

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de mestrado

**TRATAMENTO INTERMEDIÁRIO DE CONCENTRADO DE  
OSMOSE INVERSA POR PRECIPITAÇÃO PARA AUMENTO DA  
RECUPERAÇÃO DE ÁGUA NA DESSALINIZAÇÃO**

Autora: Patrícia Maria da Costa Lopes

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Sônia Denise Ferreira Rocha

Março/2015

Patrícia Maria da Costa Lopes

**TRATAMENTO INTERMEDIÁRIO DE CONCENTRADO DE  
OSMOSE INVERSA POR PRECIPITAÇÃO PARA AUMENTO DA  
RECUPERAÇÃO DE ÁGUA NA DESSALINIZAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Sônia Denise Ferreira Rocha

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2015

L864t

Lopes, Patrícia Maria da Costa.

Tratamento intermediário de concentrado de osmose inversa por precipitação para aumento da recuperação de água na dessalinização [manuscrito] / Patrícia Maria da Costa Lopes. – 2015.  
xv, 158 f., enc.: il.

Orientadora: Sônia Denise Ferreira Rocha.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 80-158.

Bibliografia: f.73-79.

1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Engenharia de minas – Teses.  
3. Tecnologia mineral – Teses. 4. Precipitação (Química) - Teses.  
I. Rocha, Sônia Denise Ferreira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 669(043)

## RESUMO

Os processos de separação por membrana (PSM) têm sido amplamente utilizados para dessalinização de águas e efluentes, em função das vantagens inerentes a esses processos. Um desafio da utilização dessas tecnologias é integrar processos de tratamento com intuito de minimizar a geração do efluente, o concentrado, e aumentar a recuperação de água. Em uma refinaria de petróleo, a unidade de osmose inversa (OI), classificada como um PSM, faz parte do tratamento de água de elevada pureza utilizada na geração de vapor (água de caldeira). O concentrado gerado nessa unidade não possui reutilização em função do seu elevado teor de sólidos totais dissolvidos e de dureza. O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica do aumento da recuperação de água da unidade de OI. Com esse propósito, foi realizada a caracterização físico-química do concentrado e o seu tratamento por precipitação induzida pela dosagem de alcalinizante.

No princípio deste estudo, foi feita a caracterização do concentrado, semanalmente, por um período de nove meses. A partir dos resultados, avaliaram-se as limitações para o tratamento do concentrado por outros dois estágios de OI, através do software *Reverse Osmosis System Analysis* (ROSA). Identificou-se elevado potencial de formação de incrustações por precipitação de carbonato de cálcio e sílica.

Nesse sentido, o delineamento experimental confrontou o desempenho dos alcalinizantes hidróxido de sódio e hidróxido de cálcio no tratamento do concentrado por precipitação, em escala de laboratório. Foi utilizado o software estatístico Minitab como ferramenta de avaliação dos resultados.

Na primeira etapa de ensaios, buscou-se definir as condições experimentais bem como fazer a prospecção do uso da precipitação e dos alcalinizantes selecionados no tratamento do concentrado. Na segunda etapa, foi avaliado o impacto do pH final da precipitação e do uso de semente na remoção dos compostos incrustantes. Na terceira etapa de ensaios, investigou-se uma faixa mais ampla de pH final de precipitação para o hidróxido de cálcio, com intuito de subsidiar a comparação dos alcalinizantes. Inferiu-se que o hidróxido de sódio foi mais eficiente, visto que ele proporcionou maior remoção de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$ , com menor dosagem.

Finalmente, avaliou-se a dessalinização em dois estágios de OI do concentrado tratado por precipitação induzida pelo hidróxido de sódio, para duas condições de pH final, através do ROSA. Concluiu-se que o controle do pH final em 10,0 foi suficiente para remover  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$  a ponto de proporcionar a redução da propensão de formação de incrustação a níveis aceitáveis para operar os dois novos estágios de OI, com recuperação de 68%. Esse resultado permite vislumbrar o aumento de recuperação global de água da unidade de OI de 75% para 92%.

**Palavras-chave:** recuperação de água; concentrado; osmose inversa; precipitação.

## ABSTRACT

The membrane separation processes (MSP) have been widely used for water and wastewater desalination, due the inherent advantages of these processes. One of the challenges of these technologies application includes integrating treatment processes with the aim to reduce the effluent generation, the concentrate, and increase water recovery. In an oil refinery, the reverse osmosis (RO) unit, classified as a MSP, takes part of the high purity water treatment used in the steam generation (boiler water). The concentrate generated from this unit has no reuse, because of its high content of total dissolved solids and hardness. The objective of this work is to assess the technical feasibility of increasing RO unit water recovery. For this purpose, it was performed the concentrate physical-chemical characterization and its treatment by alkaline-induced precipitation.

Firstly, the characterization of the concentrate was performed, weekly, for nine months. From the results, it was evaluated the limitations to the concentrated treatment by two stages of RO, through the Reverse Osmosis System Analysis software (ROSA). It was identified a high potential for fouling by the precipitation of calcium carbonate and silica.

In this sense, the experimental design confronted the performance of the alkaline reagents, sodium hydroxide and calcium hydroxide, in the concentrate treatment by precipitation, in laboratory scale. It was used the statistical software Minitab as an evaluation tool of the results.

In the first stage of testing, it was desired to define the experimental conditions and to prospect the use of precipitation and the selected alkalizing in the concentrate treatment. In the second step, the effect of the final pH precipitation and the use of seed in the fouling compounds removal were evaluated. In the third stage tests, it was investigated a broader range of final precipitation pH for the calcium hydroxide, in order to support the comparison of the alkaline reagents. It was conclude that sodium hydroxide has the best performance, since it provided the highest removal of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{SiO}_2$ , with smaller dosage.

Finally, treated concentrates by sodium hydroxide induced precipitation, at two final pH conditions, were evaluated as the feed of two stages RO desalination by ROSA simulation. It follows that the final pH control at 10.0 was sufficient to remove  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{SiO}_2$  enough to provide the reduction of scale forming propensity to acceptable levels for the two new stages RO operation, with 68% water recovery. This finding suggests that may be possible to increase the RO unit global water recovery from 75% to 92%.

**Keywords:** water recovery; concentrate; reverse osmosis; precipitation.

“Quando o poço está seco, nós sabemos o valor da água.”

Benjamim Franklin

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as bênçãos recebidas.

Agradeço, em especial, a meu querido esposo Ronan, pelo amor, companheirismo, apoio incondicional, incentivo e compreensão.

Agradeço, aos meus pais, Alberto e Márcia, e avó Inhá, que são os responsáveis por eu ter chegado até aqui, pelo amor e apoio. Agradeço, também, às minhas irmãs, Flávia e Tatiane, pela amizade e companheirismo.

Agradeço ao amigo Ubirajara, pelo apoio e pelos conselhos, sempre pertinentes.

Agradeço à Vânia, pela ajuda inestimável e por acreditar neste trabalho.

Agradeço à minha orientadora, Professora Sônia, pela confiança e pela calma necessária para me ajudar a transpor os momentos difíceis.

Agradeço ao Professor Cristiano Borges, pelos valiosos ensinamentos.

Agradeço aos colegas da planta piloto, Ursulino, Ailton, Priscila, Cintia, Juliana, Ângelo e Marcelo, e ao aluno Alisson, pelo precioso apoio nas realizações de análises e ensaios.

Finalmente, agradeço a Petrobras, sobretudo ao Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello, pelo apoio na realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivo Geral.....	5
2.2 Objetivos Específicos.....	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1 Processos de separação por membrana.....	6
3.1.1 Osmose inversa.....	11
3.2 Tecnologias em estudo para tratamento do concentrado.....	14
3.2.1 Precipitação.....	16
4 METODOLOGIA.....	19
4.1 Materiais.....	20
4.1.1 Concentrado.....	20
4.1.2 Reagentes utilizados nos ensaios de precipitação.....	21
4.1.3 Equipamentos utilizados nos ensaios de precipitação.....	21
4.1.4 Métodos analíticos.....	22
4.1.5 Ferramentas computacionais.....	23
4.2 Metodologia dos ensaios de precipitação.....	24
4.3 Metodologia das simulações.....	26
4.3.1 Simulações com o concentrado sem tratamento.....	28
4.3.2 Simulações com o concentrado tratado por precipitação.....	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
5.1 Caracterização físico-química do concentrado.....	32

5.2	Primeira etapa: determinação das condições experimentais .....	36
5.2.1	Ensaio com hidróxido de sódio – 1ª Etapa.....	36
5.2.2	Ensaio com hidróxido de cálcio – 1ª Etapa .....	39
5.2.3	Síntese dos resultados da 1ª etapa.....	42
5.3	Segunda etapa: utilização de semente .....	43
5.3.1	Determinação das dosagens de alcalinizante para os valores fixados de pH 45	
5.3.2	Ensaio com hidróxido de sódio – 2ª Etapa.....	47
5.3.3	Ensaio com hidróxido de cálcio – 2ª Etapa .....	55
5.3.4	Síntese dos resultados da 2ª etapa.....	61
5.4	Terceira etapa: dosagem em excesso de hidróxido de cálcio.....	61
5.5	Avaliação do potencial de incrustação do concentrado tratado por precipitação 65	
6	CONCLUSÕES .....	71
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	72
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	73
9	ANEXOS .....	80
9.1	Resultados das análises químicas.....	80
9.1.1	Caracterização do concentrado .....	80
9.1.2	Resultados da 1ª etapa.....	83
9.1.3	Resultados da 2ª etapa.....	85
9.1.4	Resultados da 3ª etapa.....	87
9.2	Resultados das avaliações estatísticas.....	88
9.2.1	ANOVA da 1ª etapa.....	88
9.2.2	ANOVA da 2ª etapa.....	101
9.3	Resultados das simulações .....	111

9.3.1	Simulações Caso I.....	111
9.3.2	Simulações Caso II.....	120
9.3.3	Simulações Caso III.....	129
9.3.4	Simulações Caso IV.....	138
9.3.5	Simulações Caso V.....	144
9.3.6	Simulações Caso VI.....	150
9.3.7	Simulações Caso VII.....	156

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Rota de tratamento proposta.....	4
Figura 3.1: Transporte de espécies através das membranas .....	6
Figura 3.2: Modelo esquemático de polarização de concentração. (a) Desenvolvimento da concentração na camada limite. (b) Perfil da polarização de concentração, em que $C_b$ é a concentração da espécie no seio da solução, $C_m$ na superfície da membrana e $C_p$ no permeado.....	9
Figura 3.3: Fenômeno de osmose, em que $\Delta P$ representa a pressão hidrostática e $\pi$ a pressão osmótica .....	12
Figura 3.4: Ilustração de sistema de OI de único passo e dois estágios. ....	13
Figura 4.1: Diagrama de blocos do tratamento de água .....	21
Figura 4.2: Tela de entrada da composição da alimentação .....	27
Figura 4.2: Tela de entrada da configuração do sistema.....	27
Figura 4.3: Diagrama de blocos das simulações com o concentrado sem tratamento....	29
Figura 4.4: Diagrama de blocos das simulações com o concentrado tratado por precipitação.....	30
Figura 5.1: Gráfico de pareto dos efeitos padronizados ( $p < 0,05$ ). Respostas: remoção % de: (a) $Ca^{2+}$ ; (b) $Mg^{2+}$ ; (c) $SiO_2$ e (d) $SO_4^{2-}$ .....	37
Figura 5.2: Gráfico de efeitos principais utilizando médias ajustadas .....	39
Figura 5.3: Gráfico de pareto dos efeitos padronizados ( $p < 0,05$ ). Respostas: remoção % de: (a) Ca; (b) Mg; (c) $SiO_2$ ; (d) $SO_4^{2-}$ , (e) alcalinidade.....	40
Figura 5.4: Gráfico de efeitos principais utilizando médias ajustadas .....	41
Figura 5.5: Fotomicrografia do quartzo, com aumento de 100 vezes.....	44
Figura 5.6: (a) Fotomicrografia do quartzo, com aumento de 400 vezes. (b) Espectro EDS da partícula central. ....	44
Figura 5.7: pH em função da dosagem sucessiva de alcalinizante .....	45

Figura 5.8: <i>Boxplot</i> e sumário das estatísticas calculadas nos testes de hipótese para (a) pH de 8,5; (b) pH de 10,0 e (c) pH de 11,5. ....	46
Figura 5.9: Gráfico de pareto dos efeitos padronizados, nível de confiança de 5%. Resposta: remoção percentual (a) $\text{Ca}^{2+}$ ; (b) $\text{Mg}^{2+}$ ; (c) $\text{SiO}_2$ e (d) $\text{SO}_4^{-2}$ . Fatores: A – pH final; B – semente e AB – interação entre os fatores.....	48
Figura 5.10: Gráfico de efeitos principais utilizando médias ajustadas .....	49
Figura 5.11: Gráficos de superfície.....	50
Figura 5.12: Fotos dos precipitados obtidos (a) sem aplicação de semente e (b) com aplicação de semente. ....	50
Figura 5.13: Fotomicrografias, com aumento de 500 vezes, dos precipitados obtidos com: (a) pH final de 11,4, com semente e (b) pH final de 11,4, sem semente. ....	51
Figura 5.14: Fotomicrografias do precipitado de pH final de 11,4, com semente: (a) visão geral, com aumento de 100 vezes (b) aglomerado, aumento de 550 vezes. ....	52
Figura 5.15: (a) Fotomicrografia do precipitado de pH final de 11,4, com semente; (b) Espectro EDS do ponto medial da partícula de centro .....	52
Figura 5.16: (a) Fotomicrografia do precipitado de pH final de 11,4, com semente, aumento de 100 vezes; Espectros EDS dos pontos: (b) 1; (c) 2; (d) 3 e (e) 4. ....	53
Figura 5.17: Fotomicrografias do precipitado de pH final de 10,0, com semente, com aumento de (a) 1000 vezes; (b) 1300 vezes; (c) 1700 vezes e (d) espectro EDS da partícula central de (c). ....	54
Figura 5.18: Gráfico de pareto dos efeitos padronizados, nível de confiança de 5%. Resposta: remoção percentual (a) Ca; (b) Mg; (c) $\text{SiO}_2$ e (d) $\text{SO}_4^{-2}$ . Fatores: A – pH final; B – semente e AB – interação entre os fatores.....	56
Figura 5.19: Gráfico de efeitos principais utilizando médias ajustadas .....	57
Figura 5.20: Gráficos de superfície.....	58
Figura 5.21: Fotomicrografias dos precipitados obtidos com pH final de 8,9: (a) com semente, aumento de 330 vezes e (b) sem semente, aumento de 400 vezes. ....	58

- Figura 5.22: Precipitado de pH final de 8,9, com semente: fotomicrografia, com aumento de 850 vezes (a) e o espectro EDS da partícula central (b); fotomicrografia, com aumento de 550 vezes (c) e o espectro EDS da partícula central (d)..... 59
- Figura 5.23: Precipitado de pH final de 8,8, com semente: fotomicrografia com aumento de 300 vezes (a); fotomicrografia com aumento de 950 vezes (b) e espectro EDS da partícula central (c). ..... 60
- Figura 5.24: Gráfico do pH final em função da dosagem de  $\text{Ca(OH)}_2$ ..... 62
- Figura 5.25: Gráficos de remoção média percentual de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SiO}_2$  e Sulfato em função da dosagem de  $\text{Ca(OH)}_2$  e do pH final..... 63
- Figura 5.26: Concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em equilíbrio com  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{Mg(OH)}_2$ , respectivamente. .... 64
- Figura 5.27: Concentração média de  $\text{Ca}^{2+}$  em função do pH final dos ensaios..... 65

## LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Alguns PSM, forças motrizes e propriedades físicas/químicas .....	7
Tabela III.2 - Exemplos de aplicação dos processos de separação por membrana .....	8
Tabela IV.1 – Níveis dos fatores para os ensaios com dosagem de NaOH.....	24
Tabela IV.2 – Níveis dos fatores para os ensaios com dosagem de Ca(OH) <sub>2</sub> .....	25
Tabela IV.3: Descrição da membrana BW30-400.....	28
Tabela IV.4: Configurações do sistema para os Casos I, II e III .....	29
Tabela IV.5: Configurações do sistema para os Casos IV, V e VI.....	30
Tabela IV.6: Configurações do sistema para o Caso VII .....	31
Tabela V.1 – Caracterização do concentrado .....	32
Tabela V.2 – Propriedades das amostras de concentrado– Alimentação 1, 2 e 3.....	34
Tabela V.3: Cálculos de potencial de incrustação realizados pelo ROSA para Alimentação 1, 2 e 3 .....	34
Tabela V.4: Cálculos de potencial de incrustação pelo ROSA do concentrado obtido após mais dois estágios de OI - Caso I .....	35
Tabela V.5: Cálculos de potencial de incrustação pelo ROSA do concentrado obtido após mais dois estágios de OI - Caso II.....	35
Tabela V.6: Cálculos de potencial de incrustação pelo ROSA do concentrado obtido após mais dois estágios de OI - Caso III.....	35
Tabela V.7: Composição do concentrado da primeira etapa .....	36
Tabela V.8: Média e Desvio Padrão do pH final dos ensaios com NaOH (1ª etapa).....	38
Tabela V.9: Média e Desvio Padrão do pH final dos ensaios com Ca(OH) <sub>2</sub> (1ª etapa) .	42
Tabela V.10: Composição do concentrado da segunda etapa.....	43
Tabela V.11: Dosagem demandada de hidróxido de sódio – 2ª etapa.....	45
Tabela V.12: Dosagem demandada de hidróxido de cálcio – 2ª etapa.....	46
Tabela V.13: Composição do concentrado da terceira etapa.....	61

Tabela V.14: Propriedades das amostras de concentrado tratado selecionadas para alimentação .....	66
Tabela V.15 – Propriedades das amostras de concentrado tratado selecionadas para alimentação com pH corrigido com HCl .....	67
Tabela V.16: Cálculos do potencial de incrustação realizados pelo ROSA para Alimentação 4 e 5 .....	68
Tabela V.17: Cálculos do potencial de incrustação realizados pelo ROSA do concentrado obtido após mais dois estágios de OI - Caso IV.....	68
Tabela V.18: Cálculos do potencial de incrustação realizados pelo ROSA do concentrado obtido após mais dois estágios de OI - Caso V .....	69
Tabela V.19: Cálculos do potencial de incrustação realizados pelo ROSA do concentrado obtido após mais dois estágios de OI - Caso VI.....	69
Tabela V.20: Cálculos do potencial de incrustação realizados pelo ROSA do concentrado obtido após mais dois estágios de OI - Caso VII .....	69
Tabela V.21: Comparação dos resultados obtidos para a Alimentação 4 e 5 .....	70

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial à vida e ao desenvolvimento humano. A indisponibilidade hídrica pode ser considerada um problema de âmbito global e, apesar disso, as ações para preservação dos mananciais e para a gestão adequada dos recursos hídricos são tímidas frente à gravidade desse problema. Estima-se que mais de um bilhão de pessoas não possuem acesso à água potável e que, aproximadamente, 2,3 bilhões de pessoas vivam em regiões com escassez de água (SUBRAMANI e JACANGELO, 2013).

No Brasil, a indisponibilidade hídrica deixou de ser uma adversidade localizada na região nordeste e, em 2014, comprometeu o abastecimento da região sudeste. No Estado de São Paulo, principal afetado pela baixa precipitação pluviométrica, a crise hídrica atingiu quase metade da população, cerca de 20 milhões de pessoas. O Sistema Cantareira, que atende 9,8 milhões de paulistas, 8,4 milhões deles só na capital, bateu sucessivos recordes negativos. Em outubro de 2014, a Agência Nacional de Águas (ANA) autorizou a Companhia de Saneamento Básico de São Paulo (Sabesp) a utilizar a segunda parcela do volume morto desse reservatório, com 106 bilhões de litros (SANTOS e BIBIANO, 2014). Em 2015, a ANA publicou uma resolução conjunta com o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), do Estado de São Paulo, para estabelecer as regras e as condições de restrição de uso para captações de água nas bacias dos rios Jaguari, Camanducaia e Atibaia, que fazem parte do sistema Cantareira (BRASIL, 2015).

Em Minas Gerais, a Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais (Copasa), anunciou, no dia 22 de janeiro de 2015, o risco real de desabastecimento de água na Região Metropolitana de Belo Horizonte e em cidades de outras regiões do Estado. Na mesma ocasião, a Copasa informou que enviaria à autoridade gestora de recursos hídricos do Estado uma solicitação de declaração de situação crítica de escassez de recursos hídricos (COPASA, 2015). Analogamente ao ocorrido no Estado de São Paulo, é esperada em Minas a restrição de captação na Bacia do Paraopeba.

No Estado do Rio de Janeiro a situação é semelhante. Em janeiro de 2015, dois dos quatro reservatórios que o abastece atingiram o volume morto. De acordo com uma

estimativa do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe), se não chover mais de fevereiro até abril de 2015, o Rio teria água somente por mais 250 dias (ALESSI, 2015).

Nesse cenário, o reúso de água, a reutilização de efluentes tratados e a dessalinização de água salina são estratégias cruciais para gerar a água demandada para o desenvolvimento econômico (ZHANG *et al.*, 2011). O abastecimento de água para atividade industrial pode ficar comprometido em situação de escassez, haja vista a priorização do fornecimento para consumo humano e dessedentação de animais (BRASIL, 1997) e a maioria dos segmentos industriais utiliza a água em seus processos. Ela possui algumas propriedades que a tornam ideais para o uso industrial: absorve e libera mais calor por incremento de temperatura do que muitas substâncias, possui alto conteúdo energético no estado gasoso, libera mais calor por congelamento de que outros compostos (FLYNN, 2009) e é um excelente solvente.

A osmose inversa (OI), classificada como um processo de separação por membrana (PSM), tem sido largamente utilizada para o tratamento de água e efluentes a fim de melhorar a sua qualidade, para a sua utilização direta, seu reúso ou para a adequação do seu descarte para o meio ambiente. O processo emprega membranas semi-permeáveis que permitem a separação do afluente em duas correntes: o permeado, que contém a água purificada que passa através da membrana, e o concentrado, a porção que contém a água não permeada, sais e compostos retidos (PÉREZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2012). À medida que se aumenta a recuperação de água nesse processo (vazão de permeado), cresce a concentração dos minerais precursores de incrustação (por exemplo,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{SiO}_2$ ) no concentrado e, conseqüentemente, na superfície da membrana. Se o limite de solubilidade desses compostos é excedido, eles podem cristalizar na superfície da membrana e causar a redução do fluxo permeado ao longo do tempo.

Uma solução simples para aliviar o problema de incrustação por precipitação seria operar a OI com baixas recuperações, pois ocorreria a redução da concentração de sais na superfície da membrana. Entretanto, essa opção aumenta o volume do concentrado gerado e, na prática, uma baixa recuperação de água pode inviabilizar o uso da OI (GABELICH, XU e COHEN, 2010). Então, busca-se otimizar a recuperação com a

dosagem de produtos químicos com propriedades anti-incrustantes, chegando-se ao limite permitido pela composição da água ou efluente tratado.

No caso da dessalinização de água salobra, o concentrado representa de 5 a 25% do afluente e a sua disposição requer cautela em função de vários aspectos, tais como a perda significativa de volume da água de alimentação como efluente industrial; o alto teor de sais e contaminantes presentes nessa corrente e a legislação ambiental associada à sua disposição (BADRUZZAMAN *et al.*, 2009).

As opções mais comuns de disposição do concentrado para plantas de OI situadas em regiões não litorâneas são o reúso dessa corrente, a injeção em poços profundos, o uso de lagoas de evaporação, o descarte em corpos hídricos superficiais, a disposição em esgotos domésticos, a concentração de sais na fase sólida e a irrigação de plantas tolerantes à alta salinidade (GABELICH, XU e COHEN, 2010; MORILLO *et al.*, 2014; SQUIRE, 2000).

Recentemente, tem-se buscado o desenvolvimento de tecnologias de tratamento do concentrado rejeitado na dessalinização com o intuito de maximizar a recuperação global de água do processo e reduzir o volume do concentrado a ser disposto. Pode-se dividir as tecnologias estudadas nas seguintes categorias: controle de cátions e/ou de ânions, separação física de cargas e processos térmicos. O controle de cátions e ânions inclui a desmineralização química (precipitação) intermediária do concentrado e o controle biológico de sulfato, respectivamente. A Eletrodialise, a Eletrodialise Reversa (EDR) e a deionização capacitiva têm sido propostas como tecnologias de separação de cargas. Os processos térmicos englobam a destilação por compressão de vapor, a destilação por membrana e a concentração por congelamento. Outras tecnologias ainda incipientes, mas que possuem potencial em função de possuírem baixo potencial de incrustação e de consumo energético são a osmose direta, a dessalinização com evaporação via *spray* e o uso de membranas com sistema de agitação por vibração (GABELICH, XU e COHEN, 2010).

Estudos em escala de laboratório e piloto da integração dos processos de osmose inversa com a precipitação induzida por alcalinizante apresentaram resultados bastante promissores (COMSTOCK, BOYER e GRAF, 2011; GABELICH *et al.*, 2007;

RAHARDIANTO, MCCOOL e COHEN, 2010), chegando-se a alcançar recuperação de água da ordem de 95%.

Neste trabalho, avaliou-se a remoção de compostos precursores de incrustação através da precipitação do concentrado proveniente de uma planta industrial de OI. Os ensaios de precipitação foram conduzidos em escala de laboratório e induzidos pelo uso de alcalizantes: hidróxido de sódio ou hidróxido de cálcio. O intuito da precipitação do concentrado é viabilizar a utilização de uma etapa subsequente de separação por membranas – OI, o que possibilitaria aumentar a recuperação de água da unidade. A rota proposta é exibida na Figura 1.1: o concentrado da planta seria tratado por precipitação induzida por alcalinizante, filtrado e dessalinizado por mais dois estágios de OI.

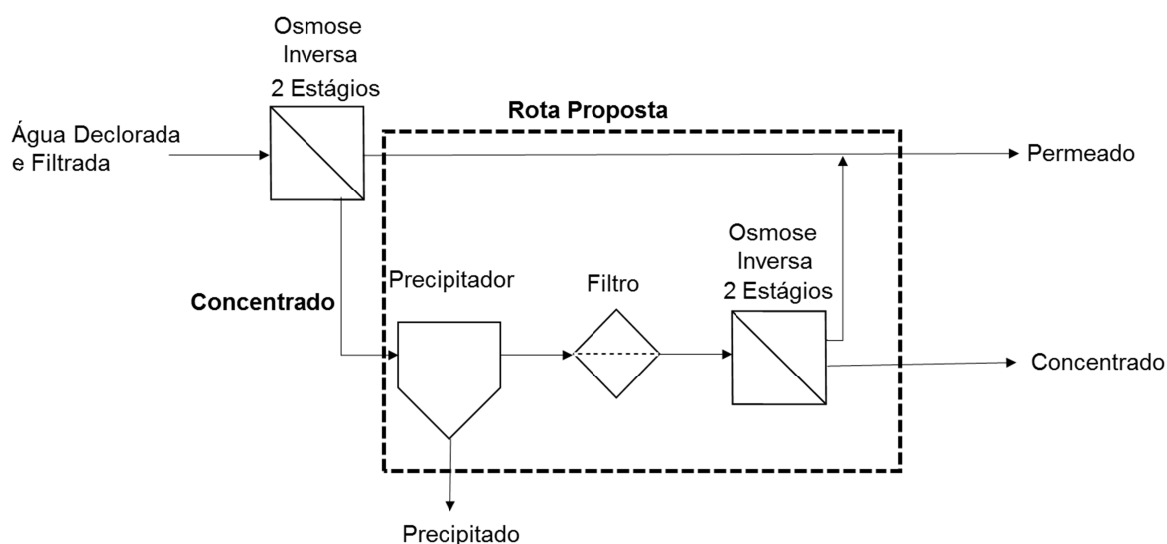


Figura 1.1: Rota de tratamento proposta

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica do tratamento intermediário por precipitação do concentrado proveniente da dessalinização por osmose inversa, parte do processo de tratamento de água de caldeira de uma refinaria de petróleo, com foco no aumento da recuperação de água.

### 2.2 Objetivos Específicos

- I. Conhecer as características físico-químicas do concentrado através de sua caracterização;
- II. Analisar o potencial de incrustação do concentrado como alimentação da osmose inversa, por meio de simulação no software *Reverse Osmosis System Analysis* (ROSA);
- III. Avaliar a eficiência do tratamento intermediário do concentrado por precipitação induzida por alcalinizante, em escala de laboratório, na remoção dos compostos precursores de incrustação. Ademais:
  - a. Confrontar o desempenho dos alcalinizantes hidróxido de sódio e hidróxido de cálcio.
  - b. Investigar o benefício da utilização de quartzo como semente.
- IV. Verificar o potencial de recuperação de água ao utilizar o concentrado tratado por precipitação como alimentação da osmose inversa, através de simulação no ROSA;

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Processos de separação por membrana

De acordo com Mulder (1996), uma definição geral de membrana é a de uma barreira seletiva entre duas fases, em que o termo “seletiva” é inerente à membrana ou ao processo de separação por membranas. Essa seletividade é caracterizada pela capacidade que a membrana possui de transportar um componente de uma solução mais prontamente do que outro componente, devido às diferenças de propriedades físicas e/ou químicas entre a membrana e os componentes que a permeiam. Desse modo, é possível concentrar, separar ou purificar soluções através da aplicação de uma força motriz, que pode ser um gradiente de pressão, de concentração, de potencial elétrico ou de temperatura.

Como explicado por Habert *et al.* (2005), o transporte das espécies através da membrana ocorre por escoamento convectivo ou difusivo. Esses mecanismos são ilustrados de forma esquemática na Figura 3.1.

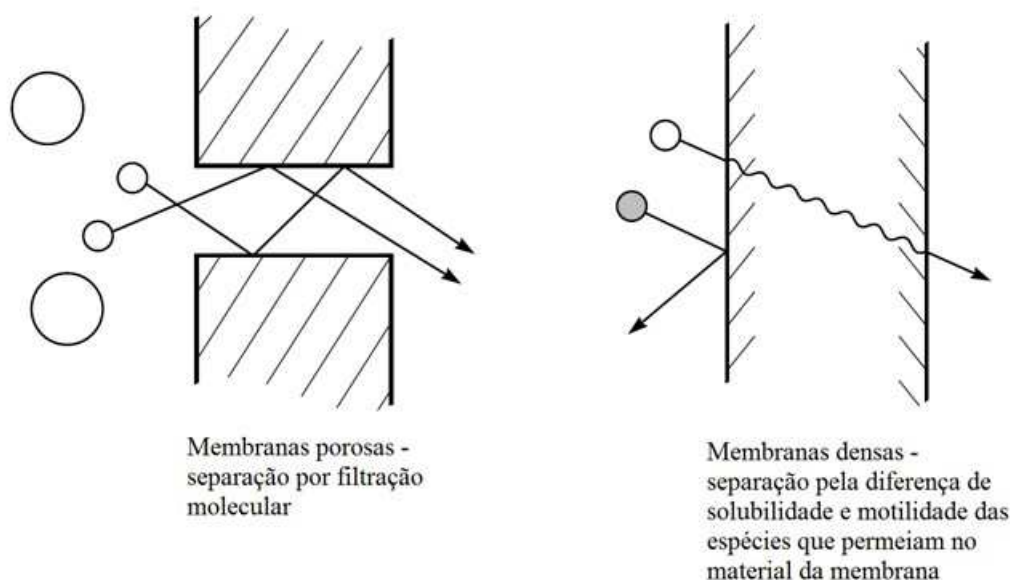


Figura 3.1: Transporte de espécies através das membranas

Fonte: Adaptado de BAKER, 2004, p. 16.

No escoamento convectivo, há a passagem preferencial das espécies de menor tamanho pelo interior dos poros. No escoamento difusivo, na ausência de poros, espécies de maior afinidade físico-química com o material da membrana se “dissolvem” nele preferencialmente e então se difundem através dele. As membranas podem ser sintetizadas a partir de materiais poliméricos, cerâmicos ou metálicos, sendo o primeiro mais comumente aplicado. Quanto à sua morfologia, as membranas podem ser porosas ou densas, estruturadas de forma simétrica ou assimétrica.

São classificados como Processos de Separação por Membrana (PSM): microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, osmose inversa, diálise, eletrodiálise, pervaporação e separação de gases (HABERT *et al.*, 2005). Na Tabela III.1 são listados alguns desses processos, com as respectivas forças motrizes e as propriedades físicas ou químicas dos componentes nas quais se baseia a separação.

Tabela III.1 – Alguns PSM, forças motrizes e propriedades físicas/químicas

<b>Processo</b>	<b>Força Motriz</b>	<b>Propriedade física/química</b>
Microfiltração	Diferencial de Pressão (0,1 – 2,0 bar)	Tamanho
Ultrafiltração	Diferencial de Pressão (1 – 5 bar)	Tamanho
Nanofiltração	Diferencial de Pressão (5 – 20 bar)	Tamanho
Osmose inversa	Diferencial de Pressão (15 – 100 bar)	Afinidade
Diálise	Diferencial de Concentração	Tamanho
Eletrodiálise	Diferencial de Potencial Elétrico	Carga elétrica

Fonte: Adaptado de MULDER, M., 1996, p. 3 e p.16.

Nesse processo, sempre estão envolvidas três correntes: a alimentação, o permeado e o concentrado. A depender da aplicação visada, o produto poderá ser o concentrado ou o permeado. Os processos de separação por membranas têm sido usados em diversos segmentos para aplicações variadas, como pode ser observado na Tabela III.2.

Tabela III.2 - Exemplos de aplicação dos processos de separação por membrana

Área	Aplicações
Química	Quebra do azeótropo benzeno/hexano Recuperação de H <sub>2</sub> – Síntese de amônia Fracionamento CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> Fracionamento do ar: gás inerte e de corrente rica em O <sub>2</sub>
Biotecnologia e Farmacêutica	Separção de substâncias termolábeis Desidratação de etanol Purificação de enzimas Fracionamento de proteínas Esterilização de meios de fermentação Bioreatores a membranas
Alimentícia e Bebidas	Concentração de leite Concentração do soro do queijo Concentração de sucos de fruta Clarificação e desalcoolização de vinhos e cervejas
Tratamento de Águas	Dessalinização de águas Eliminação de traços de orgânicos Tratamento de esgotos municipais Desmineralização de águas para caldeiras Água ultrapura para indústria de eletrônica
Tratamento de Resíduos Industriais	Separção água/óleo Recuperação de índigo e PVA – Têxtil Recuperação de íons metálicos – Couro Recuperação de proteínas – Laticínio Tratamento de águas – Papel e Celulose
Medicina	Rim artificial – Hemodiálise Pulmão artificial – Oxigenadores Ar enriquecido em oxigênio Esterilização de soluções injetáveis Dosagem controlada de remédios

Fonte: HABERT, A. C., BORGES, C. P., NOBREGA, R., 2006, p. 17.

As principais vantagens dos processos de separação por membrana são: construção modular, simplicidade operacional, seletividade, economia de energia e possibilidade de separação de compostos termosensíveis (HABERT, A. C., BORGES, C. P., NOBREGA, R., 2006). Por outro lado, as desvantagens de maior relevância são relacionadas à redução de fluxo de permeado que as membranas podem sofrer com o tempo e às limitações de temperatura e resistência química que reduzem sua vida útil. A redução de fluxo de permeado pode ser causada por mudanças na morfologia da

membrana quando aplicada pressão, por polarização de concentração ou por formação de incrustações (HABERT *et al.*, 2005).

A polarização de concentração ocorre pelo acúmulo das espécies retidas próximo à superfície da membrana, o que provoca o aumento da concentração dessas espécies em relação ao seio da solução, como ilustrado na Figura 3.2. Como consequência, há um aumento da pressão osmótica na interface solução/membrana e a força motriz efetiva diminui, resultando na redução do fluxo permeado (HABERT *et al.*, 2005).

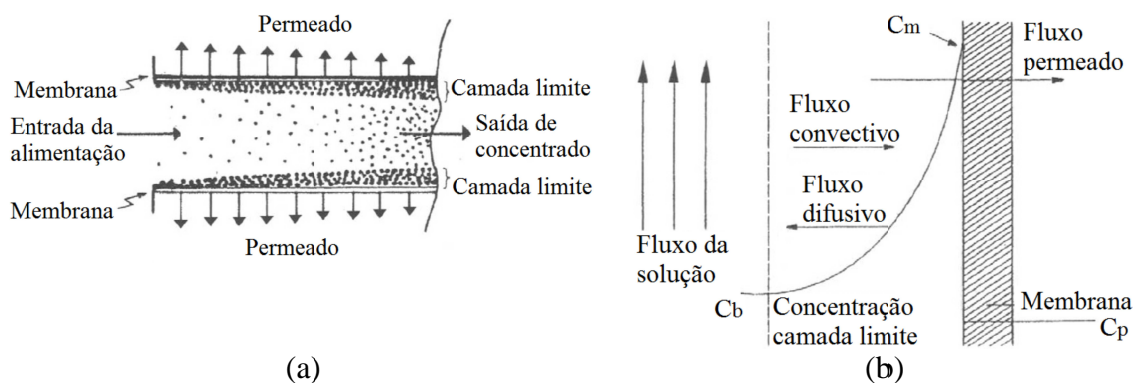


Figura 3.2: Modelo esquemático de polarização de concentração. (a) Desenvolvimento da concentração na camada limite. (b) Perfil da polarização de concentração, em que  $C_b$  é a concentração da espécie no seio da solução,  $C_m$  na superfície da membrana e  $C_p$  no permeado.

Fonte: Adaptado de SINGH, 2006, p.12.

O fenômeno de polarização de concentração é reversível e o declínio de fluxo deveria cessar ao se atingir o regime permanente. Entretanto, na prática, frequentemente é observada a redução contínua de fluxo (MULDER, 1997), que é resultado pela formação de incrustações. As incrustações podem ser originadas por deposição, por precipitação ou por microrganismos. A deposição compreende a adsorção de moléculas de soluto na superfície da membrana, a deposição superficial e o entupimento dos poros da membrana por partículas em suspensão. A precipitação, por sua vez, ocorre quando o limite de solubilidade do soluto é ultrapassado e ele precipita na superfície da membrana. Já a bioincrustação é o resultado das interações entre microrganismos na superfície da membrana e componentes presentes na alimentação do sistema.

Alguns métodos ou índices são utilizados com a finalidade de prever a propensão à incrustação por deposição da água de alimentação, tais como a turbidez, o *silt density index* (SDI) e *modified fouling index* (MFI), sendo os dois últimos os de mais ampla aplicação para a OI (KOO *et al.*, 2012).

A turbidez é uma medida da opacidade da água ou efluente que é ocasionada pela presença de partículas coloidais. A medida é feita pelo princípio nefelométrico, que consiste na leitura da intensidade da luz desviada pelas partículas, em um ângulo de 90°, em relação à luz incidente (DEZOTTI, 2008).

Os índices SDI e MFI são baseados em ensaios de filtração frontal da água de alimentação através de membrana de 0,45 µm, em batelada, a pressão constante (207 kPa ou 30 psi) (YIANTSIOS *et al.*, 2005; KOO *et al.*, 2012). Para obter o SDI, são coletados dados de fluxo em relação ao tempo para calcular um fator de tamponamento, ou seja, de decréscimo percentual de fluxo por um período de tempo específico (CORRAL *et al.*, 2014). Os dois primeiros intervalos de duração são os tempos para coletar um volume inicial de 500 mL ( $t_i$ ) e um volume final de 500 mL ( $t_f$ ). O terceiro intervalo de tempo ( $t$ ) pode ser de 5, 10 ou 15 min e corresponde ao intervalo de duração entre a coleta do primeiro volume de 500 mL e a do volume final de 500 mL (KOO *et al.*, 2012). O SDI é então calculado pela equação (3.1).

$$SDI_t = \frac{1 - \frac{t_i}{t_f}}{t} \times 100 \quad (3.1)$$

Desse modo, quando  $t$  é igual a 5 min, o índice recebe subscrito 5, SDI<sub>5</sub>, e pode variar de 0 a 20 %·min<sup>-1</sup>. Analogamente, o SDI<sub>10</sub> varia de 0 a 10 %·min<sup>-1</sup> e o SDI<sub>15</sub> de 0 a 6,67 %·min<sup>-1</sup>. Os fabricantes de membrana aconselham que o SDI<sub>5</sub> não exceda 4 ou 5 e estabelecem os limites de produtividade da membrana em função do SDI<sub>5</sub> da água de alimentação (YIANTSIOS *et al.*, 2005).

Por sua vez, o MFI é determinado utilizando o mesmo equipamento e procedimento que o SDI, entretanto o volume coletado de água permeada é registrado a cada 30 s, por um período de 15 min. Então o MFI é calculado pela inclinação da curva de tempo sobre o volume versus o volume acumulado, derivada da equação da teoria da filtração com formação de torta (KOO *et al.*, 2012).

Em relação à incrustação por precipitação, a sua formação ocorre na superfície da membrana, onde a supersaturação é intensificada pela polarização por concentração. De acordo com Habert *et al.* (2005), os compostos que comumente precipitam, em ordem de importância, são: carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, complexos de sílica, sulfato de bário, sulfato de estrôncio e fosfato de cálcio. A recomendação dos fabricantes de membranas é manter o concentrado com teores desses compostos aquém da saturação ou dosar anti-incrustantes, cujos limites e dosagens devem partir da indicação do fornecedor desses produtos.

Os anti-incrustantes são compostos que são adicionados à alimentação em pequenas quantidades, da ordem de partes por milhão, e usualmente atuam em sinergia com dispersantes poliméricos (NEOFOTISTOU e DEMADIS, 2004). Eles retardam a precipitação por inibição do crescimento de cristais e mantêm as partículas repelidas e dispersas. Todavia, cabe salientar que eles não evitam a precipitação, mas apenas a retardam e que, no caso de uma parada da planta, poderá ocorrer a precipitação. Os anti-incrustantes mais utilizados são o hexametáfosfato de sódio, os organofosfatos e os poliacrilatos (HABERT *et al.*, 2005).

A propensão de formação de incrustação de um composto é normalmente avaliada em relação a sua saturação. Quando a concentração de composto ultrapassa a concentração de saturação, ele atinge a supersaturação e pode precipitar. No caso específico do carbonato de cálcio, o seu potencial de incrustação é usualmente estimado pelo Índice de Saturação de Langelier. Esse índice é calculado pela diferença entre o pH da água que está sendo processada e o pH de saturação, que é função da temperatura, da força iônica e das concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$  (HABERT *et al.*, 2005). Um valor positivo do Índice de Langelier indica que a água está supersaturada e ocorrerá a deposição de  $\text{CaCO}_3$ , enquanto um valor negativo indica que a água está abaixo da saturação e irá dissolver todo  $\text{CaCO}_3$  (SINCERO e SINCERO, 2003).

### 3.1.1 Osmose inversa

A osmose é um fenômeno natural de transferência de massa de água entre uma solução diluída e uma solução concentrada. As soluções aquosas de sais, açúcar ou material dissolvido apresentam uma propriedade chamada pressão osmótica, que é proporcional

à concentração e à temperatura da solução bem como ao tipo das espécies iônicas presentes (SINGH, 2006). A osmose tem como força motriz a diferença de pressão osmótica entre a solução diluída e a solução concentrada e ocorre quando essas soluções têm como interface uma membrana semi-permeável. A água passa através da membrana para a solução concentrada até que a pressão do lado da solução diluída se iguale à pressão do lado da solução concentrada, situação em que é atingido o equilíbrio. Um exemplo desse fenômeno é a passagem da água presente no solo pelas raízes de uma planta.

Na osmose inversa (OI), é aplicado um diferencial de pressão ( $\Delta P$ ) no lado da solução concentrada superior à pressão osmótica ( $\pi$ ), o que provoca um fluxo de água através da membrana a partir da solução concentrada para a solução diluída, fluxo esse contrário ao sentido natural, como ilustrado na Figura 3.3.

