agitação lenta = 30 RPM.**

Na Figura 03 são apresentados os resultados do experimento 03, onde se variou a concentração de NaOH utilizando agitação rápida de 600 RPM. Neste experimento foi obtido o melhor resultado com relação à velocidade de agitação, sendo removidos 99% da sílica, quando adicionado 900 ppm de hidróxido de sódio.



**Figura 03 – Resultados obtidos com a variação da [NaOH], agitação rápida = 600 RPM; agitação lenta = 30 RPM.**

Fixando a concentração de NaOH em 400 ppm e a velocidade da agitação rápida em 200 RPM, condições nas quais a remoção de sílica não foi satisfatória, estudou-se a influência da temperatura no referido processo. Na Figura 04 são apresentados os resultados do experimento 04, utilizado temperaturas de 25, 30, 40, 50, 60, 70 e 77 °C.



**Figura 04 – Resultados obtidos fixando a [NaOH] = 400 ppm, agitação rápida de 200 RPM e variação da temperatura.**

Com os resultados apresentados na figura acima, observa-se que o mesmo processo realizado a temperatura ambiente removeu 68% de sílica, e quando realizado à 77°C removeu 97% de sílica. Com isso, pode-se afirmar que mesmo utilizando condições não muito satisfatórias à remoção de sílica da água, o processo pode ser otimizado se durante o pré-tratamento a água for levemente aquecida.

## CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos, onde se fez uso de uma água sintética, pode-se concluir que o aumento da concentração de bases fortes no pré-tratamento da água para remoção de sílica em escala de bancada, resultou numa maior remoção dessa substância, tendo em vista que as diferentes concentrações do hidróxido de sódio nas alíquotas de soluções sintéticas removeram consideravelmente e gradativamente a sílica, de acordo com a concentração de hidróxido. Atingiram-se remoções de sílica em torno de 99%.

As diferentes condições operacionais referentes à velocidade de agitação no sistema e, principalmente, variação da temperatura da solução em estudo tiveram grandes influências para esse índice de remoção. No experimento onde teve controle da temperatura observou-se um aumento bastante significante na remoção, concluindo que a sílica é melhor adsorvida ao precipitado de magnésio ao adicionar o hidróxido em temperaturas elevadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

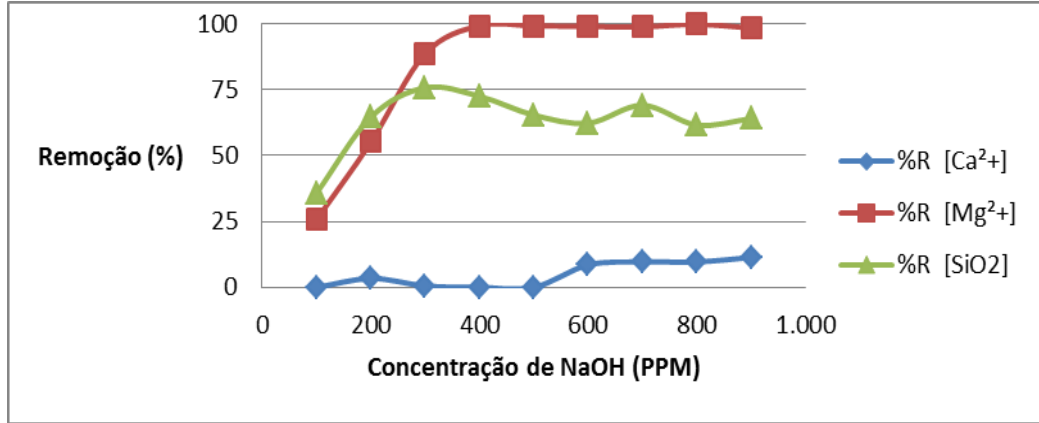
1. AMJAD, Z. *Reverse Osmosis – Membrane technology, water chemistry, and industrial applications*. Van Nostrand Reinhold, 1993.
2. APHA, AWWA, WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th ed., Washington, D.C: American Public Health Association/ American Water Works Association/ Water Environment Federation, 1998.
3. EL-DESSOUKY, H. T.; ETTOUNEY, H. M. *Fundamental of Salt Water Desalination*. Elsevier, 2002, Cap.8, p. 449.
4. ELGUERA, A. M.; PÉREZ BÁEZ, S. O. *Development of the most adequate pre-treatment for high capacity seawater desalination plants with open intake*. *Desalination*, v. 184, p.173-183, 2005.
5. FILMTEC. *Filmtec reverse osmosis membranes technical manual*, Dow Chemical Company, 2008.
6. NING, R. Y. *Discussion of silica speciation, fouling, control and maximum reduction*. *Desalination*, v.151, p. 67-73, 2002.
7. SHEIKHOLESLAMI, R.; KOO, T.; LEE, R. *Silica fouling and cleaning of reverse osmosis membranes*. *Desalination*, v. 139, p. 43-56, 2001.
8. SOARES, M. T.; SILVA, I. J. O.; DUARTE, S. N.; SILNA, E. F. F. *Destinação de águas residuárias provenientes do processo de dessalinização por osmose reversa*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, n. 3, p. 730-737, 2006.
9. TUNDISI, J. G. *Água no século XXI: Enfrentando a escassez*. RiMa, São Carlos, 2003.
10. WOLF, P. H.; SIVERNS, S.; MONTI, S. *UF membranes for RO desalination pretreatment*. *Desalination*, v. 182, p. 293-300, 2005.

**Anexo B**

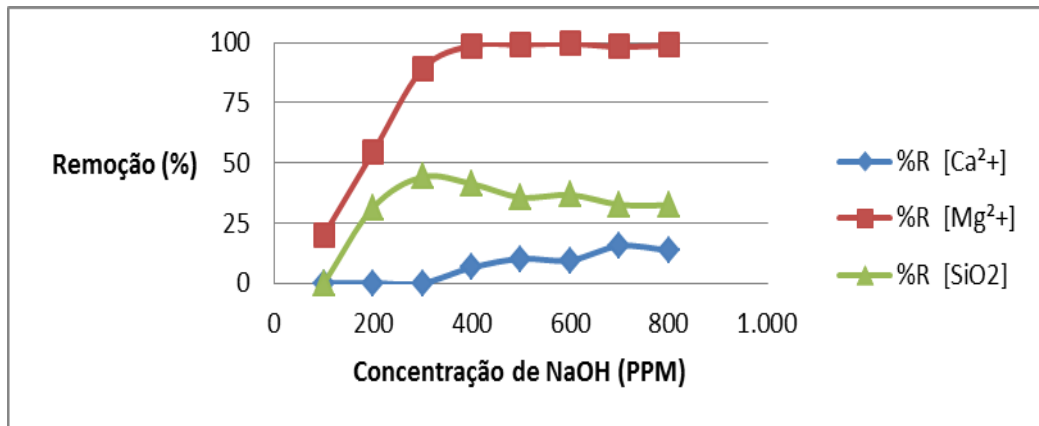
Resultados de Todos os Experimentos Realizados

