

7

Resultados e discussão

7.1

Coagulação química

7.1.1

Resultados preliminares

Como mencionado na metodologia experimental, foram feitos testes para determinar o pH ótimo de coagulação e a dosagem ótima de coagulante. O coagulante utilizado nos dois casos foi o sulfato de alumínio, com concentração estoque de 100 g/L. Os dados podem ser encontrados no Apêndice E.

7.1.1.1

Determinação do pH ótimo

Na determinação do pH ótimo foi utilizada uma dosagem fixa de coagulante, com concentração de 0,121 g Al/L em cada bécher (ou 1,5 g $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$, conforme Tabela E.1 do Apêndice E). Essa dosagem foi a mínima encontrada para que se fosse observado as primeiras evidências de formação de floco. A **Figura 7.1** apresenta os resultados preliminares dos ensaios de coagulação química para a determinação do pH ótimo.

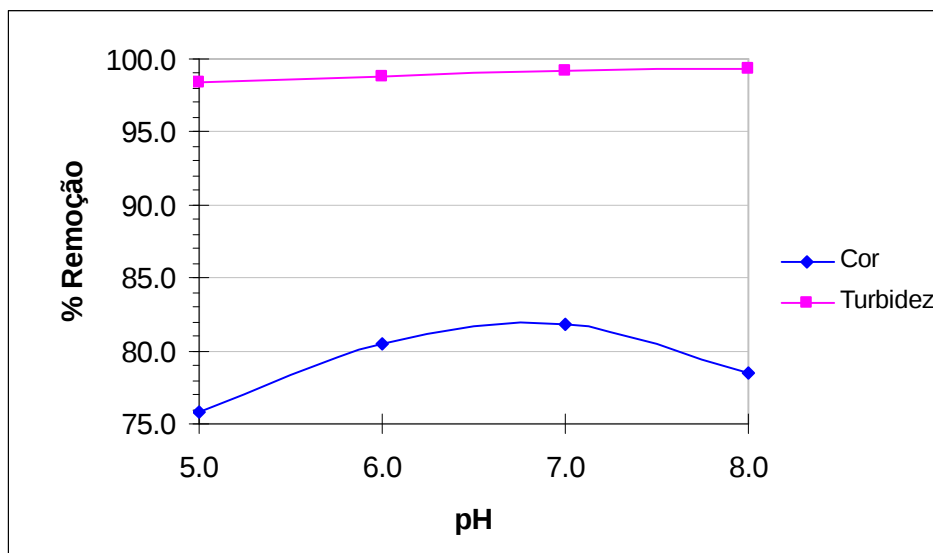


Figura 7.1 – Determinação do pH ótimo de coagulação (Condições iniciais: Turbidez = 429,2 UNT; Cor = 149 uC; Concentração de alumínio = 0,121 g/L). Dados: Tabela E.1 e E.2, Apêndice E. Amostra de 23.08.2006.

Pode ser observado na **Figura 7.1** que as remoções de turbidez foram praticamente as mesmas, entre o pH 7,0 (99,2%) e 8,0 (99,3%). Além disso, observando-se a curva de remoção de cor, pode-se notar que a maior remoção de cor encontrada foi no pH = 7,0 (81,9%). Assim, foi escolhido como pH ótimo de coagulação o pH = 7,0. Este pH será utilizado para a determinação da dosagem ótima de coagulante.

A turbidez se deve à presença de partículas suspensas na água, com tamanho variando desde suspensões grosseiras (material sedimentável se a água é mantida em repouso) até partículas coloidais (não sedimentáveis). Efluentes industriais podem conter uma ampla variedade de materiais causadores de turbidez, inorgânicos e orgânicos. Sabões, detergentes e agentes emulsificantes produzem colóides estáveis que resultam em turbidez.

A remoção de DQO também foi estudada na mesma faixa de pH, como pode ser observado na **Figura 7.2**.