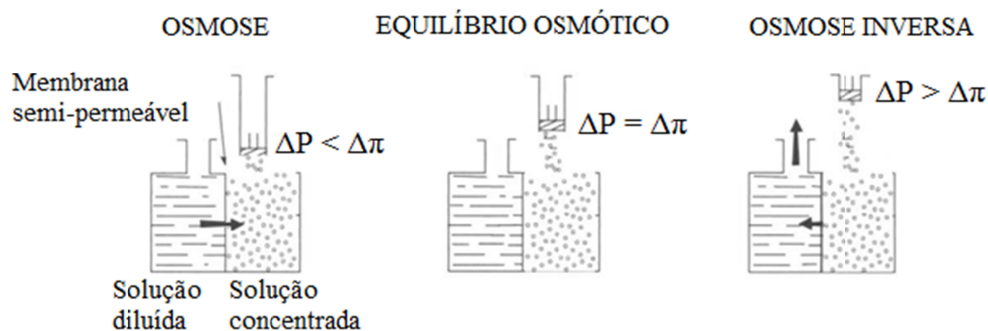


Figura 3.3: Fenômeno de osmose, em que  $\Delta P$  representa a pressão hidrostática e  $\pi$  a pressão osmótica

Fonte: SINGH, 2006, p.20.

A osmose inversa é um processo de dessalinização da água que utiliza membranas permeáveis à água, mas essencialmente impermeáveis aos sais (BAKER, 2004), de modo que tem sido largamente utilizada no tratamento de águas e efluentes. Como relatado por SINGH (2006), a OI possui importância relevante no fornecimento de água potável (água com teor de sólidos totais dissolvidos inferior a  $500 \text{ mg.L}^{-1}$ ), com aplicação extensiva e bem estabelecida na dessalinização, tanto de água do mar, quanto

de água salobra. Nas estações de água potável em que é tratada água subterrânea, a OI é normalmente utilizada para tratar apenas uma parte do volume total enquanto o restante é tratado por métodos convencionais. Para obter a qualidade desejada, o permeado é misturado à porção tratada de forma convencional (SQUIRE, 2000).

Nas plantas de dessalinização, o sistema de OI é construído a partir de vasos de pressão dispostos em módulos. Nos vasos de pressão, utilizam-se de seis a oito módulos espirais de osmose inversa, instalados em série e conectados através do canal do permeado. Os vasos são conectados em paralelo e em série para atender a capacidade e qualidade de água demandada. Nesse sentido, a configuração do sistema pode envolver estágios e passos. Na primeira situação, de único passo, a corrente do concentrado dos vasos de pressão do primeiro estágio é utilizada como alimentação para os vasos de pressão do segundo estágio (LERMONTOV *et al.*, 2013), conforme é exibido na Figura 3.4.

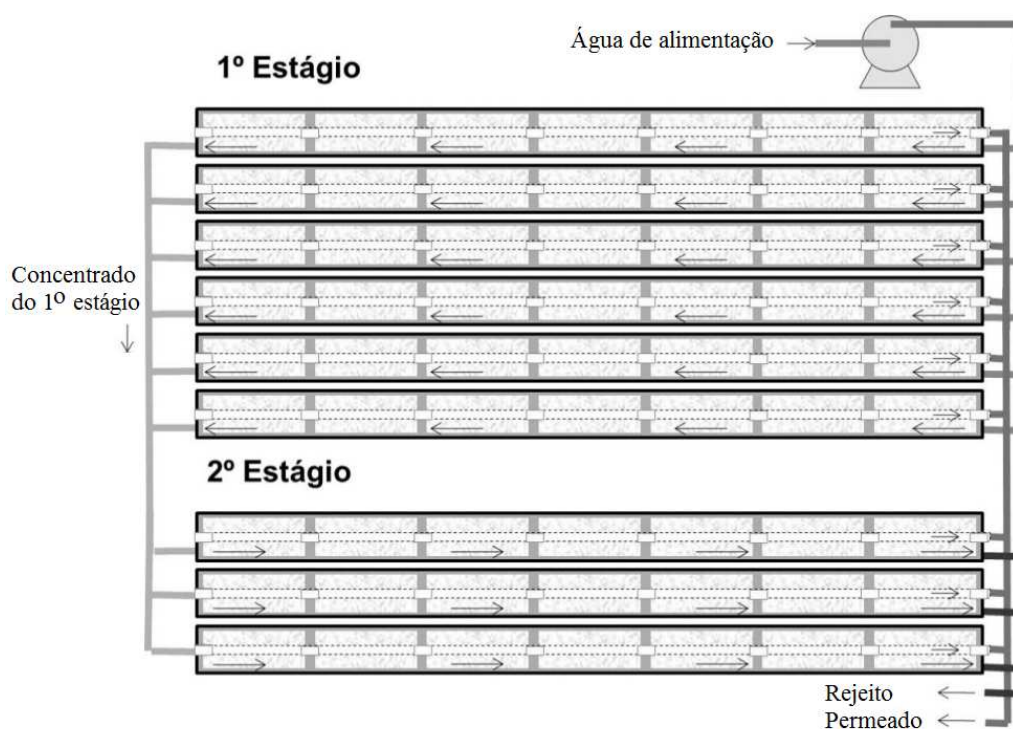


Figura 3.4: Ilustração de sistema de OI de único passo e dois estágios.

Fonte: Adaptado de ROVANI, 2006, p.42.

A configuração de dois passos é utilizada quando o permeado ainda não atingiu a qualidade requerida, utilizando-se o permeado do primeiro passo para alimentar os

vasos do segundo passo. Neste caso, a corrente concentrada do segundo passo, em geral, retorna para a alimentação do primeiro passo (LERMONTOV *et al.*, 2013).

A OI, assim como os outros PSM, está sujeita à redução de fluxo por formação de incrustações. No que se refere à formação de incrustação por precipitação, um parâmetro importante de projeto é a recuperação de permeado ( $\Theta$ ). A recuperação é definida como a razão entre a vazão de permeado ( $Q_p$ ) e a vazão de alimentação ( $Q_a$ ), exibida na equação 3.2. Outro parâmetro de relevância e ligado diretamente à recuperação, é o fator de concentração (FC) do concentrado. Como apresentado na equação (3.3), o FC é a razão entre a concentração do concentrado ( $C_c$ ) e a concentração da alimentação ( $C_a$ ).

$$\theta(\%) = 100x \frac{Q_p}{Q_a} \quad (3.2)$$

$$FC = \frac{C_c}{C_a} \quad (3.3)$$

À medida que a recuperação de permeado aumenta, o fator de concentração do concentrado também aumenta, assim como a sua propensão à precipitação. Entretanto, para recuperações superiores a 80%, o crescimento do fator de concentração é ainda mais acentuado. Por exemplo, ao se passar de uma recuperação de 90% para 98%, o fator de concentração aumenta de 10 para 48 (GABELICH, XU e COHEN, 2010). Assim sendo, o fator de concentração pode ser uma limitação a operar a OI com elevada recuperação de permeado. No caso de plantas de OI que são alimentadas por água do mar, com teor de sólidos totais dissolvidos da ordem de 35.000 mg.L<sup>-1</sup>, a recuperação do permeado é limitada em 30 a 40% pela elevada pressão osmótica do concentrado (DOW, 2015). Nesse caso, a formação de incrustações por precipitação não é um problema tão sério quanto em plantas alimentadas com água salobra.

### 3.2 Tecnologias em estudo para tratamento do concentrado

Diversas pesquisas têm sido realizadas com a finalidade de aumentar a recuperação dos PSM com foco no tratamento do concentrado gerado. As tecnologias avaliadas podem

ser divididas em três categorias básicas: processos térmicos, separação física de cargas e controle de cátions e/ou de ânions (GABELICH, XU e COHEN, 2010).

Os processos térmicos não têm a eficiência significativamente impactada pela salinidade da água de alimentação. Assim sendo, podem ser aplicados para uma faixa ampla de salinidade, de água salobra ao concentrado de água do mar, com teor de sólidos totais dissolvidos superior a  $300 \text{ g.L}^{-1}$  (GABELICH, XU e COHEN, 2010). Englobam basicamente os processos de destilação por membranas, compressão de vapor e concentração por congelamento. A destilação por membrana ainda é um processo emergente e não está disponível comercialmente em escala industrial (PÉREZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2012). A concentração por congelamento baseia-se no fenômeno natural da mudança de estado da água de líquido para sólido aumentando progressivamente a concentração de sólidos dissolvidos na porção não congelada. Entretanto, em função dos custos elevados de investimento e consumo energético quando comparada a outros processos, as pesquisas foram praticamente descontinuadas (GABELICH, XU e COHEN, 2010). Por outro lado, os processos de compressão de vapor (CV) são bem estabelecidos para a dessalinização de água do mar e tratamento de concentrado de OI, inclusive com aplicações industriais. Gabelich, Xu e Cohen (2010) relatam o uso da CV para tratar a purga de torres de resfriamento em usinas de geração de energia. Entretanto, a CV possui a desvantagem do elevado consumo energético.

Quanto ao tratamento do concentrado por separação física de cargas, Reahl (1990) foi um dos pioneiros nesse campo de pesquisa. Ele reportou o projeto e a operação da eletrodialise reversa (EDR), inserida no tratamento de concentrado da OI, de forma a aumentar a recuperação de 85% para 97%. Mais recentemente, Korngold, Aronov e Daltrophe (2009) investigaram o tratamento do concentrado de OI pela eletrodialise (ED) integrada a um precipitador contínuo de sulfato de cálcio. Os ensaios foram realizados em escala piloto e os autores relataram que foi possível operar com recuperação de 97 a 98%. Por sua vez, Zhang *et al.* (2011) avaliaram o tratamento de concentrado de OI oriundo do tratamento de efluentes por ED e ozonização, em escala piloto. Eles obtiveram a recuperação de 95% e concluíram que o uso da ED foi tecnicamente viável. Cabe ressaltar que a ED e EDR promovem tão somente a separação de íons. Assim sendo, não removem a sílica, que não se encontra ionizada nas

condições normais (REAHL, 1990). Esse fato pode ser considerado uma vantagem desses processos, pois eles ficam menos sujeitos à incrustação por sílica. Entretanto, devem ser aplicados com cautela quando é demandada água de elevada pureza.

No sentido do controle de cátion e/ou ânions, os maiores esforços têm sido envidados na utilização da precipitação intermediária do concentrado. Gabelich *et al.* (2007) avaliaram a integração da precipitação química intermediária à osmose inversa, em escala piloto, no tratamento de concentrado de uma planta de água potável. A precipitação foi induzida pela dosagem de hidróxido de sódio e os autores demonstraram a viabilidade de se alcançar 95% de recuperação. Rahardianto *et al.* (2007) introduziram a esse processo o conceito de aceleração da cristalização pelo uso de sementes. Eles também utilizaram hidróxido de sódio como alcalinizante e realizaram os ensaios em escala de laboratório, atingindo a recuperação de 98%, ao adicionar semente de calcita. Comstock, Boyer e Graf (2011) compararam o tratamento intermediário do concentrado por precipitação com hidróxido de cálcio, coagulação e troca iônica, em escala de laboratório. Eles utilizaram concentrados provenientes de OI e nanofiltração de seis fontes diferentes, todas de tratamento de água potável. Eles concluíram que os tratamentos foram capazes de produzir concentrado tratado com qualidade aproximadamente igual à fonte original de água.

O tratamento do concentrado por precipitação intermediária tem sido considerado um dos métodos mais promissores para aumentar a recuperação da OI e será o objeto deste estudo. Assim sendo, os princípios básicos da precipitação serão introduzidos.

### 3.2.1 Precipitação

A precipitação é um processo industrial de ampla utilização. O termo precipitação é usado para definir uma cristalização rápida, embora algumas vezes também indique um processo irreversível, haja vista que muitos precipitados são substâncias insolúveis. Os produtos da cristalização, por sua vez, podem se dissolver novamente se as condições originais de temperatura e concentração da solução são reestabelecidas. Outra distinção do processo de precipitação é que ele geralmente se inicia sob elevada supersaturação, resultando em rápida nucleação e, por conseguinte, criando um vasto número de cristais

primários muito pequenos (MULLIN, 2001). A precipitação segue as mesmas etapas da cristalização: supersaturação, nucleação e crescimento cristalino.

A supersaturação é o afastamento da solução em relação à condição de equilíbrio químico, a saturação. No caso da precipitação, a supersaturação pode ser alcançada por reação química, adição de um anti-solvente, adição de uma solução salina (*salting out*) ou mudança de pH (GIULIETTI *et al.*, 2001).

A nucleação é a formação de núcleos cristalinos pela reorganização de parte do soluto para o estado sólido, em uma solução supersaturada. A nucleação pode ser primária, quando o sistema não contém material cristalino, ou secundária, em que é induzida pela adição de cristais. A nucleação primária subdivide-se ainda em homogênea, que é espontânea, e em heterogênea, que é induzida por partículas estranhas (MULLIN, 2001). No caso da precipitação, devido à elevada supersaturação, a nucleação primária heterogênea é normalmente dominante e, em alguns casos, até a nucleação primária homogênea pode ocorrer (GIULIETTI *et al.*, 2001).

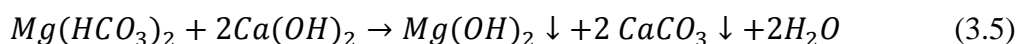
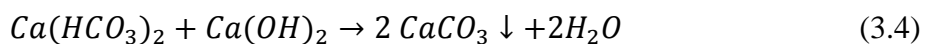
O crescimento cristalino envolve o transporte das unidades em crescimento (moléculas ou íons do soluto) do seio da solução para a superfície do cristal e a sua incorporação à rede cristalina (GIULIETTI *et al.*, 2001). A nucleação e o crescimento definem o tamanho e a forma dos cristais.

A precipitação é largamente utilizada no tratamento de água e efluentes. No tratamento de água, a precipitação é usada na remoção da dureza, ferro e manganês (FLYNN, 2009). Além disso, no tratamento de efluentes, a precipitação é utilizada na remoção de fósforo, metais pesados e substâncias orgânicas dissolvidas (METCALF & EDDY, 2003).

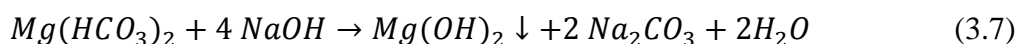
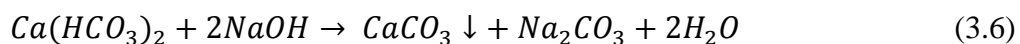
A dureza da água é tradicionalmente definida como a sua capacidade em consumir sabão. Na prática, a dureza total equivale ao conteúdo de cálcio e magnésio da água, embora metais pesados como ferro e manganês também consumam sabão (FLYNN, 2009). A dureza pode ser carbonato ou não carbonato. A dureza carbonato, também denominada dureza temporária, ocorre quando está associada ao íon bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). Já a dureza não carbonato ou permanente, sucede da associação

com outros íons. Um exemplo de dureza carbonato é  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  e de dureza não carbonato é  $\text{MgCl}_2$  (SINCERO e SINCERO, 2003).

Ao propósito de remover a dureza da água por precipitação, normalmente utiliza-se como reagente a cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , hidróxido de cálcio) ou cal sodada (mistura de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e  $\text{NaCO}_3$ , carbonato de sódio). O primeiro reagente remove apenas a dureza temporária enquanto o segundo remove ambos os tipos de dureza. As reações de remoção da dureza temporária com hidróxido de cálcio são apresentadas nas equações (3.4) e (3.5).



A soda cáustica ( $\text{NaOH}$ , hidróxido de sódio) também é utilizada como reagente com intuito de remover a dureza da água. As reações de remoção da dureza temporária são exibidas nas equações (3.6) e (3.7). Nesse caso, para remoção da dureza permanente pode ser usado  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , produzido na reação ou adicionado (MOODY, 1991).



A escolha do reagente mais adequado depende da composição da água ou efluente e do custo com o produto químico. Quando a relação molar de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  é de aproximadamente 1:1, o uso do hidróxido de sódio pode se tornar viável, uma vez que a dosagem de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  demanda a adição de  $\text{NaCO}_3$ , para retirar o  $\text{Ca}^{2+}$  adicionado (GABELICH *et al.*, 2007).

## 4 METODOLOGIA

Inicialmente, foi realizada a caracterização físico-química do concentrado, com frequência semanal, por um período de nove meses. A partir dos resultados da caracterização, avaliou-se quais compostos limitavam o tratamento do concentrado por um passo de OI, com dois estágios, através do software *Reverse Osmosis System Analysis* (ROSA).

Em seguida, foram realizados os ensaios de tratamento do concentrado por precipitação, em três etapas, na escala de laboratório. Em todas as etapas, a eficiência da precipitação foi verificada pela remoção percentual de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  da fase líquida. Ademais, todos os ensaios de uma etapa foram conduzidos com a mesma amostra de concentrado. Os alcalinizantes selecionados para a precipitação do concentrado foram o hidróxido de sódio e hidróxido de cálcio. A seleção do primeiro é baseada na elevada alcalinidade do concentrado, o que permite precipitar grande parte dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  como  $\text{CaCO}_3$ , similarmente ao observado por Gabelich *et al.* (2007) no tratamento de concentrado de dessalinização para produção de água potável. Por sua vez, o hidróxido de cálcio foi escolhido por possuir ampla utilização no abrandamento de água.

Na primeira etapa, buscou-se definir as condições experimentais bem como fazer a prospecção do uso da precipitação e dos alcalinizantes hidróxido de sódio e hidróxido de cálcio. Os fatores avaliados foram a dosagem de alcalinizante, o tempo de mistura rápida ( $T_{mr}$ ) e o tempo de mistura lenta ( $T_{ml}$ ). A mistura rápida é o estágio do ensaio em que são introduzidos os reagentes, sob agitação vigorosa, com intuito de distribuí-los uniformemente e favorecer as reações. Por sua vez, a mistura lenta é o estágio de mistura moderada, que tem a finalidade de permitir o crescimento dos cristais e a agregação das partículas.

Na segunda etapa, foi avaliado o impacto do pH final da precipitação e do uso de semente na remoção dos compostos incrustantes. A partir dos resultados de remoção da fase líquida, foram selecionadas algumas condições para observação do precipitado obtido em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), com intuito de avaliar a forma e tamanho dos cristais.

Na terceira etapa de ensaios, investigou-se uma faixa mais ampla de pH final de precipitação para o hidróxido de cálcio, com a finalidade de subsidiar a sua comparação com o hidróxido de sódio.

Por fim, avaliou-se novamente a dessalinização do concentrado tratado para o alcalinizante selecionado em um passo de OI, com dois estágios, para duas condições de pH final, através do ROSA. Desse modo, verificou-se o potencial de recuperação de água obtido pelo tratamento proposto e selecionou-se o pH final mais adequado.

## **4.1 Materiais**

### **4.1.1 Concentrado**

O concentrado utilizado neste estudo foi coletado em uma planta industrial de OI, pertencente ao processo de desmineralização de água para a produção de água de caldeira. A planta possui módulos espirais de OI, de único passo e dois estágios. O concentrado foi coletado na saída do segundo estágio.

A água afluenta à planta de OI é oriunda de tratamento primário por clarificação e filtração da água bruta, que é captada em manancial superficial, integrante da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba, MG. A primeira etapa do processo de desmineralização é a de cloração da água em leitos de carvão ativado. A de cloração tem a finalidade de remover o cloro livre presente, pois ele pode oxidar tanto as membranas de OI quanto as resinas da troca iônica. Posteriormente, a água passa por filtros multimídia, para a remoção de sólidos suspensos e recebe a adição dos produtos químicos: metabissulfito de sódio, anti-incrustantes e hidróxido de sódio. Após filtrada, a água é tratada nos módulos de OI. Finalmente, a água permeada passa por leitos de troca iônica que realizam o seu polimento, removendo grande parte dos sais remanescentes e produzindo água de elevada pureza. O fluxograma do tratamento de água, incluindo o processo de desmineralização, pode ser visto no diagrama de blocos exibido na Figura 4.1.

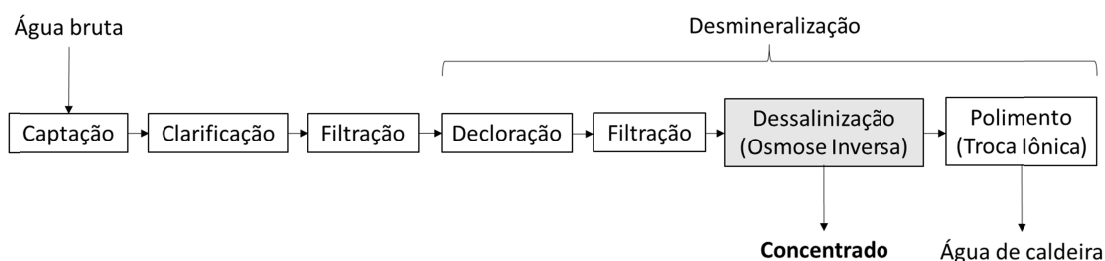


Figura 4.1: Diagrama de blocos do tratamento de água

#### 4.1.2 Reagentes utilizados nos ensaios de precipitação

Na primeira etapa de testes foram utilizadas micropérolas de hidróxido de sódio pró-análise (P.A.) da marca Synth<sup>1</sup> para o preparo de 1 L da solução estoque, com concentração de 24 g.L<sup>-1</sup>. No caso do hidróxido de cálcio, usou-se o reagente P.A. da marca Pro Analysis para o preparo de 1 L de suspensão a 22,88 g.L<sup>-1</sup>, utilizada como solução estoque.

Na segunda etapa, utilizou-se solução estoque de hidróxido de sódio com a mesma concentração. A solução estoque de hidróxido de cálcio foi preparada com o mesmo reagente, na concentração de 68,64 g.L<sup>-1</sup>. Como semente foi utilizada quartzo, de 53 a 160 µm, denominada AQ-120 e proveniente da Mineração Jundu Ltda<sup>2</sup>.

Finalmente, na terceira etapa foi novamente preparada solução estoque de hidróxido de cálcio, com o mesmo reagente, na concentração de 65,0 g.L<sup>-1</sup>.

#### 4.1.3 Equipamentos utilizados nos ensaios de precipitação

Os ensaios de precipitação foram conduzidos em equipamento de Teste de Jarros da marca Ethik Technology<sup>3</sup>, modelo 218-6 LDB, nos próprios reatores prismáticos de

<sup>1</sup> <http://www.labsynth.com.br/>

<sup>2</sup> <http://mjundu.com.br/>

<sup>3</sup> <http://www.ethik.com.br/>

acrílico do equipamento. As medidas de pH foram executadas em medidor de pH de bancada da marca Quimis<sup>4</sup>, modelo Q400A. Os alcalinizantes foram pesados em balança de precisão da marca Shimadzu<sup>5</sup>, modelo AY 220. Após os ensaios, as amostras foram filtradas sob vácuo, em papel de filtro, JP40, faixa branca, marca J Prolab<sup>6</sup>.

#### 4.1.4 Métodos analíticos

O concentrado e o concentrado tratado por precipitação foram analisados usando as normas do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998), da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

O *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998) foi utilizado como padrão para as análises de: Cálcio (3500 Ca B. EDTA *Titrimetric Method*); Magnésio (3500- Mg *Magnesium* e 2340C. *Hardness* EDTA); Sílica (4500-SiO<sub>2</sub> D. *Heteropoly Blue method*); Carbono orgânico dissolvido – COD (5310 B. *High-Temperature Combustion Method*); Sulfato (4500-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> D. *Gravimetric Method with Drying of Residue*); Demanda química de oxigênio – DQO (5220 D. *Closed Reflux, Colorimetric Method*); Sólidos Suspensos Totais – SST (2540 D. *Total suspended Solids dried at 103 – 105°C*); Turbidez (2130 B. *Nephelometric Method*) e Dureza (2340 C. *Hardness EDTA*).

A ASTM norteou as análises de: Alcalinidade - D 1067 (ASTM, 1996); Cloreto - D 512 (ASTM, 2004); pH - D 1293 (ASTM, 2012), Nitrogênio amoniacal D 1426 - (ASTM, 2008) e *Silt Density Index* (SDI) - D4189 (ASTM, 2014).

A Condutividade foi medida em conformidade com a ABNT NBR 14340 (1999).

---

<sup>4</sup> <http://www.quimis.com.br/>

<sup>5</sup> <http://www.shimadzu.com.br/>

<sup>6</sup> <http://www.jprolab.com.br/>

Foram utilizados os seguintes equipamentos: balança analítica digital Shimadzu, modelo Aux 220; analisador de carbono orgânico Shimadzu, modelo V-CSH; estufa marca Cole Parmer<sup>7</sup>, modelo 05015-50; espectrofotômetro HACH<sup>8</sup>, modelo DR 3900; condutivímetro da marca HACH, modelo HQ 14d; turbidímetro da marca HACH; modelo 2100Q; titulador automático da marca Metrohm<sup>9</sup>, modelo 855 Robotic Titrator e digestor da marca HACH, modelo DRB 200.

As fotomicrografias do precipitado e da semente foram obtidas em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca JEOL<sup>10</sup>, modelo JSM - 6360LV. O equipamento possui espectrômetro de raio-X de energia dispersiva (EDS), que foi utilizado para identificação e análise química semi-quantitativa. As amostras foram previamente recobertas por camada de 4 nm de Au, no equipamento BAL-TEC<sup>11</sup>, modelo MSC 010.

#### 4.1.5 Ferramentas computacionais

Para o delineamento experimental e avaliação dos dados obtidos, foi usado o software estatístico Minitab®<sup>12</sup>, versão 17.1.0. As análises de variância e os pós-testes foram feitos para  $p \leq 0,05$ .

Para dimensionamento do sistema de OI, foi utilizada a rotina computacional *Reverse Osmosis System Analysis* (ROSA), versão 9.1, da empresa Dow Chemical<sup>13</sup>. Essa rotina permite avaliar o potencial de incrustação da alimentação da OI bem como do

---

<sup>7</sup> <http://www.coleparmer.com/>

<sup>8</sup> <http://www.hach.com/>

<sup>9</sup> <http://www.metrohm.com.br/>

<sup>10</sup> <http://www.jeol.com.br/>

<sup>11</sup> A BAL-TEC foi comprada pela Leica: <http://www.leica-microsystems.com/products/em-sample-prep/>

<sup>12</sup> <http://www.minitab.com/pt-br/>

<sup>13</sup> [http://www.dowwaterandprocess.com/en/Resources/ROSA\\_System\\_Design\\_Software](http://www.dowwaterandprocess.com/en/Resources/ROSA_System_Design_Software)

concentrado produzido, através dos cálculos de percentual de saturação e do Índice de Saturação de Langelier.

#### 4.2 Metodologia dos ensaios de precipitação

Foi utilizado o volume de 1 L de concentrado para cada reator. Os alcalinizantes foram adicionados sob agitação vigorosa (300 rpm), etapa denominada mistura rápida. Posteriormente, a agitação foi reduzida (100 rpm) para favorecer o crescimento dos cristais e a coagulação, etapa de mistura lenta. Finalmente, a agitação foi cessada para possibilitar a decantação e as amostras foram filtradas a vácuo. O efluente filtrado foi diluído a 50% v/v com a finalidade de se afastar da condição de supersaturação e interromper a precipitação.

As condições dos ensaios de precipitação realizados em Testes de Jarros encontradas na literatura não foram uniformes. Para o tempo de mistura rápida, foram utilizados valores de 1 a 5 minutos e, para o tempo de mistura lenta, de 30 a 60 minutos (COMSTOCK, BOYER e GRAF, 2011; GREENLEE *et al.*, 2010; HSU e SINGER 2009; RAHARDIANTO, MCCOOL e COHEN, 2010; RENOUE *et al.*, 2008). Como os fatores tempo de mistura rápida e tempo de mistura lenta podem interferir nos resultados da precipitação, na primeira etapa de testes foi realizado um piloto, com delineamento experimental  $2^3$  completo, um para cada alcalinizante, de forma a definir as condições experimentais. Os níveis escolhidos para cada fator são exibidos nas Tabelas IV.1 e IV.2.

Tabela IV.1 – Níveis dos fatores para os ensaios com dosagem de NaOH

Fator	Nível	
	Baixo	Alto
Dosagem (mg.L <sup>-1</sup> )	222,7	445,4
Tmr (min)	2	5
Tml (min)	20	40

Tabela IV.2 – Níveis dos fatores para os ensaios com dosagem de  $\text{Ca(OH)}_2$ 

Fator	Nível	
	Baixo	Alto
Dosagem ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	272	544
Tmr (min)	2	5
Tml (min)	20	40

No caso de  $\text{Ca(OH)}_2$ , a dosagem mínima foi estabelecida a partir da quantidade estequiométrica requerida para precipitar todo o  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  presentes, baseado na composição média do concentrado salino. A dosagem máxima foi estabelecida como o dobro da dosagem mínima, uma vez que a priori deveria ser suficiente para precipitar todo o  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , mesmo nas composições de maior dureza do concentrado salino. Para o NaOH, as dosagens foram estabelecidas considerando o equivalente dos íons OH<sup>-</sup>. Essa premissa foi adotada como ponto de partida, embora se saiba que a dissociação desses alcalinizantes não é a mesma. Como variáveis resposta, foram verificadas a remoção percentual de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SiO}_2$ , Sulfato e, para os testes com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , alcalinidade. Os ensaios foram realizados em triplicata e em ordem aleatória. A partir dos resultados da primeira etapa, definiu-se como padrão para os testes de precipitação o Tmr de 5 min e Tml de 40 min.

Na segunda etapa, os ensaios tiveram a finalidade de comparar os alcalinizantes, fixando-se o pH final bem como verificar se a utilização de sementes favoreceria a remoção dos compostos avaliados. Desse modo, foi concebido um experimento fatorial  $2^2$  com ponto central, em que os fatores foram o pH final (8,5; 10,0 e 11,5) e a dosagem de semente (0, 25 e 50 mg). Inicialmente, foi necessário fazer a curva de dosagem versus o pH para cada alcalinizante, com o intuito de definir a dosagem necessária para atingir o pH determinado. Para traçar a curva, alíquotas do alcalinizante foram adicionadas, sucessivamente, em 1 L de concentrado, sob agitação de 100 rpm. Após três minutos da adição da alíquota, era realizada a leitura de pH. Posteriormente, com as dosagens definidas, foram realizados testes de hipótese para confirmar que não haveria diferença no pH final médio de cada alcalinizante. Para o teste de hipótese, foi dosado a quantidade definida de alcalinizante em 500 mL de concentrado, sob agitação de 100 rpm e, após 3 minutos, realizada a leitura de pH. Para cada ponto de pH, foram

realizadas cinco réplicas por alcalinizante. Finalmente, após a confirmação das dosagens necessárias de alcalinizante, foram iniciados, em ordem aleatória e com cinco réplicas, os ensaios do planejamento fatorial. A semente foi adicionada ao concentrado antes do início da agitação.

Na terceira etapa, buscou-se ampliar a dosagem do  $\text{Ca(OH)}_2$ , com a intenção de verificar a remoção dos compostos incrustantes por esse alcalinizante na faixa de pH de 10,0 a 11,5. Os ensaios foram realizados variando-se a dosagem de  $\text{Ca(OH)}_2$  de  $422,5 \text{ mg.L}^{-1}$  a  $910 \text{ mg.L}^{-1}$ .

### **4.3 Metodologia das simulações**

O software ROSA é utilizado no dimensionamento de sistemas de OI e demanda a inclusão da composição da água de alimentação e da configuração do sistema. Na Figura 4.2 é apresentada a tela de interface com o usuário utilizada para a entrada dos dados de composição da alimentação. Na Figura 4.3 é possível visualizar a tela de alimentação dos dados de configuração do sistema: a vazão a ser tratada, a recuperação desejada, o número de passos e estágios, o número de elementos por estágio e a membrana desejada.

A partir dos dados fornecidos pelo usuário, o ROSA calcula várias propriedades da alimentação e do concentrado, tais como: a pressão osmótica, o Índice de Saturação de Langelier, o percentual da saturação de  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{SrSO}_4$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Mg(OH)}_2$ . Além disso, o software fornece informações sobre o sistema como: a pressão de bombeamento demandada, o consumo de energia, a recuperação e o fluxo de permeado e concentrado por elemento.

File Options Help

System Permeate Flow: 18.75 m<sup>3</sup>/h System Feed Flow: 25.00 m<sup>3</sup>/h System Recovery: 75.01%

Water Type: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5 Open Water Profile Library

Feed Percentage: 100.0 (%) Feed Number: 1 Feed Streams: 1

Ions	mg/l	ppm CaCO <sub>3</sub>	meq/l	Total Conc.(mg/l)
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NH <sub>3</sub> )	6.78	18.793	0.376	6.78
Potassium (K)	0	0.000	0.000	0.00
Sodium (Na)	161.941	352.199	7.044	161.94
Magnesium (Mg)	66.63	274.062	5.481	66.63
Calcium (Ca)	80.85	201.722	4.034	80.85
Strontium (Sr)	0	0.000	0.000	0.00
Barium (Ba)	0	0.000	0.000	0.00
Carbonate (CO <sub>3</sub> )	2.232	3.719	0.074	2.23
Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> )	239	195.886	3.918	239.00
Nitrate (NO <sub>3</sub> )	0	0.000	0.000	0.00
Chloride (Cl)	316	445.661	8.913	316.00
Fluoride (F)	0	0.000	0.000	0.00
Sulfate (SO <sub>4</sub> )	193.64	201.708	4.034	193.64
Silica (SiO <sub>2</sub> )	25.03	n.a.	n.a.	25.03
Boron (B)	0	n.a.	n.a.	n.a.

System Temp: 25.0 °C System pH: 7.95 Save Water Profile to Library

Total Dissolved Solids: 1091.8 mg/l

Feed Parameters  
 Temperature: 25.0 °C  
 Flow Rate: 25.0 m<sup>3</sup>/h  
 pH: 7.95

Charge Balance  
 Cations: 16.94  
 Anions: 16.94  
 Balance: 0.00

Add Sodium  
Add Calcium  
Adjust Cations  
Adjust Anions  
Adjust All Ions

Note: Any changes in raw feedwater composition will affect scaling calculations. Please review scaling calculations.

1) Project Information 2) Feedwater Data 3) Scaling Information 4) System Configuration 5) Report 6) Cost Analysis

Figura 4.2: Tela de entrada da composição da alimentação

File Options Help

System Permeate Flow: 18.75 m<sup>3</sup>/h System Feed Flow: 25.00 m<sup>3</sup>/h System Recovery: 75.01%

No. Passes: 1 Current Pass: 1 Dosing Chemical: None Adjusted pH: None

Configuration for Pass 1  
 Stages in Pass: 2 Permeate Flow: 18.75 m<sup>3</sup>/h  
 Flow Factor: 0.85 Recovery: 75.00 %  
 Operating Temp: 25.0 °C Feed Flow: 25.00 m<sup>3</sup>/h  
 Permeate Flux: 16.82 l/mh

Configuration for Stage 1 in Pass 1  
 Stage in Pass: Stage 1 Feed Pressure: None bar  
 Boost (2-pass): Calc Back Pressure: None bar  
 Same back pressure for all stages:   
 Pressure vessels in each stage: 3  
 Elements in each vessel: 6  
 Total elements in stage: 18  
 Products: BW30-400  
 Use the same element in the pass:

Recirculation Loops  
 Blend Permeate  
 Pass 1 Conc to Pass 1 Feed  
 Pass 2 Conc to Pass 1 Feed

System Configuration

1) Project Information 2) Feedwater Data 3) Scaling Information 4) System Configuration 5) Report 6) Cost Analysis

Figura 4.2: Tela de entrada da configuração do sistema

Em todas as simulações realizadas, foi selecionada a membrana BW30-400, produzida pela Dow Chemical. Esse tipo de membrana é o mesmo utilizado na planta industrial de OI. Na Tabela IV.3, são apresentadas algumas informações sobre essa membrana.

Tabela IV.3: Descrição da membrana BW30-400

<b>Modelo</b>	<b>Sal rejeitado no teste</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Vazão de permeado teste (L.h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Pressão de teste (bar)</b>	<b>Permeabilidade (L.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>.bar<sup>-1</sup>)</b>
BW30-400	NaCl	37	1666,7	15,5	2,91

Fonte: DOW, 2015.

Para as situações avaliadas, foram realizadas diversas simulações com a finalidade de se obter a maior recuperação de água possível, sem infringir os parâmetros de projeto estabelecidos pelo fabricante, tais como a vazão máxima de permeado por elemento, a vazão mínima de concentrado e a recuperação máxima de permeado por elemento. Quando algum parâmetro de projeto é extrapolado, o ROSA emite um aviso a respeito. Desse modo, na maioria das situações, foi necessário utilizar o recurso de recircular parte do concentrado do segundo estágio para a alimentação, com intuito de aumentar a recuperação e enquadrar esses parâmetros de projeto. Em todos os casos, foi utilizado apenas um passo, com dois estágios.

Com o intuito de se deixar os cálculos na base 100, foi considerado uma vazão de alimentação da planta de OI existente de 100 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Como a planta possui recuperação de 75%, obtém-se a vazão de 25 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> de concentrado para tratamento, que foi utilizada em todas as simulações.

#### 4.3.1 Simulações com o concentrado sem tratamento

As simulações com concentrado sem tratamento visaram identificar quais compostos limitavam o tratamento do concentrado por mais dois estágios de OI. Foram selecionadas três composições variadas dos dados de caracterização do concentrado, denominados como Alimentação 1, 2 e 3, para evitar confusão com o novo concentrado obtido na simulação (Tabela V.2). Durante a seleção, buscou-se varrer uma faixa ampla dos compostos mais incrustantes Ca<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e SiO<sub>2</sub>, com a intenção de avaliar o

impacto da variação da composição da alimentação. Na Figura 4.3 é apresentado um diagrama de blocos para elucidar o arranjo simulado.

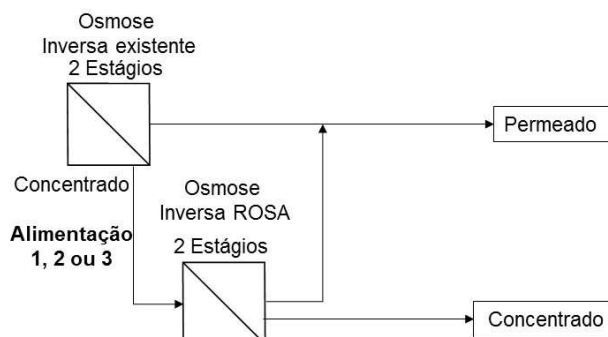


Figura 4.3: Diagrama de blocos das simulações com o concentrado sem tratamento

Embora o concentrado sem tratamento tenha apresentado  $SDI_5$  superior a  $5\% \cdot \text{min}^{-1}$ , foi selecionada a classificação da alimentação como “*Wastewater with Conventional pretreatment,  $SDI < 5$* ”, haja vista que não existe a opção de  $SDI$  superior no ROSA, por contrariar a recomendação do fabricante.

As configurações do sistema foram variadas com intuito de se obter a maior recuperação possível. Assim sendo, chegou-se em três condições similares para cada alimentação, denominadas Casos I, II e III, cujo sumário é exibido na Tabela IV.4.

Tabela IV.4: Configurações do sistema para os Casos I, II e III

Caso	Recuperação (%)	Recirculação ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	Vasos de pressão		Elementos por vaso
			1º estágio	2º estágio	
I	52 ou 53 <sup>(*)</sup>	-	3	1	6
II	70	2,5	3	2	6
III	75	3,0	3	2	6

<sup>(\*)</sup>Para o concentrado 1, alcançou-se a recuperação máxima de 52%, sem recirculação. Para os demais, 53%.

Por fim, os resultados dos cálculos de saturação dos compostos incrustantes emitidos pelo ROSA ao se variar a alimentação (1, 2 e 3) foram comparados para os Casos I, II e III.

### 4.3.2 Simulações com o concentrado tratado por precipitação

As simulações do concentrado tratado por precipitação tiveram a intenção de avaliar o benefício do tratamento proposto em relação à redução da propensão à incrustação do concentrado. Na Figura 4.4 é exibido um diagrama de blocos para esclarecer o arranjo simulado.

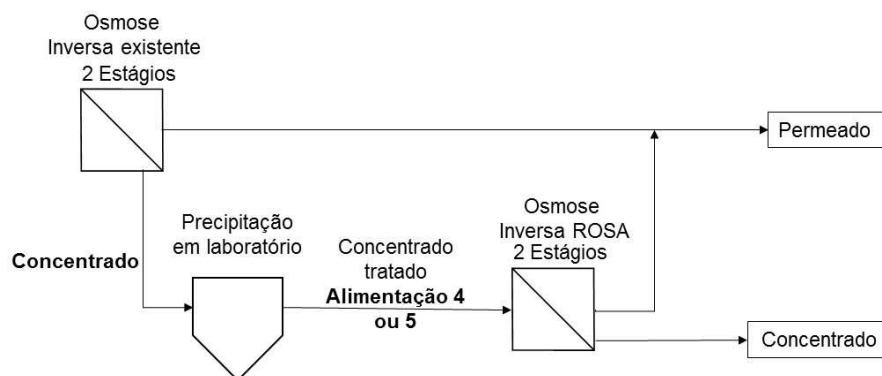


Figura 4.4: Diagrama de blocos das simulações com o concentrado tratado por precipitação

Foram escolhidas duas composições do concentrado tratado por precipitação, denominados como Alimentação 4 e 5 (Tabela V.15). Assim como para as simulações anteriores, foram variadas as configurações do sistema com intuito de se obter a maior recuperação possível. Desse modo, também se chegou em três condições similares para cada alimentação, denominadas Casos IV, V e VI, cujo sumário é apresentado na Tabela IV.5.

Tabela IV.5: Configurações do sistema para os Casos IV, V e VI

Caso	Recuperação (%)	Recirculação (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	Vasos de pressão		Elementos por vaso
			1º estágio	2º estágio	
IV	52 ou 53 <sup>(*)</sup>	-	3	1	6
V	70	2,5	3	2	6
VI	74 ou 75 <sup>(*)</sup>	3,0	3	2	6

<sup>(\*)</sup>Para a Alimentação 5, foi possível alcançar a recuperação máxima de 52%, no Caso IV e 74% no Caso VI.

Após comparar os resultados da Alimentação 4 e 5, verificou-se que a Alimentação 4 apresentava supersaturação do concentrado em sílica no Caso V. Portanto, foi buscada a configuração da OI no ROSA para se obter a máxima recuperação com essa alimentação, mantendo o concentrado abaixo da saturação, que corresponde ao Caso VII, exposto na Tabela IV.6.

Tabela IV.6: Configurações do sistema para o Caso VII

Caso	Recuperação (%)	Recirculação ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	Vasos de pressão		Elementos por vaso
			1º estágio	2º estágio	
VII	68	2,0	3	2	6

Finalmente, a partir dos resultados da simulação, definiu-se a condição mais adequada de tratamento do concentrado e verificou-se a recuperação de água esperada.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização físico-química do concentrado

O concentrado foi caracterizado com frequência semanal durante o período de 27 de março a 26 de dezembro de 2014. A média e o desvio padrão dos resultados analíticos são expostos na Tabela V.1

Tabela V.1 – Caracterização do concentrado

Análise	Unidade	Média	Desvio padrão
Cálcio	mg.L <sup>-1</sup>	112,6	9,2
Magnésio	mg.L <sup>-1</sup>	21,2	5,4
Dureza Cálcica	mg.L <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>	281,1	38,3
Dureza Total	mg.L <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>	367,0	48,6
Alcalinidade	mg.L <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>	433,5	100,0
Nitrogênio amoniacal	mg.L <sup>-1</sup> N-NH <sub>3</sub>	10,7	7,7
Sílica	mg.L <sup>-1</sup>	60,4	10,4
Cloreto	mg.L <sup>-1</sup>	509,9	133,6
Sulfato	mg.L <sup>-1</sup>	272,6	59,6
Carbono orgânico dissolvido	mg.L <sup>-1</sup>	16,9	7,7
Demanda química de oxigênio	mg.L <sup>-1</sup>	58,8	12,7
Sólidos suspensos totais	mg.L <sup>-1</sup>	6,2	5,5
pH		8,07	0,27
Condutividade elétrica	mS.cm <sup>-1</sup>	2,6	0,8
SDI <sub>5</sub>	%.min <sup>-1</sup>	18,3	1,6
Turbidez	NTU	0,84	0,42

Número de amostras (n) = 34.