### Experimentos de Bancada

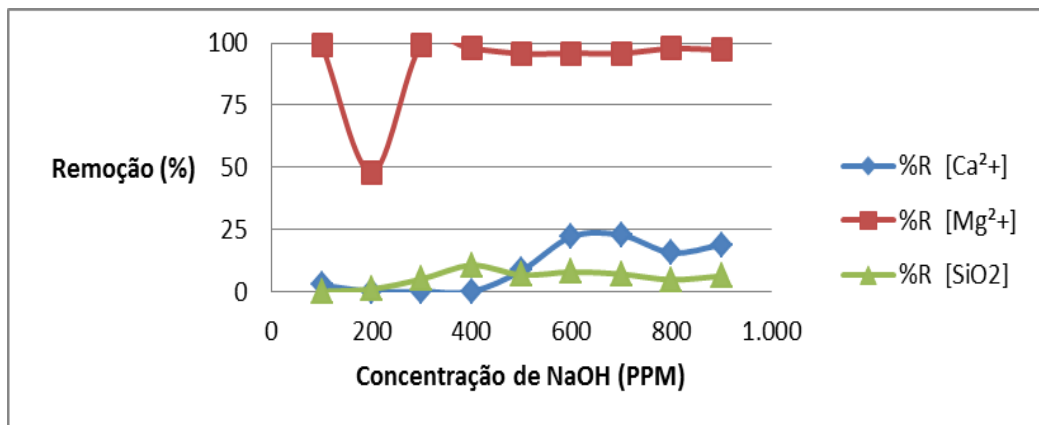
**Exp.01:**  $[\text{SiO}_2] = 50 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 300 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.).



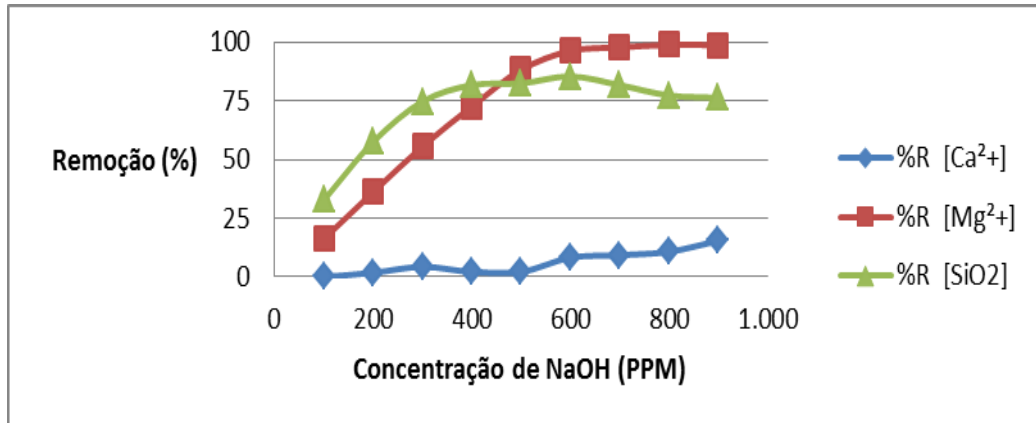
**Exp. 02:**  $[\text{SiO}_2] = 100 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 300 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.)



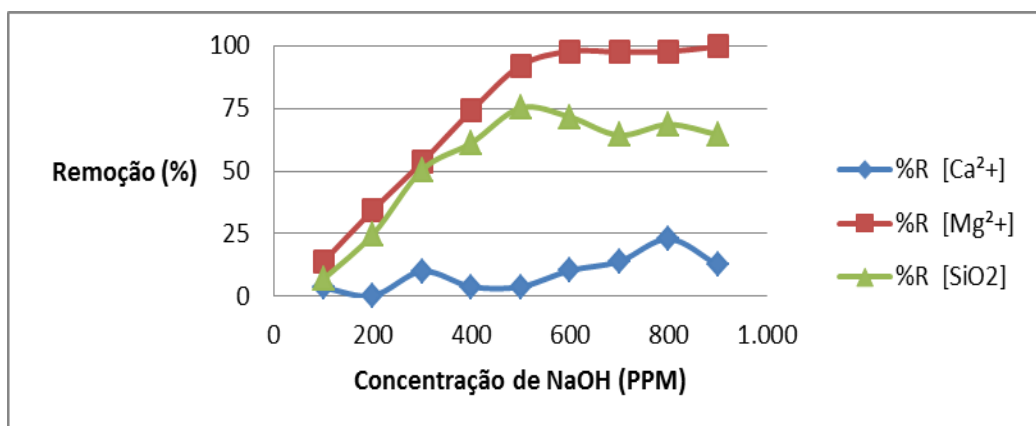
**Exp.03:**  $[\text{SiO}_2] = 150 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 300 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.)



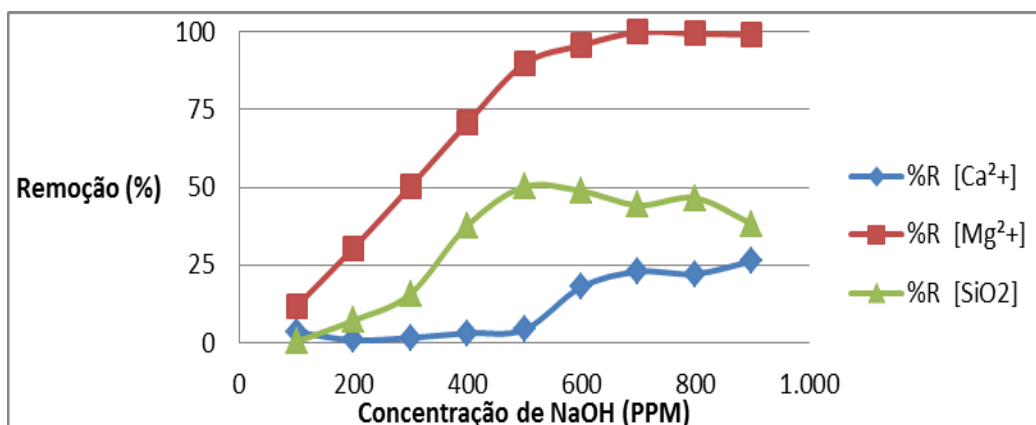
**Exp.04:**  $[\text{SiO}_2] = 50 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm}$  de  $\text{CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.)



**Exp.05:**  $[\text{SiO}_2] = 100 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm}$  de  $\text{CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.)