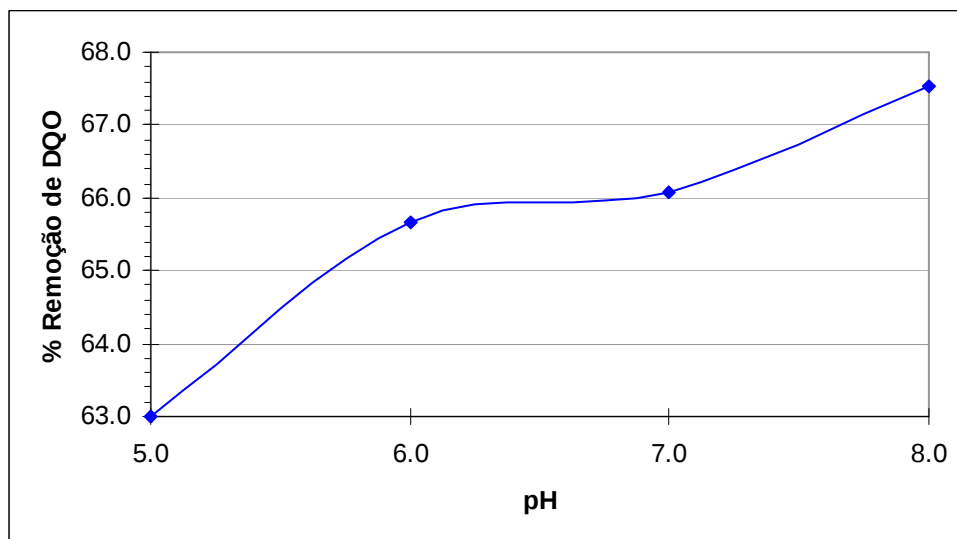


Figura 7.2 – Remoção de DQO em função do pH (Condições iniciais: Turbidez = 429,2 UNT; Cor = 149 uC; Concentração de alumínio = 0,121 g/L). Dados: Tabela E.1 e E.2, Apêndice E. Amostra de 23.08.2006.

A remoção de DQO foi de 66,1% no pH 7,0 e de 67,5% no pH 8,0.

7.1.1.2

Determinação da dosagem ótima de coagulante

A **Figura 7.3** mostra a variação de cor e turbidez com diferentes valores de dosagem do coagulante no pH ótimo (7,0) encontrado no item anterior. Os dados podem ser encontrados nas Tabelas E.1 e E.4 do Apêndice E, onde também são encontrados os respectivos valores de concentração em termos de sulfato de alumínio.

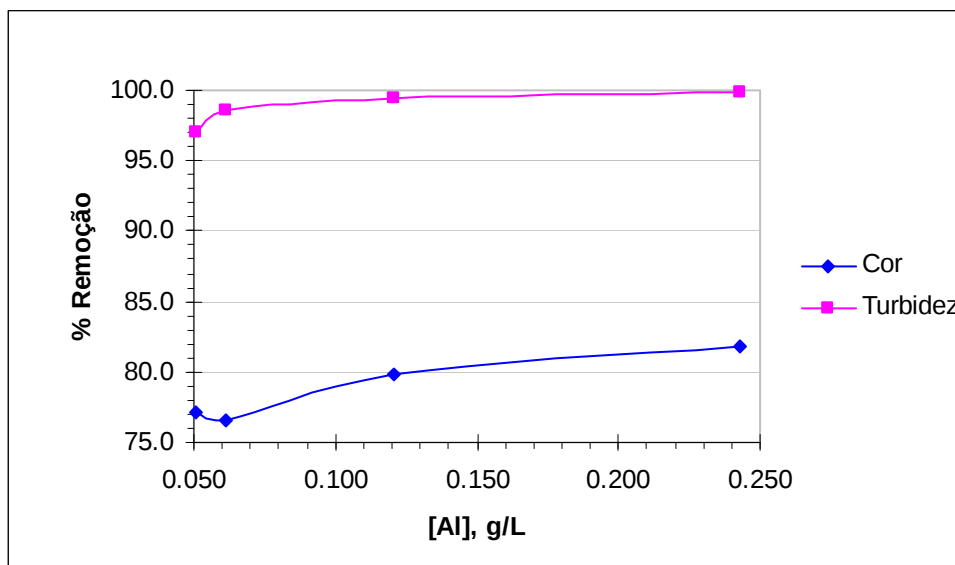


Figura 7.3 – Determinação da dosagem ótima de coagulante no pH ótimo de coagulação (Condições iniciais: pH = 7,0; Turbidez = 429,2 UNT; Cor = 149 uC; Concentração de alumínio = 0,121 g/L). Dados: Tabela E.1 e E.4, Apêndice E. Amostra de 23.08.2006.

É observado na **Figura 7.3** que os valores máximos de remoção de turbidez e cor acontecem com a maior dosagem de coagulante utilizada, ou seja, 0,243 g Al/L (ou 3,000 g $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$), o que poderia indicar maiores eficiências de remoção de DQO. Porém, ao analisar a remoção de DQO (**Figura 7.4**) para diferentes dosagens de alumínio, observa-se que a maior remoção se obtém nas dosagens de 0,061 g Al/L e 0,243 g Al/L.