O concentrado é considerado, em termos de dureza, como água muito dura, classificação atribuída a água com dureza total superior a 300 mg.L<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> (DEZOTTI, 2008).

Em relação à salinidade, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2005), qualifica as águas em doce, salobra e salina. São consideradas doces as águas com salinidade igual ou inferior a 0,50 ‰. (500 mg.L<sup>-1</sup>), salobras com salinidade entre 0,5 ‰. e 30 ‰. (500 a 30.000 mg.L<sup>-1</sup>) e salinas com salinidade superior a 30 ‰. (30.000 mg.L<sup>-1</sup>). Desse modo, para classificar o concentrado em relação a sua

salinidade, necessita-se do teor de sólidos totais dissolvidos (STD), que pode ser estimado através de correlação com a condutividade elétrica (PINTO, 2006), conforme a equação 5.1, válida para a faixa de condutividade de 1.000 a 4.000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Obtém-se a concentração de STD de 1950  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , teor suficiente para classificar o concentrado como água salobra.

$$STD (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) \cong \text{Condutividade } (\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}) \times (0,75) \quad (5.1)$$

No que se refere à propensão de deposição de material particulado, já vislumbrando a aplicação de um outro estágio de OI, verificou-se a adequação dos valores de turbidez e do SDI<sub>5</sub>. É indicado que a água de alimentação da OI possua turbidez inferior a 2,0 NTU (JOHIR *et al.*, 2009) e o concentrado atende essa recomendação, haja vista que apresentou turbidez de  $0,84 \pm 0,42$  NTU. Contudo, quando se avalia o SDI<sub>5</sub>, o concentrado apresenta valor bastante superior ao aconselhado pelos fabricantes de membrana:  $18,3 \pm 1,6$   $\% \cdot \text{min}^{-1}$ , frente ao valor máximo recomendado de  $5$   $\% \cdot \text{min}^{-1}$  (YIANTSIOS *et al.*, 2005). Embora esse resultado pareça inviabilizar a utilização de outro estágio de OI, vale lembrar que o tratamento por precipitação pode causar a redução do SDI<sub>5</sub>, proporcionada pela remoção de compostos que contribuem para o aumento desse índice, tais como a matéria orgânica natural e a sílica. Além disso, embora o SDI tenha aceitação ampla na indústria de OI, não são raros os casos de pobre correlação entre esse índice e a propensão de incrustação por deposição (YIANTSIOS *et al.*, 2005). Portanto, o ideal é realizar testes com a água ou o efluente em questão em módulos de OI, em escala de laboratório, e medir a redução de fluxo de permeado em função do tempo.

Em relação à verificação do potencial de incrustação do concentrado, foram realizadas simulações no software ROSA, verificando a aplicação de outros estágios de OI. Na Tabela V.2, é apresentada a composição das amostras de concentrado sem tratamento selecionadas. Na Tabela V.3, são apresentados os dados de potencial de incrustação calculados pelo ROSA para a água de alimentação. A princípio, apenas o Índice de Langelier é superior a zero, o que indica propensão à precipitação do carbonato de cálcio. Para os demais, a concentração está aquém da saturação (% de saturação é inferior a 100 %). Para esses compostos, a ordem de importância em relação à

proximidade da saturação é sílica, sulfato de cálcio e hidróxido de magnésio, em todas as composições selecionadas.

Tabela V.2 – Propriedades das amostras de concentrado– Alimentação 1, 2 e 3

Composição (mg.L <sup>-1</sup> ) ou propriedade	Alimentação		
	1	2	3
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NH <sub>3</sub>	6,45	2,11	10,31
Na <sup>-</sup> (*)	161,94	532,50	464,31
Mg <sup>2+</sup>	66,63	28,94	21,10
Ca <sup>2+</sup>	80,85	129,96	102,04
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (**)	2,23	6,83	17,63
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (**)	239,00	464,50	674,20
Cl <sup>-</sup>	316,00	632,12	399,33
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	193,64	311,06	228,66
SiO <sub>2</sub>	25,03	73,30	40,20
CO <sub>2</sub> (**)	3,14	4,38	3,43
STD (***)	1091,79	2181,33	1957,81
pH	7,95	8,06	8,34

(\*) Adicionado para balancear a carga.

(\*\*) Estimados a partir da alcalinidade total. A distribuição das espécies é proposta pelo software, em função do pH.

(\*\*\*) Estimado pelo software.

Tabela V.3: Cálculos de potencial de incrustação realizados pelo ROSA para Alimentação 1, 2 e 3

Cálculos de potencial de incrustação	Alimentação		
	1	2	3
Índice de Saturação de Langelier	0,63	1,20	1,54
Força iônica (M)	0,02	0,04	0,03
CaSO <sub>4</sub> (% de saturação)	3,08	6,28	3,94
SiO <sub>2</sub> (% de saturação)	18,88	51,73	23,95
Mg(OH) <sub>2</sub> (% de saturação)	0,02	0,01	0,03

Nas Tabelas V.4, V.5 e V.6 são exibidos os resultados de potencial de incrustação calculados pelo ROSA para o novo concentrado gerado, para os Casos I, II e III, nessa ordem (configurações na Tabela IV.4). Como é de se esperar, o potencial de incrustação aumenta à medida que a recuperação da OI aumenta: no sentido do Caso I para o Caso III. Em todas as situações avaliadas, o percentual de saturação do sulfato de cálcio e do hidróxido de magnésio para o novo concentrado permaneceram inferior a 100%, o que

indica que não há propensão de formação de incrustação desses compostos, ao avaliar apenas a sua concentração em relação à saturação. Entretanto, para a sílica, em todos os Casos avaliados, em pelo menos uma das composições é encontrado % de saturação acima de 100 %, chegando a 209 % no Caso III. Ademais, o Índice de Langelier do novo concentrado foi superior a 1,0 para todas as situações, excedendo o limite recomendado para controle de formação de incrustação por precipitação de  $\text{CaCO}_3$ .

Tabela V.4: Cálculos de potencial de incrustação pelo ROSA do concentrado obtido após mais dois estágios de OI - Caso I

Cálculos de potencial de incrustação	Alimentação		
	1	2	3
Índice de Saturação de Langelier	1,33	1,82	2,10
Força iônica (M)	0,05	0,08	0,07
$\text{CaSO}_4$ (% de saturação)	9,63	17,42	11,57
$\text{SiO}_2$ (% de saturação)	37,84	106,60	52,69
$\text{Mg(OH)}_2$ (% de saturação)	0,06	0,03	0,05

Tabela V.5: Cálculos de potencial de incrustação pelo ROSA do concentrado obtido após mais dois estágios de OI - Caso II

Cálculos de potencial de incrustação	Alimentação		
	1	2	3
Índice de Saturação de Langelier	1,71	2,17	2,42
Força iônica (M)	0,08	0,13	0,11
$\text{CaSO}_4$ (% de saturação)	17,80	31,55	20,70
$\text{SiO}_2$ (% de saturação)	58,53	172,73	85,09
$\text{Mg(OH)}_2$ (% de saturação)	0,10	0,04	0,06

Tabela V.6: Cálculos de potencial de incrustação pelo ROSA do concentrado obtido após mais dois estágios de OI - Caso III

Cálculos de potencial de incrustação	Alimentação		
	1	2	3
Índice de Saturação de Langelier	1,86	2,31	2,54
Força iônica (M)	0,09	0,16	0,13
$\text{CaSO}_4$ (% de saturação)	22,57	39,45	25,98
$\text{SiO}_2$ (% de saturação)	70,19	209,12	103,55
$\text{Mg(OH)}_2$ (% de saturação)	0,11	0,04	0,07

Em suma, a limitação para o tratamento direto do concentrado por mais dois estágios de OI é a sua elevada propensão à formação de incrustações por carbonato de cálcio e sílica. Nesse sentido, o tratamento intermediário do concentrado por precipitação induzida por alcalinizante visa remover, principalmente, o  $\text{Ca}^{2+}$  e, por conseguinte, atenuar ou eliminar a propensão de precipitação de  $\text{CaCO}_3$  nas membranas de OI. Além disso, a remoção de  $\text{SiO}_2$  também será avaliada bem como a sua respectiva redução no % de saturação do novo concentrado.

## 5.2 Primeira etapa: determinação das condições experimentais

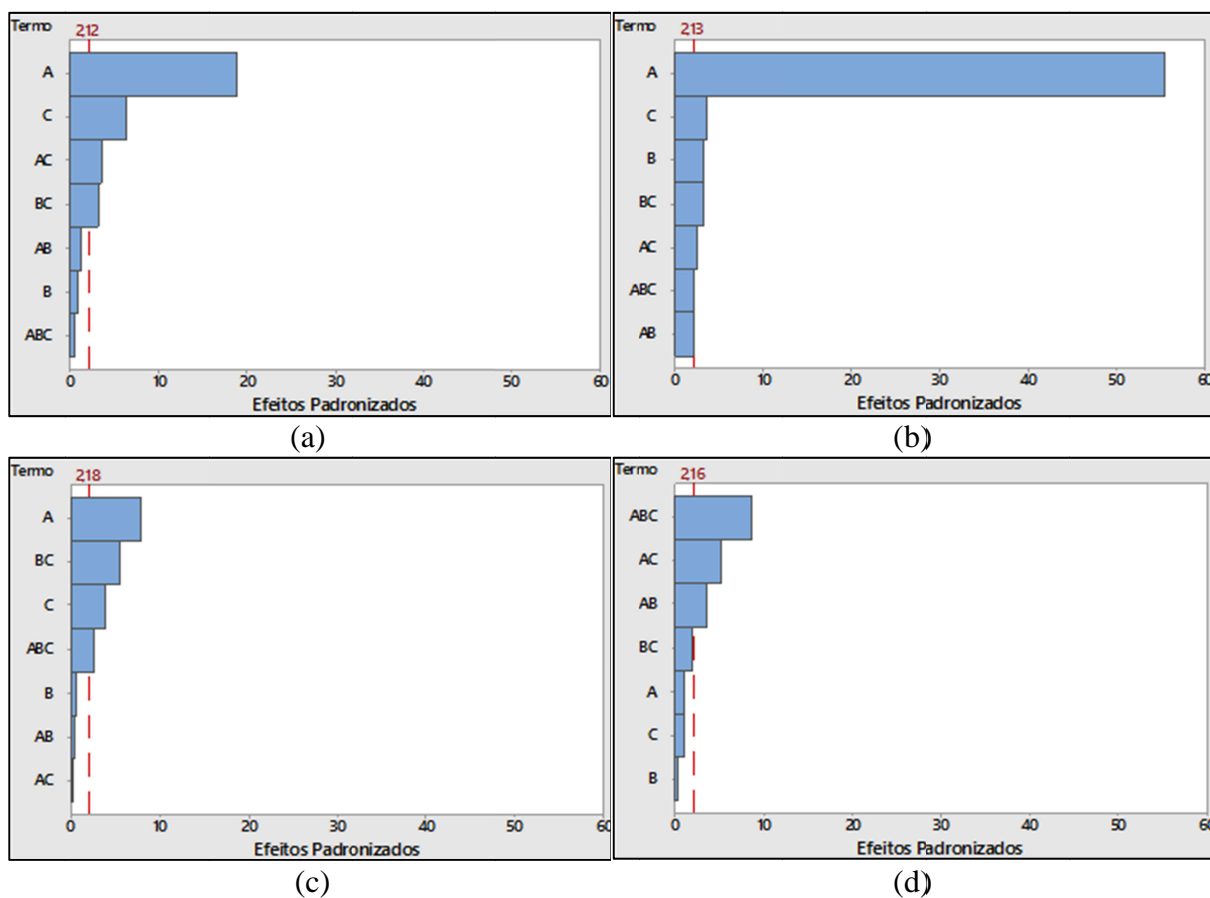
Os ensaios de precipitação desta etapa foram conduzidos de acordo com o planejamento experimental  $2^3$  completo, em triplicata, conforme os níveis dos fatores apresentados nas Tabelas IV.1 e IV.2. A amostra do concentrado utilizada nestes ensaios foi caracterizada em relação aos principais componentes, conforme pode ser visualizado na Tabela V.7. O pH do concentrado era de 7,75.

Tabela V.7: Composição do concentrado da primeira etapa

Concentração	Alcalinidade (como $\text{CaCO}_3$ )	Cálcio	Magnésio	Sílica	Sulfato
Mássica ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	374,90	120,60	25,03	73,67	355,97
Molar (mM)	3,75	3,01	1,03	1,23	3,70

### 5.2.1 Ensaios com hidróxido de sódio – 1ª Etapa

Na Figura 5.1, são apresentados os efeitos padronizados dos fatores sobre as variáveis respostas, para os ensaios de precipitação com dosagem de hidróxido de sódio. Os efeitos que se estendem além da linha de referência (tracejada) são significativos, ao nível padrão de 0,05.



Fatores: A – dosagem de NaOH;  
 B – Tmr;  
 C – Tml;  
 AB, AC, BC e ABC – interação entre os respectivos fatores

Figura 5.1: Gráfico de pareto dos efeitos padronizados ( $p < 0,05$ ). Respostas: remoção % de: (a)  $\text{Ca}^{2+}$ ; (b)  $\text{Mg}^{2+}$ ; (c)  $\text{SiO}_2$  e (d)  $\text{SO}_4^{2-}$ .

O efeito de um fator pode ser definido como a mudança sofrida pela variável resposta quando se passa do nível baixo para o nível alto desse fator (WERKEMA e AGUIAR, 1996). Isto posto, interpreta-se através do gráfico (a) da Figura 5.1, que o fator A (dosagem de NaOH) provoca uma mudança de cerca de 20 unidades na variável resposta (remoção percentual de  $\text{Ca}^{2+}$ ) quando ele passa do nível baixo (dosagem de  $222,7 \text{ mg.L}^{-1}$ ) para o nível alto (dosagem de  $445,4 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Ademais, neste mesmo gráfico, verifica-se que os fatores A e C e as interações AB e BC são significativos, ao nível padrão de 0,05.

Portanto, com exceção da remoção percentual de sulfato, a dosagem de NaOH afetou significativamente a remoção dos demais compostos avaliados ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$ ). Esses resultados são explicados pelo aumento do pH proporcionado pela dosagem desse alcalinizante, como pode ser examinado na Tabela V.8. A variação de pH interfere na solubilidade dos compostos de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{Mg(OH)}_2$ , respectivamente. Para  $\text{SiO}_2$ , o pH também afeta a sua polimerização por condensação dos grupos silanóis, que leva à sua precipitação (SALVADOR COB *et al.*, 2012). Contudo, no caso do sulfato, a solubilidade de seus compostos  $\text{CaSO}_4$  e  $\text{BaSO}_4$  são relativamente independentes do pH (GABELICH *et al.*, 2007), o que explica a ausência de significância do fator dosagem de NaOH em sua remoção. O tempo de mistura rápida teve efeito significativo apenas na remoção de  $\text{Mg}^{2+}$ , enquanto o tempo de mistura lenta afetou a remoção dos compostos avaliados, também com exceção do sulfato. A interação de dois ou mais dos fatores avaliados teve efeito significativo na remoção de todos os compostos.

Tabela V.8: Média e Desvio Padrão do pH final dos ensaios com NaOH (1ª etapa)

Dosagem de NaOH ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	pH final	
	Média	Desvio Padrão
222,7	9,72	0,08
445,4	11,38	0,22

Na Figura 5.2, são exibidos os gráficos de efeitos principais utilizando-se as médias ajustadas. A média ajustada para um nível de um determinado fator é o valor médio da variável resposta, para todos os ensaios realizados nesse nível desse fator. Por exemplo, na Figura 5.2, infere-se pelo gráfico de Média de remoção % de  $\text{Ca}^{2+}$  que a média de todos os ensaios cuja a dosagem de NaOH foi de  $222,7 \text{ mg.L}^{-1}$ , foi cerca de 81%. Do mesmo modo, a média de remoção % de  $\text{Ca}^{2+}$  de todos os ensaios em que foram dosados  $445,4 \text{ mg.L}^{-1}$  de NaOH foi de 96%, aproximadamente. Portanto, a avaliação da Figura 5.2 permite verificar se a mudança de nível do fator teve um efeito positivo ou negativo na média da variável resposta.

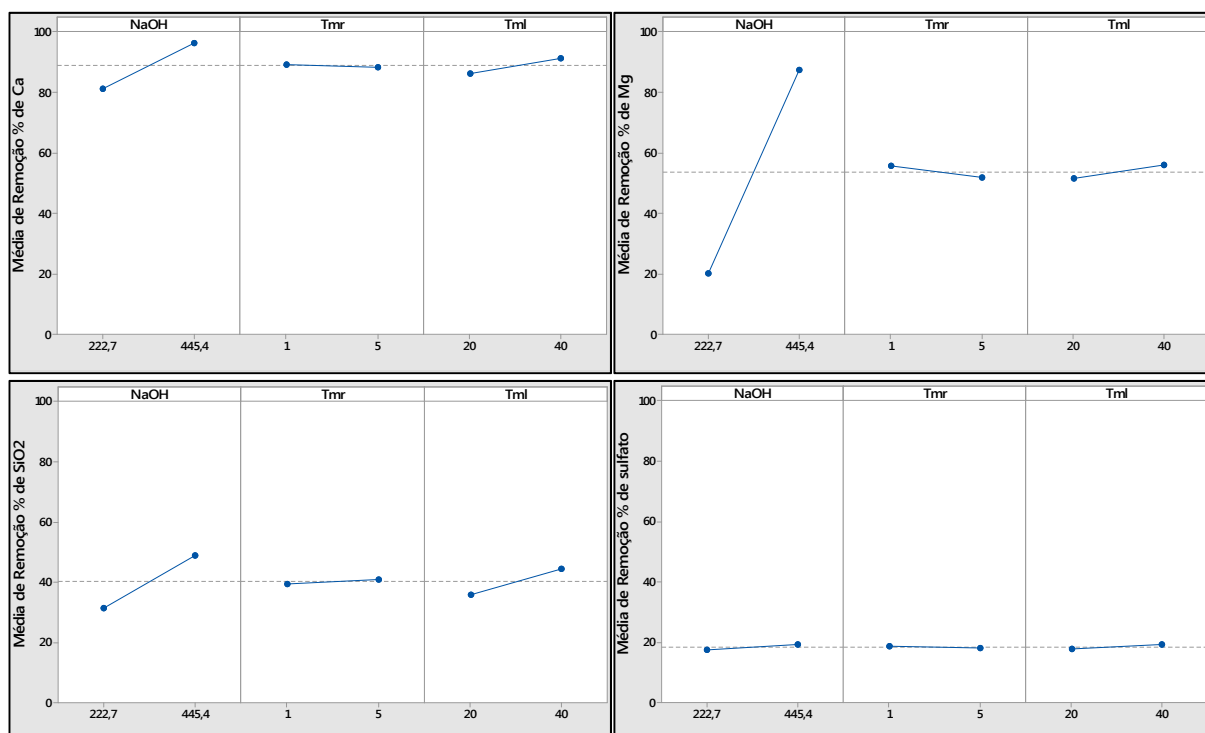


Figura 5.2: Gráfico de efeitos principais utilizando médias ajustadas

Assim sendo, pelo exame da Figura 5.2, constata-se que o aumento da dosagem de alcalinizante e do tempo de mistura lenta tiveram efeito positivo na remoção de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$ .

No que tange a avaliação da eficiência do processo, foram obtidos resultados excelentes de remoção de  $\text{Ca}^{2+}$ :  $81 \pm 5 \%$  para a dosagem mais baixa de alcalinizante e  $96 \pm 2 \%$  para a dosagem alta. Por outro lado, a remoção de  $\text{Mg}^{2+}$  foi pequena na dosagem baixa, apenas  $21 \pm 6 \%$ , mas teve um aumento expressivo na dosagem alta, passou para  $87 \pm 2 \%$ . Analogamente, a remoção de  $\text{SiO}_2$  foi de apenas  $31 \pm 6\%$  na condição de baixa dosagem, mas se alcançou um bom resultado de remoção,  $50 \pm 11 \%$ , para a dosagem alta de alcalinizante.

### 5.2.2 Ensaios com hidróxido de cálcio – 1ª Etapa

Na Figura 5.3, são exibidos os efeitos padronizados dos fatores sobre as variáveis respostas, para os ensaios de precipitação com dosagem de hidróxido de cálcio. Quaisquer efeitos que excedam a linha de referência são significativos ( $p < 0,05$ ).

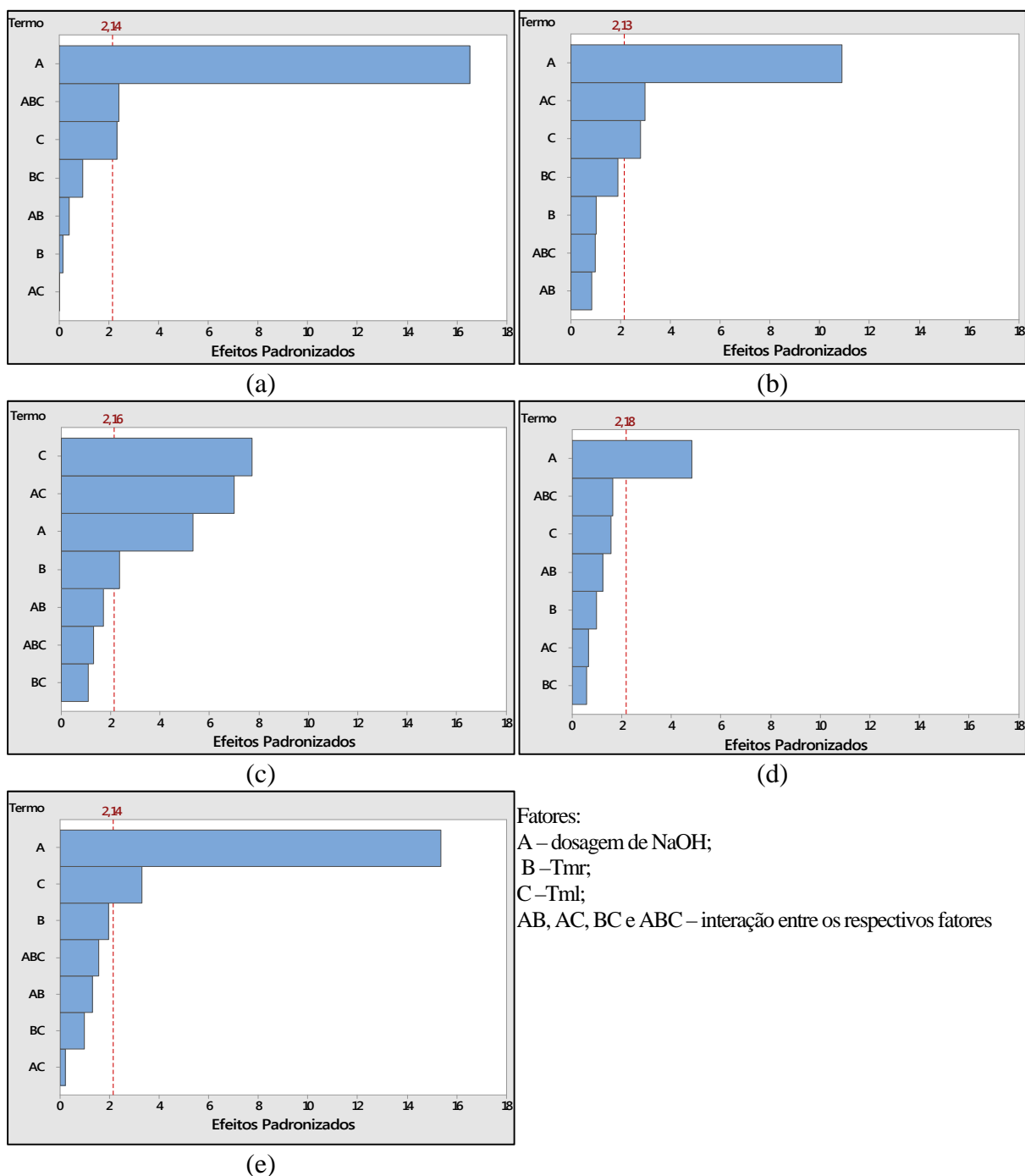


Figura 5.3: Gráfico de pareto dos efeitos padronizados ( $p < 0,05$ ). Respostas: remoção % de: (a) Ca; (b) Mg; (c) SiO<sub>2</sub>; (d) SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, (e) alcalinidade.

Portanto, é possível afirmar que a dosagem de hidróxido de cálcio afetou significativamente a remoção de todos os compostos avaliados. Já o tempo de mistura rápida afetou apenas a remoção de SiO<sub>2</sub>. O tempo de mistura lenta teve efeito significativo na remoção dos compostos avaliados, com exceção do sulfato. A interação

de dois ou mais dos fatores avaliados teve efeito significativo na remoção de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$ .

Na Figura 5.4, são apresentados os gráficos de efeitos principais utilizando-se as médias ajustadas para os ensaios com dosagem de  $\text{Ca(OH)}_2$ .

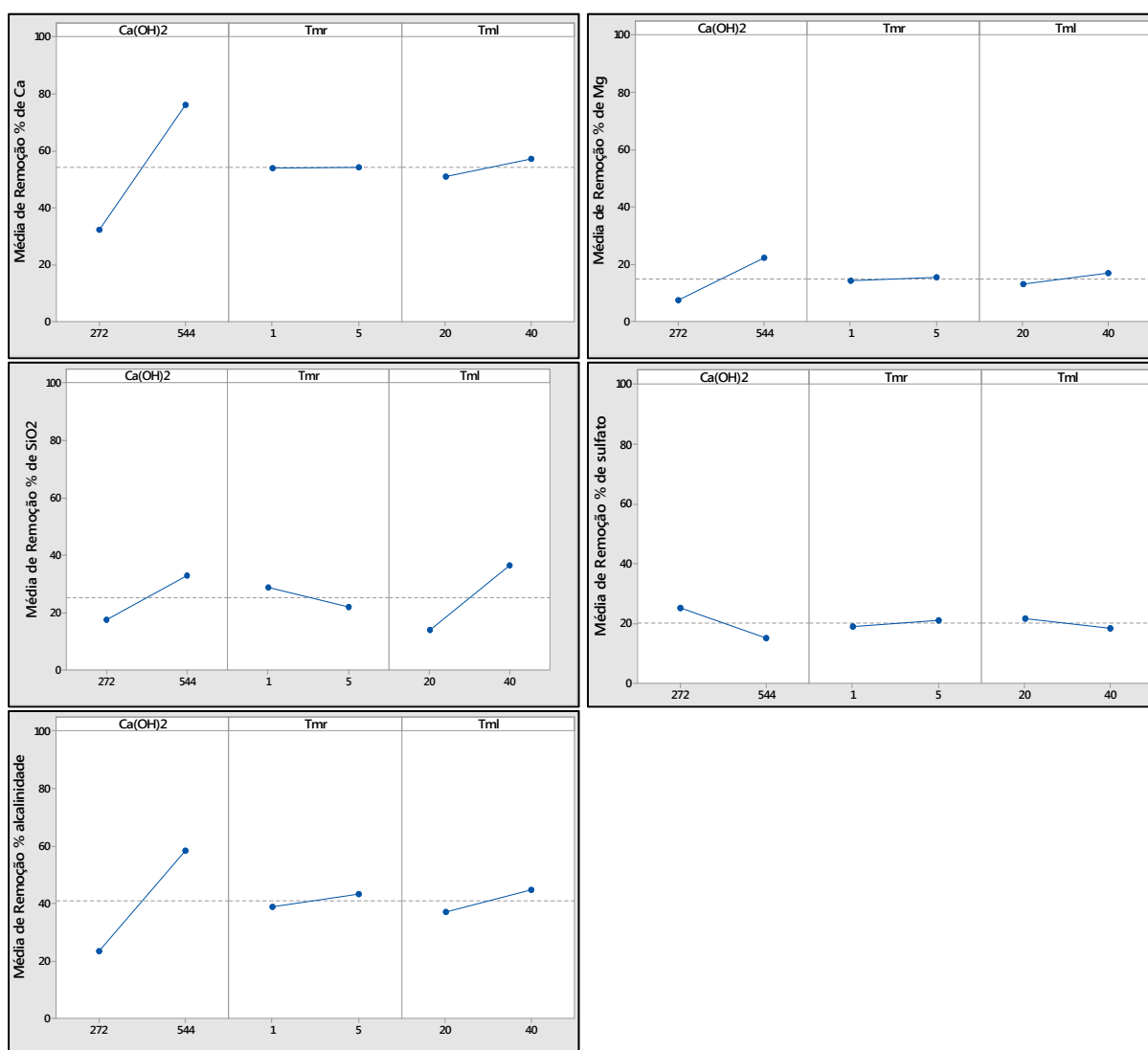


Figura 5.4: Gráfico de efeitos principais utilizando médias ajustadas

Observa-se que o aumento da dosagem de  $\text{Ca(OH)}_2$  e do tempo de mistura lenta tiveram efeito positivo na remoção de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SiO}_2$  e alcalinidade. A ordem de grandeza de remoção percentual de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$  foi inferior à remoção obtida ao dosar hidróxido de sódio, possivelmente pelo pH final ter sido menor, como é apresentado na

Tabela V.9. A remoção de  $\text{Ca}^{2+}$  foi de apenas  $32 \pm 9 \%$  para a dosagem baixa de alcalinizante e de  $76 \pm 5 \%$  para a dosagem alta. Por outro lado, a remoção de  $\text{Mg}^{2+}$  foi de tão-somente  $8 \pm 5 \%$  na dosagem baixa, e teve um aumento pouco expressivo na dosagem alta, passou para  $22 \pm 3 \%$ . Similarmente, a remoção de  $\text{SiO}_2$  foi de somente  $17 \pm 6\%$  na condição de baixa dosagem e apresentou aumento, porém com alta variabilidade, na dosagem alta de alcalinizante,  $37 \pm 24 \%$ .

Tabela V.9: Média e Desvio Padrão do pH final dos ensaios com  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (1ª etapa)

Dosagem de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	pH final	
	Média	Desvio Padrão
272	8,64	0,15
544	9,26	0,26

O pH inferior obtido pode ser explicado pelo fato do hidróxido de cálcio ser uma base mais fraca do que o hidróxido de sódio e, conseqüentemente, apresentar menor constante de dissociação.

### 5.2.3 Síntese dos resultados da 1ª etapa

O método de precipitação utilizado foi eficaz na remoção de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$ , em concordância com os resultados da literatura consultada. Não foi observada remoção apreciável de sulfato: máxima de  $19 \pm 11 \%$ , para menor dosagem de  $\text{NaOH}$  e de  $25 \pm 5 \%$ , para menor dosagem de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Em relação às condições experimentais, os fatores dosagem de alcalinizante e o tempo de mistura lenta interferiram positivamente na remoção de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$ , para ambos alcalinizantes testados. O fator tempo de mistura rápida praticamente não interferiu nas variáveis respostas. Assim sendo, foram definidas como condição experimental padrão para os próximos ensaios, o tempo de mistura rápida de 5 min e o tempo de mistura lenta de 40 min.

Ao se confrontar os resultados dos alcalinizantes hidróxido de sódio e hidróxido de cálcio desta etapa, verificou-se que o primeiro foi mais eficiente, haja vista que ele proporcionou maior remoção de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$ , com menor dosagem. Entretanto,

como o hidróxido de cálcio é um alcalinizante de menor custo, é importante encontrar a sua dosagem ótima para subsidiar uma futura comparação econômica entre esses alcalinizantes.

### 5.3 Segunda etapa: utilização de semente

Da mesma forma que na etapa anterior, o concentrado utilizado nos ensaios desta etapa foi caracterizado em relação aos principais componentes e os resultados são exibidos na Tabela V.10. O pH do concentrado era de 7,91.

Tabela V.10: Composição do concentrado da segunda etapa

Concentração	Alcalinidade (como CaCO <sub>3</sub> )	Cálcio	Magnésio	Sílica	Sulfato
Mássica (mg.L <sup>-1</sup> )	371,45	120,38	21,17	59,40	426,01
Molar (mM)	3,71	3,00	0,87	0,99	4,43

Além disso, o quartzo, utilizado como semente, foi caracterizada por MEV/EDS. As fotomicrografias obtidas são apresentadas nas Figuras 5.5 e 5.6. Na Figura 5.5 é apresentada uma visão geral das partículas de quartzo, com aumento de 100 vezes. É possível observar que as dimensões das partículas variam de 60 µm a 250 µm, aproximadamente. Na Figura 5.6 observa-se a fotomicrografia de uma partícula (central), com aumento de 400 vezes e o seu espectro de EDS. Nota-se que foram identificados apenas os elementos Si e O, como esperado.

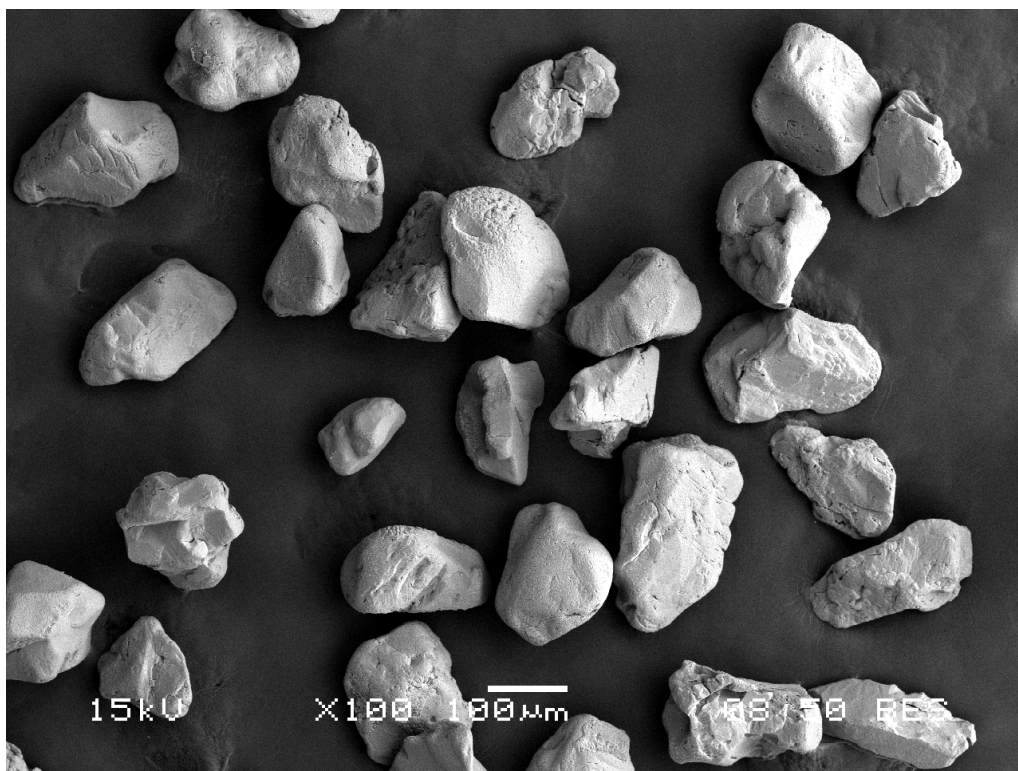


Figura 5.5: Fotomicrografia do quartzo, com aumento de 100 vezes.

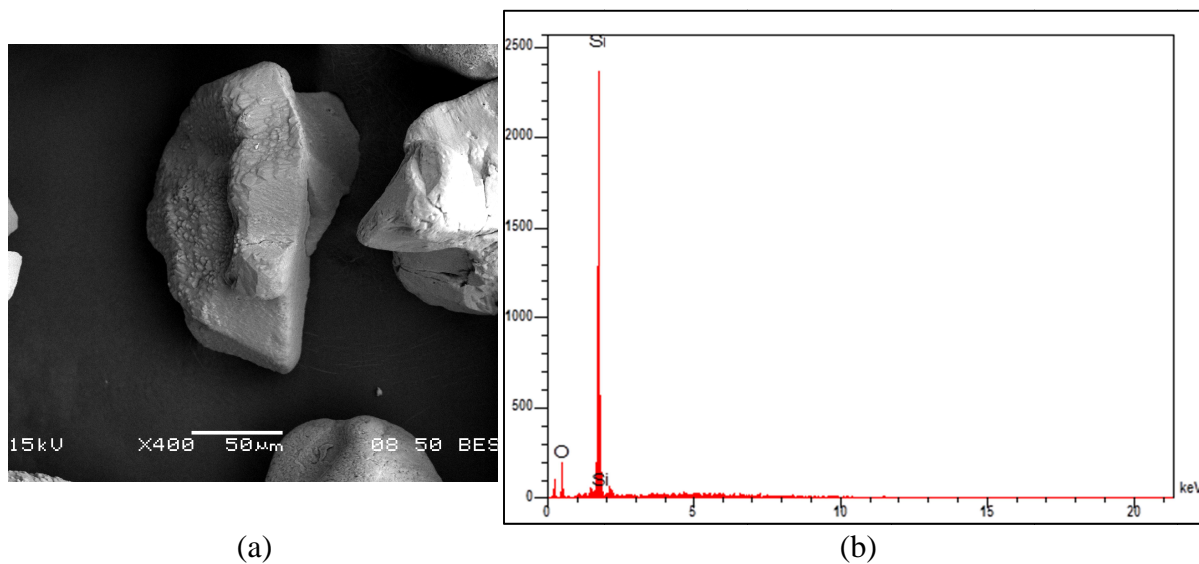


Figura 5.6: (a) Fotomicrografia do quartzo, com aumento de 400 vezes. (b) Espectro EDS da partícula central.

### 5.3.1 Determinação das dosagens de alcalinizante para os valores fixados de pH

Inicialmente, foram feitas as curvas de pH em função da dosagem sucessiva de alcalinizante, que podem ser examinadas na Figura 5.7. Dessa forma, foi possível ter uma estimativa preliminar da quantidade de cada alcalinizante necessária para os valores desejados de pH (8,5; 10,0 e 11,5).

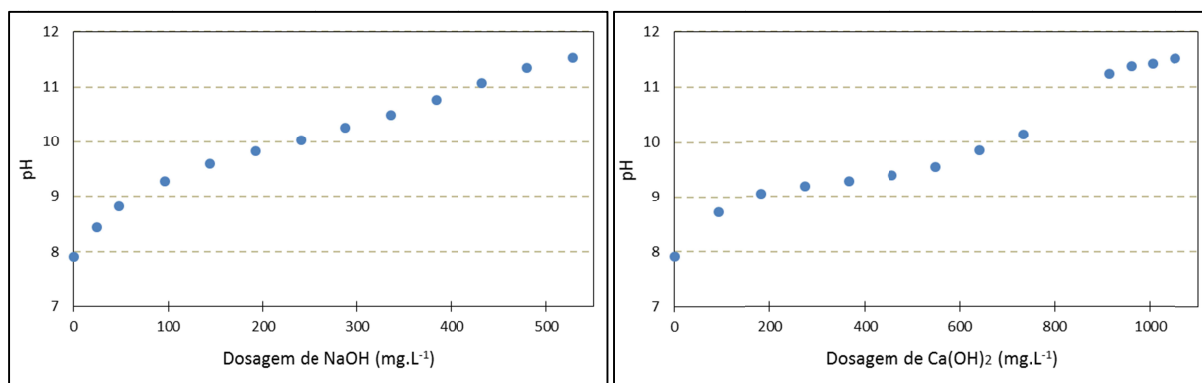


Figura 5.7: pH em função da dosagem sucessiva de alcalinizante

Posteriormente, procedeu-se a dosagem única de alcalinizante, usando como ponto de partida os dados da Figura 5.7. No caso do hidróxido de sódio, a estimativa anterior mostrou-se bastante precisa e a dosagem demandada para cada pH é apresentada na Tabela V.11. Todavia, para o uso do hidróxido de cálcio, o pH obtido ao realizar a dosagem única foi superior ao estimado pela dosagem sucessiva (dados da Figura 5.7). Portanto, foi necessário reduzir a dosagem de hidróxido de cálcio até atingir o pH desejado, conforme os dados apresentados na Tabela V.12. Finalmente, procedeu-se aos testes *t* de hipóteses, um para cada pH desejado, conforme exibido na Figura 5.8.

Tabela V.11: Dosagem demandada de hidróxido de sódio – 2<sup>a</sup> etapa

Ponto do planejamento experimental	pH	Dosagem de NaOH (mg.L <sup>-1</sup> )
-1	8,5	24
0	10,0	240
+1	11,5	528

Tabela V.12: Dosagem demandada de hidróxido de cálcio – 2ª etapa

Ponto do planejamento experimental	pH	Dosagem de Ca(OH) <sub>2</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )
-1	8,5	68,64
0	10,0	343,2
+1	11,5	411,84

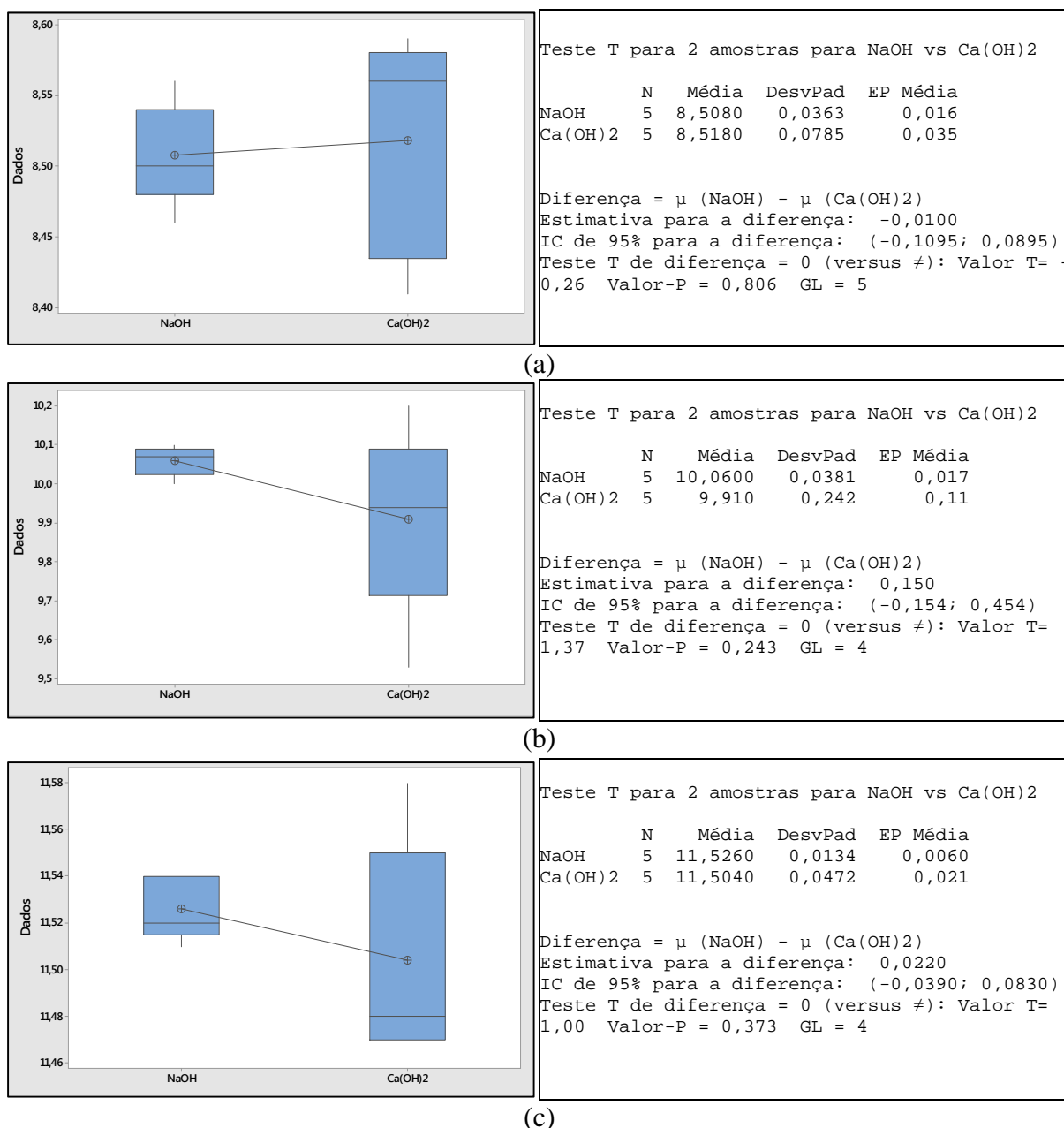


Figura 5.8: Boxplot e sumário das estatísticas calculadas nos testes de hipótese para (a) pH de 8,5; (b) pH de 10,0 e (c) pH de 11,5.