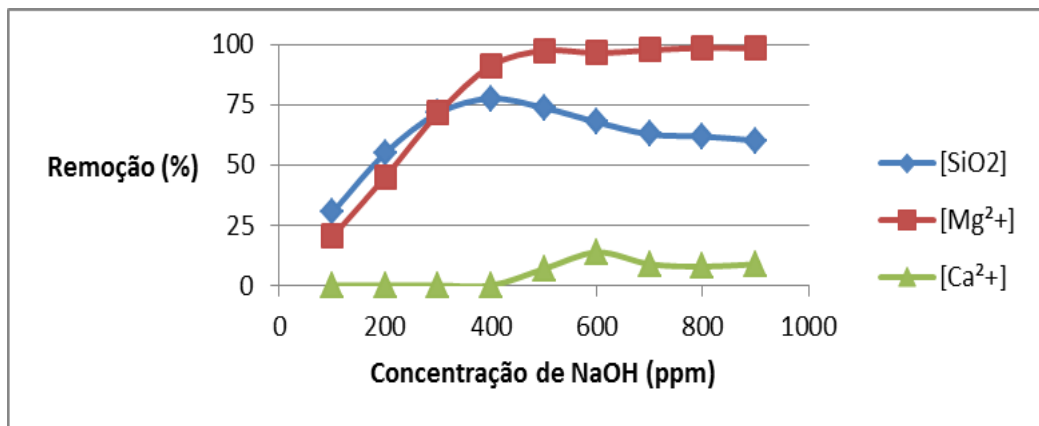


**Exp. 06:**  $[\text{SiO}_2] = 150 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm}$  de  $\text{CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.)

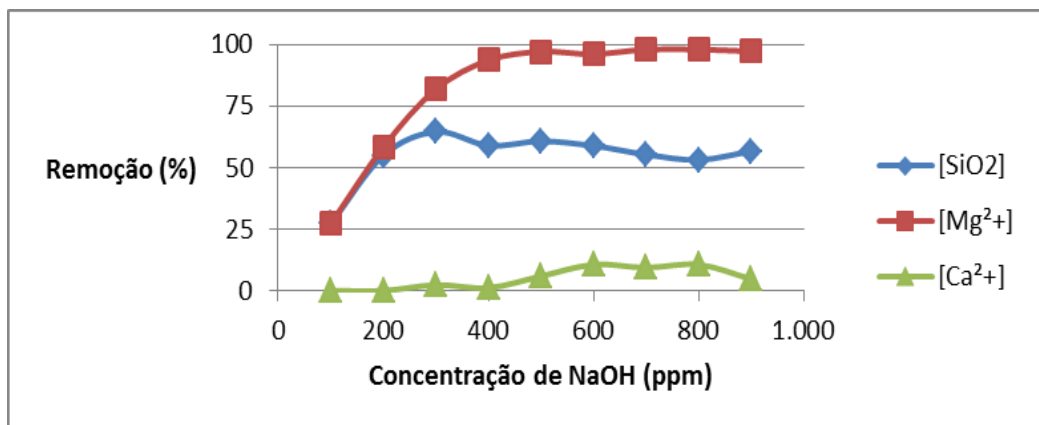




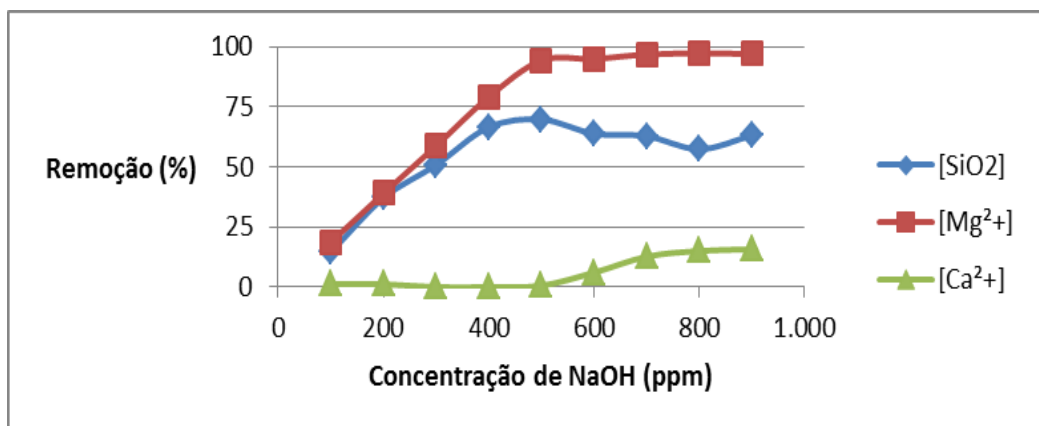
**Exp.07:**  $[\text{SiO}_2] = 50 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 300 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 3,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.)



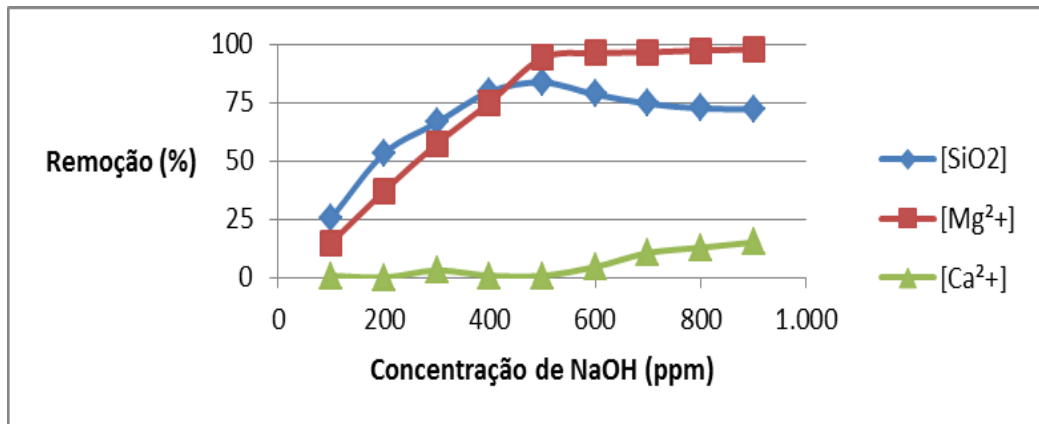
**Exp. 08:**  $[\text{SiO}_2] = 50 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 300 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 4,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.)



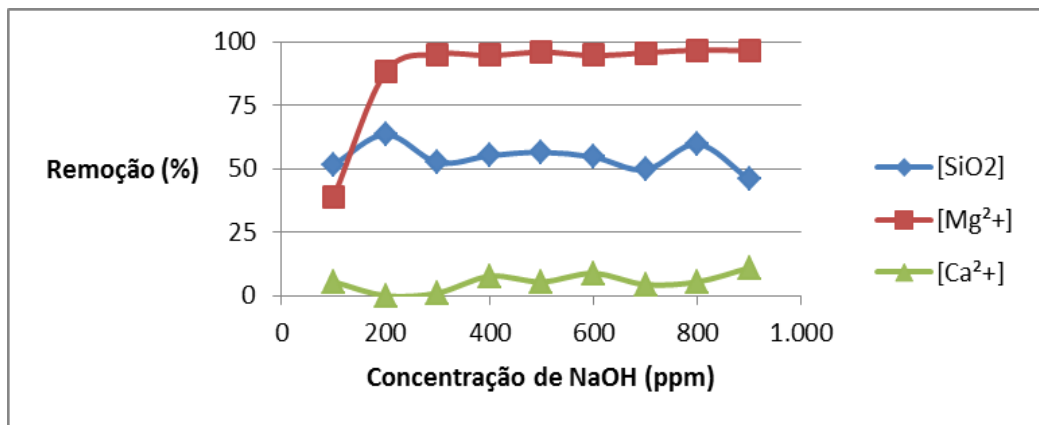
**Exp.09:**  $[\text{SiO}_2] = 100 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 3,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.)



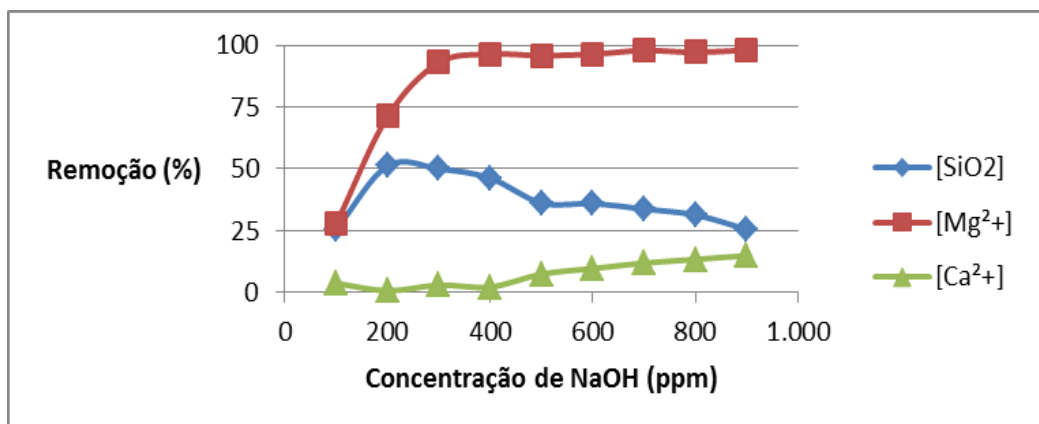
**Exp. 10:**  $[\text{SiO}_2] = 100 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 4,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.)



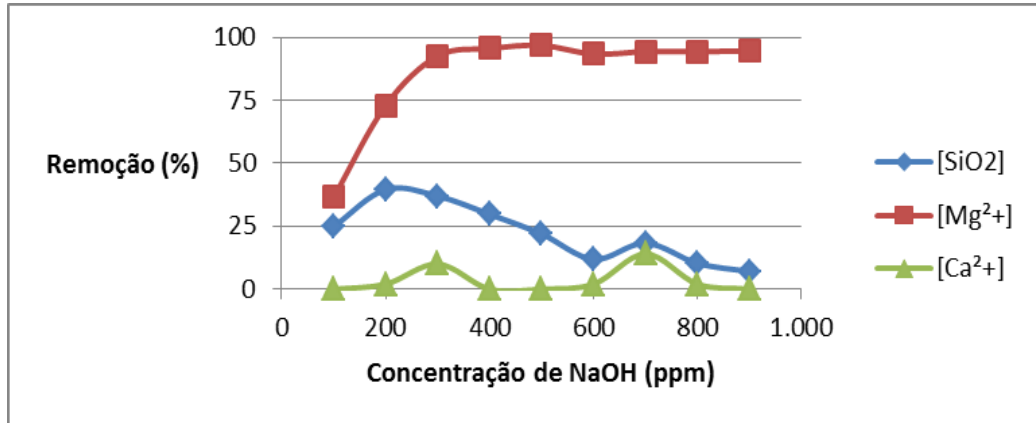
**Exp. 11:**  $[\text{SiO}_2] = 25 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 200 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.)



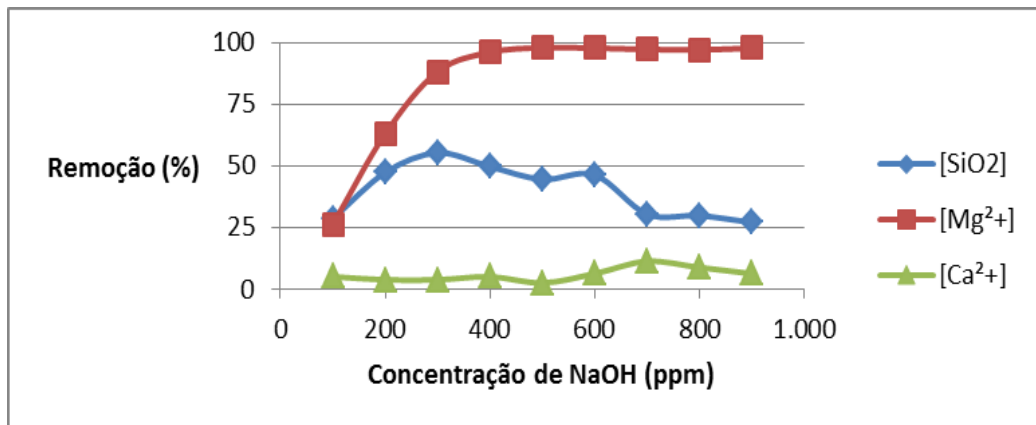
**Exp. 12:**  $[\text{SiO}_2] = 25 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 300 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.)