A hipótese nula de todos os testes foi de que a diferença entre a média do pH obtido ao se dosar NaOH e a média do pH ao se dosar  $\text{Ca(OH)}_2$  era igual a zero, ou seja, não havia diferença entre as médias. Foi utilizado um nível de confiança de 95 % ( $\alpha = 0,05$ ). Na Figura 5.8 são exibidos os resultados dos testes de hipóteses, na forma de *Boxplot* bem como, ao lado direito, o respectivo sumário das estatísticas calculadas. Nota-se que, em todos os casos, a estatística valor-p foi maior do que  $\alpha$ . Portanto, a hipótese nula não deve ser rejeitada, ou seja, não há diferença significativa entre as duas médias das populações.

### 5.3.2 Ensaios com hidróxido de sódio – 2ª Etapa

Para os ensaios com dosagem de hidróxido de sódio, o procedimento anterior para fixar o pH final dos ensaios e considerá-lo como o fator avaliado no planejamento experimental foi bem sucedido. Obteve-se para o ponto (-1) do planejamento o pH final de  $8,6 \pm 0,1$ ; para o ponto (0), o pH de  $10,0 \pm 0,1$  e para o ponto (+1), o pH final de  $11,4 \pm 0,2$ .

Na Figura 5.9, são apresentados os efeitos padronizados dos fatores pH final e sementes sobre as variáveis respostas, para os ensaios de precipitação com dosagem de hidróxido de sódio. Quaisquer efeitos que ultrapassem a linha de referência (tracejada) são considerados significativos, ao nível padrão de 0,05. Assim sendo, pode-se afirmar que o pH final teve um efeito significativo na remoção de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$ . Contudo, a utilização de sementes não teve efeito significativo na remoção dos compostos avaliados.

Na Figura 5.10, são exibidos os gráficos de efeitos principais utilizando-se as médias ajustadas. O ponto no formato de um quadrado corresponde ao ponto central do planejamento experimental. Quando esse ponto não está próximo à linha que une o ponto (-1) e (+1) do experimento, infere-se que o fator não atua de forma linear sobre a variável resposta (desde que tenha efeito sobre ela). Portanto, nota-se que a remoção de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$  não é linear em relação à variação do pH final obtido ao se dosar hidróxido de sódio. Além disso, observa-se que o aumento do pH final proporcionou um acréscimo na remoção percentual de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$ .

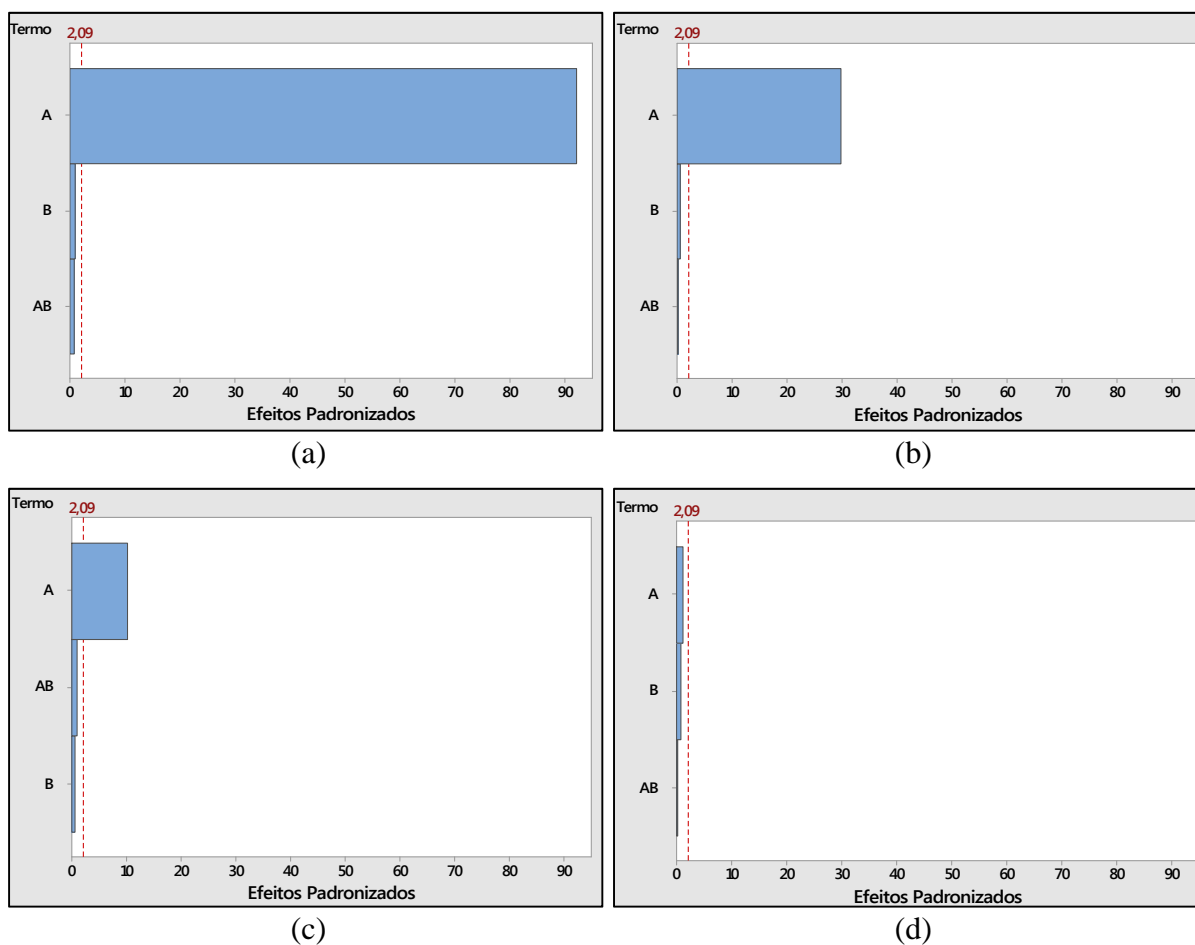


Figura 5.9: Gráfico de pareto dos efeitos padronizados, nível de confiança de 5%. Resposta: remoção percentual (a) Ca<sup>2+</sup>; (b) Mg<sup>2+</sup>; (c) SiO<sub>2</sub> e (d) SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>. Fatores: A – pH final; B – semente e AB – interação entre os fatores

Na Figura 5.11, são apresentados os gráficos de superfície obtidos a partir dos resultados do delineamento experimental. Assim, pode-se visualizar com clareza a ausência de linearidade entre a remoção de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e SiO<sub>2</sub> em relação à variação do pH final.

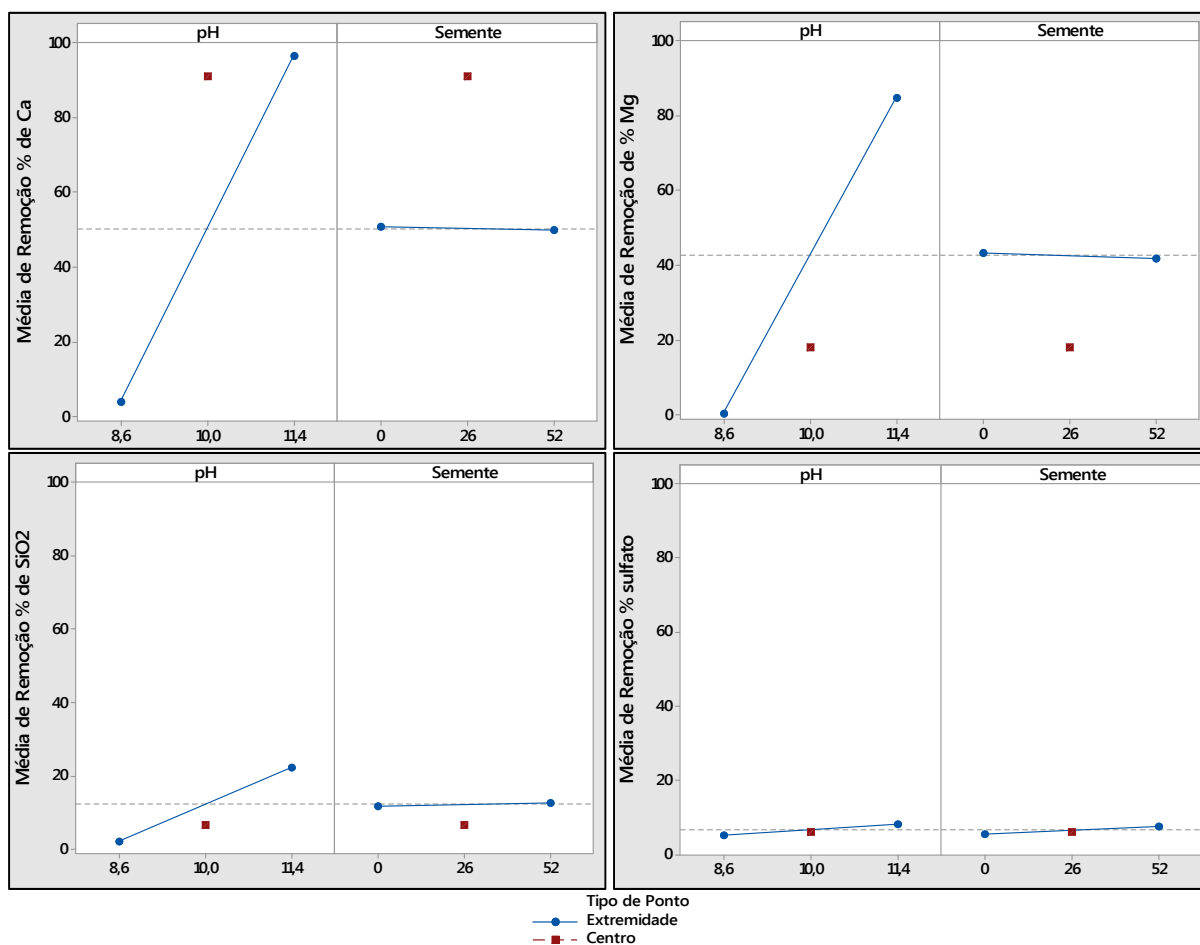


Figura 5.10: Gráfico de efeitos principais utilizando médias ajustadas

Embora a utilização de sementes não tenha proporcionado melhoria na remoção dos compostos estudados, foi notado visualmente que ela proporcionou maior crescimento dos cristais, conforme registro fotográfico apresentado na Figura 5.12. Observa-se que, sem o uso da semente, Figura 5.12 (a), o precipitado é tão fino que causa o aspecto de embaçar o fundo do reator. Em contraste, na Figura 5.12 (b), visualiza-se com nitidez os cristais formados. Essa informação passa a ser relevante ao se pensar na separação sólido-líquido, por gravidade, que ocorre no equipamento de precipitação, mas que não foi objeto deste estudo.

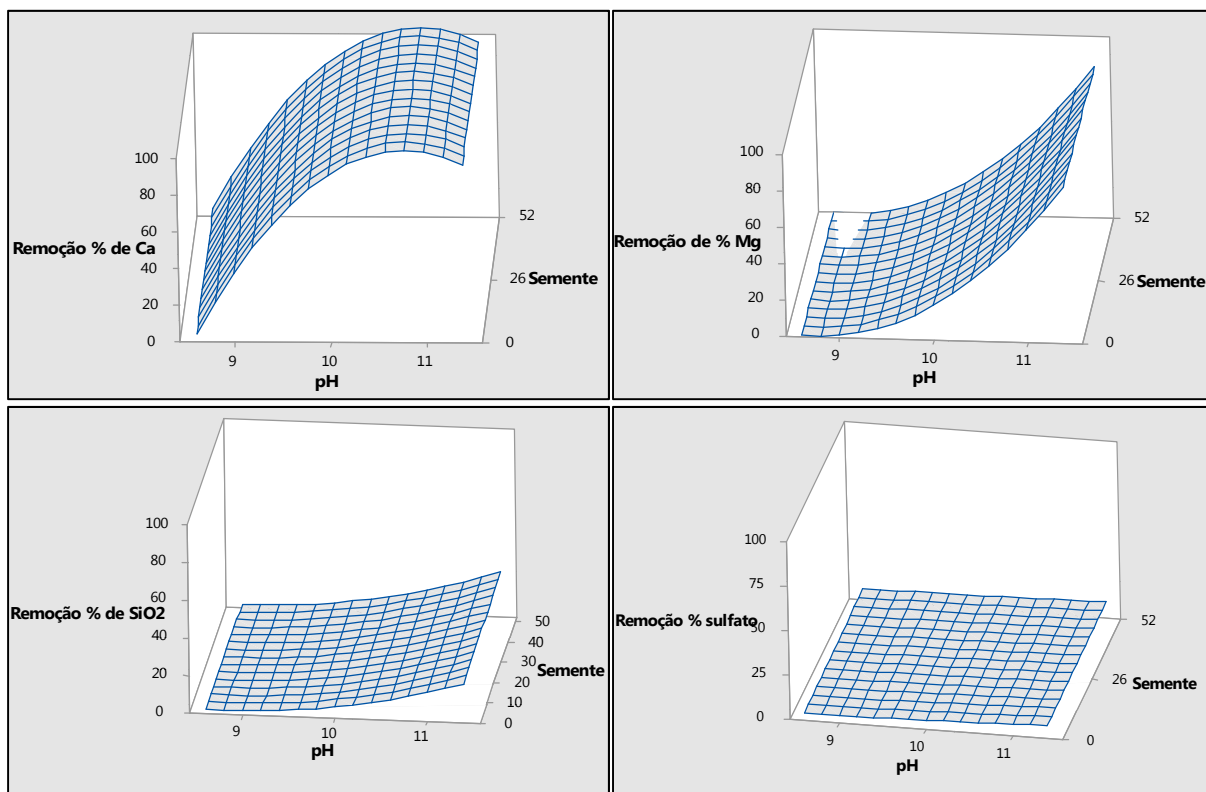


Figura 5.11: Gráficos de superfície

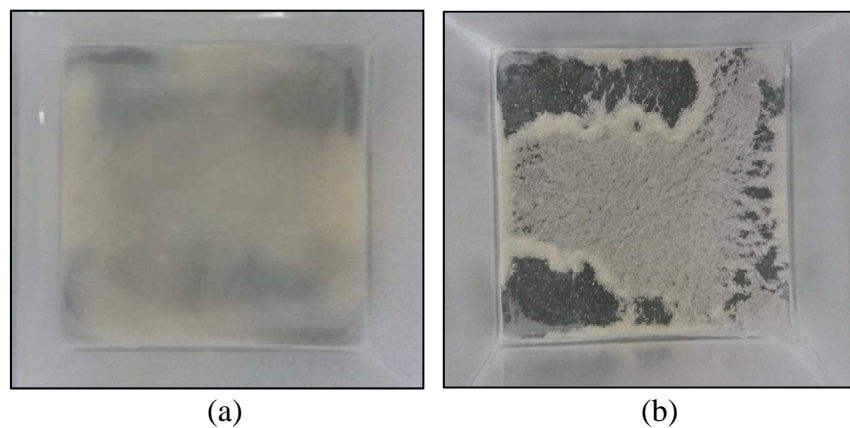


Figura 5.12: Fotos dos precipitados obtidos (a) sem aplicação de semente e (b) com aplicação de semente.

Além disso, foi realizada a caracterização por MEV/EDS dos precipitados produzidos nesta etapa, e que apresentaram maior remoção dos compostos incrustantes. As fotomicrografias e espectros obtidos são apresentadas nas Figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16.

Na Figura 5.13 é apresentada uma visão geral dos precipitados obtidos no tratamento do concentrado na condição de pH final de 11,4, com o uso de semente (a) e sem o uso de semente (b), ambas com aumento de 500 vezes. É possível observar que as dimensões dos aglomerados variam desde 10  $\mu\text{m}$  a 70  $\mu\text{m}$ , aproximadamente. Nota-se a predominância da forma cristalina trigonal ou romboédrica, que pode ser atribuída ao carbonato de cálcio.

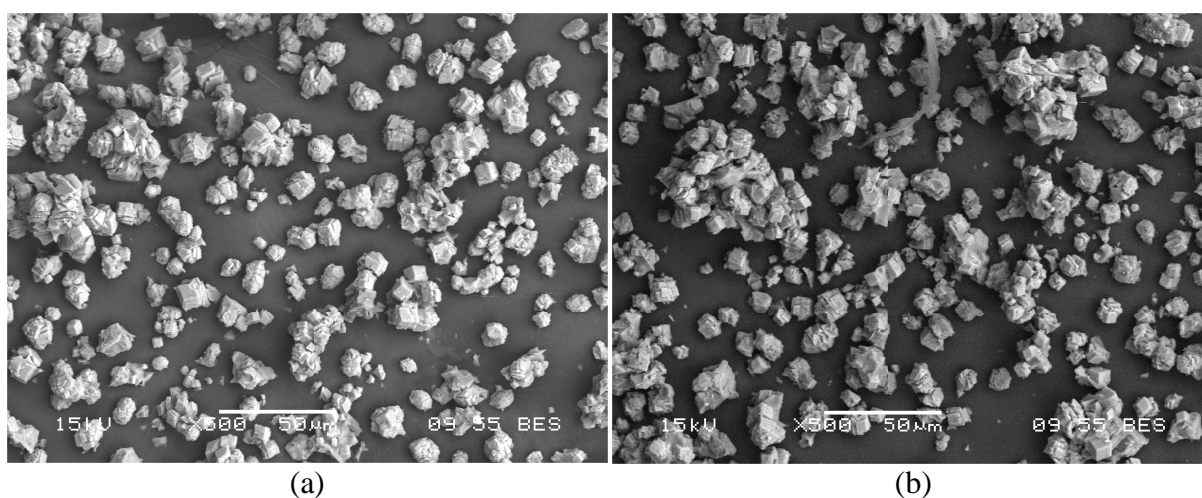


Figura 5.13: Fotomicrografias, com aumento de 500 vezes, dos precipitados obtidos com: (a) pH final de 11,4, com semente e (b) pH final de 11,4, sem semente.

Na Figura 5.14 são exibidas fotomicrografias do precipitado obtido a partir do pH final de 11,4, com o uso de semente, com aumento de (a) 100 vezes e (b) de 550 vezes. É possível observar aglomerados com dimensão superior a 100  $\mu\text{m}$ , o que não foi visualizado para o precipitado produzido sem o uso de semente. Portanto, aparentemente o uso de semente contribuiu para o aumento do tamanho das partículas, como já havia se observado a olho nu.

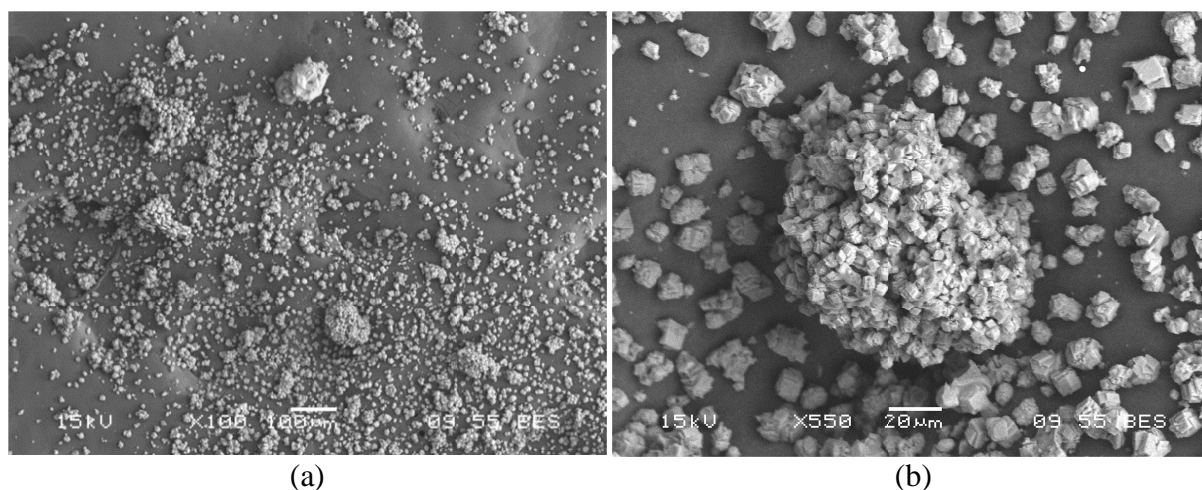


Figura 5.14: Fotomicrografias do precipitado de pH final de 11,4, com semente: (a) visão geral, com aumento de 100 vezes (b) aglomerado, aumento de 550 vezes.

Na Figura 5.15, são exibidas a fotomicrografia do precipitado obtido a partir do pH final de 11,4, com o uso de semente, com aumento de 450 vezes (a) e o espectro EDS do ponto medial da partícula de centro (b). Essa partícula destacou-se por apresentar forma diferente das demais. Observa-se no espectro EDS do ponto medial a predominância de Si, inferindo-se que se trata do quartzo utilizado como semente. Nota-se a presença de cristais romboédricos, possivelmente de carbonato de cálcio, formadas em sua superfície.

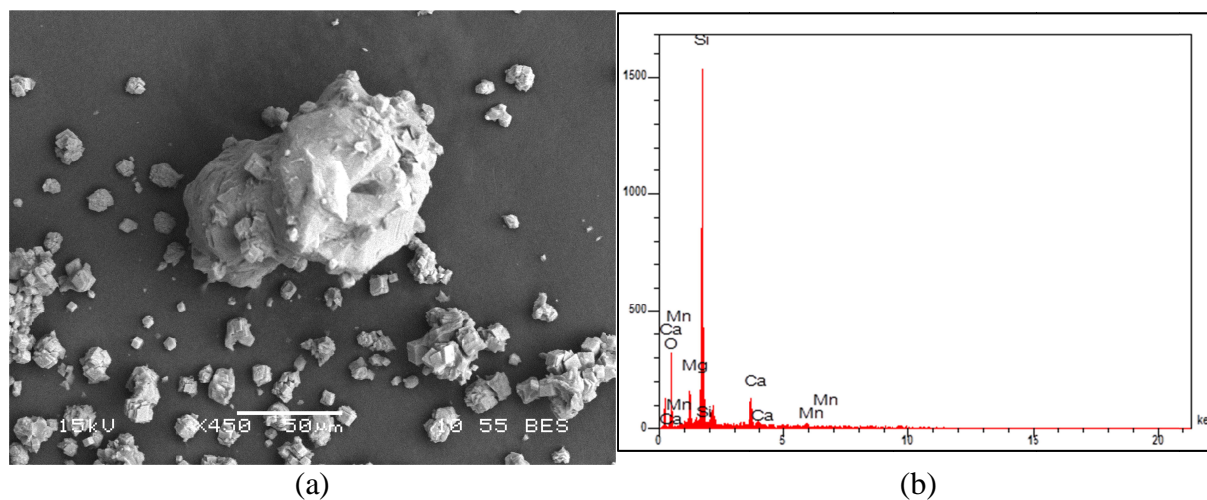


Figura 5.15: (a) Fotomicrografia do precipitado de pH final de 11,4, com semente; (b) Espectro EDS do ponto medial da partícula de centro

Na Figura 5.16 são apresentados a fotomicrografia do precipitado obtido com pH final de 11,4, com semente, com aumento de 100 vezes e os espectros EDS dos pontos 1, 2, 3 e 4, demarcados na fotomicrografia.

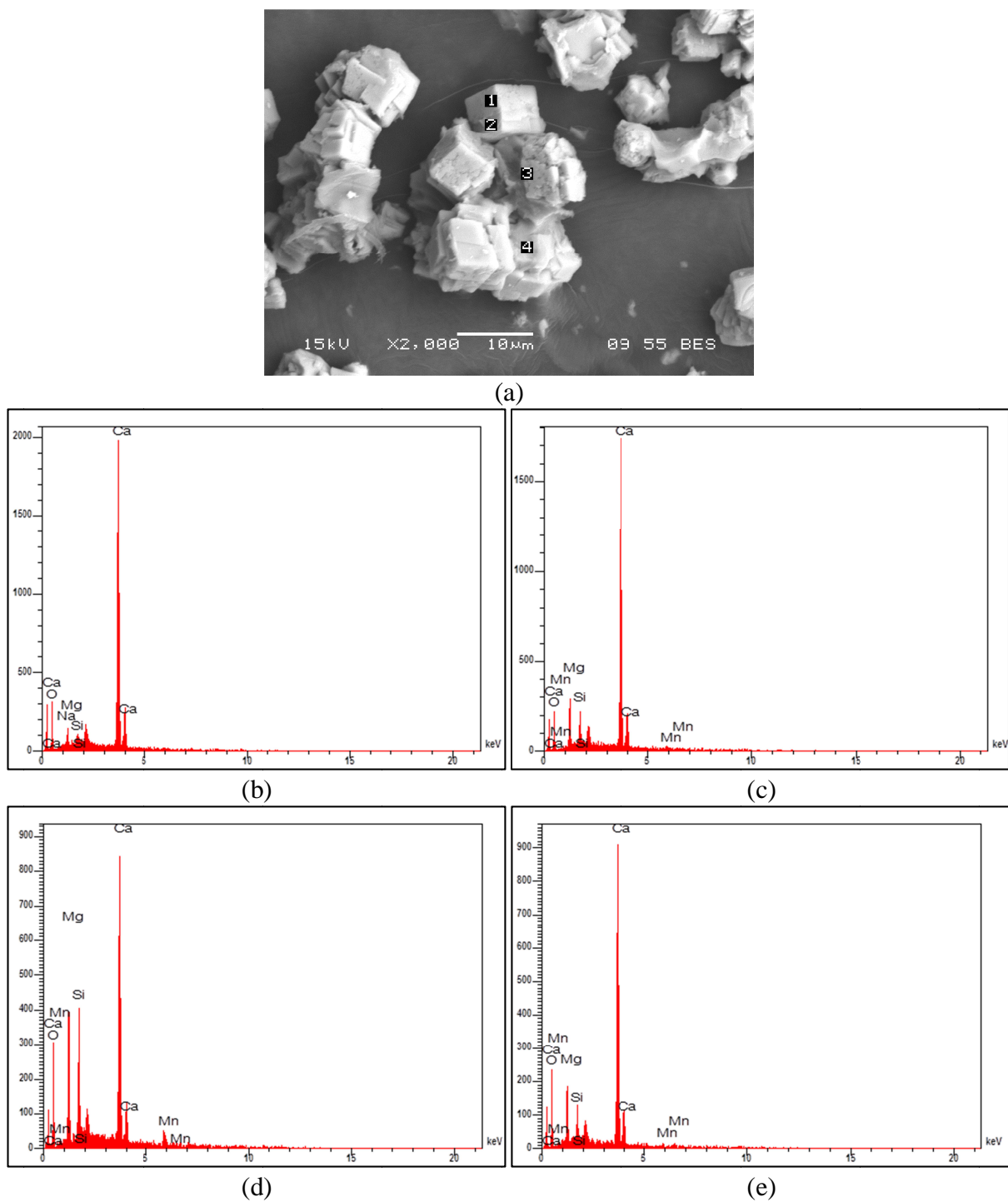


Figura 5.16: (a) Fotomicrografia do precipitado de pH final de 11,4, com semente, aumento de 100 vezes; Espectros EDS dos pontos: (b) 1; (c) 2; (d) 3 e (e) 4.

Embora seja notada pequena diferença de forma ou coloração entre os pontos demarcados, é demonstrada em todos os espectros a predominância de Ca. Além disso, nota-se no espectro do ponto 3 (d) pequeno aumento do pico de Si quando comparado aos demais.

Na Figura 5.17 são apresentadas as fotomicrografias do precipitado obtido com pH final de 10,0, com semente, visão geral, com aumento de 1000 vezes (a); partícula, com aumento de 1300 vezes(b); partícula, com aumento de 1700 vezes(c) e seu espectro EDS (d). Embora no espectro seja constatada a preponderância de Ca, não é observada a forma romboédrica. Possivelmente, neste pH, houve a formação de outra estrutura cristalina  $\text{CaCO}_3$ .

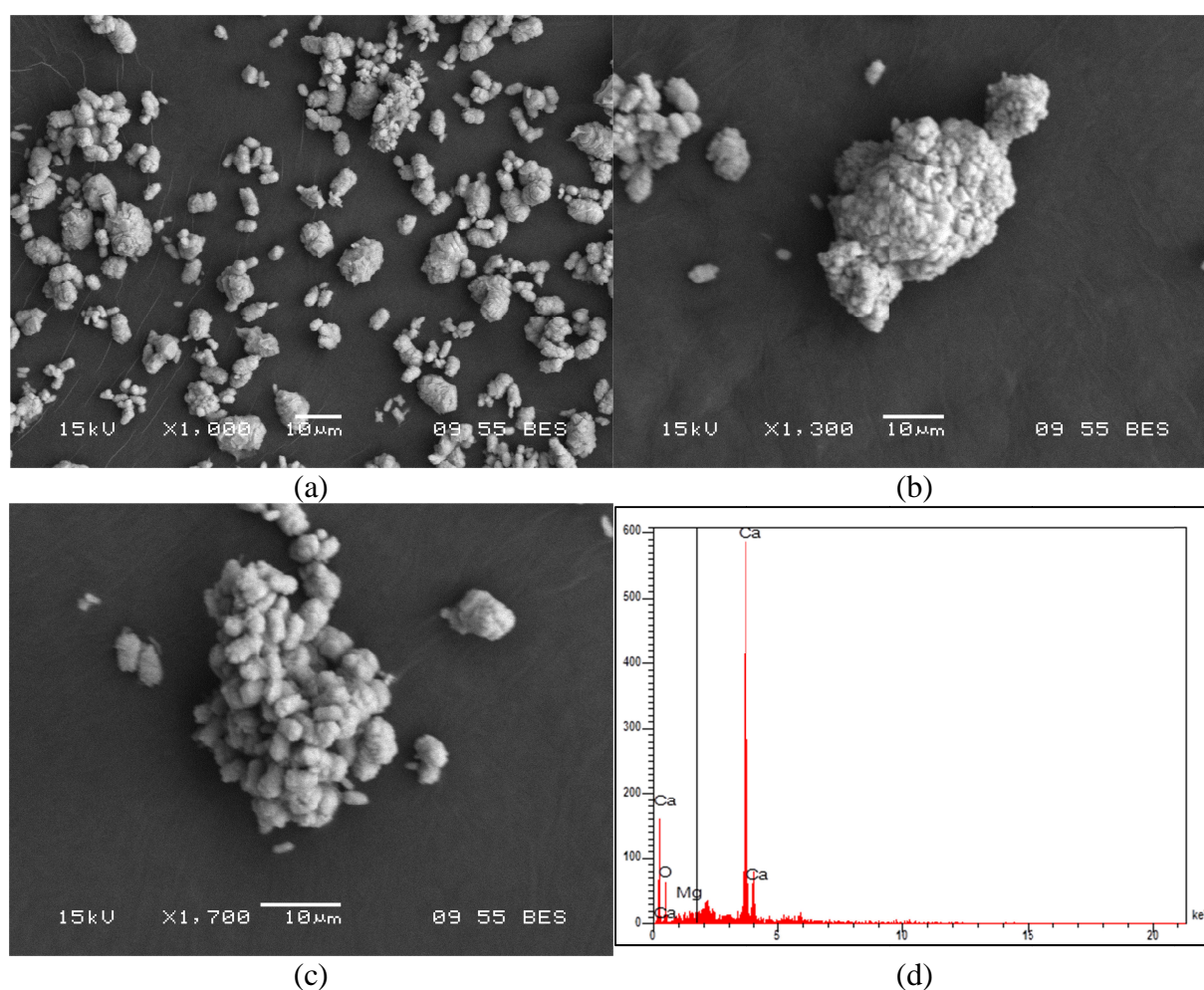


Figura 5.17: Fotomicrografias do precipitado de pH final de 10,0, com semente, com aumento de (a) 1000 vezes; (b) 1300 vezes; (c) 1700 vezes e (d) espectro EDS da partícula central de (c).

### 5.3.3 Ensaios com hidróxido de cálcio – 2ª Etapa

Para os ensaios com dosagem de hidróxido de cálcio, o procedimento utilizado para fixar o pH final dos ensaios mostrou-se ineficaz, uma vez que não foi obtido o pH final almejado. Possivelmente, o insucesso deveu-se às reações de abrandamento por  $\text{Ca(OH)}_2$  não terem ocorrido durante o referido procedimento, que foi realizado apenas sob agitação lenta, por isso observou-se pH menor para o ponto central e +1. Embora não tenha sido alcançado o pH final desejado para confrontar com os resultados do hidróxido de sódio, foi possível utilizar o pH final como o fator do planejamento experimental. Obteve-se para o ponto (-1) o pH final de  $8,7 \pm 0,1$ ; para o ponto (0), o pH de  $8,8 \pm 0,2$  e para o ponto (+1), o pH final de  $8,9 \pm 0,1$ . Na Figura 5.18, são apresentados os efeitos padronizados dos fatores pH final e sementes sobre as variáveis respostas, para os ensaios de precipitação com dosagem de hidróxido de cálcio.

Os efeitos que se estendem além da linha de referência (tracejada) são significativos, ao nível padrão de 0,05. Portanto, pode-se concluir que na faixa avaliada, o pH final teve um efeito significativo na remoção de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e que a utilização de sementes teve efeito significativo apenas na remoção de sulfato.

Na Figura 5.19, são apresentados os gráficos de efeitos principais utilizando-se as médias ajustadas. O ponto na forma de um quadrado representa o ponto central do delineamento experimental. Se esse ponto não está bem próximo à linha que une os pontos (-1) e (+1) do experimento, conclui-se que o fator não interfere de forma linear sobre a variável resposta (quando ele tem efeito sobre ela). Portanto, nota-se que somente a remoção de  $\text{Ca}^{2+}$  não foi linear em relação à variação do pH final obtido ao se dosar hidróxido de cálcio, na faixa avaliada. Outrossim, extrai-se dessa figura, que o aumento do pH final proporcionou a elevação da remoção percentual de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e que o aumento da dosagem de semente também teve efeito positivo na remoção percentual de sulfato.

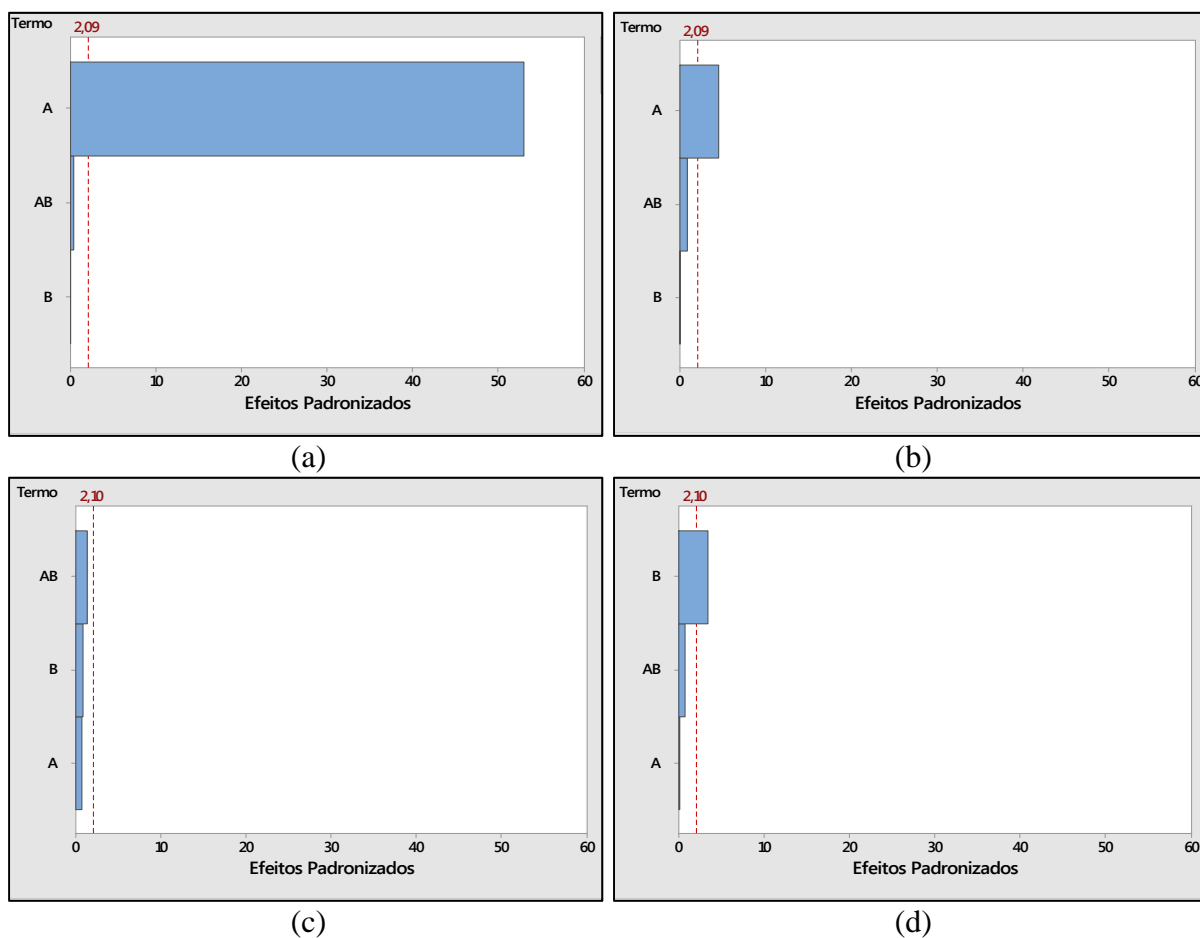


Figura 5.18: Gráfico de pareto dos efeitos padronizados, nível de confiança de 5%. Resposta: remoção percentual (a) Ca; (b) Mg; (c) SiO<sub>2</sub> e (d) SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Fatores: A – pH final; B – semente e AB – interação entre os fatores

Na Figura 5.20, são apresentados os gráficos de superfície obtidos a partir dos resultados do planejamento experimental. Claramente, visualiza-se a ausência de linearidade relatada entre a remoção de Ca<sup>2+</sup> em relação à variação do pH final, para a faixa avaliada.

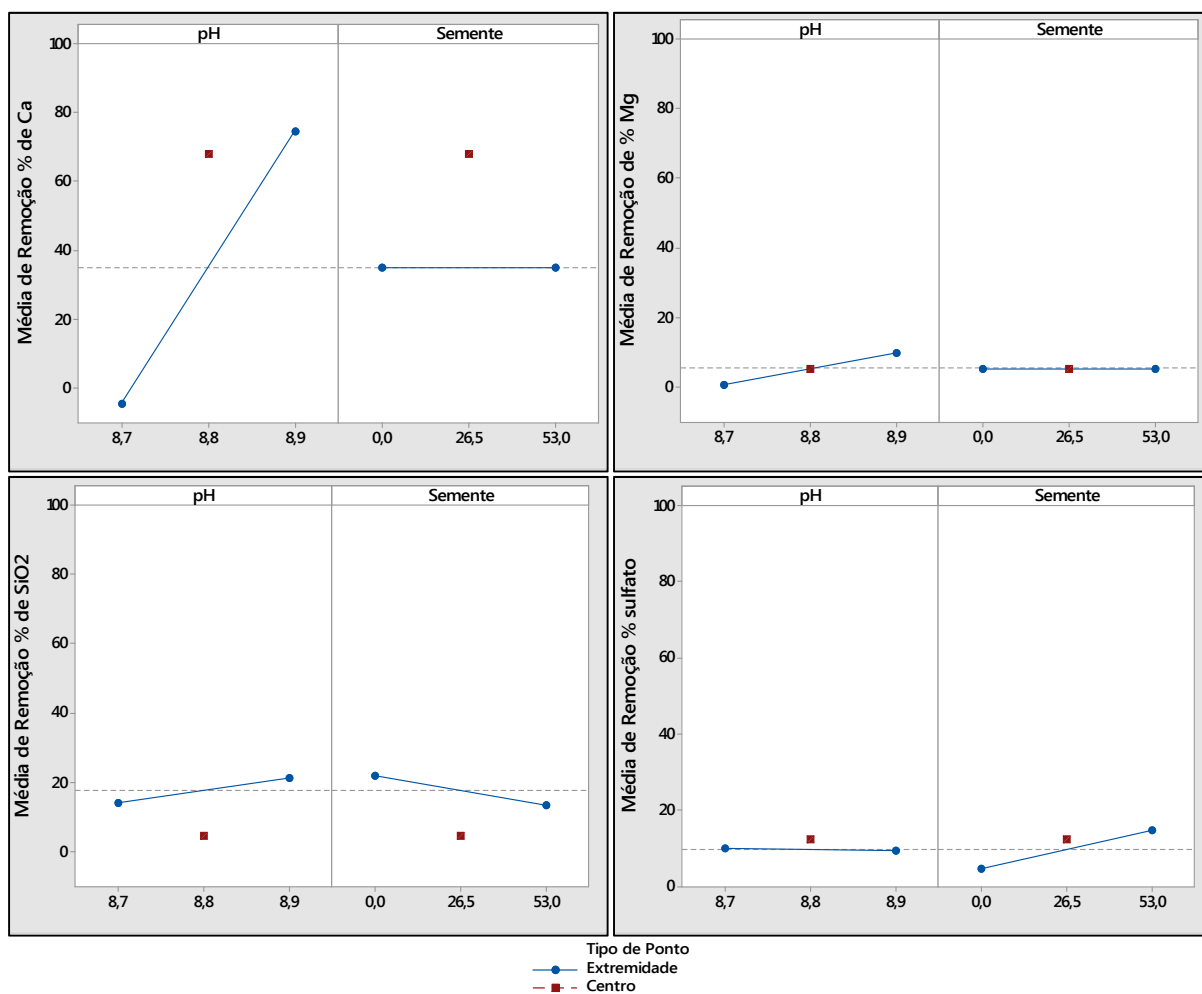


Figura 5.19: Gráfico de efeitos principais utilizando médias ajustadas

Foi realizada a caracterização por MEV/EDS dos precipitados produzidos, que apresentaram maior remoção dos compostos incrustantes. As fotomicrografias e espectros obtidos são exibidos nas Figuras 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24.

Na Figura 5.21, confronta-se as micrografias dos precipitados obtidos no tratamento do concentrado na condição de pH final de 8,9, com o uso de semente (a) e sem o uso de semente (b). Nota-se que as dimensões dos aglomerados variam desde 5  $\mu\text{m}$  a 90  $\mu\text{m}$ , aproximadamente, em (a) e cerca de 5  $\mu\text{m}$  a 55  $\mu\text{m}$ , em (b). Desse modo, aparentemente o uso de semente também favoreceu o crescimento dos cristais.