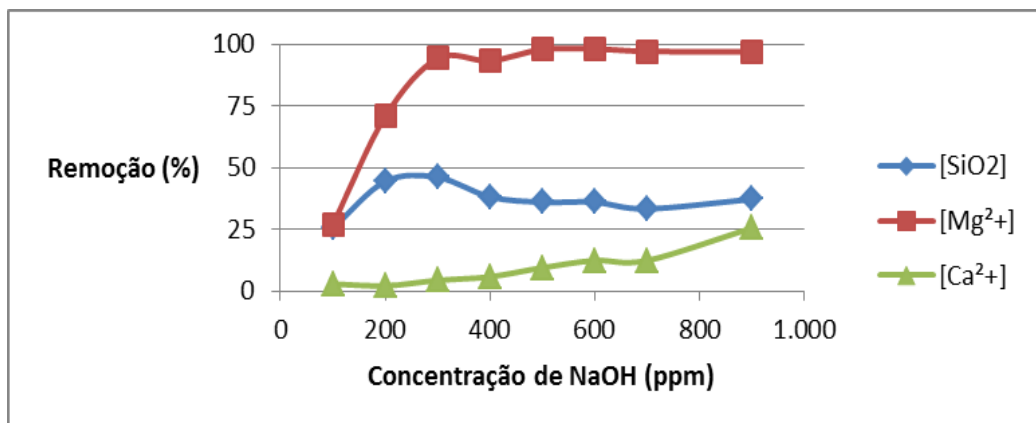
**Exp. 13:**  $[\text{SiO}_2] = 25 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 200 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 4,0$ ; agitação: não controlada (durante 5 min.)



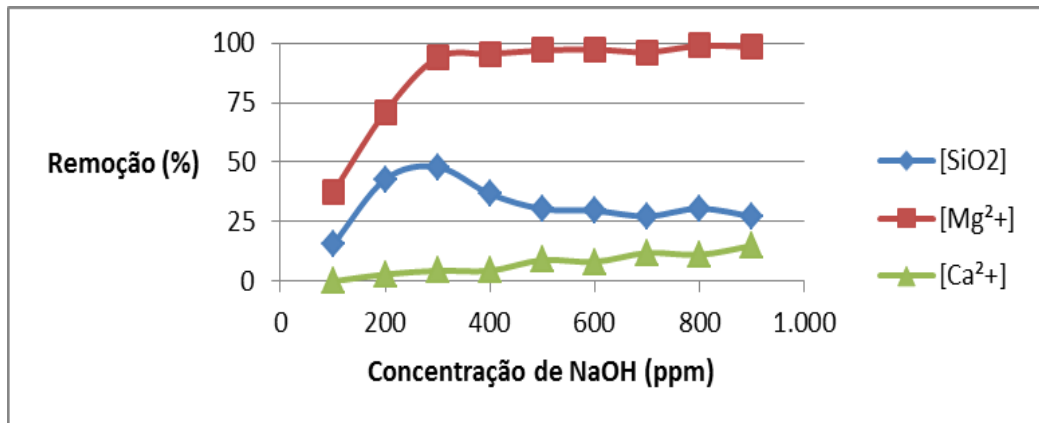
**Exp. 14:** [SiO<sub>2</sub>] = 25 ppm; [D.T.] = 300 ppm de CaCO<sub>3</sub>; [Mg<sup>2+</sup>] / [Ca<sup>2+</sup>] = 4,0; agitação: não controlada (durante 5 min.)



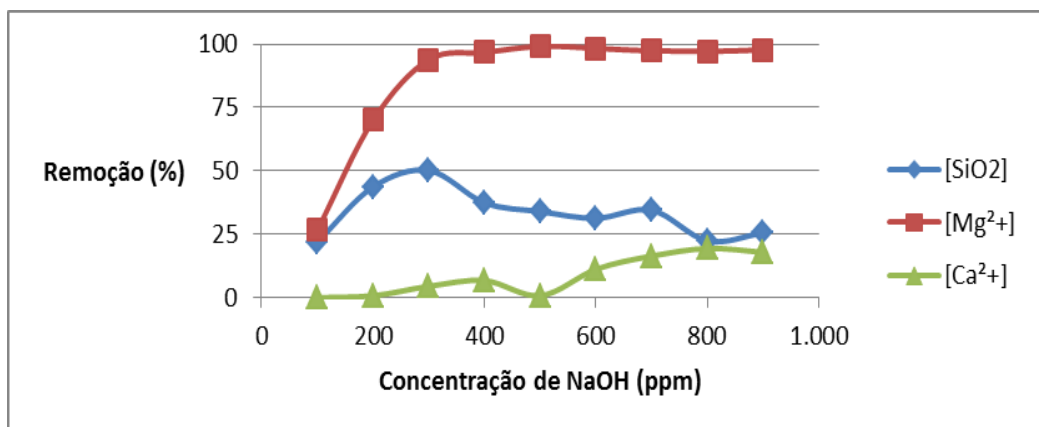
**Exp. 15:** [SiO<sub>2</sub>] = 50 ppm; [D.T.] = 300 ppm de CaCO<sub>3</sub>; [Mg<sup>2+</sup>] / [Ca<sup>2+</sup>] = 2,0; agitação rápida = 200 RPM (durante 3 min.); agitação lenta = 30 RPM (durante 15 min.)



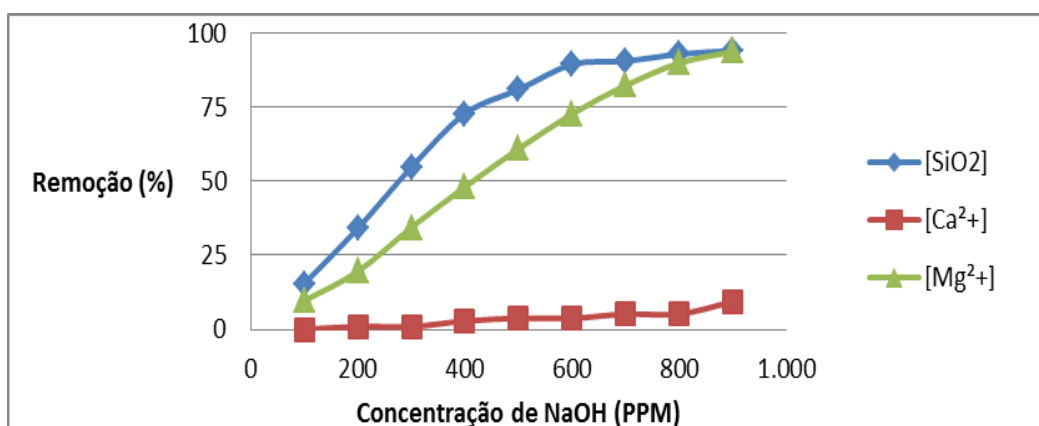
**Exp. 16:** [SiO<sub>2</sub>] = 50 ppm; [D.T.] = 300 ppm de CaCO<sub>3</sub>; [Mg<sup>2+</sup>] / [Ca<sup>2+</sup>] = 2,0; agitação rápida = 400 RPM (durante 3 min.); agitação lenta = 30 RPM (durante 15 min.)



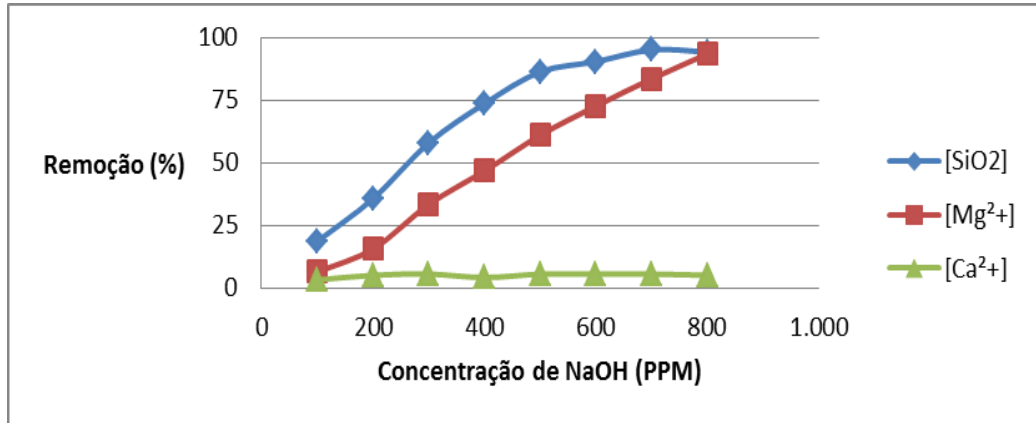
**Exp. 17:** [SiO<sub>2</sub>] = 50 ppm; [D.T.] = 300 ppm de CaCO<sub>3</sub>; [Mg<sup>2+</sup>] / [Ca<sup>2+</sup>] = 2,0; agitação rápida = 600 RPM (durante 3 min.); agitação lenta = 30 RPM (durante 15 min.)



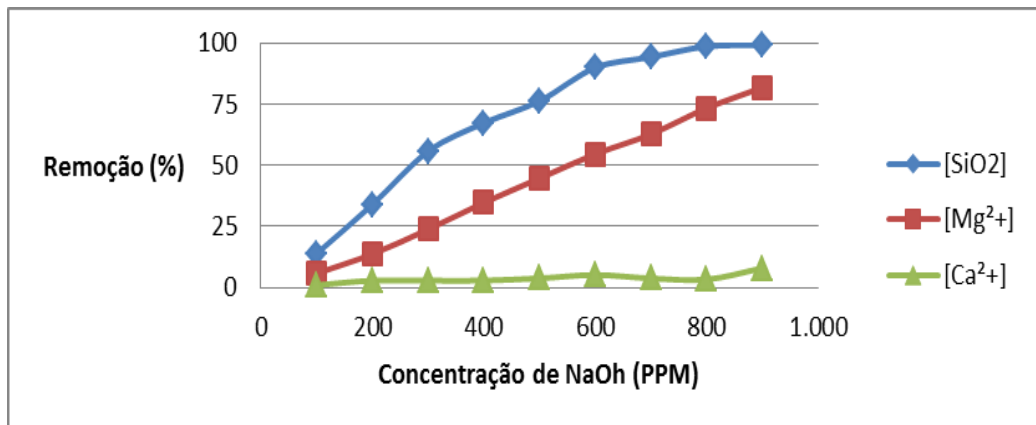
**Exp. 18:** [SiO<sub>2</sub>] = 50 ppm; [D.T.] = 500 ppm de CaCO<sub>3</sub>; [Mg<sup>2+</sup>] / [Ca<sup>2+</sup>] = 2,0; agitação rápida = 200 RPM (durante 3 min.); agitação lenta = 30 RPM (durante 15 min.)



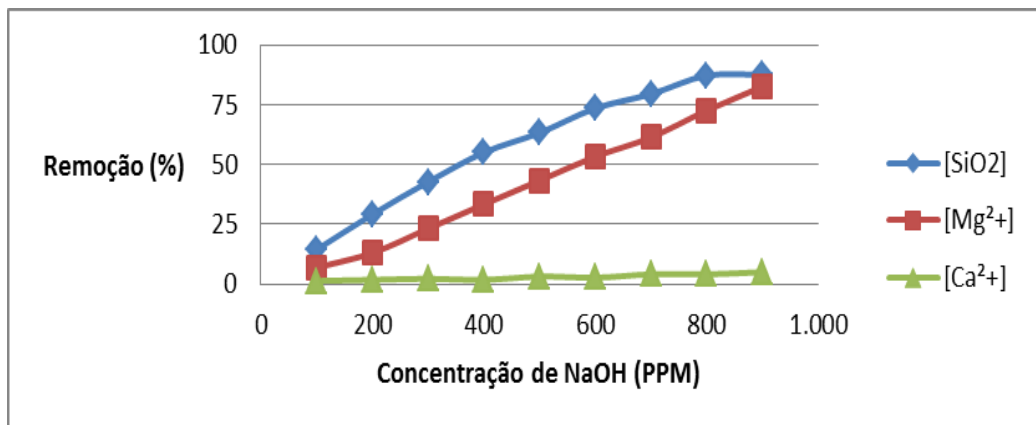
**Exp. 19:** [SiO<sub>2</sub>] = 50 ppm; [D.T.] = 500 ppm de CaCO<sub>3</sub>; [Mg<sup>2+</sup>] / [Ca<sup>2+</sup>] = 2,0; agitação rápida = 400 RPM (durante 3 min.); agitação lenta = 30 RPM (durante 15 min.)



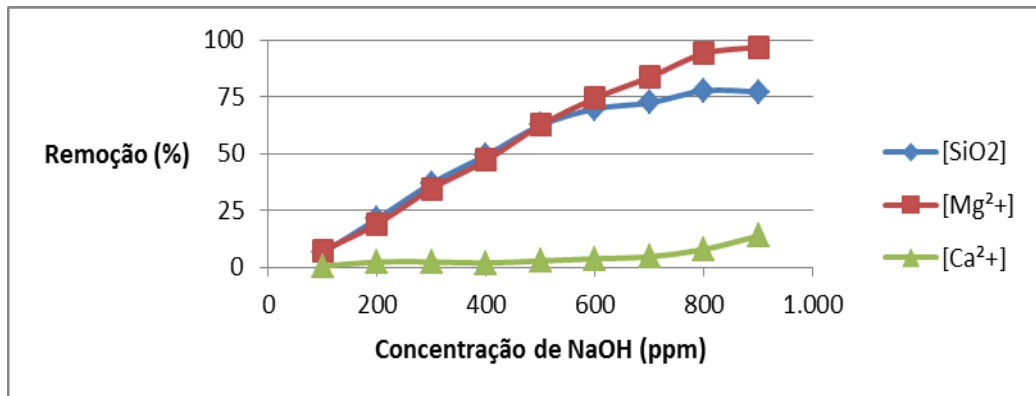
**Exp. 20:** [SiO<sub>2</sub>] = 50 ppm; [D.T.] = 500 ppm de CaCO<sub>3</sub>; [Mg<sup>2+</sup>] / [Ca<sup>2+</sup>] = 2,0; agitação rápida = 600 RPM (durante 3 min.); agitação lenta = 30 RPM (durante 15 min.)