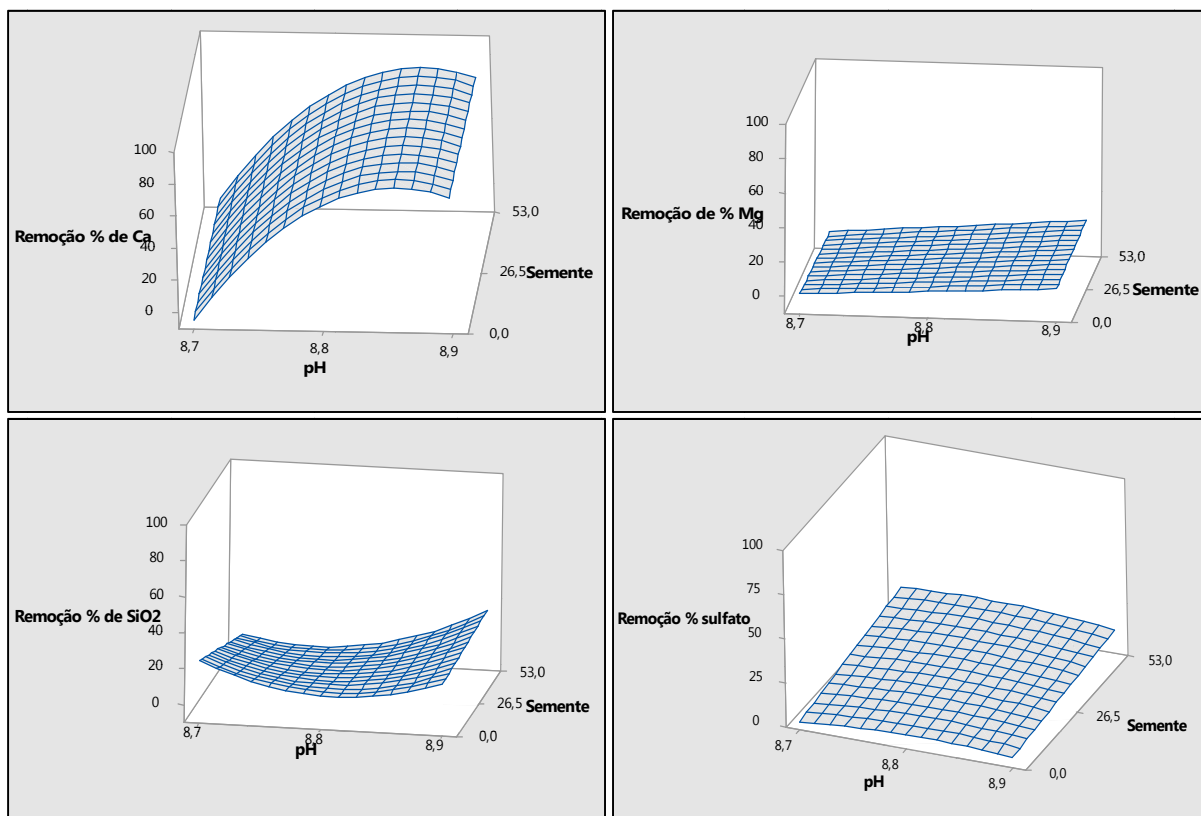


Figura 5.20: Gráficos de superfície

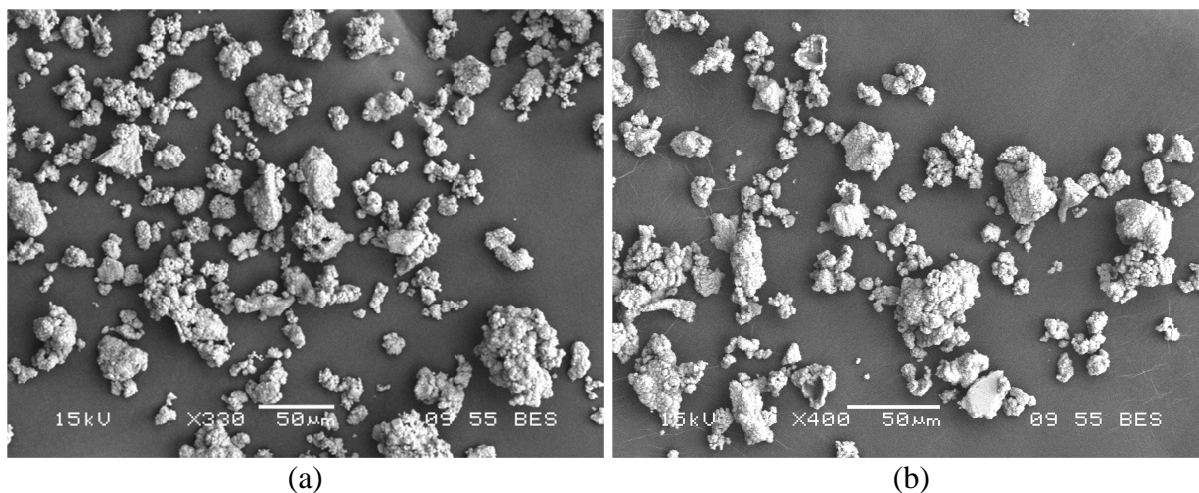


Figura 5.21: Fotomicrografias dos precipitados obtidos com pH final de 8,9: (a) com semente, aumento de 330 vezes e (b) sem semente, aumento de 400 vezes.

Na Figura 5.22 são exibidas as fotomicrografias e respectivos espectros EDS do precipitado obtido a partir do pH final de 8,9, com o uso de semente. Em (a), observa-se

fotomicrografia, com aumento de 850 vezes e em (b) o espectro EDS da partícula central. Nota-se a presença de cristais romboédricos, reforçada pela predominância de Ca no espectro, embora menos acentuada do que constatado para o precipitado do tratamento com NaOH e pH mais elevado (Figuras 5.13 e 5.14). Em (c), analisa-se a fotomicrografia de outro ponto, com aumento de 550 vezes e em (d) o espectro EDS da partícula central. Verifica-se que a partícula tem a forma arredonda de aspecto poroso e ao examinar o espectro EDS, que acusa a presença somente de Ca e O, é possível inferir que se trata de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  em excesso.

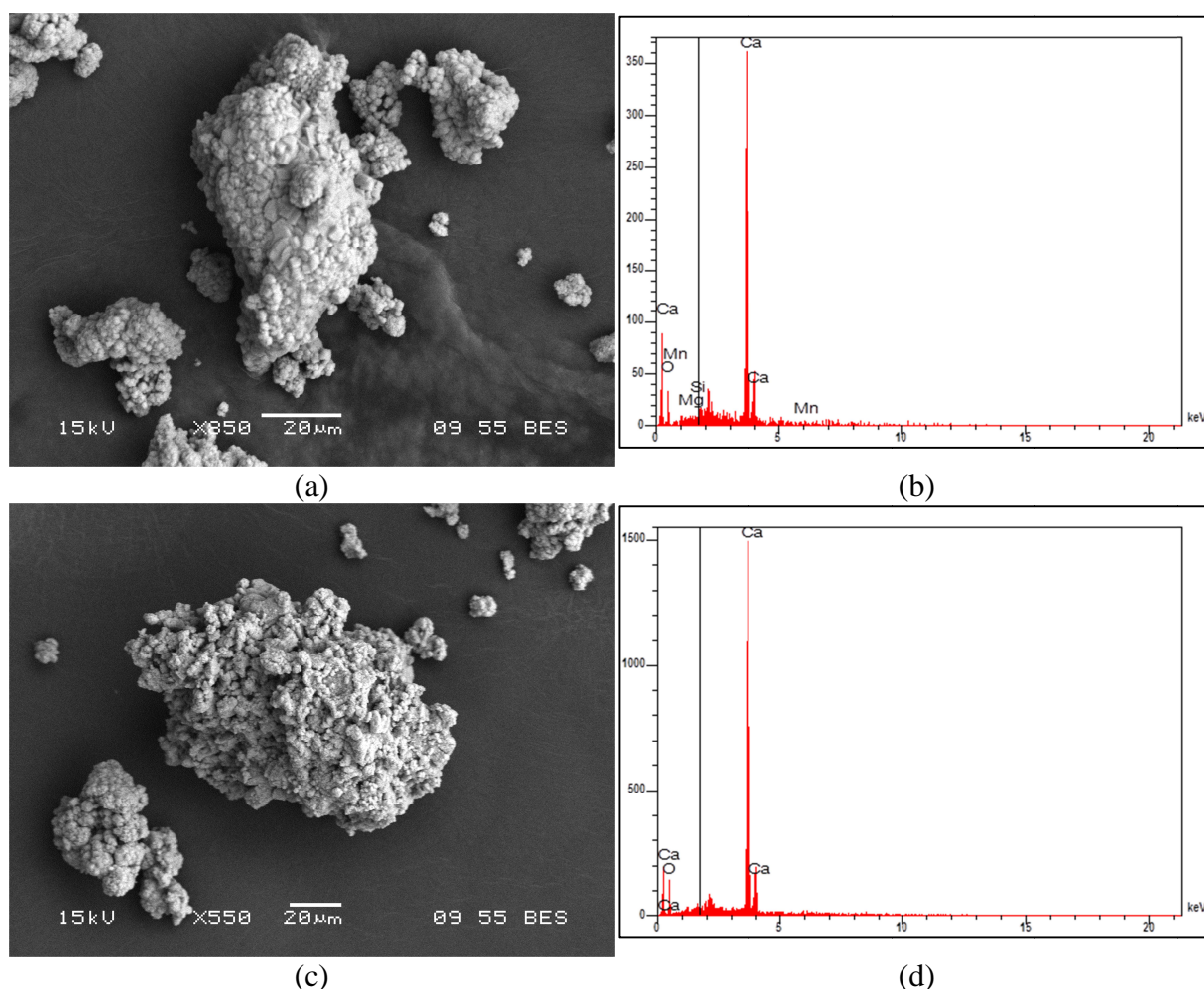


Figura 5.22: Precipitado de pH final de 8,9, com semente: fotomicrografia, com aumento de 850 vezes (a) e o espectro EDS da partícula central (b); fotomicrografia, com aumento de 550 vezes (c) e o espectro EDS da partícula central (d).

Na Figura 5.23, são exibidas as fotomicrografias do precipitado obtido a partir do pH final de 8,8, com o uso de semente, com aumento de 300 vezes (a), aumento de 950 vezes (b) e o respectivo espectro EDS da partícula central (c). Verifica-se em (a) que as dimensões dos aglomerados estão entre 5 e 80  $\mu\text{m}$ . Em (b), nota-se a presença de cristais romboédricos. No espectro apresentado em (c), constata-se a predominância de Ca, o que reforça a presença da  $\text{CaCO}_3$ .

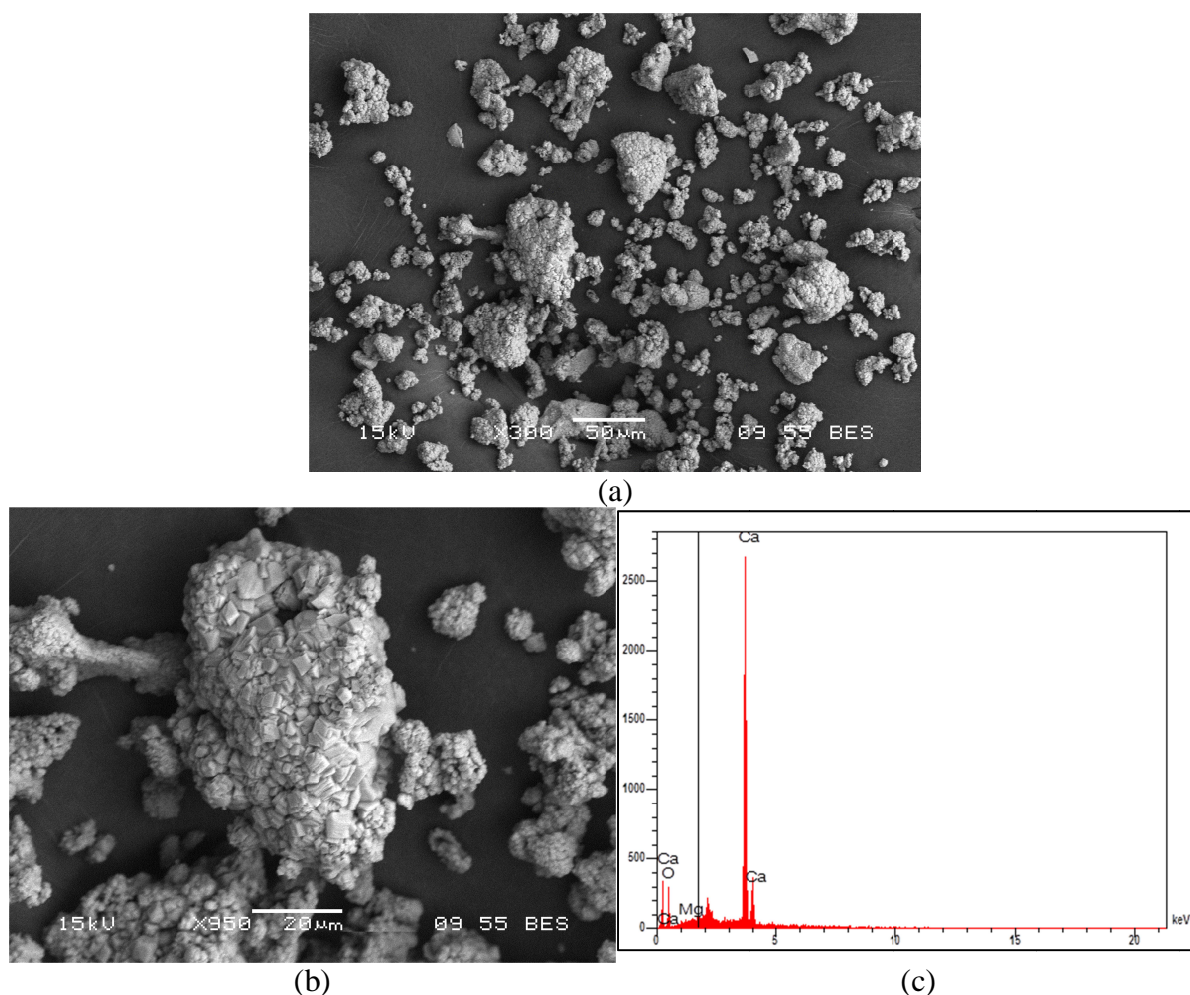


Figura 5.23: Precipitado de pH final de 8,8, com semente: fotomicrografia com aumento de 300 vezes (a); fotomicrografia com aumento de 950 vezes (b) e espectro EDS da partícula central (c).

#### 5.3.4 Síntese dos resultados da 2ª etapa

A metodologia utilizada para fixar o pH dos ensaios (8,5; 10,0 e 11,5) foi bem sucedida ao se dosar hidróxido de sódio, todavia ao usar hidróxido de cálcio observou-se o oposto. Atribuiu-se essa diferença ao fato do hidróxido de cálcio liberar duas hidroxilas. Nesse sentido, a realização de ensaios de precipitação com o hidróxido de cálcio, abrangendo a faixa de pH de 10,0 a 11,5, foi tida como fundamental para melhor avaliação desse alcalinizante (3ª etapa deste estudo).

No que se refere às condições experimentais, o fator pH final interferiu positivamente na remoção de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$ , ao se dosar hidróxido de sódio (pH entre 8,6 e 11,4) bem como na remoção de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  ao se dosar hidróxido de cálcio (pH entre 8,7 e 8,9). O fator aplicação de semente interferiu, também positivamente, apenas na remoção de sulfato quando da utilização de hidróxido de cálcio. Na dosagem de hidróxido de sódio, embora a aplicação semente não tenha melhorado a remoção dos compostos, proporcionou o aumento do tamanho dos cristais, o que pode ser relevante na etapa de separação sólido-líquido. Pode-se explicar o fato da presença de semente não ter proporcionado o aumento de remoção dos compostos desejados pela desproporção das dimensões das partículas de quartzo e os cristais obtidos na precipitação, como pôde ser observado nas fotomicrografias obtidas. O quartzo deveria ter sido cominuído para a faixa de 10 a 50  $\mu\text{m}$  para apresentar tamanho compatível com o precipitado formado.

#### 5.4 Terceira etapa: dosagem em excesso de hidróxido de cálcio

A amostra do concentrado utilizada nesta etapa também foi caracterizada em relação aos principais componentes, conforme é apresentado na Tabela V.13. O pH do concentrado era de 8,05.

Tabela V.13: Composição do concentrado da terceira etapa

Concentração	Alcalinidade (como $\text{CaCO}_3$ )	Cálcio	Magnésio	Sílica	Sulfato
Mássica ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	300,04	114,74	16,69	49,10	257,92
Molar (mM)	3,00	2,86	0,69	0,82	2,68

Os ensaios foram conduzidos variando-se a dosagem de hidróxido de cálcio de 422,5 a 910 mg.L<sup>-1</sup>. Na Figura 5.24 são apresentados os resultados médios do pH final obtido em função da dosagem de hidróxido de cálcio. Observa-se que o ponto de menor dosagem, 422,5 mg.L<sup>-1</sup>, foi suficiente para provocar um pH final de 10,11. Nos ensaios da primeira etapa, com uma dosagem superior, de 572 mg.L<sup>-1</sup> chegou-se ao pH final médio de 9,26. Inicialmente, essa diferença pode parecer incoerente. Todavia, quando se confronta o pH inicial e a composição do concentrado usado em cada etapa percebe-se que não existe divergência. O concentrado da terceira etapa tinha pH inicial maior no que o do primeira: 8,05 frente a 7,75. Ademais, o teor de alcalinidade (300,04 mg.L<sup>-1</sup>), cálcio (114,74 mg.L<sup>-1</sup>) e magnésio (16,69 mg.L<sup>-1</sup>) do concentrado da terceira etapa, componentes que reagem com o hidróxido de cálcio, eram menores que os teores do concentrado da primeira etapa (374,90 mg.L<sup>-1</sup>, 120,60 mg.L<sup>-1</sup> e 25,03 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente). Em síntese, de posse desses dados, era de se esperar que o concentrado da terceira etapa demandasse uma menor dosagem de hidróxido de cálcio.

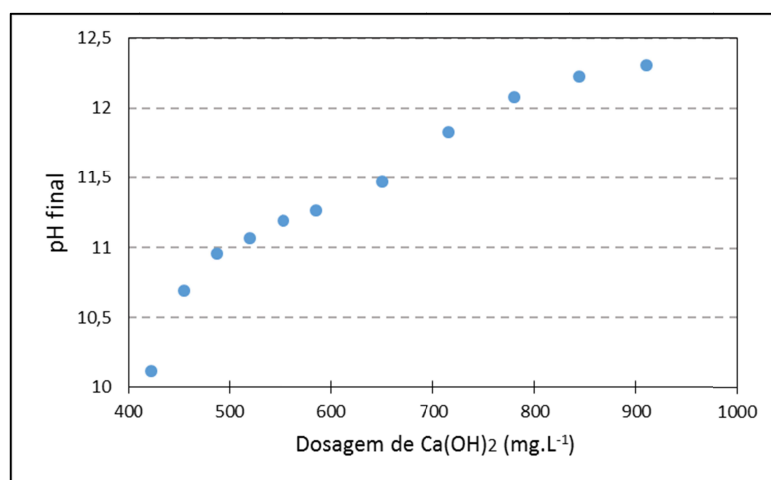


Figura 5.24: Gráfico do pH final em função da dosagem de Ca(OH)<sub>2</sub>

Na Figura 5.25 são exibidos os resultados médios de remoção percentual de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SiO<sub>2</sub> e Sulfato em função da dosagem de Ca(OH)<sub>2</sub> e do pH final. Nota-se que a remoção percentual de Ca<sup>2+</sup> decresce à medida que se aumenta a dosagem de Ca(OH)<sub>2</sub>, com redução mais acentuada a partir do pH de 10,7. Essa observação está em concordância com o relato de Sincero e Sincero (2003). Os autores explicam que a solubilidade mais baixa do íon Ca<sup>2+</sup> em equilíbrio com CaCO<sub>3</sub> é por volta do pH de 9,3 e que, em pH acima de 11,0, ela aumenta consideravelmente, como apresentado na Figura 5.26.

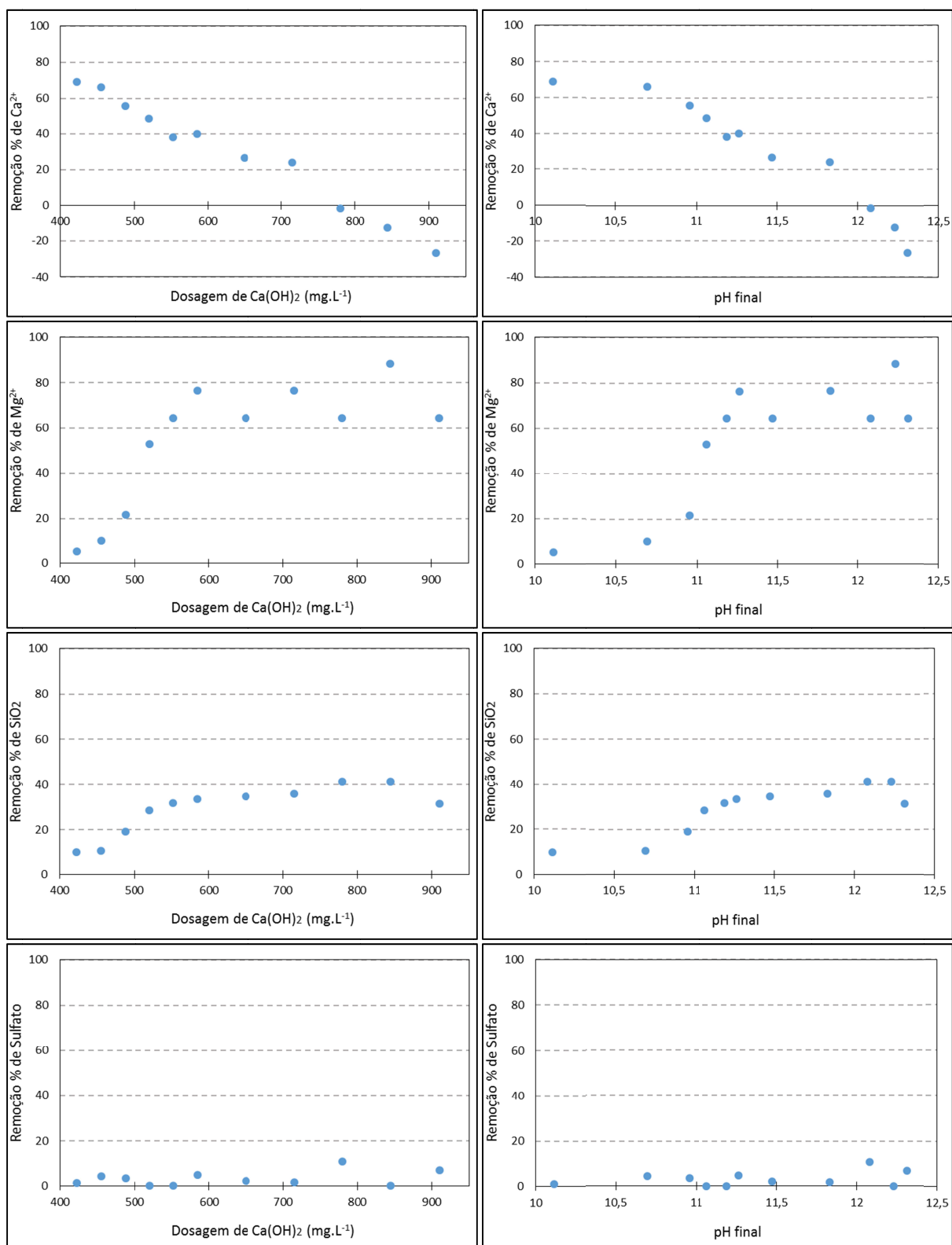


Figura 5.25: Gráficos de remoção média percentual de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SiO}_2$  e Sulfato em função da dosagem de  $\text{Ca(OH)}_2$  e do pH final

O resultado de concentração residual média de  $\text{Ca}^{2+}$  é apresentado na Figura 5.27, para facilitar a comparação dos resultados com a Figura 5.26.

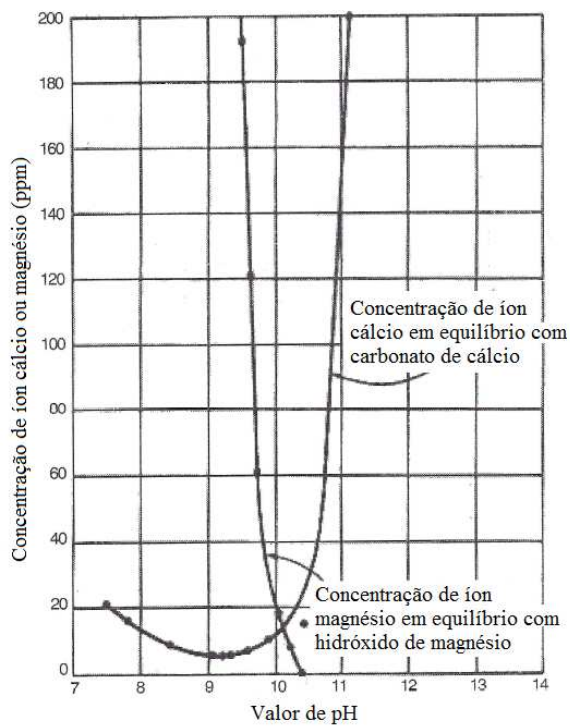


Figura 5.26: Concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em equilíbrio com  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , respectivamente.

Fonte: Adaptado de SINCERO e SINCERO, 2003, p. 483.

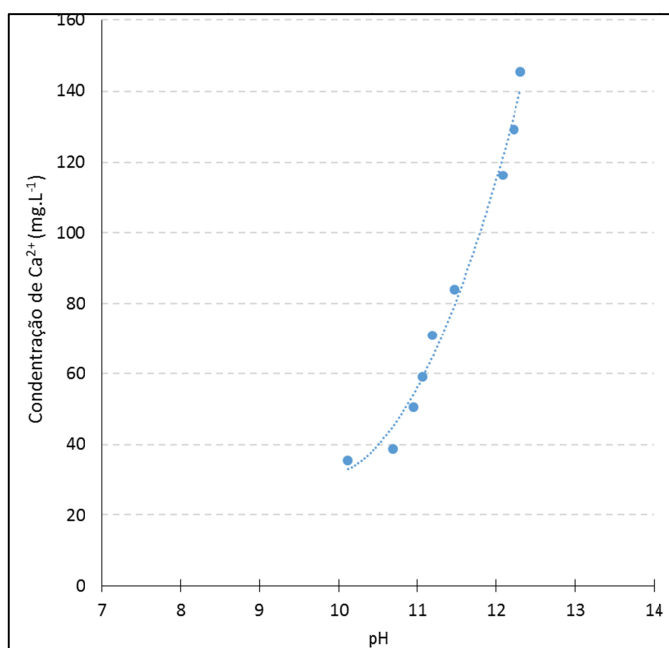


Figura 5.27: Concentração média de  $\text{Ca}^{2+}$  em função do pH final dos ensaios

Portanto, a dosagem em excesso de hidróxido de cálcio durante a precipitação pode ter o efeito indesejável de aumentar a concentração de  $\text{Ca}^{2+}$ . Os íons  $\text{Ca}^{2+}$  são convertidos em complexos de  $\text{CaOH}^+$ , de elevada solubilidade, de acordo com a equação (5.2) (SINCERO e SINCERO, 2003).



Para o íon  $\text{Mg}^{2+}$ , ocorre o oposto: o aumento da dosagem de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e consequentemente do pH, favoreceu a remoção percentual de  $\text{Mg}^{2+}$ . Sincero e Sincero (2003) também relatam que o aumento do pH de 9,8 a 10,4 reduz drasticamente a solubilidade dos íons  $\text{Mg}^{2+}$  em equilíbrio com  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , conforme já apresentado na Figura 5.9. Os autores afirmam ainda que aumentar o pH além de 10,4 não afeta a solubilidade, já que ela é praticamente nula nesse pH. Em contraste à afirmação dos autores, foi observado que a remoção percentual de  $\text{Mg}^{2+}$  passou a ser considerável, maior do que 50%, a partir do pH de 11,0, e estagnou na faixa de 64 a 88% a partir do pH de 11,2.

No que concerne à remoção percentual de sílica, ela não é apreciável (inferior a 20%) até o pH de 11,0. Na faixa de pH de 11,2 a 12,0 a remoção percentual de sílica aumenta, variando de 32 a 41%. Por sua vez, a remoção de sulfato permaneceu abaixo de 20%, independente da dosagem de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e do pH final. Como relatado anteriormente, essa observação é consistente com a constância da solubilidade do composto de sulfato,  $\text{CaSO}_4$ , em relação ao pH.

### **5.5 Avaliação do potencial de incrustação do concentrado tratado por precipitação**

Foram selecionadas duas composições de concentrado tratadas pela dosagem de hidróxido de sódio, dentre os ensaios da segunda etapa, para verificação da viabilidade do tratamento subsequente por mais dois estágios de OI, utilizando o ROSA. Foi escolhido o tratamento com esse alcalinizante porque ele possibilitou maior remoção de  $\text{Ca}^{2+}$ , uma vez que foi identificada uma elevada propensão por incrustação por  $\text{CaCO}_3$ .

Além disso, escolheu-se uma amostra correspondente ao ponto central e outra correspondente ao ponto de pH mais elevado, sem a dosagem de semente. As propriedades das amostras selecionadas são exibidas na Tabela V.14.

Tabela V.14: Propriedades das amostras de concentrado tratado selecionadas para alimentação

Composição (mg.L <sup>-1</sup> ) ou propriedade	Alimentação	
	4	5
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NH <sub>3</sub> <sup>(*)</sup>	2,71	0,00
Na <sup>- (**)</sup>	540,98	565,67
Mg <sup>2+</sup>	17,32	1,92
Ca <sup>2+</sup>	9,50	3,16
CO <sub>3</sub> <sup>2- (***)</sup>	61,03	105,35
HCO <sub>3</sub> <sup>- (***)</sup>	62,50	2,03
Cl <sup>-</sup>	538,86	521,28
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	385,64	359,26
SiO <sub>2</sub>	53,49	45,84
CO <sub>2</sub> <sup>(***)</sup>	0,01	0,00
STD <sup>(****)</sup>	1671,99	1680,43
pH	9,92	11,65

(\*) Distribuição proposta pelo software, em função do pH.

(\*\*) Adicionado para balancear a carga.

(\*\*\*) Estimados por balanço de massa a partir da alcalinidade total original e pelo consumo de parte do Ca<sup>2+</sup> (foi considerado que 100% do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> precipitou como CaSO<sub>4</sub>). A distribuição das espécies é proposta pelo software, em função do pH.

(\*\*\*\*) Estimado pelo software.

Ao propósito de estabilizar a amostra antes do tratamento por OI, fez-se necessário a correção de pH. Foi utilizado o recurso de adição de ácido do próprio ROSA. Escolheu-se o ácido clorídrico e ajustou-se o pH para 8,5. Na Tabela V.15 são exibidas as propriedades da alimentação, após a correção de pH.

Semelhantemente ao procedimento adotado durante as simulações preliminares do concentrado, buscou-se atingir a máxima recuperação. Para essa finalidade, variou-se as

configurações do sistema, com a cautela de não infringir os parâmetros de projeto recomendados pelo fabricante. Os Casos avaliados são apresentados na Tabela IV.5.

Tabela V.15 – Propriedades das amostras de concentrado tratado selecionadas para alimentação com pH corrigido com HCl

Composição (mg.L <sup>-1</sup> ) ou propriedade	Alimentação	
	4	5
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NH <sub>3</sub> <sup>(*)</sup>	15,48	14,64
Na <sup>- (*)</sup>	542,91	668,30
Mg <sup>2+</sup>	17,32	1,92
Ca <sup>2+</sup>	9,50	3,16
CO <sub>3</sub> <sup>2- (**)</sup>	4,43	3,84
HCO <sub>3</sub> <sup>- (**)</sup>	119,45	104,70
Cl <sup>-</sup>	575,47	739,81
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	385,64	359,26
SiO <sub>2</sub>	53,46	45,82
CO <sub>2</sub> <sup>(**)</sup>	0,42	0,37
STD <sup>(***)</sup>	1723,71	1941,50
pH	8,50	8,50

(\*\*) Distribuição proposta pelo software, em função do pH.

(\*\*) Adicionado para balancear a carga.

(\*\*\*) Estimados por balanço de massa a partir da alcalinidade total original e pelo consumo de parte do Ca<sup>2+</sup> (foi considerado que 100% do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> precipitou como CaSO<sub>4</sub>). A distribuição das espécies é proposta pelo software, em função do pH.

(\*\*\*\*) Estimado pelo software.

Na Tabela V.16 são apresentados os cálculos de potencial de incrustação do concentrado tratado, denominado alimentação, com e sem a correção de pH. Nota-se que a alimentação de composição 5 apresenta elevada saturação de hidróxido de magnésio, todavia o ajuste de pH retira a alimentação da condição de saturação. Analogamente, o Índice de Saturação de Langelier também sofre redução com o ajuste do pH, proporcionada pela função da mudança da distribuição das espécies CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Nas Tabelas V.17, V.18 e V.19 são apresentados os cálculos do ROSA de potencial de incrustação para o novo concentrado gerado, para os Casos IV, V e VI, respectivamente. Em todas as situações avaliadas, a concentração de sulfato de cálcio e de hidróxido de magnésio para o novo concentrado ficou muito aquém da saturação, indicativo de baixa

propensão de formação de incrustação desses compostos. No que se refere ao potencial de incrustação por  $\text{CaCO}_3$ , o novo concentrado apresentou Índice de Saturação de Langelier inferior a 1,0 para todas as situações. Nessa condição, o fabricante da membrana informa que a formação de incrustações de  $\text{CaCO}_3$  é facilmente controlável pela adição de  $20 \text{ mg.L}^{-1}$  de hexametáfosfato de sódio na corrente de concentrado (DOW, 2015). No que concerne à sílica, foi possível obter concentrado abaixo da condição de saturação no Caso IV para ambas as alimentações. Contudo, no Caso V, a alimentação 4 ficou acima da saturação e, no Caso VI, ambas as alimentações ficaram nessa condição. Desse modo, com intuito de comparar as condições de tratamento da alimentação 4 e 5, decidiu-se verificar qual a recuperação máxima que a Alimentação 4 possibilita, sem alcançar a saturação de sílica, nomeado de Caso VII (configurações na Tabela IV.6). Os resultados dos cálculos obtidos são apresentados na Tabela V.20 e foi possível alcançar a recuperação de 68%.

Tabela V.16: Cálculos do potencial de incrustação realizados pelo ROSA para Alimentação 4 e 5

Cálculos de potencial de incrustação	Alimentação			
	4		5	
	pH sem ajuste	pH ajustado	pH sem ajuste	pH ajustado
Índice de Saturação de Langelier	1,06	-0,08	0,83	- 0,62
Força iônica (M)	0,03	0,03	0,03	0,03
$\text{CaSO}_4$ (% de saturação)	0,63	0,64	0,20	0,20
$\text{SiO}_2$ (% de saturação)	12,26	28,92	3,7	24,79
$\text{Mg(OH)}_2$ (% de saturação)	41,07	0,06	13131,04	0,01

Tabela V.17: Cálculos do potencial de incrustação realizados pelo ROSA do concentrado obtido após mais dois estágios de OI - Caso IV

Cálculos de potencial de incrustação	Alimentação	
	4	5
Índice de Saturação de Langelier	0,46	-0,11
Força iônica (M)	0,07	0,07
$\text{CaSO}_4$ (% de saturação)	1,90	0,54
$\text{SiO}_2$ (% de saturação)	64,41	54,58
$\text{Mg(OH)}_2$ (% de saturação)	0,08	0,01

Tabela V.18: Cálculos do potencial de incrustação realizados pelo ROSA do concentrado obtido após mais dois estágios de OI - Caso V

Cálculos de potencial de incrustação	Alimentação	
	4	5
Índice de Saturação de Langelier	0,76	0,21
Força iônica (M)	0,10	0,11
CaSO <sub>4</sub> (% de saturação)	3,43	1,00
SiO <sub>2</sub> (% de saturação)	105,01	91,10
Mg(OH) <sub>2</sub> (% de saturação)	0,06	0,01

Tabela V.19: Cálculos do potencial de incrustação realizados pelo ROSA do concentrado obtido após mais dois estágios de OI - Caso VI

Cálculos de potencial de incrustação	Alimentação	
	4	5
Índice de Saturação de Langelier	0,88	0,29
Força iônica (M)	0,12	0,13
CaSO <sub>4</sub> (% de saturação)	4,31	1,19
SiO <sub>2</sub> (% de saturação)	128,45	106,80
Mg(OH) <sub>2</sub> (% de saturação)	0,10	0,01

Tabela V.20: Cálculos do potencial de incrustação realizados pelo ROSA do concentrado obtido após mais dois estágios de OI - Caso VII

Cálculos de potencial de incrustação	Alimentação
	4
Índice de Saturação de Langelier	0,72
Força iônica (M)	0,10
CaSO <sub>4</sub> (% de saturação)	3,16
SiO <sub>2</sub> (% de saturação)	97,79
Mg(OH) <sub>2</sub> (% de saturação)	0,09

Na Tabela V.21 é apresentado um sumário de comparação entre os resultados obtidos para a Alimentação 4 e 5. Para o cálculo da recuperação global<sup>14</sup>, foi somada a vazão de permeado da primeira etapa de OI ( $75 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) ao produzido pela segunda etapa proposta e, como a entrada foi considerada de  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , essa soma corresponde à recuperação global da unidade. Nota-se que o consumo de hidróxido de sódio para tratar a alimentação 5 é 2,2 vezes superior ao consumo para tratar a alimentação 4. Analogamente, é estimado um consumo de ácido clorídrico cerca de 6 vezes superior para ajustar o pH da alimentação 5 quando comparado com a alimentação 4. Logo, o ganho na recuperação de água ao controlar o pH em 11,5 (alimentação 5) no tratamento intermediário do concentrado por precipitação é muito pequeno, apenas 0,5%, frente ao consumo adicional de produtos químicos.

Tabela V.21: Comparação dos resultados obtidos para a Alimentação 4 e 5

Parâmetro	Alimentação	
	4	5
Consumo de NaOH ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	240	528
Consumo de HCl ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) <sup>(*)</sup>	37,64	224,67
Recuperação (%)	68,0	70,0
Recuperação global (%)	92,0	92,5

(\*) Estimado pelo software ROSA (HCl a 100%).

Em suma, o controle do pH final em 10,0 durante o tratamento intermediário do concentrado por precipitação foi considerado o mais adequado. Nessa condição, vislumbra-se que a integração dos tratamentos proposta permita alcançar 92% de recuperação de água.

<sup>14</sup> Embora seja esperada alguma perda líquida tratamento intermediário por precipitação proposto, ela foi considerada nula neste cálculo.

## 6 CONCLUSÕES

O tratamento intermediário do concentrado de OI por precipitação induzida por alcalinizante mostrou-se uma rota tecnicamente viável. Esse tratamento propiciou a redução dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$  e, conseqüente, a diminuição da propensão à formação de incrustações dessa corrente a ponto de viabilizar o seu tratamento por outro passe de OI, de dois estágios.

No que se refere ao comportamento dos alcalinizantes avaliados, hidróxido de sódio e hidróxido de cálcio, o primeiro foi considerado mais eficiente. O hidróxido de sódio proporcionou a remoção mais elevada dos compostos precursores de incrustação, com menor dosagem. Em relação ao controle de pH, conclui-se que o pH de 10,0, obtido com a dosagem de  $240 \text{ mg.L}^{-1}$  de NaOH, apresentou melhor custo benefício ao se contrapor o consumo de produtos químicos e a recuperação alcançada.

A utilização de quartzo como semente não trouxe ganho na remoção dos compostos incrustantes, contudo propiciou a obtenção de precipitado com aglomerados maiores. Essa característica é importante para a separação sólido-líquido que ocorre no equipamento de precipitação, entretanto essa avaliação não foi objeto deste estudo.

Em síntese, a partir dos resultados obtidos infere-se que deve ser possível alcançar o aumento de recuperação de água almejado, de 75% para 92%, com a rota proposta.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Primordialmente, recomenda-se a avaliação de aditivos, tais como óxido de magnésio e aluminato de sódio (DOW, 2015), para maximizar a remoção de sílica no tratamento intermediário por precipitação. Após o tratamento do concentrado, a sílica passou a ser o composto limitante para se alcançar recuperações de água ainda superiores.

Ademais, sugere-se o desenvolvimento de um sistema contínuo de precipitação, em escala de laboratório, tornando viável o tratamento de um volume maior de concentrado. Dessa maneira, o concentrado tratado poderia alimentar uma unidade, também em escala de laboratório, de osmose inversa. Essa configuração permitiria validar a recuperação obtida por simulação e verificar a eficácia de diferentes anti-incrustantes.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALESSI, G. Mesmos erros de SP empurram Rio e Minas Gerais para a crise. *El país*. <[http://brasil.elpais.com/brasil/2015/02/09/politica/1423508609\\_720450.html](http://brasil.elpais.com/brasil/2015/02/09/politica/1423508609_720450.html)>. 11/02/2015. Acesso em: 23 fev. 2015.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th ed. Washington: APHA-AWWA-WEF, 1200p, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 512 - 04: Standard test methods for Chloride Ion in water*. 2004. 8 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 1067 – 92: Electrometric Titration Standard test method for Acidity or Alkalinity of water*. 1996. 8 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 1293-12: Standard test methods for pH of water*. 2012. 10 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 1426 -08: Standard test Methods for Ammonia Nitrogen in water*. 2008. 7 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. *D4189 – 07: Standard Test Method for Silt Density Index (SDI) of Water*. 2014. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 14340: Determinação da condutividade e resistividade elétrica. Rio de Janeiro, 1999. 3 p.

BADRUZZAMAN, M., OPPENHEIMER, J., ADHAMB, S., KUMAR, M. Innovative beneficial reuse of reverse osmosis concentrate using bipolar membrane electro dialysis and electrochlorination processes. *Journal of Membrane Science*, v. 326, n. 2, p. 392–399, Jan. 2009.

BAKER, R. W., *Membrane Technology and Applications*, 2. ed. Nova York: John Wiley & Sons. 2004. 538 p.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. *Resolução Conjunta n. 50*, de 21 de Janeiro de 2015. Estabelece regras e condições de restrição de uso para captações de água nas bacias dos rios Jaguari, Camanducaia e Atibaia. Brasília, 21 jan. 2015.

BRASIL. Presidência da República. *Lei Federal n. 9.437*, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da Constituição Federal e altera o artigo 1 da Lei n. 8001 de 13 de março de 1990. Brasília, 8 jan. 1997. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm)>. Acesso em: 04 fev. 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. *Resolução n. 357, de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, 18 mar. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2015.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - COPASA. Nova direção da Copasa pede à população uma redução de 30% no consumo de água. <[http://www.copasa.com.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infolid=3617&sid=129&tpl=selection\\_only](http://www.copasa.com.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infolid=3617&sid=129&tpl=selection_only)>. Acesso em: 10 fev. 2015.

COMSTOCK, S. E. H., BOYER, T. H., GRAF, K. C. Treatment of nanofiltration and reverse osmosis concentrates: Comparison of precipitative softening, coagulation, and anion exchange. *Water Research*, v. 45, p. 4855 – 4865, Jul. 2011.

CORRAL, A. F., YENAL, U., STRICKLE, R., YAN, D., HOLLER, E., HILL, C., ELA, W. P., ARNOLD, R. G. Comparison of slow sand filtration and microfiltration as pretreatments for inland desalination via reverse osmosis. *Desalination*, v. 334, p. 1–9, 2014.

DEZOTTI, M. *Processos e Técnicas para o Controle Ambiental de Efluentes Líquidos*. Série Escola Piloto em Engenharia Química COPPE/UFRJ, v.5, editora e-papers, 2008. 360 p.

DOW. Product Information. DOW™ FILMTEC™ Membranes: DOW FILMTEC BW30-400 High Rejection, High Surface Area Brackish Water RO Element. <[http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_090d/0901b8038090d9a2.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/609-00091.pdf&fromPage=GetDoc](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_090d/0901b8038090d9a2.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/609-00091.pdf&fromPage=GetDoc)>. Acesso em: 25/07/2014.

DOW. Tech Manual Excerpt. Water Chemistry and Pretreatment: Calcium Carbonate Scale Prevention. <[http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_003e/0901b8038003e635.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/60902017.pdf&fromPage=GetDoc](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_003e/0901b8038003e635.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/60902017.pdf&fromPage=GetDoc)>. Acesso em: 21/02/2015.

DOW. Tech Manual Excerpt. Water Chemistry and Pretreatment: Scale Control. <[http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_003e/0901b8038003e5ed.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/609-02012.pdf&fromPage=GetDoc](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_003e/0901b8038003e5ed.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/609-02012.pdf&fromPage=GetDoc)>. Acesso em: 21/02/2015.

DOW. Tech Manual Excerpt. Water Chemistry and Pretreatment: Silica Scale Prevention. <[http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_003c/0901b8038003c01d.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/60902022.pdf&fromPage=GetDoc](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_003c/0901b8038003c01d.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/60902022.pdf&fromPage=GetDoc)>. Acesso em: 21/02/2015.

FLYNN, D. J. *The Nalco Water Handbook*: Nalco Company. 3. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2009. 1280 p.

GABELICH, C.J., XU, P., COHEN, Y. Concentrate treatment for inland desalting. In: ESCOBAR, I. C.; SCHÄFER, A. I. *Sustainability Science and Engineering*; Sustainable Water for the Future: Water Recycling versus Desalination. Elsevier, 2010. v. 2, cap. 10, p. 295-326.

GABELICH, C. J., WILLIAMS, M. D., RAHARDIANTO, A., FRANKLIN, J. C., COHEN, Y. High-recovery reverse osmosis desalination using intermediate chemical demineralization. *Journal of Membrane Science*. v. 301, p. 131–141. Sep. 2007.

GIULIETTI, M., SECKLER, M. M., DERENZO, S., RÉ, M.I., CEKINSKI, E. Industrial crystallization and precipitation from solutions: State of the technique. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. v.18, n. 4, p. 423 - 440. 2001. <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S010466322001000400007&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010466322001000400007&lng=en&nrm=iso)>.

GRAY, S., SEMIAT, R., DUKE, M., RAHARDIANTO, A., COHEN, Y. Seawater use and desalination technology. In: WILDERER, P. *Treatise on Water Science: Water-Quality Engineering*. 1. ed. Elsevier, 2011. v. 4. cap. 4. pp. 73-105.

GREENLEE, L. F., TESTA F., LAWLER, D. F., FREEMAN, B. D., MOULIN, P. The effect of antiscalant addition on calcium carbonate precipitation for simplified synthetic brackish water reverse osmosis concentrate. *Water Research*, v. 44, p. 2957 – 2969. Mar. 2010.

HABERT, A. C., BORGES, C. P., NOBREGA, R. *Processos de separação com membranas*. Rio de Janeiro: E-papers, 2006. 180 p.

HABERT, A. C., BORGES, C. P., NOBREGA, R., OLIVEIRA, D. R., RAMOS, G. M., BERTOLDO, L. C. Fundamentos e operação dos processos de nanofiltração e osmose inversa. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. Apostila de curso.

JOHIR, A.H., KHORSHEED, C., VIGNESWARAN, S., SHON, H.K. In-line flocculation–filtration as pre-treatment to reverse osmosis desalination. *Desalination*, v. 247, p. 85–93, 2009.

KORNGOLD, E., ARONOV, L., DALTROPHE, N. Electrodialysis of brine solutions discharged from an RO plant. *Desalination*, v. 242, p. 215–227, 2009.

KOO, C. H., MOHAMMAD, A. W., SUJA, F., TALIB, M. Z. M. Review of the effect of selected physicochemical factors on membrane fouling propensity based on fouling indices. *Desalination*, v. 287, p. 167–177, 2012.

LERMONTOV, A., BORGES, C. P., REUTHER, P. W. T., YOKOYAMA, L., LUVISOTTO, D. L. Análise econômica da dessalinização de água do mar por osmose inversa visando abastecimento público no Estado do Rio de Janeiro. 2013. <<http://siteteste.grupoaguasdobrasil.com.br/aguas-niteroi/wpcontent/uploads/2013/01/artigo- dessanilizacao.pdf>>. Acesso em 25/09/2014.

METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 1469 p.

MOODY, B.J. *Comparative Inorganic Chemistry*. 3 ed. London: Edward Arnold Publishers, 1965. 388 p.

MORILLO, J., USERO, J., ROSADO, D., BAKOURI, H. E., RIAZA, A., BERNAOLA, F. J. Comparative study of brine management technologies for desalination plants. *Desalination*, v. 336, p. 32 – 49. Jan. 2014.

MULDER, M. *Basic Principles of Membrane Technology*. 2. ed. Kluwer Academic Publishers, 1996. 564 p.

MULLIN, J. *Crystallization*. 4. ed. Butterworth-Heinemann, 2001. 600 p.

NEOFOTISTOU, E., DEMADIS, K. D. Use of antiscalants for mitigation of silica (SiO<sub>2</sub>) fouling and deposition: fundamentals and applications in desalination systems. *Dessalination*, v. 167, p. 257 – 272. 2004.

PÉREZ-GONZÁLEZ, A., URTIAGA, A. M., IBÁÑEZ, R., ORTIZ, I. State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates. *Water Research*, v. 46, n. 2, p. 267 – 283, Fev. 2012.

PINTO, B. V. Características química e físico-químicas de águas subterrâneas do Estado do Rio de Janeiro. 2006. 146 p. (Dissertação de mestrado em Química) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

RAHARDIANTO, A., GAO, J., GABELICH, C. J., WILLIAMS, M. D., COHEN, Y. High recovery membrane desalting of low-salinity brackish water: Integration of accelerated precipitation softening with membrane RO. *Journal of Membrane Science*, v. 289, p.123–137, 2007.

RAHARDIANTO, A., MCCOOL, B. C., COHEN, Y. Accelerated desupersaturation of reverse osmosis concentrate by chemically-enhanced seeded precipitation. *Desalination*, v. 264, p. 256–267, 2010.

REAHL, E.R. Reclaiming reverse osmosis blowdown with electrodialysis reversal. *Desalination*, v. 78, p. 77 – 89, 1990.

RENOU, S., POULAIN, S., GIVAUDAN, J. G., MOULIN, P. Treatment process to stabilized leachates: lime precipitation – prefiltration – reverse osmosis. *Journal of Membrane Science*, v. 313, p. 9-22, Nov. 2007.

ROVANI, M. Z. *Estudo da osmose inversa na produção de água desmineralizada para caldeiras*. 2012. 71 p. (Dissertação de mestrado em Engenharia de Alimentos) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

SALVADOR COB, S., BEAUPIN, C., HOFES, B., NEDERLOF, M. M., HARMSSEN, D. J. H., CORNELISSEN, E.R., ZWIJNENBURG, A., GENCELI GÜNER, F.E., WITKAMP, G. J. Silica and silicate precipitation as limiting factors in high-recovery reverse osmosis operations. *Journal of Membrane Science*. v. 423–424, p. 1–10, Dec. 2012.

SINCERO, A. P., SINCERO, G. A. *Physical-chemical treatment of water and wastewater*. IWA Publishing, London, 2003.

SINGH, R. *Hybrid Membrane Systems for Water Purification: Technology, Systems Design and Operations*. 1. ed. Elsevier, 2006. 384 p.

SQUIRE, D. Reverse osmosis concentrate disposal in the UK. *Desalination*, v. 132, p. 47 -54. Jul. 2000.

SUBRAMANI, A., JACANGELO, J. G. Treatment technologies for reverse osmosis concentrate volume minimization: A review. *Separation and Purification Technology*, v. 122, p. 472–489, 2014.

TANAKA, Y. *Ion Exchange Membranes: Fundamentals and Applications*. Membrane Science and Technology, v. 12. 1 .ed. Elsevier, 2007. 546 p.

SANTOS, J., BIBIANO, B. Como São Paulo pode superar a crise hídrica. *VEJA*. <<http://veja.abril.com.br/noticia/ciencia/como-sao-paulo-pode-superar-a-crise-hidrica>>. 19/10/2014. Acesso em: 23 fev. 2015.

WERKEMA, M. C. C, AGUIAR, S. *Otimização estatística de processos: como determinar a condição de operação de um processo que leva ao alcance de uma meta de melhoria*, v.9. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Otoni, 1996. 331 p.

YIANTSIOS, S.G., SIOUTOPOULOS, D., KARABELAS, A.J. Colloidal fouling of RO membranes: an overview of key issues and efforts to develop improved prediction techniques. *Desalination*, v. 183, p. 257–272, Fev. 2005.

ZHANG, Y., GHYSELBRECHT, K., MEESSCHAERT, B., PINOY, L., VAN DER BRUGGEN, B. Electrodialysis on RO concentrate to improve water recovery in wastewater reclamation. *Journal of Membrane Science*, v. 378, p. 101–110, Ago. 2011.

## 9 ANEXOS

### 9.1 Resultados das análises químicas

#### 9.1.1 Caracterização do concentrado

Data	Alcalinidade	Amônia	Cálcio	Cloreto	Condutividade	DQO
	mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>	mg N-NH <sub>3</sub> .L <sup>-1</sup>	mg Ca <sup>2+</sup> .L <sup>-1</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	μS.cm <sup>-1</sup>	mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup>
27/03/2014		5,65	30,72	446,32	1600	74,4
03/04/2014	394,67	4,24	106,72	439,74	1660	47,7
10/04/2014	270,9	6,44	102,67	410,67	1520	48
17/04/2014	379,14	8,5	90,55	383,7	1662	45,8
24/04/2014	382	10,22	106,72	409	1650	50,5
08/05/2014	199,89	6,78	80,85	316	1220	49
16/05/2014	250,44	9,04	103,48	391,86	1450	51
23/05/2014	573,93	11,57	101,87	399,33	1790	56
30/05/2014	386,34		100,25	570,14	1530	49
06/06/2014	232,79	1,87	114,8	498,94	1730	52
13/06/2014	481,31	9,85	98,39	401,51	1730	
20/06/2014	428,27	7,42	97,82	398,51	1690	48,1
27/06/2014	564,88	6,66	98,39	492,48	2850	57,2
04/07/2014	456,28	4,37	113,71	218,34	2560	48,7
11/07/2014	483,26	2,07	108,87	524,87	2920	55
18/07/2014	448,69	5,6	115,32	523,79	2850	53
24/07/2014	441,68					40,4
01/08/2014						
05/08/2014						
08/08/2014	408,78	1,92	102,42	528,1	2760	56,7
15/08/2014	430,55	2,98	110,48	596,34	2890	
22/08/2014	388,4	2,24	129,84	632,12	3250	46,8
29/08/2014	550,53	15,23	108,87		3010	59,4
05/09/2014	400,55	0,82	113,71	604,42	3140	49,7
12/09/2014	550,49	9,2	111,29	573,23	3280	
19/09/2014	528,31		92,74	646,66	3400	
06/10/2014	340,62	10,58	124,42	612,66	3150	59,1
10/10/2014	542,17	19,18	147,4	951,55	3880	75,7
17/10/2014	436,91	18,26	133,93	605,57	3300	58,8
24/10/2014	435,89	18,74	127,35	628,84	3350	66,6
10/11/2014	458,97	17,78	123,01	626,71	3470	70,5
14/11/2014	464,18	17,3	119,29	590,3	3330	64,3
21/11/2014	472,75	30,1	137,36	634,21	3160	83,8
28/11/2014	518,69	28,03	125,02		3300	79,3
05/12/2014	513,23	21,26	119,88	415,47	3270	77,6
12/12/2014	611,28	19,39	144,69	528,97	3490	88,7
26/12/2014	313,34	8,21	104,81	317,96	2570	

Data	Dureza Cálcio	Dureza Total	Magnésio	pH	SDI <sub>5</sub>	Sílica
	mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>	mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>	mg Mg <sup>2+</sup> .L <sup>-1</sup>		%.min <sup>-1</sup>	mg.L <sup>-1</sup>
27/03/2014	76,61	330,64	61,73	8,74		
03/04/2014	266,13	358,87	22,54	8,68	16,59	
10/04/2014	256,05	360,89	25,48	8,07	19,04	
17/04/2014	225,81	262,1	8,82	8,36	19,48	46,23
24/04/2014	266,13	354,84	21,56		19,55	52,26
08/05/2014	201,61	274,19	66,63	7,95	18,35	25,03
16/05/2014	258,06	346,77	21,56	8,04	19,1	61,21
23/05/2014	254,03	340,72	21,07	8,34	18,91	40,2
30/05/2014	250	312,5	15,19	8,04		44,09
06/06/2014	286,29	395,16	26,46	7,29	19,05	53,23
13/06/2014	245,97	332,66	21,07	8,12	15,3	58,58
20/06/2014	243,95	314,51	17,15	7,92	18,78	53,03
27/06/2014	245,97	328,63	20,09	8,09	18,51	58,03
04/07/2014	284,27	316,53	7,84	7,99	19,83	60,86
11/07/2014	272,18	336,69	15,68	7,98	17,49	68,32
18/07/2014	288,31	364,92	18,62	7,9	19,94	43,02
24/07/2014					19,75	
01/08/2014					12,98	
05/08/2014				8,26		58,02
08/08/2014	256,05	350,8	23,03	8,03	19,18	63,29
15/08/2014	276,21	328,63	12,74	7,87		62,93
22/08/2014	324,6	443,55	28,91	8,06		73,3
29/08/2014	272,18	370,97	24,01	8,26		68,21
05/09/2014	284,27	377,01	22,54		19,05	72,03
12/09/2014	278,22	372,98	23,03	8,4	18,72	67,3
19/09/2014	231,85	370,97	33,8	8,09	18,52	70,57
06/10/2014	310,26	409,07	24,01	7,61	17,05	58,2
10/10/2014	367,57	472,31	25,45	7,91	18,13	79,31
17/10/2014	333,98	399,19	15,85	7,95		68,03
24/10/2014	317,58	420,09	24,91	8		69,48
10/11/2014	307,53	416,07	26,38	8,06		68,94
14/11/2014	297,48	389,94	22,47	7,85		68,21
21/11/2014	342,55	438,96	23,43	7,93		40,18
28/11/2014	311,78	404,09	22,43	8,35		68,39
05/12/2014	298,96	383,49	20,54	8,07		
12/12/2014	360,82	457,72	23,55	7,95		63,66
26/12/2014	261,36	340,56	19,25	8,09		53,28

Data	Sólidos Totais Suspensos	Sulfato	Carbono orgânico dissolvido	Turbidez
	mg.L <sup>-1</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	NTU
27/03/2014	3,5	288,81	17,95	0,94
03/04/2014		260,38	16,85	0,7
10/04/2014	3	252,14	16,51	1,38
17/04/2014	4	279,75	9,897	0,94
24/04/2014		269,44	12,36	0,87
08/05/2014	4	193,64	14,25	0,95
16/05/2014	6	229,03	13,06	1,02
23/05/2014	9	228,66	12,72	1,48
30/05/2014		162,74	5,14	1,01
06/06/2014	2	249,26	9,46	0,59
13/06/2014	7	227,01	15,88	1,4
20/06/2014	3	208,88	12,16	0,55
27/06/2014	3	234,84	14,51	0,46
04/07/2014	9	192,4	10,15	0,64
11/07/2014	29	236,07	3,26	1,94
18/07/2014	5	216,71		0,96
24/07/2014	9	249,26		0,26
01/08/2014				
05/08/2014				0,76
08/08/2014	4,5	186,64	26,49	0,53
15/08/2014	14	234,84	30,08	
22/08/2014	4	311,06	28,91	0,35
29/08/2014	18	322,18		0,86
05/09/2014	3	243,08	20,55	0,33
12/09/2014	1	294,17	18,07	0,47
19/09/2014	1	278,51	19,38	0,67
06/10/2014	3,5	319,71	31,49	0,61
10/10/2014	5,5	399,22	30,51	0,69
17/10/2014	6	318,06	22,28	0,48
24/10/2014	5,67	364,2		0,34
10/11/2014	4,33	399,22		0,73
14/11/2014	4	305,7		0,77
21/11/2014	4,33	313,53	14	1,17
28/11/2014	5,67	328,36	24,58	1,99
05/12/2014	6	337,01		
12/12/2014	9,66	366,68	15,26	1,21
26/12/2014	3,66	296,22	6,48	0,53

## 9.1.2 Resultados da 1ª etapa

NaOH	Tmr	Tml	Ca <sup>2+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	Mg <sup>2+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	SiO <sub>2</sub> mg.L <sup>-1</sup>	Sulfato mg.L <sup>-1</sup>	pH final
-1	-1	-1	21,42	20,02	41,78*	263,68	9,68
1	-1	-1	3,28	3,00	47,24	283,46	11,52
-1	1	-1	23,08	19,02*	55,26	359,26*	9,75
1	1	-1	7,76	3,98	33,78	227,42	10,95
-1	-1	1	19,30	19,02	20,68*	253,80*	9,83
1	-1	1	3,28	3,98	25,04	309,82	11,52
-1	1	1	16,48	19,02	50,16	253,78	9,57
1	1	1	3,22	3,00	41,78	303,24	11,52
-1	-1	-1	28,02	20,02	57,44	273,56	9,82
1	-1	-1	3,28	3,00	33,78*	316,40	11,52
-1	1	-1	31,32	22,02	51,98	385,62*	9,81
1	1	-1	8,20	3,98	35,60	260,38	11,07
-1	-1	1	20,90	19,02	43,24	293,34	9,64
1	-1	1	3,28	3,00	25,04	293,34	11,51
-1	1	1	14,84	20,02	49,42	263,68	9,71
1	1	1	1,60	3,00	37,42	313,12	11,50
-1	-1	-1	28,02	18,02	54,52	267,76	9,78
1	-1	-1	3,28	3,00	49,80	313,12	11,50
-1	1	-1	32,96	23,02	45,42	290,04*	9,72
1	1	-1	8,20	3,00	30,86	355,96*	11,02
-1	-1	1	19,30	19,02	47,24	296,64	9,76
1	-1	1	3,22	2,00	35,24	266,98	11,45
-1	1	1	16,48	18,02	67,98*	247,20	9,62
1	1	1	3,28	3,00	40,70	316,42	11,48

\*Considerado *outlier*.

Ca(OH) <sub>2</sub>	Tmr	Tml	Alcalinidade mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>	Ca <sup>2+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	Mg <sup>2+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	SiO <sub>2</sub> mg.L <sup>-1</sup>	Sulfato mg.L <sup>-1</sup>	pH final
-1	-1	-1	334,30	77,94	24,92	57,80	250,48	8,77
1	-1	-1	197,72	32,82	18,94	56,70	326,30	9,27
-1	1	-1	229,36*	67,56*	23,02	60,70	375,80*	8,63
1	1	-1	150,44	27,90	19,82	38,50*	379,04*	9,06
-1	-1	1	281,62	78,80	21,02	57,08	316,40	8,71
1	-1	1	129,72	22,52	19,02	26,86	286,76	9,56
-1	1	1	242,32	64,28	21,02	59,26	266,98	8,45
1	1	1	134,12	22,98	18,94	41,78	309,82	9,52
-1	-1	-1	295,98	82,40	22,02*	47,24*	273,56	8,59
1	-1	-1	162,58	36,10	19,94	65,44	286,56	9,28
-1	1	-1	281,38	87,34	23,02	67,26	243,90	8,30
1	1	-1	155,74	31,18	18,94	67,26	286,76	8,83
-1	-1	1	262,22	72,36	22,02	59,98	266,98	8,74
1	-1	1	132,58	22,52	19,02	23,22	290,04	9,53
-1	1	1	174,66*	36,26*	23,02	54,16	257,08	8,50
1	1	1	173,92	37,74	18,94	38,88	319,72	8,84
-1	-1	-1	305,18	82,40	25,02	58,88	263,68	8,81
1	-1	-1	193,16	34,46	19,94	80,36*	365,86*	9,21
-1	1	-1	296,46	92,28	24,02	66,54	263,68	8,78
1	1	-1	163,96	32,82	18,94	71,26	296,64	9,14
-1	-1	1	327,94	101,30	23,02	68,72	276,86	8,71
1	-1	1	135,18	22,52	20,02	36,68	313,12	9,51
-1	1	1	272,66	79,10	23,02	61,08	263,68	8,68
1	1	1	137,72	22,98	20,94	33,78	273,56*	9,41

\*Considerado *outlier*.

## 9.1.3 Resultados da 2ª etapa

NaOH	Semente	Ca <sup>2+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	Mg <sup>2+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	SiO <sub>2</sub> mg.L <sup>-1</sup>	Sulfato mg.L <sup>-1</sup>	pH final
0	0	6,6	19,2	56,7	395,52	9,66
-1	1	115,5	22,0	60,0	382,34	8,53
1	1	6,6	6,0	47,6	395,52	11,13
-1	-1	122,1	20,0	59,7	405,4	8,46
1	1	9,5	13,5*	58,4*	398,82	10,48
1	-1	3,2	3,8	46,6	428,48	11,27
1	-1	3,2	3,8	47,3	428,48	11,34
-1	-1	110,9	23,1	58,4	484,5	8,68
-1	1	114,0	21,2	59,7	438,36	8,68
-1	-1	114,0	23,1	59,3	431,76	8,56
1	-1	3,2	1,9	48,0	405,4	11,45
1	-1	3,2	3,8	47,5	359,26	11,47
1	1	3,2	1,9	46,0	346,08	11,38
-1	-1	117,2	21,2	57,7	398,82	8,63
-1	1	117,2	21,2	58,6	412	8,62
-1	1	114,0	23,1	60,2	405,4	8,66
0	0	12,7	15,4	56,4	428,48	9,90
0	0	9,5	17,3	53,5	385,64	9,92
1	-1	3,2	1,9	45,8	359,26	11,65
1	1	3,2	3,8	48,6	405,4	11,66
0	0	15,8	15,4	56,9	418,6	10,07
-1	-1	114,0	23,1	53,8	388,92	8,56
0	0	9,5	19,2	53,8	369,16	9,98
1	1	3,2	1,9	39,1	388,92	11,62
-1	1	117,2	21,2	53,5	365,86	8,51

\*Considerado *outlier*.

Ca(OH) <sub>2</sub>	Semente	Alcalinidade mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>	Ca <sup>2+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	Mg <sup>2+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	SiO <sub>2</sub> mg.L <sup>-1</sup>	Sulfato mg.L <sup>-1</sup>	pH final
0	0	204,5	41,18	21,18	26,54*	359,26	8,54
-1	1	401,56	129,88	21,18	25,98*	362,56	8,48
1	1	168,12	28,52	19,24	26,9	352,68	8,92
-1	-1	399,12	129,88	19,24	24,72	402,1	8,54
1	1	275,92	72,86*	19,24	60,38	405,4	8,31
1	-1	175,72	31,68	19,24	58,56	362,56	8,94
1	-1	167,24	28,52	19,24	50,74	395,52	8,77
-1	-1	395,12	126,72	21,18	58,02	405,4	8,48
-1	1	395,94	126,72	21,18	57,1	347,26	8,73
-1	-1	402,22	126,72	21,18	46,92	412	8,89
1	-1	175,62	31,68	19,24	47,1	461,44	9,04
1	-1	180,2	31,68	19,24	24,54	428,48	8,98
1	1	177,34	31,68	19,24	24,54	357,6	8,81
-1	-1	395,7	123,56	21,66	38,54	458,14	8,67
-1	1	396,34	123,56	21,18	59,48	323	8,73
-1	1	388,12	123,56	23,1	59,3	461,44	8,72
0	0	176,44	28,52	19,24	56,74	444,96*	9,01
0	0	188,34	34,84	21,66	58,92	352,26*	8,81
1	-1	171,56	28,52	19,24	59,1	398,82	8,94
1	1	168,12	31,68	17,32	59,1	336,2	9,04
0	0	214,12	47,52	21,18	57,66	418,6	8,66
-1	-1	460,1	123,56	21,18	55,1	398,8	8,72
0	0	546,7	41,18	17,32	53,1	359,26	8,84
1	1	299,88	31,68	19,24	57,28	392,22	9,01
-1	1	471,76	123,56	21,18	54,02	398,82	8,72

\*Considerado *outlier*.

## 9.1.4 Resultados da 3ª etapa

Ensaio	Dosagem de Ca(OH) <sub>2</sub> mg.L <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	Mg <sup>2+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	SiO <sub>2</sub> mg.L <sup>-1</sup>	Sulfato mg.L <sup>-1</sup>	pH final
1	585,0	54,94	5,9	33,08	250,5	11,45
2	650,0	67,88	5,9	32	263,68	11,58
3	715,0	87,26	3,92	31,44	253,8	11,83
4	780,0	116,36	5,9	28,9	230,72	12,08
5	845,0	129,28	1,96	28,9	266,98	12,23
6	910,0	145,44	5,9	33,64	240,6	12,31
7	455,0	35,56	15,7	44,92	280,16	10,48
8	487,5	51,72	11,78	40,72	257,08	10,96
9	520,0	54,94	9,82	34,54	253,8	11,02
10	552,5	71,1	5,9	33,44	270,28	11,19
11	585,0	74,34	3,92	33,26	240,6	11,19
12	650,0	93,72	1,96	32,9	214,24	11,47
13	422,5	35,56	15,7	44,74	247,2	9,97
14	455,0	42,02	13,74	43,64	253,8	10,76
15	487,5	54,94	11,78	36,18	234	10,89
16	520,0	64,64	5,9	36	276,86	11
17	585,0	77,56	1,96	31,44	247,2	11,16
18	650,0	90,5	9,82	31,44	280,16	11,36
19	422,5	35,56	15,7	46	253,8	9,94
20	422,5	35,56	19,64	42,36	263,68	10,43
21	455,0	38,78	15,7	43,46	207,64	10,84
22	487,5	45,24	15,7	42,18	257,08	11,01
23	520,0	58,18	7,86	34,54	257,08	11,18

## 9.2 Resultados das avaliações estatísticas

### 9.2.1 ANOVA da 1ª etapa

#### NaOH: Experimento Fatorial Completo

Fatores: 3 Experimento Base: 3; 8  
 Ensaios: 24 Réplicas: 3  
 Blocos: 1 Pts centrais (total): 0

Todos os termos estão livres de alias.

#### Regressão Fatorial: Remoção % de Ca versus NaOH; Tmr; Tml

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	1644,78	234,97	60,38	0,000
Linear	3	1548,31	516,10	132,63	0,000
NaOH	1	1389,59	1389,59	357,10	0,000
Tmr	1	3,37	3,37	0,87	0,366
Tml	1	155,35	155,35	39,92	0,000
Interações de 2 fatores	3	95,58	31,86	8,19	0,002
NaOH*Tmr	1	5,97	5,97	1,54	0,233
NaOH*Tml	1	49,10	49,10	12,62	0,003
Tmr*Tml	1	40,50	40,50	10,41	0,005
Interações de 3 fatores	1	0,90	0,90	0,23	0,637
NaOH*Tmr*Tml	1	0,90	0,90	0,23	0,637
Erro	16	62,26	3,89		
Total	23	1707,05			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
1,97265	96,35%	94,76%	91,79%

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	EP de		Valor T	Valor-P	VIF
		Coef	Coef			
Constante		88,806	0,403	220,55	0,000	
NaOH	15,218	7,609	0,403	18,90	0,000	1,00
Tmr	-0,749	-0,375	0,403	-0,93	0,366	1,00
Tml	5,088	2,544	0,403	6,32	0,000	1,00
NaOH*Tmr	-0,998	-0,499	0,403	-1,24	0,233	1,00
NaOH*Tml	-2,861	-1,430	0,403	-3,55	0,003	1,00
Tmr*Tml	2,598	1,299	0,403	3,23	0,005	1,00
NaOH*Tmr*Tml	-0,387	-0,193	0,403	-0,48	0,637	1,00

## Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned} \text{Remoção \% de Ca} = & 52,25 + 0,1058 \text{ NaOH} - 2,26 \text{ Tmr} + 0,402 \text{ Tml} \\ & + 0,00037 \text{ NaOH} * \text{Tmr} \\ & - 0,001024 \text{ NaOH} * \text{Tml} + 0,0940 \text{ Tmr} * \text{Tml} - 0,000087 \text{ NaOH} * \text{Tmr} * \text{Tml} \end{aligned}$$

## Estrutura de Aliases

Fator Nome

A NaOH  
B Tmr  
C Tml

## Aliases

I  
A  
B  
C  
AB  
AC  
BC  
ABC

## Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Remoção % de Ca	Ajuste	Resid	Resid Pad	
1	82,24	78,59	3,65	2,27	R
3	80,86	75,85	5,01	3,11	R

R Resíduo grande

## Efeitos de Pareto para Remoção % de Ca

**Regressão Fatorial: Remoção % de Mg versus NaOH; Tmr; Tml**

\* NOTA \* Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 1

## Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	25518,2	3645,5	441,06	0,000
Linear	3	25492,4	8497,5	1028,11	0,000
NaOH	1	25490,6	25490,6	3084,10	0,000
Tmr	1	82,5	82,5	9,98	0,006
Tml	1	113,7	113,7	13,76	0,002
Interações de 2 fatores	3	156,5	52,2	6,31	0,006
NaOH*Tmr	1	35,4	35,4	4,28	0,056
NaOH*Tml	1	56,7	56,7	6,86	0,019
Tmr*Tml	1	81,9	81,9	9,91	0,007
Interações de 3 fatores	1	35,8	35,8	4,33	0,055
NaOH*Tmr*Tml	1	35,8	35,8	4,33	0,055
Erro	15	124,0	8,3		
Total	22	25642,1			

## Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
2,87492	99,52%	99,29%	98,86%

## Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P	VIF
Constante		53,775	0,605	88,90	0,000	
NaOH	67,186	33,593	0,605	55,53	0,000	1,02
Tmr	-3,822	-1,911	0,605	-3,16	0,006	1,02
Tml	4,488	2,244	0,605	3,71	0,002	1,02
NaOH*Tmr	2,504	1,252	0,605	2,07	0,056	1,02
NaOH*Tml	-3,170	-1,585	0,605	-2,62	0,019	1,02
Tmr*Tml	3,809	1,904	0,605	3,15	0,007	1,02
NaOH*Tmr*Tml	-2,517	-1,258	0,605	-2,08	0,055	1,02

## Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned} \text{Remoção \% de Mg} = & -33,9 + 0,2767 \text{ NaOH} - 11,35 \text{ Tmr} - 0,152 \text{ Tml} \\ & + 0,02257 \text{ NaOH*Tmr} \\ & + 0,000272 \text{ NaOH*Tml} + 0,2840 \text{ Tmr*Tml} - 0,000565 \text{ NaOH*Tmr*Tml} \end{aligned}$$

## Estrutura de Aliases

Fator	Nome
-------	------

A	NaOH
B	Tmr
C	Tml

## Aliases

I  
A  
B  
C  
AB  
AC  
BC  
ABC

## Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Remoção % de Mg	Ajuste	Resid Resid	Resid Pad
17	28,01	22,68	5,33	2,27 R

R Resíduo grande

## Efeitos de Pareto para Remoção % de Mg

## Regressão Fatorial: Remoção % de SiO<sub>2</sub> versus NaOH; Tmr; Tml

\* NOTA \* Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 4

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	2995,32	427,90	17,74	0,000
Linear	3	1989,95	663,32	27,49	0,000
NaOH	1	1469,30	1469,30	60,90	0,000
Tmr	1	9,40	9,40	0,39	0,544
Tml	1	355,59	355,59	14,74	0,002
Interações de 2 fatores	3	729,34	243,11	10,08	0,001
NaOH*Tmr	1	5,10	5,10	0,21	0,654
NaOH*Tml	1	1,58	1,58	0,07	0,802
Tmr*Tml	1	727,44	727,44	30,15	0,000
Interações de 3 fatores	1	159,56	159,56	6,61	0,024
NaOH*Tmr*Tml	1	159,56	159,56	6,61	0,024
Erro	12	289,51	24,13		
Total	19	3284,84			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
4,91183	91,19%	86,05%	78,62%

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de		Valor T	Valor-P	VIF
			Coef				
Constante		40,23	1,12		35,89	0,000	
NaOH	17,50	8,75	1,12		7,80	0,000	1,03
Tmr	1,40	0,70	1,12		0,62	0,544	1,03
Tml	8,61	4,30	1,12		3,84	0,002	1,04
NaOH*Tmr	1,03	0,52	1,12		0,46	0,654	1,04
NaOH*Tml	0,57	0,29	1,12		0,26	0,802	1,03
Tmr*Tml	-12,31	-6,16	1,12		-5,49	0,000	1,03
NaOH*Tmr*Tml	-5,77	-2,88	1,12		-2,57	0,024	1,04

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned} \text{Remoção \% de SiO}_2 = & 16,1 - 0,0526 \text{ NaOH} - 4,16 \text{ Tmr} - 0,030 \text{ Tml} \\ & + 0,0411 \text{ NaOH*Tmr} \\ & + 0,00414 \text{ NaOH*Tml} + 0,125 \text{ Tmr*Tml} - 0,001294 \text{ NaOH*Tmr*Tml} \end{aligned}$$

Estrutura de Aliases

Fator Nome

A	NaOH
B	Tmr
C	Tml

Aliases

I  
A  
B  
C  
AB  
AC  
BC  
ABC

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Remoção % de SiO2	Ajuste	Resid	Resid Pad	
22	52,17	61,40	-9,23	-2,30	R

R Resíduo grande

Efeitos de Pareto para Remoção % de SiO2

### Regressão Fatorial: Remoção % de sulfato versus NaOH; Tmr; Tml

\* NOTA \* Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 3

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	1580,77	225,82	15,36	0,000
Linear	3	29,60	9,87	0,67	0,585
NaOH	1	15,55	15,55	1,06	0,323
Tmr	1	1,59	1,59	0,11	0,748
Tml	1	11,71	11,71	0,80	0,388
Interações de 2 fatores	3	596,80	198,93	13,53	0,000
NaOH*Tmr	1	188,98	188,98	12,85	0,003
NaOH*Tml	1	403,05	403,05	27,41	0,000
Tmr*Tml	1	53,73	53,73	3,65	0,078
Interações de 3 fatores	1	1089,07	1089,07	74,07	0,000
NaOH*Tmr*Tml	1	1089,07	1089,07	74,07	0,000
Erro	13	191,14	14,70		
Total	20	1771,91			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
3,83447	89,21%	83,40%	71,45%

## Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P	VIF
Constante		18,414	0,853	21,59	0,000	
NaOH	1,754	0,877	0,853	1,03	0,323	1,04
Tmr	-0,561	-0,280	0,853	-0,33	0,748	1,04
Tml	1,523	0,761	0,853	0,89	0,388	1,04
NaOH*Tmr	6,116	3,058	0,853	3,59	0,003	1,04
NaOH*Tml	-8,931	-4,466	0,853	-5,24	0,000	1,04
Tmr*Tml	3,261	1,631	0,853	1,91	0,078	1,02
NaOH*Tmr*Tml	-14,681	-7,341	0,853	-8,61	0,000	1,04

## Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned} \text{Remoção \% de sulfato} = & 93,9 - 0,2097 \text{ NaOH} - 40,21 \text{ Tmr} - 2,132 \text{ Tml} \\ & + 0,1126 \text{ NaOH*Tmr} \\ & + 0,00588 \text{ NaOH*Tml} + 1,183 \text{ Tmr*Tml} - \\ & 0,003296 \text{ NaOH*Tmr*Tml} \end{aligned}$$

## Estrutura de Aliases

Fator Nome

A NaOH  
B Tmr  
C Tml

## Aliases

I  
A  
B  
C  
AB  
AC  
BC  
ABC

## Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Remoção % de sulfato	Ajuste	Resid	Resid Pad
22	25,00	18,52	6,48	2,07 R

R Resíduo grande

## Efeitos de Pareto para Remoção % de sulfato

## Ca(OH)<sub>2</sub> - Experimento Fatorial Completo

Fatores: 3 Experimento Base: 3; 8  
 Ensaios: 24 Réplicas: 3  
 Blocos: 1 Pts centrais (total): 0

Todos os termos estão livres de alias.

## Resultados de: Ca(OH)<sub>2</sub>

### Regressão Fatorial: Remoção % alcalinidade versus Ca(OH)<sub>2</sub>; Tmr; Tml

\* NOTA \* Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 2

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	7568,98	1081,28	38,96	0,000
Linear	3	7259,31	2419,77	87,18	0,000
Ca(OH) <sub>2</sub>	1	6575,31	6575,31	236,89	0,000
Tmr	1	108,65	108,65	3,91	0,068
Tml	1	301,64	301,64	10,87	0,005
Interações de 2 fatores	3	73,80	24,60	0,89	0,472
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tmr	1	46,59	46,59	1,68	0,216
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tml	1	1,32	1,32	0,05	0,830
Tmr*Tml	1	26,88	26,88	0,97	0,342
Interações de 3 fatores	1	69,34	69,34	2,50	0,136
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tmr*Tml	1	69,34	69,34	2,50	0,136
Erro	14	388,60	27,76		
Total	21	7957,58			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
5,26851	95,12%	92,67%	88,11%

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de		Valor-P	VIF
			Coef	Valor T		
Constante		40,95	1,14	35,90	0,000	
Ca(OH) <sub>2</sub>	35,11	17,56	1,14	15,39	0,000	1,02
Tmr	4,51	2,26	1,14	1,98	0,068	1,02
Tml	7,52	3,76	1,14	3,30	0,005	1,03
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tmr	-2,96	-1,48	1,14	-1,30	0,216	1,02
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tml	0,50	0,25	1,14	0,22	0,830	1,03
Tmr*Tml	-2,24	-1,12	1,14	-0,98	0,342	1,03
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tmr*Tml	-3,61	-1,80	1,14	-1,58	0,136	1,03

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned} \text{Remoção \% alcalinidade} = & -11,5 + 0,0802 \text{ Ca(OH)}_2 - 3,08 \text{ Tmr} - 0,342 \text{ Tml} \\ & + 0,0145 \text{ Ca(OH)}_2 * \text{Tmr} \\ & + 0,00217 \text{ Ca(OH)}_2 * \text{Tml} \quad + 0,214 \text{ Tmr} * \text{Tml} \quad - \\ & 0,000663 \text{ Ca(OH)}_2 * \text{Tmr} * \text{Tml} \end{aligned}$$

Estrutura de Aliases

Fator Nome

A Ca(OH)<sub>2</sub>  
B Tmr  
C Tml

Aliases

I  
A  
B  
C  
AB  
AC  
BC  
ABC

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Remoção % alcalinidade	Ajuste	Resid	Resid Pad
21	12,53	22,49	-9,96	-2,32 R

R Resíduo grande

Efeitos de Pareto para Remoção % alcalinidade

### Regressão Fatorial: Remoção % de Ca versus Ca(OH)<sub>2</sub>; Tmr; Tml

\* NOTA \* Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 2

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	10909,2	1558,5	41,74	0,000
Linear	3	10559,3	3519,8	94,28	0,000
Ca(OH) <sub>2</sub>	1	10208,7	10208,7	273,44	0,000
Tmr	1	0,9	0,9	0,02	0,877
Tml	1	200,2	200,2	5,36	0,036
Interações de 2 fatores	3	40,2	13,4	0,36	0,784
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tmr	1	6,0	6,0	0,16	0,694
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tml	1	0,0	0,0	0,00	0,987
Tmr*Tml	1	33,9	33,9	0,91	0,357
Interações de 3 fatores	1	214,1	214,1	5,74	0,031
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tmr*Tml	1	214,1	214,1	5,74	0,031
Erro	14	522,7	37,3		
Total	21	11431,8			

## Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
6,11015	95,43%	93,14%	88,43%

## Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	EP de		Valor T	Valor-P	VIF
		Coef	Coef			
Constante		54,18	1,32	40,96	0,000	
Ca(OH)2	43,75	21,88	1,32	16,54	0,000	1,02
Tmr	0,42	0,21	1,32	0,16	0,877	1,02
Tml	6,13	3,06	1,32	2,32	0,036	1,03
Ca(OH)2*Tmr	-1,06	-0,53	1,32	-0,40	0,694	1,02
Ca(OH)2*Tml	-0,04	-0,02	1,32	-0,02	0,987	1,03
Tmr*Tml	2,52	1,26	1,32	0,95	0,357	1,03
Ca(OH)2*Tmr*Tml	-6,34	-3,17	1,32	-2,39	0,031	1,03

## Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Remoção % de Ca = 24,9 + 0,0623 Ca(OH)2 - 15,25 Tmr - 1,302 Tml  
+ 0,0330 Ca(OH)2\*Tmr  
+ 0,00348 Ca(OH)2\*Tml + 0,538 Tmr\*Tml -  
0,001165 Ca(OH)2\*Tmr\*Tml

## Estrutura de Aliases

Fator	Nome
-------	------

A	Ca(OH)2
B	Tmr
C	Tml

## Aliases

I  
A  
B  
C  
AB  
AC  
BC  
ABC

## Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Remoção % de Ca	Ajuste	Resid	Resid Pad	R
21	16,00	30,22	-14,22	-2,85	R

R Resíduo grande

## Efeitos de Pareto para Remoção % de Ca

## Regressão Fatorial: Remoção % de Mg versus Ca(OH)<sub>2</sub>; Tmr; Tml

\* NOTA \* Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 1

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	1362,48	194,64	18,56	0,000
Linear	3	1300,21	433,40	41,33	0,000
Ca(OH) <sub>2</sub>	1	1250,14	1250,14	119,22	0,000
Tmr	1	11,09	11,09	1,06	0,320
Tml	1	82,64	82,64	7,88	0,013
Interações de 2 fatores	3	127,78	42,59	4,06	0,027
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tmr	1	7,62	7,62	0,73	0,407
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tml	1	93,32	93,32	8,90	0,009
Tmr*Tml	1	37,40	37,40	3,57	0,078
Interações de 3 fatores	1	9,87	9,87	0,94	0,347
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tmr*Tml	1	9,87	9,87	0,94	0,347
Erro	15	157,30	10,49		
Total	22	1519,78			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
3,23827	89,65%	84,82%	76,70%

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	EP de		Valor T	Valor-P	VIF
		Coef	Coef			
Constante		14,854	0,681	21,80	0,000	
Ca(OH) <sub>2</sub>	14,879	7,439	0,681	10,92	0,000	1,02
Tmr	1,402	0,701	0,681	1,03	0,320	1,02
Tml	3,825	1,913	0,681	2,81	0,013	1,02
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tmr	-1,162	-0,581	0,681	-0,85	0,407	1,02
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tml	-4,065	-2,033	0,681	-2,98	0,009	1,02
Tmr*Tml	-2,574	-1,287	0,681	-1,89	0,078	1,02
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tmr*Tml	1,322	0,661	0,681	0,97	0,347	1,02

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned} \text{Remoção \% de Mg} = & -49,9 + 0,1278 \text{ Ca(OH)}_2 + 6,13 \text{ Tmr} + 1,291 \text{ Tml} - \\ & 0,00942 \text{ Ca(OH)}_2 * \text{Tmr} \\ & - 0,002223 \text{ Ca(OH)}_2 * \text{Tml} - 0,163 \text{ Tmr} * \text{Tml} \\ & + 0,000243 \text{ Ca(OH)}_2 * \text{Tmr} * \text{Tml} \end{aligned}$$

Estrutura de Aliases

Fator Nome

A	Ca(OH) <sub>2</sub>
B	Tmr
C	Tml
Aliases	

I  
A  
B  
C  
AB  
AC  
BC  
ABC

#### Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Remoção % de Mg	Ajuste	Resid	Resid Pad	
7	16,02	10,69	5,33	2,01	R
24	16,34	21,67	-5,33	-2,01	R

R Resíduo grande

#### Efeitos de Pareto para Remoção % de Mg

### Regressão Fatorial: Remoção % de SiO<sub>2</sub> versus Ca(OH)<sub>2</sub>; Tmr; Tml

\* NOTA \* Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 3

#### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	7069,89	1009,98	23,63	0,000
Linear	3	4390,11	1463,37	34,23	0,000
Ca(OH) <sub>2</sub>	1	1224,26	1224,26	28,64	0,000
Tmr	1	236,25	236,25	5,53	0,035
Tml	1	2561,01	2561,01	59,91	0,000
Interações de 2 fatores	3	2308,40	769,47	18,00	0,000
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tmr	1	125,45	125,45	2,93	0,110
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tml	1	2107,51	2107,51	49,30	0,000
Tmr*Tml	1	49,43	49,43	1,16	0,302
Interações de 3 fatores	1	74,17	74,17	1,74	0,211
Ca(OH) <sub>2</sub> *Tmr*Tml	1	74,17	74,17	1,74	0,211
Erro	13	555,69	42,75		
Total	20	7625,58			

#### Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
6,53798	92,71%	88,79%	81,63%

## Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	EP de		Valor T	Valor-P	VIF
		Coef	Coef			
Constante		25,23	1,45	17,35	0,000	
Ca(OH)2	15,57	7,78	1,45	5,35	0,000	1,04
Tmr	-6,84	-3,42	1,45	-2,35	0,035	1,04
Tml	22,51	11,26	1,45	7,74	0,000	1,02
Ca(OH)2*Tmr	-4,98	-2,49	1,45	-1,71	0,110	1,04
Ca(OH)2*Tml	20,42	10,21	1,45	7,02	0,000	1,04
Tmr*Tml	3,13	1,56	1,45	1,08	0,302	1,04
Ca(OH)2*Tmr*Tml	-3,83	-1,92	1,45	-1,32	0,211	1,04

## Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned} \text{Remoção \% de SiO}_2 = & 86,8 - 0,2039 \text{ Ca(OH)}_2 - 8,94 \text{ Tmr} - 3,034 \text{ Tml} \\ & + 0,0120 \text{ Ca(OH)}_2 * \text{Tmr} \\ & + 0,00962 \text{ Ca(OH)}_2 * \text{Tml} + 0,366 \text{ Tmr} * \text{Tml} \\ & - 0,000704 \text{ Ca(OH)}_2 * \text{Tmr} * \text{Tml} \end{aligned}$$

## Estrutura de Aliases

Fator Nome

A Ca(OH)2  
B Tmr  
C Tml

## Aliases

I  
A  
B  
C  
AB  
AC  
BC  
ABC

## Efeitos de Pareto para Remoção % de SiO2

**Regressão Fatorial: Remoção % de sulfato versus Ca(OH)2; Tmr; Tml**

\* NOTA \* Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 4

## Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	637,441	91,063	4,35	0,013
Linear	3	561,209	187,070	8,94	0,002
Ca(OH)2	1	489,908	489,908	23,41	0,000
Tmr	1	20,673	20,673	0,99	0,340
Tml	1	50,628	50,628	2,42	0,146
Interações de 2 fatores	3	47,686	15,895	0,76	0,538
Ca(OH)2*Tmr	1	31,283	31,283	1,49	0,245
Ca(OH)2*Tml	1	9,173	9,173	0,44	0,520
Tmr*Tml	1	7,231	7,231	0,35	0,568
Interações de 3 fatores	1	55,102	55,102	2,63	0,131
Ca(OH)2*Tmr*Tml	1	55,102	55,102	2,63	0,131
Erro	12	251,165	20,930		
Total	19	888,606			

## Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
4,57497	71,73%	55,25%	19,57%

## Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	EP de		Valor T	Valor-P	VIF
		Coef	Coef			
Constante		20,10	1,04	19,26	0,000	
Ca(OH)2	-10,10	-5,05	1,04	-4,84	0,000	1,03
Tmr	2,08	1,04	1,04	0,99	0,340	1,03
Tml	-3,25	-1,62	1,04	-1,56	0,146	1,03
Ca(OH)2*Tmr	-2,55	-1,28	1,04	-1,22	0,245	1,04
Ca(OH)2*Tml	1,38	0,69	1,04	0,66	0,520	1,04
Tmr*Tml	-1,23	-0,61	1,04	-0,59	0,568	1,04
Ca(OH)2*Tmr*Tml	-3,39	-1,69	1,04	-1,62	0,131	1,03

## Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Remoção % de sulfato = 59,2 - 0,0944 Ca(OH)2 - 4,27 Tmr - 1,040 Tml  
+ 0,0140 Ca(OH)2\*Tmr + 0,00238 Ca(OH)2\*Tml + 0,223 Tmr\*Tml -  
0,000623 Ca(OH)2\*Tmr\*Tml

## Estrutura de Aliases

Fator	Nome
-------	------

A	Ca(OH)2
B	Tmr
C	Tml

## Aliases

I  
A  
B  
C  
AB  
AC  
BC  
ABC

## Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Remoção % de sulfato	Ajuste	Resid	Resid Pad
5	11,12	19,45	-8,33	-2,23

R Resíduo grande

## Efeitos de Pareto para Remoção % de sulfato

## 9.2.2 ANOVA da 2ª etapa

### NaOH: Experimento Fatorial Completo

Fatores: 2 Experimento Base: 2; 4  
 Ensaios: 25 Réplicas: 5  
 Blocos: 1 Pts centrais (total): 5

Todos os termos estão livres de alias.