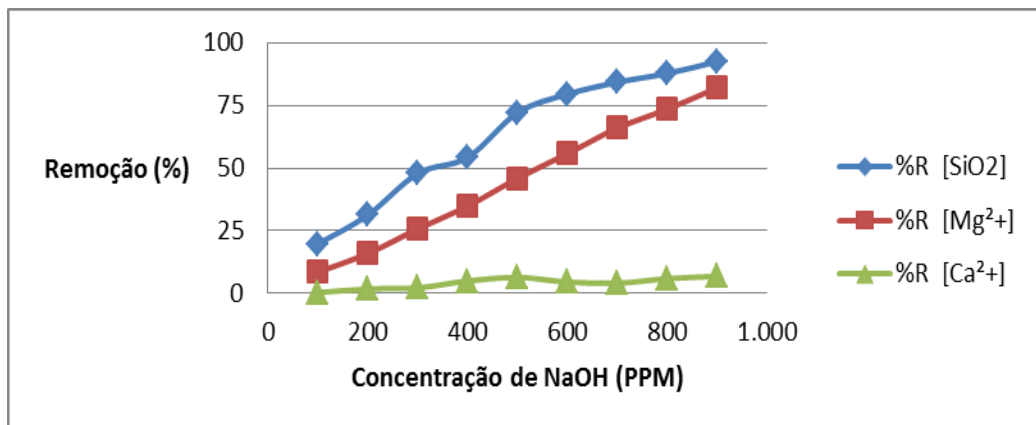
**Exp. 21:** [SiO<sub>2</sub>] = 100 ppm; [D.T.] = 500 ppm de CaCO<sub>3</sub>; [Mg<sup>2+</sup>] / [Ca<sup>2+</sup>] = 2,0; agitação rápida = 200 RPM (durante 3 min.); agitação lenta = 30 RPM (durante 15 min.)



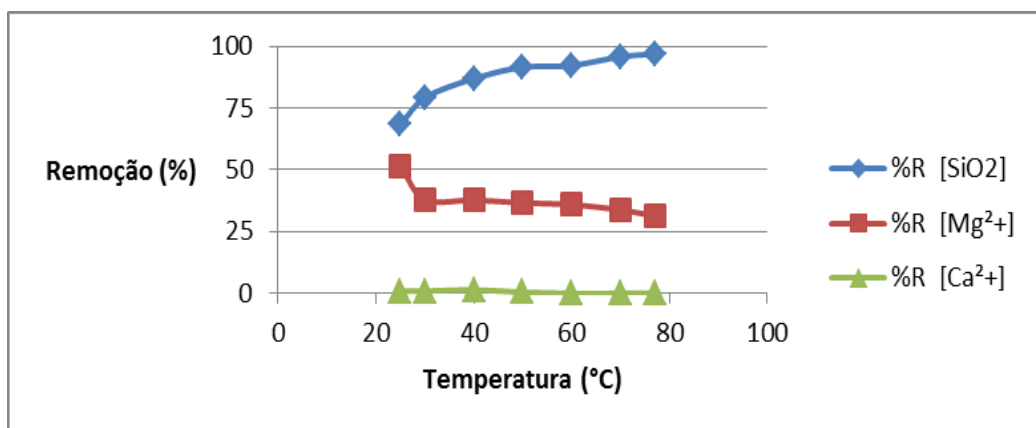
**Exp. 22:**  $[\text{SiO}_2] = 100 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação rápida = 400 RPM (durante 3 min.); agitação lenta = 30 RPM (durante 15 min.)



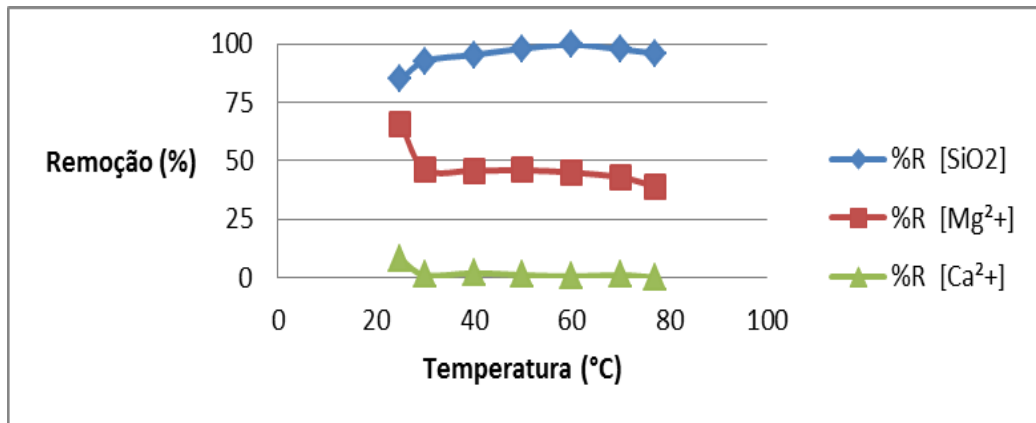
**Exp. 23:**  $[\text{SiO}_2] = 100 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; agitação rápida = 600 RPM (durante 3 min.); agitação lenta = 30 RPM (durante 15 min.)



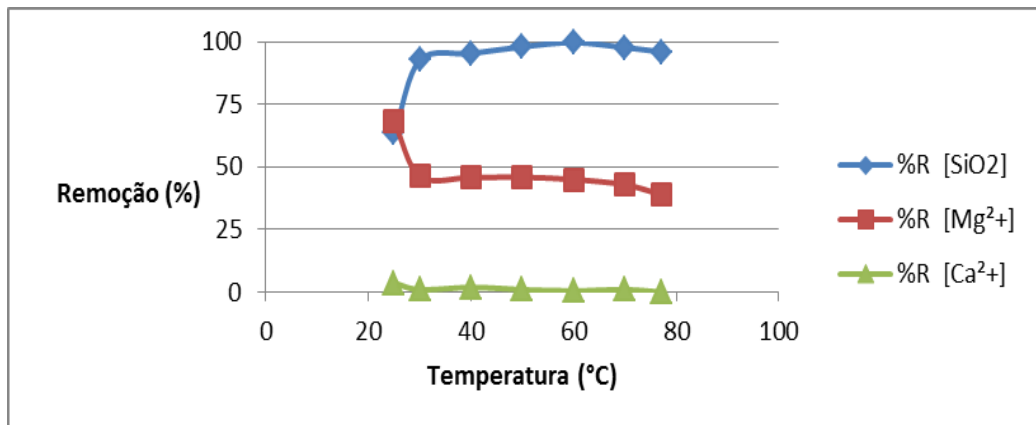
**Exp. 24:**  $[\text{SiO}_2] = 50 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ;  $[\text{NaOH}] = 400 \text{ ppm}$ ; agitação rápida = 200 RPM (durante 3 min.); agitação lenta = 30 RPM (durante 15 min.)