### Regressão Fatorial: Remoção % de Ca versus pH; Semente; PtCentral

#### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	49380,5	12345,1	2464,29	0,000
Linear	2	42758,3	21379,2	4267,63	0,000
pH	1	42754,0	42754,0	8534,40	0,000
Semente	1	4,3	4,3	0,86	0,364
Interações de 2 fatores	1	2,4	2,4	0,48	0,496
pH*Semente	1	2,4	2,4	0,48	0,496
Curvatura	1	6619,8	6619,8	1321,43	0,000
Erro	20	100,2	5,0		
Total	24	49480,7			

#### Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
2,23821	99,80%	99,76%	99,68%

#### Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	EP de		Valor T	Valor-P	VIF
		Coef	Coef			
Constante		50,327	0,500	100,56	0,000	
pH	92,471	46,235	0,500	92,38	0,000	1,00
Semente	-0,930	-0,465	0,500	-0,93	0,364	1,00
pH*Semente	-0,694	-0,347	0,500	-0,69	0,496	1,00
Pt Ct		40,68	1,12	36,35	0,000	1,00

#### Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Remoção % de Ca = -281,94 + 33,273 pH + 0,078 Semente - 0,0095 pH\*Semente + 40,68 Pt Ct

#### Estrutura de Aliases

Fator	Nome
A	pH
B	Semente

Aliases

I  
A  
B  
AB

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Remoção % de Ca	Ajuste	Resid	Resid Pad	
4	0,00	4,21	-4,21	-2,10	R
21	86,84	91,01	-4,17	-2,08	R

R Resíduo grande

Efeitos de Pareto para Remoção % de Ca

### Regressão Fatorial: Remoção de % Mg versus pH; Semente; PtCentral

\* NOTA \* Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 1

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	35560,3	8890,1	239,35	0,000
Linear	2	33489,1	16744,6	450,83	0,000
pH	1	33300,8	33300,8	896,58	0,000
Semente	1	8,8	8,8	0,24	0,632
Interações de 2 fatores	1	0,4	0,4	0,01	0,916
pH*Semente	1	0,4	0,4	0,01	0,916
Curvatura	1	2353,7	2353,7	63,37	0,000
Erro	19	705,7	37,1		
Total	23	36266,0			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
6,09442	98,05%	97,64%	96,81%

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P	VIF
Constante		42,59	1,40	30,32	0,000	
pH	84,12	42,06	1,40	29,94	0,000	1,01
Semente	-1,37	-0,68	1,40	-0,49	0,632	1,01
pH*Semente	-0,30	-0,15	1,40	-0,11	0,916	1,01
Pt Ct		-24,41	3,07	-7,96	0,000	1,00

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Remoção de % Mg = -258,2 + 30,15 pH + 0,015 Semente - 0,0041 pH\*Semente - 24,41 Pt Ct

Estrutura de Aliases

Fator Nome

A pH  
B Semente

Aliases

I  
A  
B  
AB

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	de % Mg	Ajuste	Resid	Resid Pad	
3	71,56	83,82	-12,26	-2,32	R

R Resíduo grande

Efeitos de Pareto para Remoção de % Mg

## Regressão Fatorial: Remoção % de SiO<sub>2</sub> versus pH; Semente; PtCentral

\* NOTA \* Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 1

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	1965,44	491,36	27,47	0,000
Linear	2	1860,89	930,44	52,02	0,000
pH	1	1860,71	1860,71	104,03	0,000
Semente	1	4,48	4,48	0,25	0,623
Interações de 2 fatores	1	16,72	16,72	0,93	0,346
pH*Semente	1	16,72	16,72	0,93	0,346
Curvatura	1	127,29	127,29	7,12	0,015
Erro	19	339,85	17,89		
Total	23	2305,29			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
4,22928	85,26%	82,15%	75,51%

## Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	EP de		Valor T	Valor-P	VIF
		Coef	Coef			
Constante		12,323	0,975	12,64	0,000	
pH	19,885	9,942	0,975	10,20	0,000	1,01
Semente	0,976	0,488	0,975	0,50	0,623	1,01
pH*Semente	1,885	0,942	0,975	0,97	0,346	1,01
Pt Ct		-5,68	2,13	-2,67	0,015	1,00

## Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\text{Remoção \% de SiO}_2 = -52,45 + 6,429 \text{ pH} - 0,240 \text{ Semente} + 0,0259 \text{ pH*Semente} - 5,68 \text{ Pt Ct}$$

## Estrutura de Aliases

Fator Nome

A pH  
B Semente

## Aliases

I  
A  
B  
AB

## Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Remoção % de SiO <sub>2</sub>		Resid		R
	Ajuste	Resid	Pad		
24	34,18	23,70	10,48	2,86	R
25	10,00	1,93	8,07	2,13	R

R Resíduo grande

Efeitos de Pareto para Remoção % de SiO<sub>2</sub>**Regressão Fatorial: Remoção % sulfato versus pH; Semente; PtCentral**

## Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	69,520	17,3801	0,51	0,730
Linear	2	68,526	34,2629	1,00	0,385
pH	1	43,799	43,7993	1,28	0,271
Semente	1	24,726	24,7264	0,72	0,405
Interações de 2 fatores	1	0,421	0,4206	0,01	0,913
pH*Semente	1	0,421	0,4206	0,01	0,913
Curvatura	1	0,574	0,5740	0,02	0,898
Erro	20	684,351	34,2175		
Total	24	753,871			

## Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
5,84958	9,22%	0,00%	0,00%

## Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	EP de		Valor T	Valor-P	VIF
		Coef	Coef			
Constante		6,72	1,31	5,14	0,000	
pH	2,96	1,48	1,31	1,13	0,271	1,00
Semente	2,22	1,11	1,31	0,85	0,405	1,00
pH*Semente	-0,29	-0,15	1,31	-0,11	0,913	1,00
Pt Ct		-0,38	2,92	-0,13	0,898	1,00

## Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Remoção % sulfato = -6,0 + 1,16 pH + 0,083 Semente - 0,0040 pH\*Semente - 0,38 Pt Ct

## Estrutura de Aliases

Fator	Nome
-------	------

A	pH
B	Semente

## Aliases

I  
A  
B  
AB

## Efeitos de Pareto para Remoção % sulfato

## Ca(OH)2: Experimento Fatorial Completo

Fatores: 2 Experimento Base: 2; 4  
 Ensaios: 25 Réplicas: 5  
 Blocos: 1 Pts centrais (total): 5

Todos os termos estão livres de alias.

## Regressão Fatorial: Remoção % de Ca versus pH; Semente; PtCentral

\* NOTA \* Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 1

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	34422,8	8605,7	822,74	0,000
Linear	2	29480,2	14740,1	1409,20	0,000
pH	1	29381,0	29381,0	2808,93	0,000
Semente	1	0,0	0,0	0,00	0,965
Interações de 2 fatores	1	1,0	1,0	0,09	0,761
pH*Semente	1	1,0	1,0	0,09	0,761
Curvatura	1	4267,4	4267,4	407,98	0,000
Erro	19	198,7	10,5		
Total	23	34621,5			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
3,23417	99,43%	99,31%	99,10%

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P	VIF
Constante		35,029	0,745	46,99	0,000	
pH	79,016	39,508	0,745	53,00	0,000	1,01
Semente	0,066	0,033	0,745	0,04	0,965	1,01
pH*Semente	-0,459	-0,230	0,745	-0,31	0,761	1,01
Pt Ct		32,87	1,63	20,20	0,000	1,00

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Remoção % de Ca = -3461,9 + 397,4 pH + 0,76 Semente - 0,087 pH\*Semente + 32,87 Pt Ct

Estrutura de Aliases

Fator Nome

A pH  
 B Semente

Aliases

I  
A  
B  
AB

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Remoção				
	% de Ca	Ajuste	Resid	Resid Pad	
17	76,31	67,89	8,41	2,91	R
21	60,53	67,89	-7,37	-2,55	R

R Resíduo grande

Efeitos de Pareto para Remoção % de Ca

### Regressão Fatorial: Remoção de % Mg versus pH; Semente; PtCentral

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	431,675	107,919	5,44	0,004
Linear	2	415,138	207,569	10,46	0,001
pH	1	415,138	415,138	20,91	0,000
Semente	1	0,000	0,000	0,00	0,998
Interações de 2 fatores	1	16,537	16,537	0,83	0,372
pH*Semente	1	16,537	16,537	0,83	0,372
Curvatura	1	0,000	0,000	0,00	0,997
Erro	20	397,055	19,853		
Total	24	828,730			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
4,45564	52,09%	42,51%	25,14%

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	EP de		Valor T	Valor-P	VIF
		Coef	Coef			
Constante		5,468	0,996	5,49	0,000	
pH	9,112	4,556	0,996	4,57	0,000	1,00
Semente	-0,005	-0,002	0,996	-0,00	0,998	1,00
pH*Semente	1,819	0,909	0,996	0,91	0,372	1,00
Pt Ct		-0,01	2,23	-0,00	0,997	1,00

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Remoção de % Mg = -315 + 36,5 pH - 3,02 Semente + 0,343 pH\*Semente - 0,01 Pt Ct

## Estrutura de Aliases

Fator Nome

A pH  
B Semente

## Aliases

I  
A  
B  
AB

## Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Remoção de % Mg	Ajuste	Resid	Resid Pad
23	18,19	5,46	12,73	3,19 R

R Resíduo grande

## Efeitos de Pareto para Remoção de % Mg

**Regressão Fatorial: Remoção % de SiO<sub>2</sub> versus pH; Semente; PtCentral**

\* NOTA \* Este experimento não é ortogonal.

## Método

Linhas não usadas 2

## Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	1881,3	470,3	1,04	0,412
Linear	2	568,8	284,4	0,63	0,543
pH	1	251,4	251,4	0,56	0,465
Semente	1	350,4	350,4	0,78	0,389
Interações de 2 fatores	1	788,6	788,6	1,75	0,202
pH*Semente	1	788,6	788,6	1,75	0,202
Curvatura	1	555,5	555,5	1,23	0,281
Erro	18	8109,9	450,6		
Total	22	9991,2			

## Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
21,2262	18,83%	0,79%	0,00%

## Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P	VIF
Constante		17,68	4,89	3,61	0,002	
pH	7,31	3,65	4,89	0,75	0,465	1,01
Semente	-8,63	-4,31	4,89	-0,88	0,389	1,01
pH*Semente	12,95	6,47	4,89	1,32	0,202	1,01
Pt Ct		-13,0	11,7	-1,11	0,281	1,00

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Remoção % de SiO<sub>2</sub> = 270 - 28,2 pH - 21,7 Semente + 2,44 pH\*Semente - 13,0 Pt Ct

Estrutura de Aliases

Fator Nome

A pH  
B Semente

Aliases

I  
A  
B  
AB

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Remoção % de SiO <sub>2</sub>	Ajuste	Resid Resid	Resid Pad	
12	58,7	19,2	39,5	2,08	R

R Resíduo grande

Efeitos de Pareto para Remoção % de SiO<sub>2</sub>

## Regressão Fatorial: Remoção % sulfato versus pH; Semente; PtCentral

\* NOTA \* Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 2

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	500,41	125,103	3,28	0,035
Linear	2	456,55	228,274	5,98	0,010
pH	1	0,95	0,951	0,02	0,876
Semente	1	456,47	456,468	11,96	0,003
Interações de 2 fatores	1	20,98	20,978	0,55	0,468
pH*Semente	1	20,98	20,978	0,55	0,468
Curvatura	1	26,17	26,169	0,69	0,419
Erro	18	687,20	38,178		
Total	22	1187,62			

Sumário do Modelo

S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (aj)	R <sup>2</sup> (pred)
6,17884	42,14%	29,28%	3,68%

## Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	EP de		Valor T	Valor-P	VIF
		Coef	Coef			
Constante		9,78	1,42	6,87	0,000	
pH	-0,45	-0,22	1,42	-0,16	0,876	1,01
Semente	9,85	4,92	1,42	3,46	0,003	1,01
pH*Semente	-2,11	-1,06	1,42	-0,74	0,468	1,01
Pt Ct		2,82	3,40	0,83	0,419	1,00

## Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\text{Remoção \% sulfato} = -68 + 8,3 \text{ pH} + 3,69 \text{ Semente} - 0,398 \text{ pH*Semente} + 2,82 \text{ Pt Ct}$$

## Estrutura de Aliases

Fator Nome

A pH  
B Semente

## Aliases

I  
A  
B  
AB

## Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Remoção % sulfato	Ajuste	Resid	Resid Pad	R
21	1,74	12,60	-10,86	-2,03	

R Resíduo grande

## Efeitos de Pareto para Remoção % sulfato

## 9.3 Resultados das simulações

### 9.3.1 Simulações Caso I

#### Case-specific: Alimentação 1

##### System Details

Feed Flow to Stage 1	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	13.25 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	53.00 %	Feed	0.62 bar
Feed Pressure	7.31 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	1.27 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	1092 mg /l	Average	0.95 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	24	Average NDP	4.89 bar
Total Active Area	891.84 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	14.86 lm/h	Power	6.34 kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0.4 kWh/8 m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	25.00	6.96	0.00	13.75	5.85	11.25	16.82	0.00	0.00	10.71
2	BW30-400	1	6	13.75	5.50	0.00	11.75	2.61	2.00	8.96	0.00	0.00	30.52

Pass Streams (mg/l as Ion)							
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate		
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4+ + NH3	6.45	6.78	12.50	14.48	0.51	0.88	0.57
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	161.94	162.03	293.00	341.78	2.06	5.99	2.65
Mg	66.63	66.63	120.85	141.19	0.41	1.15	0.52
Ca	80.85	80.85	146.64	171.33	0.49	1.39	0.62
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	2.23	2.23	6.03	7.70	0.00	0.00	0.00
HCO3	239.00	239.00	427.87	497.63	3.50	9.65	4.42
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	316.00	316.00	572.21	667.93	3.05	8.98	3.94
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	193.64	193.64	351.54	410.92	0.77	2.15	0.97
SiO2	25.03	25.03	45.31	52.90	0.26	0.66	0.32
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	3.14	3.14	4.30	4.76	3.42	4.37	3.56
TDS	1091.79	1092.21	1975.64	2305.56	10.71	30.52	13.69
pH	7.95	7.95	8.03	8.04	6.22	6.54	6.30

**Design Warnings**

-None-

**Solubility Warnings**

Langelier Saturation Index &gt; 0

Stiff &amp; Davis Stability Index &gt; 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

**Stage Details**

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.08	0.70	6.83	8.33	1092.21	6.96
2	0.09	0.67	8.06	7.63	1191.62	6.71
3	0.09	0.64	9.54	6.97	1304.74	6.49
4	0.10	0.61	11.34	6.33	1434.73	6.29
5	0.10	0.58	13.59	5.72	1585.75	6.12
6	0.11	0.56	16.42	5.14	1763.46	5.97

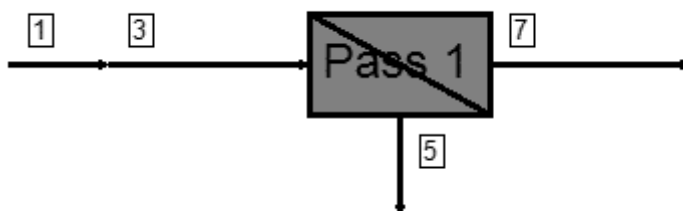
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.04	0.48	19.67	13.75	1975.64	5.50
2	0.03	0.42	23.39	13.26	2047.03	4.97
3	0.03	0.36	28.13	12.84	2113.33	4.46
4	0.02	0.30	34.42	12.48	2173.38	3.97
5	0.02	0.24	43.24	12.18	2226.08	3.51
6	0.02	0.19	56.57	11.94	2270.42	3.05

**Scaling Calculations**

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	7.95	7.95	8.04
Langelier Saturation Index	0.63	0.63	1.33
Stiff & Davis Stability Index	0.92	0.92	1.35
Ionic Strength (Molal)	0.02	0.02	0.05
TDS (mg/l)	1091.79	1092.21	2305.56
HCO <sub>3</sub>	239.00	239.00	497.63
CO <sub>2</sub>	3.14	3.14	4.76
CO <sub>3</sub>	2.23	2.23	7.70
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	3.08	3.08	9.63
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	18.88	18.88	37.84
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	0.02	0.02	0.06

To balance: 0.09 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	1091.79 mg/l	% System Recovery (7/1)	53.00 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
Stage #	1	2
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	1
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	6
Pass Average Flux	14.86 lmh	
Stage Average Flux	16.82 lmh	8.96 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	-	
Energy Consumption	0.48 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	1091.79
3	25.00	7.31	1092.21
5	11.75	2.61	2305.56
7	13.25	-	13.69
7/1	% Recovery	53.00	

#### Project Information:

#### Design Warnings:

-None-

#### Solubility Warnings:

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

## Case-specific: Alimentação 2

### System Details

Feed Flow to Stage 1	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	13.0 m <sup>3</sup> / h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	52.0 %	Feed	1.3 <sub>0</sub> bar
Feed Pressure	8.36 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	2.6 <sub>1</sub> bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	2181. mg / l	Average	1.9 <sub>5</sub> bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	24	Average NDP	4.9 <sub>3</sub> bar
Total Active Area	891.84 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	14.58 lm / h	Power	7.2 <sub>6</sub> kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0. kWh / 56 m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	25.00	8.01	0.00	13.79	6.90	11.21	16.75	0.00	0.00	29.04
2	BW30-400	1	6	13.79	6.56	0.00	12.00	3.61	1.79	8.04	0.00	0.00	83.75

Pass Streams (mg/l as Ion)								
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate			
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total	
NH4+ + NH3	2.11	2.24	4.14	4.70	0.21	0.36	0.23	
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Na	532.50	532.50	958.35	1097.94	8.39	24.41	10.60	
Mg	28.94	28.94	52.30	60.04	0.18	0.52	0.23	
Ca	129.96	129.96	234.89	269.65	0.81	2.32	1.02	
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO3	6.83	6.83	16.56	20.22	0.00	0.01	0.00	
HCO3	464.50	464.50	827.11	945.05	7.84	22.02	9.79	
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Cl	632.12	632.12	1138.11	1304.09	9.37	27.57	11.88	
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
SO4	311.06	311.06	562.49	645.88	1.61	4.58	2.02	
SiO2	73.30	73.30	132.24	151.69	0.76	2.11	0.95	
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO2	4.38	4.38	6.85	7.69	5.05	6.96	5.32	
TDS	2181.33	2181.47	3926.08	4499.15	29.04	83.75	36.59	
pH	8.06	8.06	8.07	8.07	6.39	6.68	6.46	

### Design Warnings

-None-

### Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.09	0.72	18.52	8.33	2181.47	8.01
2	0.09	0.68	21.96	7.61	2386.01	7.76
3	0.09	0.64	26.11	6.93	2617.46	7.54
4	0.10	0.60	31.14	6.29	2880.63	7.34
5	0.10	0.56	37.30	5.69	3181.54	7.17
6	0.10	0.53	44.89	5.13	3527.28	7.03

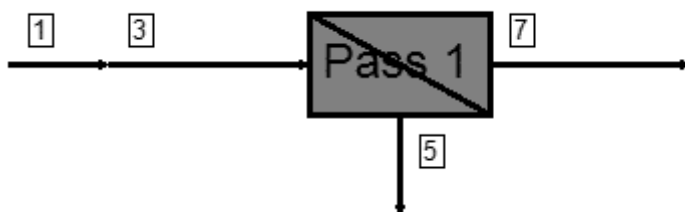
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.03	0.45	53.08	13.79	3926.08	6.56
2	0.03	0.39	63.49	13.34	4057.74	6.02
3	0.03	0.33	77.12	12.95	4177.35	5.51
4	0.02	0.27	95.80	12.62	4282.86	5.01
5	0.02	0.21	123.03	12.36	4372.48	4.53
6	0.01	0.15	166.54	12.15	4444.85	4.07

### Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	8.06	8.06	8.07
Langelier Saturation Index	1.20	1.20	1.82
Stiff & Davis Stability Index	1.32	1.32	1.66
Ionic Strength (Molal)	0.04	0.04	0.08
TDS (mg/l)	2181.33	2181.47	4499.15
HCO <sub>3</sub>	464.50	464.50	945.05
CO <sub>2</sub>	4.38	4.38	7.69
CO <sub>3</sub>	6.83	6.83	20.22
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	6.28	6.28	17.41
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	51.73	51.73	106.60
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	0.01	0.01	0.03

To balance: 0.00 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	2181.33 mg/l	% System Recovery (7/1)	52.00 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
	1	2
Stage #		
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	1
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	6
Pass Average Flux	14.58 lmh	
Stage Average Flux	16.75 lmh	8.04 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	-	
Energy Consumption	0.56 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	2181.33
3	25.00	8.36	2181.47
5	12.00	3.61	4499.15
7	13.00	-	36.59
7/1	% Recovery	52.00	

#### Project Information:

#### Design Warnings:

-None-

#### Solubility Warnings:

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Case-specific: Alimentação 3

#### System Details

Feed Flow to Stage 1	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	13.25 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	53.00 %	Feed	1.14 bar
Feed Pressure	8.20 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	2.34 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	1959.09 mg/l	Average	1.74 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	24	Average NDP	5.01 bar
Total Active Area	891.84 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	14.86 lm/h	Power	7.12 kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0.54 kWh/m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	25.00	7.85	0.00	13.64	6.75	11.36	16.98	0.00	0.00	27.30
2	BW30-400	1	6	13.64	6.40	0.00	11.75	3.52	1.89	8.50	0.00	0.00	77.29

Pass Streams (mg/l as Ion)								
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate			
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total	
NH4+ + NH3	10.31	11.59	22.19	25.38	1.67	2.39	1.77	
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Na	464.31	464.31	844.84	977.78	7.13	20.40	9.02	
Mg	21.10	21.10	38.55	44.71	0.14	0.38	0.17	
Ca	102.04	102.04	186.41	216.17	0.66	1.84	0.83	
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO3	17.63	17.63	37.16	44.60	0.00	0.01	0.00	
HCO3	674.20	674.20	1215.95	1403.87	11.69	32.46	14.66	
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Cl	399.33	399.33	726.83	841.27	5.86	17.09	7.46	
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
SO4	228.66	228.66	418.13	485.09	1.02	2.87	1.29	
SiO2	40.20	40.20	73.32	84.96	0.41	1.12	0.51	
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO2	3.43	3.43	6.27	7.31	4.11	6.25	4.42	
TDS	1957.81	1959.09	3562.14	4122.58	27.30	77.29	34.45	
pH	8.34	8.34	8.29	8.27	6.65	6.89	6.72	

#### Design Warnings

-None-

#### Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.09	0.72	17.32	8.33	1959.09	7.85
2	0.09	0.69	20.55	7.61	2143.60	7.60
3	0.09	0.65	24.46	6.92	2353.26	7.38
4	0.10	0.61	29.20	6.28	2592.90	7.19
5	0.10	0.58	35.03	5.66	2868.85	7.02
6	0.11	0.54	42.25	5.09	3188.80	6.87

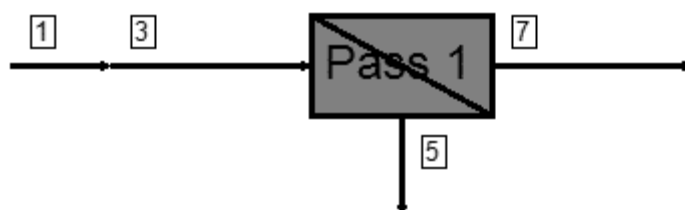
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.03	0.47	49.82	13.64	3562.14	6.40
2	0.03	0.40	59.26	13.18	3686.79	5.87
3	0.03	0.34	71.40	12.77	3801.31	5.37
4	0.02	0.28	87.67	12.43	3903.76	4.89
5	0.02	0.23	110.69	12.15	3992.34	4.42
6	0.01	0.17	145.75	11.92	4065.61	3.96

### Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	8.34	8.34	8.27
Langelier Saturation Index	1.54	1.54	2.10
Stiff & Davis Stability Index	1.72	1.72	2.00
Ionic Strength (Molal)	0.03	0.03	0.07
TDS (mg/l)	1957.81	1959.09	4122.58
HCO <sub>3</sub>	674.20	674.20	1403.87
CO <sub>2</sub>	3.43	3.43	7.31
CO <sub>3</sub>	17.63	17.63	44.60
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	3.94	3.94	11.57
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	23.95	23.95	52.69
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	0.03	0.03	0.05

To balance: 0.00 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	1957.81 mg/l	% System Recovery (7/1)	53.00 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
Stage #	1	2
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	1
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	6
Pass Average Flux	14.86 lmh	
Stage Average Flux	16.98 lmh	8.50 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	-	
Energy Consumption	0.54 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	1957.81
3	25.00	8.20	1959.09
5	11.75	3.52	4122.58
7	13.25	-	34.45
7/1	% Recovery	53.00	

#### Project Information:

#### Design Warnings:

-None-

#### Solubility Warnings:

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

## 9.3.2 Simulações Caso II

**Case-specific: Alimentação 1****System Details**

Feed Flow to Stage 1	27.50 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	17.50 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	69.98 %	Feed	0.62 bar
Feed Pressure	8.06 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	1.94 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	1092.21 mg/l	Average	1.28 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	30	Average NDP	5.22 bar
Total Active Area	1114.80 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	15.69 lm/h	Power	7.70 kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0.44 kWh/m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	27.50	7.72	2.50	15.36	6.43	12.14	18.15	0.00	0.00	12.69
2	BW30-400	2	6	15.36	6.09	0.00	10.00	5.01	5.35	12.01	0.00	0.00	34.78

Pass Streams (mg/l as Ion)								
Name	Feed	Adjusted Feed		Concentrate		Permeate		
		Initial	After Recycles	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4+ + NH3	6.45	6.78	8.15	14.75	22.14	0.55	0.94	0.67
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	161.94	162.03	195.69	348.46	531.33	2.45	6.80	3.78
Mg	66.63	66.63	80.62	143.97	220.32	0.48	1.33	0.74
Ca	80.85	80.85	97.83	174.71	267.37	0.58	1.60	0.89
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	2.23	2.23	3.19	8.10	15.33	0.00	0.00	0.00
HCO3	239.00	239.00	287.53	506.79	766.28	4.13	11.07	6.25
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	316.00	316.00	381.97	681.06	1040.16	3.63	10.16	5.63
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	193.64	193.64	234.45	419.06	642.02	0.91	2.51	1.40
SiO2	25.03	25.03	30.26	53.95	82.46	0.29	0.70	0.41
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	3.14	3.14	3.31	4.72	6.55	3.67	5.22	4.15
TDS	1091.79	1092.21	1319.72	2350.55	3587.10	12.69	34.78	19.45
pH	7.95	7.95	8.00	8.05	8.05	6.26	6.52	6.38

**Design Warnings**

-None-

### Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.08	0.76	8.11	9.17	1319.72	7.72
2	0.09	0.72	9.58	8.41	1438.09	7.43
3	0.09	0.69	11.36	7.68	1572.10	7.17
4	0.09	0.66	13.51	7.00	1725.10	6.95
5	0.10	0.63	16.12	6.34	1901.56	6.75
6	0.10	0.60	19.34	5.72	2107.41	6.58

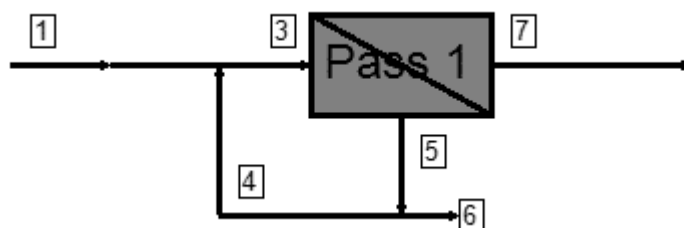
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.07	0.54	23.49	7.68	2350.55	6.09
2	0.07	0.50	27.43	7.14	2524.48	5.86
3	0.07	0.46	32.05	6.65	2711.31	5.66
4	0.07	0.43	37.53	6.18	2911.39	5.47
5	0.07	0.39	44.05	5.76	3124.59	5.30
6	0.07	0.36	51.85	5.36	3350.28	5.15

### Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	7.95	7.95	8.05
Langelier Saturation Index	0.63	0.63	1.71
Stiff & Davis Stability Index	0.92	0.92	1.57
Ionic Strength (Molal)	0.02	0.02	0.08
TDS (mg/l)	1091.79	1092.21	3587.10
HCO <sub>3</sub>	239.00	239.00	766.28
CO <sub>2</sub>	3.14	3.14	6.55
CO <sub>3</sub>	2.23	2.23	15.33
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	3.08	3.08	17.79
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	18.88	18.88	58.53
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	0.02	0.02	0.10

To balance: 0.09 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	1091.79 mg/l	% System Recovery (7/1)	69.98 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
	1	2
Stage #	1	2
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	2
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	12
Pass Average Flux	15.69 lmh	
Stage Average Flux	18.15 lmh	12.01 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	-	
Energy Consumption	0.44 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	1091.79
3	27.50	8.06	1319.72
4	2.50	5.01	3587.10
5	10.00	5.01	3587.10
6	7.50	5.01	3587.10
7	17.50	-	19.45
7/1	% Recovery	69.98	

#### Project Information:

#### Design Warnings:

-None-

#### Solubility Warnings:

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

## Case-specific: Alimentação 2

### System Details

Feed Flow to Stage 1	27.50 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	17.50 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	69.9 %	Feed	1.30 bar
Feed Pressure	9.66 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	4.09 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	2181.47 mg/l	Average	2.69 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	30	Average NDP	5.44 bar
Total Active Area	1114.80 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	15.70 lm/h	Power	9.23 kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0.5 kWh/3 m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	27.50	9.32	2.50	14.87	8.06	12.63	18.88	0.00	0.00	32.88
2	BW30-400	2	6	14.87	7.72	0.00	10.00	6.67	4.87	10.92	0.00	0.00	92.30

Pass Streams (mg/l as Ion)								
Name	Feed	Adjusted Feed		Concentrate		Permeate		
		Initial	After Recycles	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4+ + NH3	2.11	2.24	2.69	5.04	7.31	0.22	0.38	0.27
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	532.50	532.50	642.66	1180.45	1741.90	9.50	26.85	14.33
Mg	28.94	28.94	35.01	64.57	95.71	0.21	0.58	0.31
Ca	129.96	129.96	157.25	290.02	429.91	0.93	2.58	1.39
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	6.83	6.83	9.43	22.90	39.71	0.00	0.01	0.00
HCO3	464.50	464.50	558.12	1013.63	1483.59	8.87	24.39	13.19
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	632.12	632.12	763.07	1402.17	2069.89	10.62	30.24	16.08
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	311.06	311.06	376.49	694.70	1030.33	1.83	5.12	2.75
SiO2	73.30	73.30	88.60	163.15	241.45	0.83	2.28	1.23
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	4.38	4.38	4.83	8.03	11.67	5.70	9.03	6.63
TDS	2181.33	2181.47	2633.35	4836.51	7139.70	32.88	92.30	49.41
pH	8.06	8.06	8.08	8.07	8.04	6.39	6.61	6.49

### Design Warnings

-None-

### Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.09	0.82	20.95	9.17	2633.35	9.32
2	0.09	0.77	24.85	8.35	2888.54	9.03
3	0.10	0.72	29.56	7.58	3178.52	8.77
4	0.10	0.68	35.29	6.86	3509.88	8.55
5	0.10	0.63	42.32	6.18	3890.37	8.36
6	0.11	0.59	51.08	5.55	4329.16	8.20

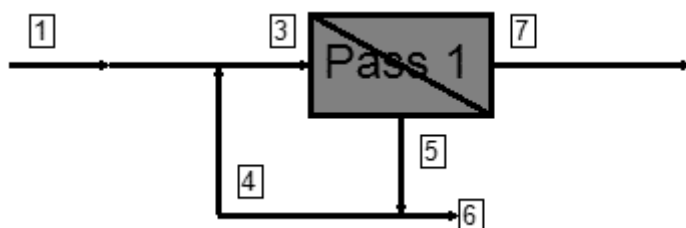
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.07	0.52	61.80	7.43	4836.51	7.72
2	0.07	0.47	72.55	6.92	5193.47	7.50
3	0.07	0.43	85.48	6.45	5567.33	7.30
4	0.06	0.38	101.11	6.02	5954.45	7.12
5	0.06	0.34	120.15	5.64	6349.85	6.96
6	0.06	0.30	143.44	5.30	6747.31	6.81

### Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	8.06	8.06	8.04
Langelier Saturation Index	1.20	1.20	2.18
Stiff & Davis Stability Index	1.32	1.32	1.84
Ionic Strength (Molal)	0.04	0.04	0.13
TDS (mg/l)	2181.33	2181.47	7139.70
HCO <sub>3</sub>	464.50	464.50	1483.59
CO <sub>2</sub>	4.38	4.38	11.67
CO <sub>3</sub>	6.83	6.83	39.71
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	6.28	6.28	31.59
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	51.73	51.73	172.73
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	0.01	0.01	0.04

To balance: 0.00 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	2181.33 mg/l	% System Recovery (7/1)	69.99 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
Stage #	1	2
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	2
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	12
Pass Average Flux	15.70 lmh	
Stage Average Flux	18.88 lmh	10.92 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	-	
Energy Consumption	0.53 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	2181.33
3	27.50	9.66	2633.35
4	2.50	6.67	7139.70
5	10.00	6.67	7139.70
6	7.50	6.67	7139.70
7	17.50	-	49.41
7/1	% Recovery	69.99	

#### Project Information:

#### Design Warnings:

-None-

#### Solubility Warnings:

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Case-specific: Alimentação 3

#### System Details

Feed Flow to Stage 1	27.50 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	17.50 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	70.01 %	Feed	1.14 bar
Feed Pressure	9.30 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	3.59 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	1959.09 mg/l	Average	2.36 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	30	Average NDP	5.41 bar
Total Active Area	1114.80 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	15.70 lm/h	Power	8.88 kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0.5 kWh/m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	27.50	8.95	2.50	14.98	7.69	12.52	18.71	0.00	0.00	31.34
2	BW30-400	2	6	14.98	7.34	0.00	10.00	6.29	4.99	11.18	0.00	0.00	86.46

Pass Streams (mg/l as Ion)								
Name	Feed	Adjusted Feed		Concentrate		Permeate		
		Initial	After Recycles	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4+ + NH3	10.31	11.59	13.92	26.45	38.39	1.72	2.51	1.95
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	464.31	464.31	560.38	1021.62	1519.82	8.19	22.78	12.35
Mg	21.10	21.10	25.53	46.73	69.81	0.16	0.44	0.24
Ca	102.04	102.04	123.45	225.93	337.57	0.76	2.09	1.14
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	17.63	17.63	22.78	47.80	78.08	0.00	0.01	0.01
HCO3	674.20	674.20	810.46	1464.28	2163.42	13.40	36.43	19.96
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	399.33	399.33	482.03	879.05	1308.03	6.74	19.00	10.23
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	228.66	228.66	276.79	507.01	758.28	1.18	3.26	1.77
SiO2	40.20	40.20	48.59	88.80	132.48	0.46	1.21	0.67
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	3.43	3.43	4.02	7.53	11.73	4.89	8.49	5.92
TDS	1957.81	1959.09	2363.98	4306.40	6404.64	31.34	86.46	47.04
pH	8.34	8.34	8.34	8.28	8.22	6.63	6.81	6.72

#### Design Warnings

-None-

#### Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.09	0.80	20.04	9.17	2363.98	8.95
2	0.09	0.76	23.73	8.36	2588.62	8.66
3	0.09	0.71	28.19	7.61	2843.66	8.41
4	0.10	0.67	33.58	6.89	3134.86	8.19
5	0.10	0.63	40.16	6.22	3469.55	8.00
6	0.11	0.59	48.29	5.59	3856.53	7.83

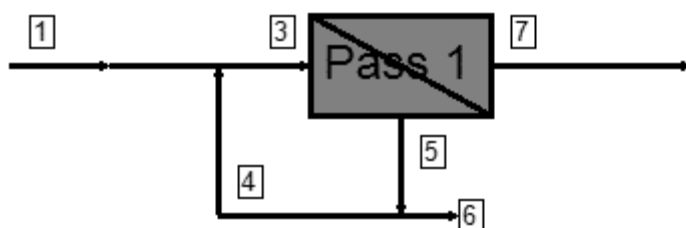
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.07	0.52	58.25	7.49	4306.40	7.34
2	0.07	0.48	68.18	6.97	4624.63	7.12
3	0.07	0.44	80.06	6.49	4960.00	6.92
4	0.06	0.39	94.33	6.05	5309.96	6.74
5	0.06	0.35	111.60	5.66	5670.85	6.58
6	0.06	0.31	132.62	5.31	6037.76	6.43

### Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	8.34	8.34	8.22
Langelier Saturation Index	1.54	1.54	2.42
Stiff & Davis Stability Index	1.72	1.72	2.14
Ionic Strength (Molal)	0.03	0.03	0.11
TDS (mg/l)	1957.81	1959.09	6404.64
HCO <sub>3</sub>	674.20	674.20	2163.42
CO <sub>2</sub>	3.43	3.43	11.73
CO <sub>3</sub>	17.63	17.63	78.08
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	3.94	3.94	20.70
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	23.95	23.95	85.09
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	0.03	0.03	0.06

To balance: 0.00 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	1957.81 mg/l	% System Recovery (7/1)	70.01 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
	1	2
Stage #	1	2
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	2
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	12
Pass Average Flux	15.70 lmh	
Stage Average Flux	18.71 lmh	11.18 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	-	
Energy Consumption	0.51 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	1957.81
3	27.50	9.30	2363.98
4	2.50	6.29	6404.64
5	10.00	6.29	6404.64
6	7.50	6.29	6404.64
7	17.50	-	47.04
7/1	% Recovery	70.01	

#### Project Information:

#### Design Warnings:

-None-

#### Solubility Warnings:

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

## 9.3.3 Simulações Caso III

**Case-specific: Alimentação 1****System Details**

Feed Flow to Stage 1	28.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	18.75 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	75.00 %	Feed	0.62 bar
Feed Pressure	8.66 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	2.31 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	1092.21 mg/l	Average	1.46 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	30	Average NDP	5.65 bar
Total Active Area	1114.80 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	16.82 lm/h	Power	8.42 kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0.45 kWh/m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	28.00	8.31	3.00	15.02	7.02	12.98	19.40	0.00	0.00	13.73
2	BW30-400	2	6	15.02	6.67	0.00	9.25	5.66	5.77	12.94	0.00	0.00	38.98

Pass Streams (mg/l as Ion)								
Name	Feed	Adjusted Feed		Concentrate		Permeate		
		Initial	After Recycles	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NH <sub>3</sub>	6.45	6.78	8.84	16.61	26.34	0.57	1.01	0.70
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	161.94	162.03	212.86	394.48	635.89	2.65	7.61	4.17
Mg	66.63	66.63	87.80	163.21	264.11	0.53	1.50	0.83
Ca	80.85	80.85	106.54	198.06	320.53	0.63	1.79	0.99
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO <sub>3</sub>	2.23	2.23	3.79	9.99	20.23	0.00	0.00	0.00
HCO <sub>3</sub>	239.00	239.00	312.04	571.92	912.95	4.47	12.41	6.91
NO <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	316.00	316.00	415.71	771.50	1245.81	3.92	11.38	6.22
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO <sub>4</sub>	193.64	193.64	255.42	475.25	770.04	1.00	2.83	1.56
SiO <sub>2</sub>	25.03	25.03	32.94	61.14	98.82	0.30	0.76	0.44
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO <sub>2</sub>	3.14	3.14	3.35	5.06	7.54	3.79	5.75	4.40
TDS	1091.79	1092.21	1435.97	2661.85	4294.41	13.73	38.98	21.50
pH	7.95	7.95	8.02	8.06	8.05	6.28	6.52	6.39

**Design Warnings**

-None-

### Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.09	0.81	8.62	9.33	1435.97	8.31
2	0.09	0.77	10.24	8.52	1571.51	8.01
3	0.09	0.73	12.19	7.75	1726.56	7.75
4	0.10	0.70	14.59	7.02	1905.79	7.53
5	0.11	0.67	17.54	6.32	2115.33	7.33
6	0.11	0.64	21.25	5.65	2363.60	7.16

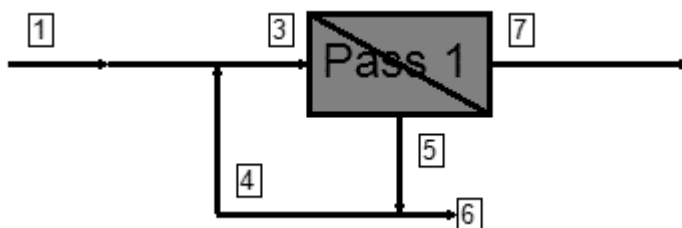
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.08	0.58	25.80	7.51	2661.85	6.67
2	0.08	0.54	30.28	6.93	2880.44	6.45
3	0.08	0.50	35.64	6.40	3119.48	6.26
4	0.08	0.46	42.08	5.90	3380.18	6.08
5	0.08	0.42	49.87	5.44	3663.21	5.93
6	0.08	0.39	59.36	5.01	3968.39	5.79

### Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	7.95	7.95	8.05
Langelier Saturation Index	0.63	0.63	1.86
Stiff & Davis Stability Index	0.92	0.92	1.65
Ionic Strength (Molal)	0.02	0.02	0.09
TDS (mg/l)	1091.79	1092.21	4294.41
HCO <sub>3</sub>	239.00	239.00	912.95
CO <sub>2</sub>	3.14	3.14	7.53
CO <sub>3</sub>	2.23	2.23	20.23
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	3.08	3.08	22.57
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	18.88	18.88	70.19
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	0.02	0.02	0.11

To balance: 0.09 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	1091.79 mg/l	% System Recovery (7/1)	75.00 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
	1	2
Stage #		
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	2
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	12
Pass Average Flux	16.82 lmh	
Stage Average Flux	19.40 lmh	12.94 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	-	
Energy Consumption	0.45 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	1091.79
3	28.00	8.66	1435.97
4	3.00	5.66	4294.41
5	9.25	5.66	4294.41
6	6.25	5.66	4294.41
7	18.75	-	21.50
7/1	% Recovery	75.00	

#### Project Information:

#### Design Warnings:

-None-

#### Solubility Warnings:

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

## Case-specific: Alimentação 2

### System Details

Feed Flow to Stage 1	28.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	18.75 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	75.01 %	Feed	1.30 bar
Feed Pressure	10.52 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	4.86 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	2181.47 mg/l	Average	3.08 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	30	Average NDP	5.93 bar
Total Active Area	1114.80 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	16.8 lm <sup>2</sup> /h	Power	10.23 kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0.5 kWh/5 m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	28.00	10.17	3.00	14.41	8.92	13.59	20.32	0.00	0.00	34.89
2	BW30-400	2	6	14.41	8.57	0.00	9.25	7.61	5.16	11.57	0.00	0.00	102.99

Pass Streams (mg/l as Ion)								
Name	Feed	Adjusted Feed		Concentrate		Permeate		
		Initial	After Recycles	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4+ + NH3	2.11	2.24	2.92	5.72	8.69	0.23	0.41	0.28
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	532.50	532.50	698.81	1348.60	2084.37	10.08	29.95	15.55
Mg	28.94	28.94	38.13	73.89	114.75	0.22	0.65	0.34
Ca	129.96	129.96	171.25	331.88	515.45	0.99	2.89	1.51
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	6.83	6.83	11.03	28.22	51.79	0.00	0.01	0.00
HCO3	464.50	464.50	605.28	1153.75	1766.48	9.42	27.20	14.31
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	632.12	632.12	829.85	1602.16	2477.30	11.26	33.75	17.45
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	311.06	311.06	410.08	795.13	1235.59	1.96	5.74	3.00
SiO2	73.30	73.30	96.44	186.61	289.31	0.87	2.54	1.33
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	4.38	4.38	4.98	8.90	13.83	6.03	10.26	7.20
TDS	2181.33	2181.47	2863.82	5525.84	8543.60	34.89	102.99	53.63
pH	8.06	8.06	8.10	8.07	8.02	6.39	6.59	6.48

### Design Warnings

-None-

### Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.09	0.88	21.81	9.33	2863.82	10.17
2	0.10	0.83	26.00	8.45	3159.37	9.88
3	0.10	0.78	31.10	7.62	3499.60	9.62
4	0.11	0.73	37.42	6.84	3893.94	9.40
5	0.11	0.68	45.32	6.11	4353.77	9.21
6	0.12	0.63	55.38	5.43	4892.66	9.05

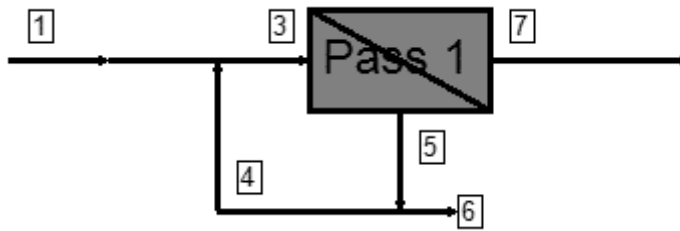
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.08	0.56	67.03	7.20	5525.84	8.57
2	0.08	0.50	79.48	6.65	5982.16	8.36
3	0.07	0.45	94.70	6.14	6466.05	8.18
4	0.07	0.40	113.50	5.69	6972.71	8.01
5	0.07	0.35	136.87	5.29	7494.65	7.86
6	0.06	0.31	166.09	4.93	8022.10	7.73

### Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	8.06	8.06	8.02
Langelier Saturation Index	1.20	1.20	2.31
Stiff & Davis Stability Index	1.32	1.32	1.90
Ionic Strength (Molal)	0.04	0.04	0.16
TDS (mg/l)	2181.33	2181.47	8543.60
HCO <sub>3</sub>	464.50	464.50	1766.48
CO <sub>2</sub>	4.38	4.38	13.83
CO <sub>3</sub>	6.83	6.83	51.79
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	6.28	6.28	39.45
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	51.73	51.73	209.12
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	0.01	0.01	0.04

To balance: 0.00 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	2181.33 mg/l	% System Recovery (7/1)	75.01 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
Stage #	1	2
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	2
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	12
Pass Average Flux	16.82 lmh	
Stage Average Flux	20.32 lmh	11.57 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	-	
Energy Consumption	0.55 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	2181.33
3	28.00	10.52	2863.82
4	3.00	7.61	8543.60
5	9.25	7.61	8543.60
6	6.25	7.61	8543.60
7	18.75	-	53.63
7/1	% Recovery	75.01	

#### Project Information:

#### Design Warnings:

-None-

#### Solubility Warnings:

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Case-specific: Alimentação 3

#### System Details

Feed Flow to Stage 1	28.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	18.75 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	75.01 %	Feed	1.14 bar
Feed Pressure	10.08 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	4.27 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	1959.09 mg/l	Average	2.70 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	30	Average NDP	5.87 bar
Total Active Area	1114.80 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	16.82 lm/h	Power	9.80 kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0.5 kWh/2 m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	28.00	9.74	3.00	14.55	8.47	13.45	20.11	0.00	0.00	33.35
2	BW30-400	2	6	14.55	8.13	0.00	9.25	7.15	5.30	11.88	0.00	0.00	96.39

Pass Streams (mg/l as Ion)								
Name	Feed	Adjusted Feed		Concentrate		Permeate		
		Initial	After Recycles	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4+ + NH3	10.31	11.59	15.09	29.89	45.50	1.75	2.64	2.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	464.31	464.31	609.35	1164.87	1817.58	8.72	25.40	13.43
Mg	21.10	21.10	27.80	53.36	83.65	0.17	0.49	0.26
Ca	102.04	102.04	134.43	258.02	404.47	0.82	2.34	1.25
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	17.63	17.63	25.81	57.07	98.68	0.00	0.01	0.01
HCO3	674.20	674.20	879.06	1664.12	2576.06	14.27	40.59	21.70
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	399.33	399.33	524.21	1002.42	1564.48	7.16	21.19	11.13
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	228.66	228.66	301.52	579.23	908.93	1.26	3.65	1.94
SiO2	40.20	40.20	52.89	101.37	158.66	0.48	1.35	0.73
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	3.43	3.43	4.28	8.54	14.25	5.33	9.90	6.62
TDS	1957.81	1959.09	2570.21	4909.11	7656.75	33.35	96.39	51.16
pH	8.34	8.34	8.34	8.26	8.19	6.62	6.79	6.70

#### Design Warnings

-None-

#### Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.09	0.86	20.94	9.33	2570.21	9.74
2	0.10	0.82	24.92	8.47	2829.81	9.44
3	0.10	0.77	29.76	7.65	3128.12	9.18
4	0.11	0.72	35.70	6.88	3473.56	8.96
5	0.11	0.68	43.10	6.16	3876.53	8.77
6	0.12	0.63	52.43	5.48	4349.90	8.61

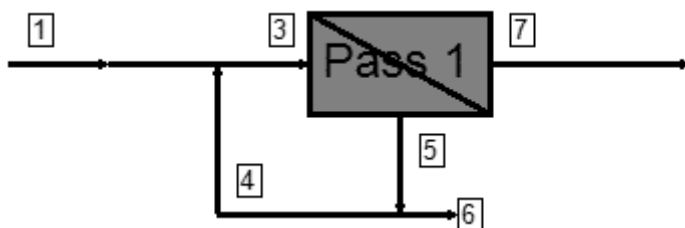
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.08	0.56	63.33	7.27	4909.11	8.13
2	0.08	0.51	74.74	6.71	5313.49	7.92
3	0.07	0.46	88.62	6.20	5745.58	7.73
4	0.07	0.42	105.63	5.73	6202.26	7.56
5	0.07	0.37	126.61	5.32	6678.30	7.41
6	0.07	0.32	152.67	4.95	7166.28	7.27

### Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	8.34	8.34	8.19
Langelier Saturation Index	1.54	1.54	2.54
Stiff & Davis Stability Index	1.72	1.72	2.20
Ionic Strength (Molal)	0.03	0.03	0.13
TDS (mg/l)	1957.81	1959.09	7656.75
HCO <sub>3</sub>	674.20	674.20	2576.06
CO <sub>2</sub>	3.43	3.43	14.24
CO <sub>3</sub>	17.63	17.63	98.68
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	3.94	3.94	25.95
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	23.95	23.95	103.55
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	0.03	0.03	0.07

To balance: 0.00 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	1957.81 mg/l	% System Recovery (7/1)	75.01 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
	1	2
Stage #	1	2
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	2
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	12
Pass Average Flux	16.82 lmh	
Stage Average Flux	20.11 lmh	11.88 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	-	
Energy Consumption	0.52 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	1957.81
3	28.00	10.08	2570.21
4	3.00	7.15	7656.75
5	9.25	7.15	7656.75
6	6.25	7.15	7656.75
7	18.75	-	51.16
7/1	% Recovery	75.01	

#### Project Information:

#### Design Warnings:

-None-

#### Solubility Warnings:

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

## 9.3.4 Simulações Caso IV

**Case-specific: Alimentação 4****System Details**

Feed Flow to Stage 1	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	13.2 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	53.0 %	Feed	1.1 bar
Feed Pressure	8.14 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	2.2 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	1723. mg /l	Average	1.7 bar
Chem. Dose (100% HCl)	37.64 mg/l	Number of Elements	24	Average NDP	4.9 bar
Total Active Area	891.84 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	14.8 lm /h	Power	7.0 kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0. kWh/ 53 m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	25.00	7.79	0.00	13.64	6.69	11.36	16.98	0.00	0.00	23.12
2	BW30-400	1	6	13.64	6.34	0.00	11.75	3.46	1.90	8.50	0.00	0.00	66.72

Pass Streams (mg/l as Ion)								
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate			
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total	
NH4+ + NH3	2.71	15.48	40.71	44.99	13.27	14.23	13.41	
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Na	540.98	542.91	988.59	1144.61	7.37	21.49	9.39	
Mg	17.32	17.32	31.66	36.73	0.09	0.25	0.11	
Ca	9.50	9.50	17.37	20.15	0.05	0.13	0.06	
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO3	61.03	4.43	8.86	10.49	0.00	0.01	0.00	
HCO3	62.50	119.45	215.70	249.12	2.36	6.36	2.93	
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Cl	538.86	575.47	1046.69	1211.17	9.26	27.17	11.82	
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
SO4	385.64	385.64	704.14	816.39	2.93	8.37	3.71	
SiO2	53.46	53.46	97.49	112.98	0.55	1.48	0.68	
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO2	0.01	0.42	0.81	0.95	0.35	0.57	0.38	
TDS	1671.99	1723.71	3138.50	3633.90	23.12	66.72	29.35	
pH	9.92	8.50	8.43	8.41	7.03	7.23	7.08	

**Design Warnings**

-None-

### Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.09	0.72	14.57	8.33	1723.71	7.79
2	0.09	0.68	17.32	7.61	1886.15	7.54
3	0.09	0.65	20.64	6.93	2070.75	7.32
4	0.10	0.61	24.71	6.28	2282.04	7.12
5	0.10	0.58	29.72	5.67	2525.47	6.96
6	0.11	0.54	35.96	5.09	2808.10	6.81

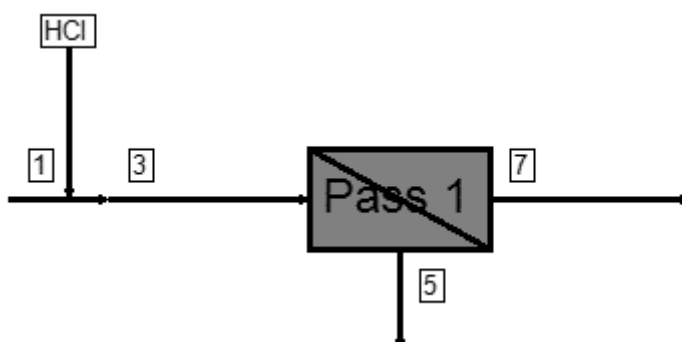
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.03	0.47	42.81	13.64	3138.50	6.34
2	0.03	0.40	51.03	13.18	3248.72	5.81
3	0.03	0.34	61.59	12.77	3349.97	5.31
4	0.02	0.28	75.76	12.43	3440.53	4.82
5	0.02	0.23	95.81	12.15	3518.85	4.36
6	0.01	0.17	126.44	11.92	3583.59	3.90

### Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	9.92	8.50	8.41
Langelier Saturation Index	1.06	-0.08	0.46
Stiff & Davis Stability Index	1.26	0.13	0.39
Ionic Strength (Molal)	0.03	0.03	0.07
TDS (mg/l)	1671.99	1723.71	3633.90
HCO <sub>3</sub>	62.50	119.45	249.12
CO <sub>2</sub>	0.01	0.42	0.95
CO <sub>3</sub>	61.03	4.43	10.49
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.63	0.64	1.90
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	12.26	28.92	64.41
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	41.07	0.06	0.08

To balance: 0.09 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	1671.99 mg/l	% System Recovery (7/1)	53.00 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
Stage #	1	2
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	1
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	6
Pass Average Flux	14.86 lmh	
Stage Average Flux	16.98 lmh	8.50 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	100% HCl 37.64 mg/l	
Energy Consumption	0.53 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	1671.99
3	25.00	8.14	1723.71
5	11.75	3.46	3633.90
7	13.25	-	29.35
7/1	% Recovery	53.00	

#### Project Information:

#### Design Warnings:

-None-

#### Solubility Warnings:

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

## Case-specific: Alimentação 5

### System Details

Feed Flow to Stage 1	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	13.0 m <sup>3</sup> / h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	52.0 %	Feed	1.3 bar
Feed Pressure	8.38 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	2.6 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	1941. mg / l	Average	1.9 bar
Chem. Dose (100% HCl)	224.67 mg/l	Number of Elements	24	Average NDP	4.9 bar
Total Active Area	891.84 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	14.58 lm / h	Power	7.2 kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0.56 kWh/ m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	25.00	8.04	0.00	13.78	6.93	11.22	16.77	0.00	0.00	27.79
2	BW30-400	1	6	13.78	6.58	0.00	12.00	3.64	1.78	8.00	0.00	0.00	81.87

Pass Streams (mg/l as Ion)							
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate		Total
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	
NH4+ + NH3	0.06	14.64	40.73	44.41	15.08	16.04	15.21
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	565.67	668.30	1204.39	1379.37	9.42	27.96	11.97
Mg	1.92	1.92	3.47	3.99	0.01	0.03	0.01
Ca	3.16	3.16	5.72	6.56	0.02	0.05	0.02
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	105.35	3.84	7.67	8.97	0.00	0.01	0.00
HCO3	2.03	104.70	187.06	213.74	2.12	5.76	2.61
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	521.28	739.81	1331.93	1524.67	12.07	36.07	15.37
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	359.26	359.26	648.98	744.13	3.18	9.22	4.01
SiO2	45.82	45.82	82.71	94.82	0.47	1.32	0.59
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	0.00	0.37	0.72	0.84	0.30	0.49	0.32
TDS	1604.55	1941.50	3498.12	4006.11	27.79	81.87	35.21
pH	11.65	8.50	8.42	8.40	7.05	7.25	7.10

### Design Warnings

-None-

### Solubility Warnings

-None-

**Stage Details**

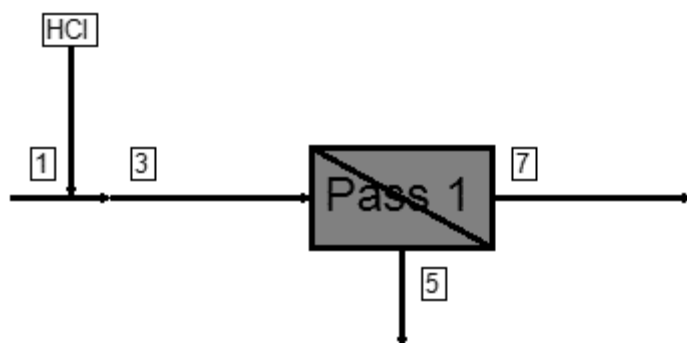
Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.09	0.72	17.56	8.33	1941.50	8.04
2	0.09	0.68	20.87	7.61	2124.04	7.78
3	0.09	0.64	24.90	6.93	2330.68	7.56
4	0.10	0.60	29.81	6.29	2565.62	7.37
5	0.10	0.56	35.84	5.69	2834.21	7.20
6	0.10	0.53	43.32	5.12	3142.65	7.05
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.03	0.45	51.69	13.78	3498.12	6.58
2	0.03	0.39	61.94	13.33	3615.19	6.05
3	0.03	0.32	75.38	12.94	3721.44	5.53
4	0.02	0.26	93.81	12.62	3815.02	5.04
5	0.02	0.21	120.68	12.36	3894.36	4.56
6	0.01	0.15	163.55	12.15	3958.28	4.09

**Scaling Calculations**

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	11.65	8.50	8.40
Langelier Saturation Index	0.83	-0.62	-0.11
Stiff & Davis Stability Index	1.03	-0.41	-0.21
Ionic Strength (Molal)	0.03	0.03	0.07
TDS (mg/l)	1604.55	1941.50	4006.11
HCO <sub>3</sub>	2.03	104.70	213.74
CO <sub>2</sub>	0.00	0.37	0.84
CO <sub>3</sub>	105.35	3.84	8.97
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.20	0.20	0.54
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	3.70	24.79	54.58
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	13131.04	0.01	0.01

To balance: 0.01 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	1604.55 mg/l	% System Recovery (7/1)	52.00 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
Stage #	1	2
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	1
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	6
Pass Average Flux	14.58 lmh	
Stage Average Flux	16.77 lmh	8.00 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	100% HCl 224.67 mg/l	
Energy Consumption	0.56 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	1604.55
3	25.00	8.38	1941.50
5	12.00	3.64	4006.11
7	13.00	-	35.21
7/1	% Recovery	52.00	

#### Project Information:

#### Design Warnings:

-None-

#### Solubility Warnings:

-None-

## 9.3.5 Simulações Caso V

**Case-specific: Alimentação 4****System Details**

Feed Flow to Stage 1	27.50 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	17.5 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	70.0 %	Feed	1.1 bar
Feed Pressure	9.21 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	3.5 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	1723 mg /l	Average	2.3 bar
Chem. Dose (100% HCl)	37.64 mg/l	Number of Elements	30	Average NDP	5.3 bar
Total Active Area	1114.80 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	15.7 lm /h	Power	8.8 kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0.5 kWh/ m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	27.50	8.87	2.50	15.00	7.61	12.50	18.69	0.00	0.00	26.72
2	BW30-400	2	6	15.00	7.26	0.00	10.00	6.21	5.00	11.22	0.00	0.00	74.96

Pass Streams (mg/l as Ion)									
Name	Feed	Adjusted Feed		Concentrate		Permeate			
		Initial	After Recycles	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total	
NH4+ + NH3	2.71	15.48	18.60	46.38	62.38	13.35	14.40	13.65	
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Na	540.98	542.91	655.61	1194.84	1780.53	8.54	24.15	13.00	
Mg	17.32	17.32	20.97	38.35	57.40	0.10	0.28	0.15	
Ca	9.50	9.50	11.50	21.04	31.49	0.05	0.15	0.08	
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO3	61.03	4.43	5.58	11.13	17.59	0.00	0.00	0.00	
HCO3	62.50	119.45	143.68	259.64	384.29	2.71	7.19	3.99	
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Cl	538.86	575.47	694.45	1264.24	1881.54	10.71	30.38	16.33	
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
SO4	385.64	385.64	466.47	852.36	1274.00	3.41	9.55	5.17	
SiO2	53.46	53.46	64.63	117.98	176.20	0.61	1.61	0.90	
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO2	0.01	0.42	0.51	0.99	1.59	0.45	0.86	0.57	
TDS	1671.99	1723.71	2081.53	3793.24	5652.68	26.72	74.96	40.50	
pH	9.92	8.50	8.49	8.41	8.34	6.97	7.10	7.03	

**Design Warnings**

-None-

### Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.09	0.80	16.97	9.17	2081.53	8.87
2	0.09	0.76	20.13	8.37	2279.14	8.58
3	0.09	0.71	23.96	7.61	2503.59	8.33
4	0.10	0.67	28.61	6.90	2759.95	8.11
5	0.10	0.63	34.32	6.22	3054.79	7.91
6	0.11	0.59	41.39	5.59	3396.04	7.75

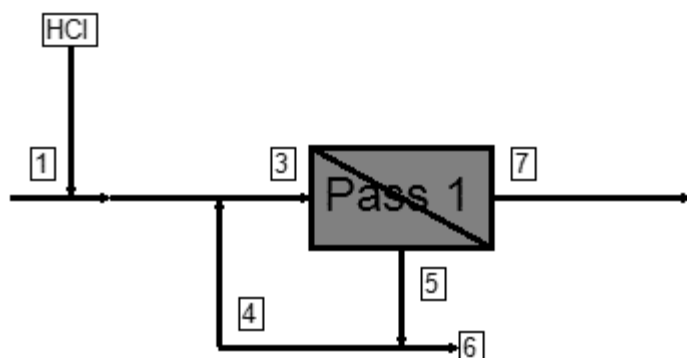
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.07	0.52	50.23	7.50	3793.24	7.26
2	0.07	0.48	58.91	6.98	4074.26	7.04
3	0.07	0.44	69.31	6.50	4370.76	6.84
4	0.07	0.39	81.81	6.06	4680.56	6.66
5	0.06	0.35	96.94	5.67	5000.48	6.50
6	0.06	0.31	115.36	5.31	5326.29	6.35

### Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	9.92	8.50	8.34
Langelier Saturation Index	1.06	-0.08	0.76
Stiff & Davis Stability Index	1.26	0.13	0.52
Ionic Strength (Molal)	0.03	0.03	0.10
TDS (mg/l)	1671.99	1723.71	5652.68
HCO <sub>3</sub>	62.50	119.45	384.29
CO <sub>2</sub>	0.01	0.42	1.59
CO <sub>3</sub>	61.03	4.43	17.59
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.63	0.64	3.43
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	12.26	28.92	105.01
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	41.07	0.06	0.09

To balance: 0.09 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	1671.99 mg/l	% System Recovery (7/1)	70.01 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
Stage #	1	2
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	2
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	12
Pass Average Flux	15.70 lmh	
Stage Average Flux	18.69 lmh	11.22 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	100% HCl 37.64 mg/l	
Energy Consumption	0.50 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	1671.99
3	27.50	9.21	2081.53
4	2.50	6.21	5652.68
5	10.00	6.21	5652.68
6	7.50	6.21	5652.68
7	17.50	-	40.50
7/1	% Recovery	70.01	

#### Project Information:

**Design Warnings:** -None-

**Solubility Warnings:** Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

## Case-specific: Alimentação 5

### System Details

Feed Flow to Stage 1	27.50 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	17.50 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	69.9 %	Feed	1.3 bar
Feed Pressure	9.71 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	4.1 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	1941. mg/50 l	Average	2.7 bar
Chem. Dose (100% HCl)	224.67 mg/l	Number of Elements	30	Average NDP	5.4 bar
Total Active Area	1114.80 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	15.69 lm/h	Power	9.2 kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0. kWh/53 m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	27.50	9.36	2.50	14.85	8.11	12.65	18.91	0.00	0.00	31.64
2	BW30-400	2	6	14.85	7.76	0.00	10.00	6.72	4.84	10.87	0.00	0.00	90.87

Pass Streams (mg/l as Ion)								
Name	Feed	Adjusted Feed		Concentrate		Permeate		
		Initial	After Recycles	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4+ + NH3	0.06	14.64	17.58	46.67	61.43	15.14	16.18	15.43
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	565.67	668.30	806.87	1485.21	2189.52	10.74	31.04	16.36
Mg	1.92	1.92	2.32	4.29	6.36	0.01	0.03	0.02
Ca	3.16	3.16	3.82	7.07	10.46	0.02	0.05	0.03
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	105.35	3.84	4.87	9.87	15.44	0.00	0.00	0.00
HCO3	2.03	104.70	125.87	229.66	336.31	2.39	6.44	3.51
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	521.28	739.81	892.66	1641.56	2417.31	13.74	39.86	20.97
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	359.26	359.26	434.38	801.38	1184.48	3.65	10.40	5.52
SiO2	45.82	45.82	55.39	102.14	150.91	0.52	1.43	0.77
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	0.00	0.37	0.46	0.90	1.44	0.40	0.78	0.51
TDS	1604.55	1941.50	2343.81	4313.31	6357.67	31.64	90.87	48.04
pH	11.65	8.50	8.47	8.39	8.32	6.97	7.09	7.03

### Design Warnings

-None-

### Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.09	0.82	19.95	9.17	2343.81	9.36
2	0.09	0.77	23.74	8.35	2571.91	9.07
3	0.10	0.72	28.34	7.58	2831.17	8.82
4	0.10	0.68	33.97	6.85	3127.50	8.60
5	0.10	0.63	40.93	6.17	3467.79	8.41
6	0.11	0.59	49.61	5.54	3860.05	8.25

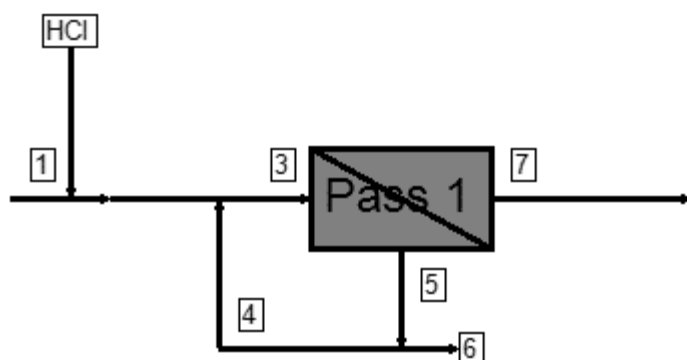
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.07	0.52	60.39	7.42	4313.31	7.76
2	0.07	0.47	71.13	6.91	4631.92	7.54
3	0.07	0.42	84.07	6.44	4965.07	7.35
4	0.06	0.38	99.74	6.01	5309.35	7.17
5	0.06	0.34	118.86	5.63	5660.17	7.01
6	0.06	0.29	142.28	5.30	6011.77	6.86

### Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	11.65	8.50	8.32
Langelier Saturation Index	0.83	-0.62	0.20
Stiff & Davis Stability Index	1.03	-0.41	-0.07
Ionic Strength (Molal)	0.03	0.03	0.11
TDS (mg/l)	1604.55	1941.50	6357.67
HCO <sub>3</sub>	2.03	104.70	336.31
CO <sub>2</sub>	0.00	0.37	1.44
CO <sub>3</sub>	105.35	3.84	15.44
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.20	0.20	1.00
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	3.70	24.79	91.10
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	13131.04	0.01	0.01

To balance: 0.01 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	1604.55 mg/l	% System Recovery (7/1)	69.99 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
Stage #	1	2
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	2
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	12
Pass Average Flux	15.69 lmh	
Stage Average Flux	18.91 lmh	10.87 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	100% HCl 224.67 mg/l	
Energy Consumption	0.53 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	1604.55
3	27.50	9.71	2343.81
4	2.50	6.72	6357.67
5	10.00	6.72	6357.67
6	7.50	6.72	6357.67
7	17.50	-	48.04
7/1	% Recovery	69.99	

#### Project Information:

**Design Warnings:** -None-

#### Solubility Warnings:

Langelier Saturation Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

## 9.3.6 Simulações Caso VI

**Case-specific: Alimentação 4****System Details**

Feed Flow to Stage 1	28.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	18.7 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	74.9 %	Feed	1.1 <sub>1</sub> bar
Feed Pressure	9.99 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	4.1 <sub>8</sub> bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	1723. mg /l	Average	2.6 <sub>4</sub> bar
Chem. Dose (100% HCl)	37.64 mg/l	Number of Elements	30	Average NDP	5.8 <sub>4</sub> bar
Total Active Area	1114.80 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	16.8 lm <sup>2</sup> /h	Power	9.7 <sub>1</sub> kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0. kWh/ 52 m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	28.00	9.64	3.00	14.57	8.37	13.43	20.08	0.00	0.00	28.55
2	BW30-400	2	6	14.57	8.03	0.00	9.25	7.05	5.32	11.92	0.00	0.00	83.87

Pass Streams (mg/l as Ion)									
Name	Feed	Adjusted Feed		Concentrate		Permeate			
		Initial	After Recycles	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total	
NH4+ + NH3	2.71	15.48	20.19	51.01	71.93	13.39	14.58	13.73	
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Na	540.98	542.91	713.49	1362.86	2130.21	9.13	27.04	14.21	
Mg	17.32	17.32	22.84	43.80	68.77	0.11	0.32	0.17	
Ca	9.50	9.50	12.53	24.02	37.73	0.06	0.17	0.09	
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO3	61.03	4.43	6.19	13.02	21.73	0.00	0.01	0.00	
HCO3	62.50	119.45	156.06	295.36	458.07	2.88	8.03	4.34	
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Cl	538.86	575.47	755.53	1441.54	2250.10	11.43	33.96	17.82	
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
SO4	385.64	385.64	508.03	973.01	1525.78	3.67	10.74	5.67	
SiO2	53.46	53.46	70.37	134.66	210.99	0.64	1.79	0.96	
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO2	0.01	0.42	0.55	1.15	1.98	0.52	1.06	0.67	
TDS	1671.99	1723.71	2265.28	4326.55	6762.57	28.55	83.87	44.23	
pH	9.92	8.50	8.48	8.39	8.30	6.94	7.05	7.00	

**Design Warnings**

-None-

### Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.09	0.86	17.79	9.33	2265.28	9.64
2	0.10	0.81	21.21	8.47	2493.76	9.34
3	0.10	0.77	25.40	7.66	2756.45	9.09
4	0.10	0.72	30.55	6.89	3060.59	8.87
5	0.11	0.68	36.98	6.17	3415.59	8.67
6	0.12	0.63	45.12	5.49	3832.91	8.51

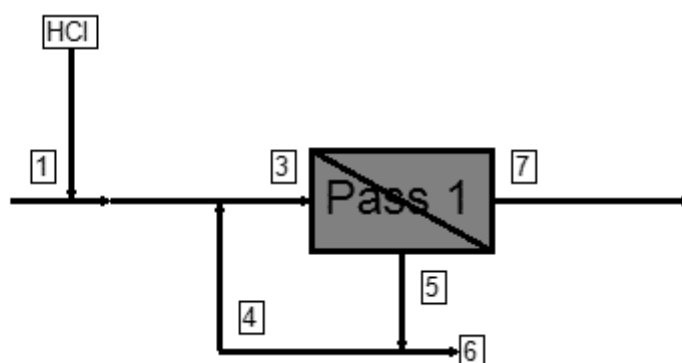
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.08	0.56	54.83	7.28	4326.55	8.03
2	0.08	0.51	64.84	6.72	4683.70	7.82
3	0.07	0.47	77.01	6.21	5065.68	7.63
4	0.07	0.42	91.89	5.74	5469.94	7.46
5	0.07	0.37	110.33	5.32	5892.26	7.31
6	0.07	0.33	133.20	4.95	6325.83	7.18

### Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	9.92	8.50	8.30
Langelier Saturation Index	1.06	-0.08	0.88
Stiff & Davis Stability Index	1.26	0.13	0.56
Ionic Strength (Molal)	0.03	0.03	0.12
TDS (mg/l)	1671.99	1723.71	6762.57
HCO <sub>3</sub>	62.50	119.45	458.07
CO <sub>2</sub>	0.01	0.42	1.98
CO <sub>3</sub>	61.03	4.43	21.73
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.63	0.64	4.31
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	12.26	28.92	128.45
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	41.07	0.06	0.10

To balance: 0.09 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	1671.99 mg/l	% System Recovery (7/1)	74.99 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
	1	2
Stage #	1	2
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	2
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	12
Pass Average Flux	16.82 lmh	
Stage Average Flux	20.08 lmh	11.92 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	100% HCl 37.64 mg/l	
Energy Consumption	0.52 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	1671.99
3	28.00	9.99	2265.28
4	3.00	7.05	6762.57
5	9.25	7.05	6762.57
6	6.25	7.05	6762.57
7	18.75	-	44.23
7/1	% Recovery	74.99	

### Project Information:

**Design Warnings:** -None-

**Solubility Warnings:** Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

## Case-specific: Alimentação 5

### System Details

Feed Flow to Stage 1	28.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	18.5 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	73.9 %	Feed	1.3 <sub>1</sub> bar
Feed Pressure	10.40 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	4.7 <sub>9</sub> bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	1941. mg /l	Average	3.0 <sub>5</sub> bar
Chem. Dose (100% HCl)	224.67 mg/l	Number of Elements	30	Average NDP	5.8 <sub>2</sub> bar
Total Active Area	1114.80 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	16.59 lm /h	Power	10.1 <sub>2</sub> kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0.5 kWh/ m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	28.00	10.06	3.00	14.58	8.80	13.42	20.07	0.00	0.00	33.37
2	BW30-400	2	6	14.58	8.45	0.00	9.50	7.46	5.08	11.38	0.00	0.00	99.34

Pass Streams (mg/l as Ion)								
Name	Feed	Adjusted Feed		Concentrate		Permeate		
		Initial	After Recycles	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4+ + NH3	0.06	14.64	18.86	50.27	68.40	15.17	16.33	15.49
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	565.67	668.30	867.36	1655.41	2521.63	11.34	33.95	17.54
Mg	1.92	1.92	2.50	4.79	7.33	0.01	0.04	0.02
Ca	3.16	3.16	4.12	7.89	12.07	0.02	0.06	0.03
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	105.35	3.84	5.33	11.24	18.26	0.00	0.00	0.00
HCO3	2.03	104.70	135.08	255.41	386.19	2.51	7.03	3.75
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	521.28	739.81	959.37	1829.23	2783.17	14.49	43.55	22.46
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	359.26	359.26	467.19	893.73	1365.08	3.87	11.41	5.94
SiO2	45.82	45.82	59.57	113.91	173.92	0.54	1.56	0.82
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	0.00	0.37	0.49	1.02	1.71	0.45	0.92	0.58
TDS	1604.55	1941.50	2519.42	4807.32	7321.48	33.37	99.34	51.48
pH	11.65	8.50	8.47	8.37	8.29	6.94	7.05	6.99

### Design Warnings

-None-

### Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.09	0.87	20.75	9.33	2519.42	10.06
2	0.10	0.82	24.79	8.46	2776.38	9.76
3	0.10	0.77	29.72	7.64	3071.25	9.51
4	0.10	0.72	35.83	6.87	3411.76	9.28
5	0.11	0.67	43.46	6.15	3807.13	9.09
6	0.11	0.62	53.15	5.48	4268.29	8.93

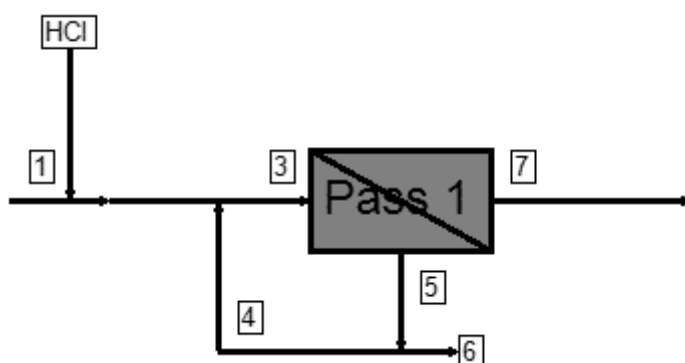
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.08	0.55	64.73	7.29	4807.32	8.45
2	0.07	0.50	76.76	6.74	5192.59	8.24
3	0.07	0.45	91.43	6.25	5599.09	8.05
4	0.07	0.40	109.52	5.80	6022.53	7.88
5	0.06	0.35	131.91	5.40	6456.28	7.73
6	0.06	0.30	159.77	5.05	6892.36	7.59

### Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	11.65	8.50	8.29
Langelier Saturation Index	0.83	-0.62	0.29
Stiff & Davis Stability Index	1.03	-0.41	-0.04
Ionic Strength (Molal)	0.03	0.03	0.13
TDS (mg/l)	1604.55	1941.50	7321.48
HCO <sub>3</sub>	2.03	104.70	386.19
CO <sub>2</sub>	0.00	0.37	1.71
CO <sub>3</sub>	105.35	3.84	18.26
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.20	0.20	1.19
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	3.70	24.79	106.80
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	13131.04	0.01	0.01

To balance: 0.01 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	1604.55 mg/l	% System Recovery (7/1)	73.99 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
Stage #	1	2
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	2
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	12
Pass Average Flux	16.59 lmh	
Stage Average Flux	20.07 lmh	11.38 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	100% HCl 224.67 mg/l	
Energy Consumption	0.55 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	1604.55
3	28.00	10.40	2519.42
4	3.00	7.46	7321.48
5	9.50	7.46	7321.48
6	6.50	7.46	7321.48
7	18.50	-	51.48
7/1	% Recovery	73.99	

### Project Information:

**Design Warnings:** -None-

**Solubility Warnings:** Langelier Saturation Index > 0

SiO<sub>2</sub> (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

## 9.3.7 Simulações Caso VII

**Case-specific: Alimentação 4****System Details**

Feed Flow to Stage 1	27.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	17.0 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	25.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	67.9 %	Feed	1.1 <sub>1</sub> bar
Feed Pressure	8.89 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	3.3 <sub>0</sub> bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	1723 mg /l	Average	2.2 <sub>0</sub> bar
Chem. Dose (100% HCl)	37.64 mg/l	Number of Elements	30	Average NDP	5.2 <sub>0</sub> bar
Total Active Area	1114.80 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	15.2 lm /h	Power	8.3 <sub>4</sub> kW
Water Classification: Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Specific Energy	0. kWh/ 49 m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400	3	6	27.00	8.55	2.00	14.87	7.31	12.13	18.14	0.00	0.00	25.83
2	BW30-400	2	6	14.87	6.96	0.00	10.00	5.92	4.87	10.91	0.00	0.00	72.06

Pass Streams (mg/l as Ion)								
Name	Feed	Adjusted Feed		Concentrate		Permeate		
		Initial	After Recycles	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4+ + NH3	2.71	15.48	17.79	44.62	59.36	13.33	14.34	13.62
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	540.98	542.91	626.56	1131.01	1670.06	8.25	23.22	12.54
Mg	17.32	17.32	20.03	36.28	53.81	0.10	0.27	0.15
Ca	9.50	9.50	10.98	19.90	29.52	0.05	0.15	0.08
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	61.03	4.43	5.28	10.42	16.30	0.00	0.00	0.00
HCO3	62.50	119.45	137.45	246.04	360.92	2.62	6.91	3.85
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	538.86	575.47	663.78	1196.89	1765.08	10.35	29.22	15.75
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	385.64	385.64	445.63	806.51	1194.50	3.29	9.17	4.98
SiO2	53.46	53.46	61.75	111.64	165.21	0.59	1.55	0.87
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	0.01	0.42	0.48	0.93	1.48	0.42	0.80	0.53
TDS	1671.99	1723.71	1989.29	3590.59	5302.02	25.83	72.06	39.07
pH	9.92	8.50	8.49	8.42	8.35	6.99	7.12	7.05

**Design Warnings**

-None-

### Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

### Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.09	0.78	16.44	9.00	1989.29	8.55
2	0.09	0.73	19.49	8.22	2175.56	8.27
3	0.09	0.69	23.19	7.49	2386.62	8.02
4	0.10	0.65	27.66	6.80	2627.06	7.80
5	0.10	0.61	33.12	6.15	2902.83	7.61
6	0.10	0.58	39.88	5.53	3221.12	7.45

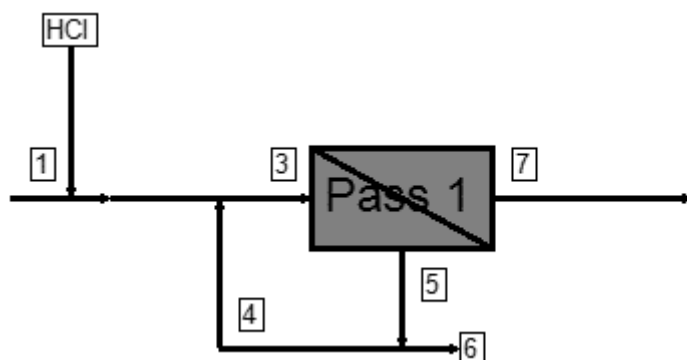
Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.07	0.51	48.49	7.43	3590.59	6.96
2	0.07	0.47	56.81	6.93	3850.53	6.75
3	0.07	0.42	66.70	6.46	4124.04	6.55
4	0.06	0.38	78.57	6.04	4409.28	6.37
5	0.06	0.34	92.89	5.65	4703.35	6.21
6	0.06	0.31	110.23	5.31	5002.47	6.06

### Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	9.92	8.50	8.35
Langelier Saturation Index	1.06	-0.08	0.72
Stiff & Davis Stability Index	1.26	0.13	0.50
Ionic Strength (Molal)	0.03	0.03	0.10
TDS (mg/l)	1671.99	1723.71	5302.02
HCO <sub>3</sub>	62.50	119.45	360.92
CO <sub>2</sub>	0.01	0.42	1.48
CO <sub>3</sub>	61.03	4.43	16.30
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.63	0.64	3.16
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	12.26	28.92	97.79
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	41.07	0.06	0.09

To balance: 0.09 mg/l Na added to feed.

### System Design Overview



Raw Water TDS	1671.99 mg/l	% System Recovery (7/1)	67.99 %
Water Classification	Wastewater with Conventional pretreatment, SDI < 5	Flow Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	25.0 C		

Pass #	Pass 1	
Stage #	1	2
Element Type	BW30-400	BW30-400
Pressure Vessels per Stage	3	2
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	18	12
Pass Average Flux	15.25 lmh	
Stage Average Flux	18.14 lmh	10.91 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	100% HCl 37.64 mg/l	
Energy Consumption	0.49 kWh/m <sup>3</sup>	

Pass 1			
Stream #	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	25.00	0.00	1671.99
3	27.00	8.89	1989.29
4	2.00	5.92	5302.02
5	10.00	5.92	5302.02
6	8.00	5.92	5302.02
7	17.00	-	39.07
7/1	% Recovery	67.99	

#### Project Information:

**Design Warnings:** -None-

#### Solubility Warnings:

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.