**Exp. 25:**  $[\text{SiO}_2] = 50 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ;  $[\text{NaOH}] = 500 \text{ ppm}$ ; agitação rápida = 400 RPM (durante 3 min.); agitação lenta = 30 RPM (durante 15 min.)

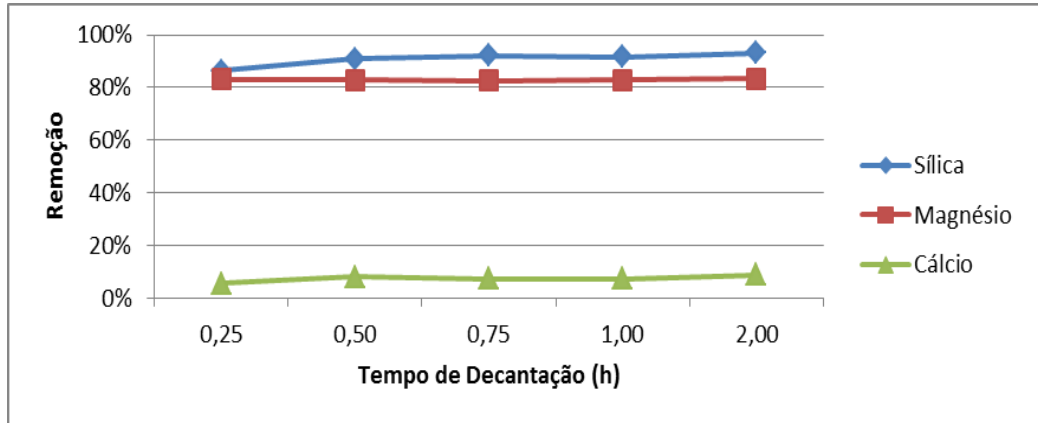


**Exp. 26:** [SiO<sub>2</sub>] = 100 ppm; [D.T.] = 500 ppm de CaCO<sub>3</sub>; [Mg<sup>2+</sup>] / [Ca<sup>2+</sup>] = 2,0; [NaOH] = 600 ppm; agitação rápida = 600 RPM (durante 3 min.) ; agitação lenta = 30 RPM (durante 15 min.)

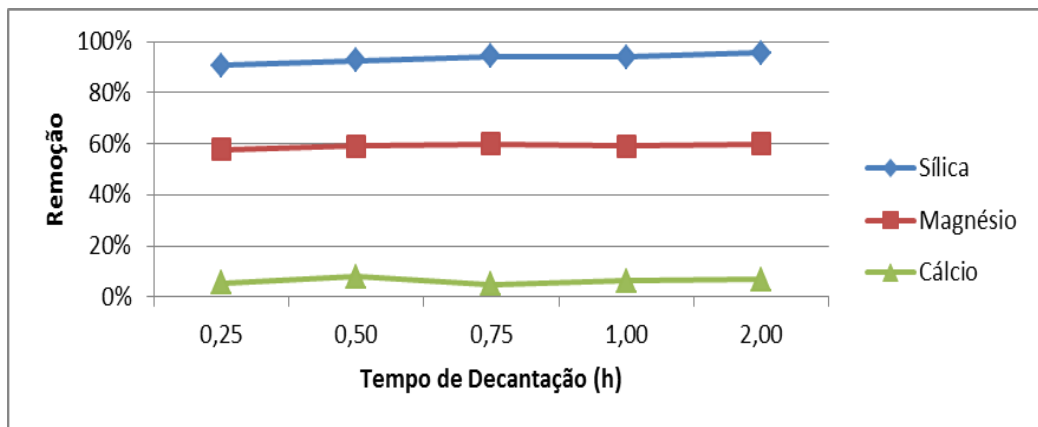


### Experimentos em Escala Piloto

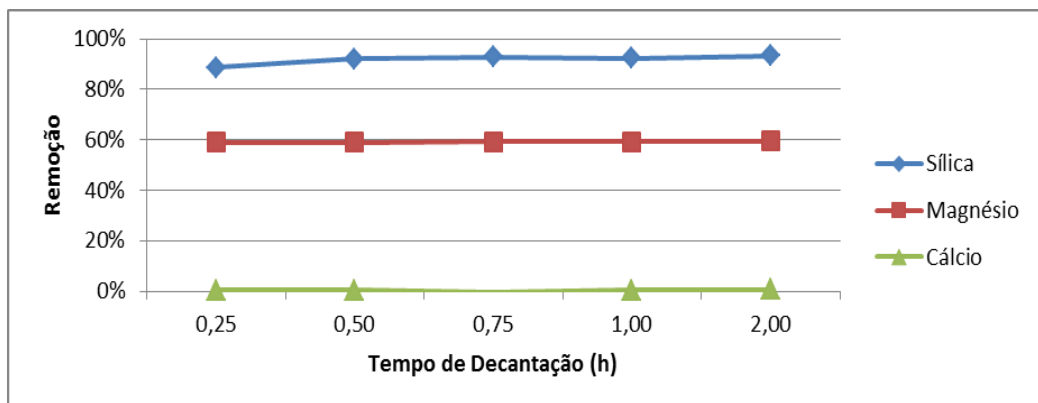
**Exp. 01** - [SiO<sub>2</sub>] = 50 ppm; [D.T.] = 300 ppm de CaCO<sub>3</sub>; [Mg<sup>2+</sup>] / [Ca<sup>2+</sup>] = 2,0; volume de solução = 200 L; Q<sub>água</sub> = 66,67; Q<sub>NaOH</sub> = 0,53 mL/s



**Exp. 02** -  $[\text{SiO}_2] = 50 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; volume de solução = 200 L;  $Q_{\text{água}} = 66,67$ ;  $Q_{\text{NaOH}} = 0,53 \text{ mL/s}$



**Exp. 03** -  $[\text{SiO}_2] = 100 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 2,0$ ; volume de solução = 200 L;  $Q_{\text{água}} = 66,67$ ;  $Q_{\text{NaOH}} = 0,53 \text{ mL/s}$



**Exp. 04** -  $[\text{SiO}_2] = 100 \text{ ppm}$ ;  $[\text{D.T.}] = 500 \text{ ppm de CaCO}_3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] / [\text{Ca}^{2+}] = 4,0$ ; volume de solução = 200 L;  $Q_{\text{água}} = 66,67$ ;  $Q_{\text{NaOH}} = 0,53 \text{ mL/s}$