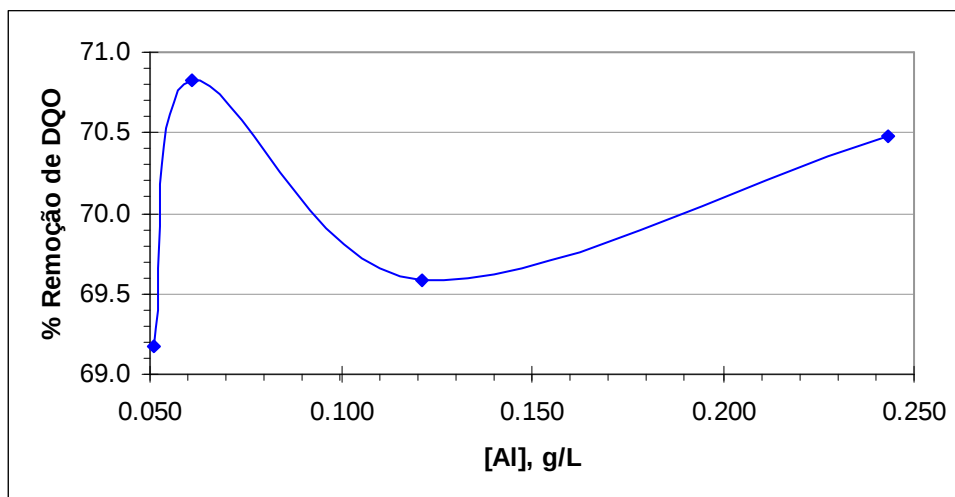


Figura 7.4 – Remoção de DQO em função da dosagem de coagulante no pH ótimo de coagulação (Condições iniciais: pH = 7,0; Turbidez = 429,2 UNT; Cor = 149 uC; Concentração de alumínio = 0,121 g/L). Dados: Tabela E.1 e E.4, Apêndice E. Amostra de 23.08.2006.

Como a remoção de turbidez é quase constante para valores acima de 0,061 g Al/L (ou 0,750 g $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$), essa é a dosagem ótima de coagulante considerada para essa amostra, o que quer dizer que uma menor quantidade de produto químico é utilizada para uma maior remoção de DQO, conseqüentemente causando um menor custo operacional.

7.1.2 Resultados finais

Como mencionado na metodologia experimental, foram feitos testes para determinar o pH ótimo de coagulação e a dosagem ótima de coagulante. O coagulante utilizado nos dois casos foi o sulfato de alumínio, com concentração estoque de 100 g/L. Os dados podem ser encontrados no Apêndice F.

7.1.2.1 Determinação do pH ótimo

Na determinação do pH ótimo foi utilizada uma dosagem fixa de coagulante, com concentração de 0,081 g Al/L (ou 1,0 g $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$) em cada bécher. Essa dosagem foi a mínima encontrada para que se fosse observado as primeiras evidências de formação de floco dessa amostra, que foi diferente da utilizada nos ensaios preliminares. Os dados podem ser encontrados nas Tabelas F.1 e F.2 do Apêndice F. A **Figura 7.5** apresenta os resultados finais

dos ensaios de coagulação química para a determinação do pH ótimo na remoção de DQO. Pode-se observar que o pH ótimo de coagulação, onde se obteve uma maior remoção de DQO, nesta amostra foi de 7,1.

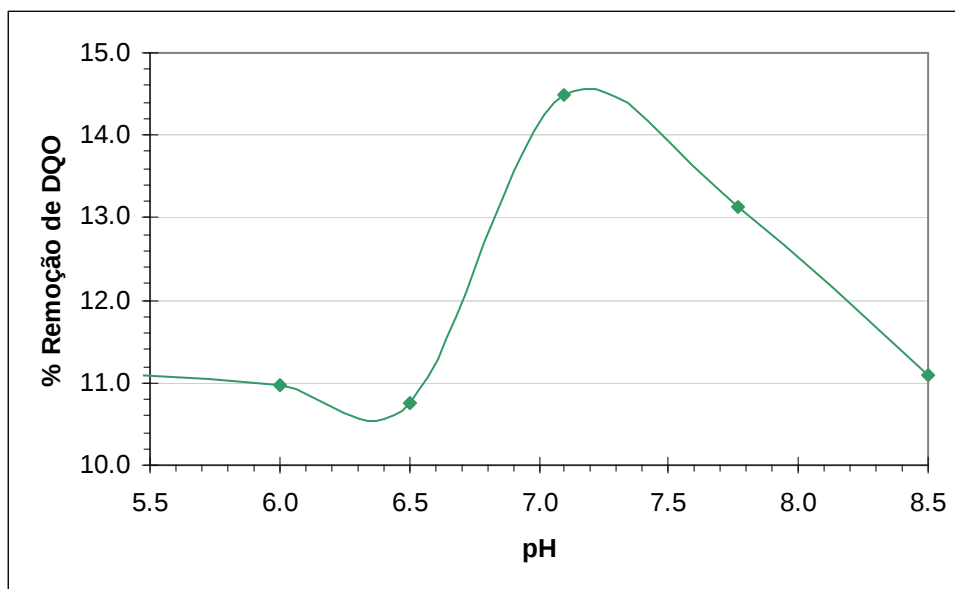


Figura 7.5 – Determinação do pH ótimo de coagulação (Condições iniciais: Turbidez = 168 UNT; Concentração de Al = 0,081 g/L). Dados: Tabela F.1 e F.2, Apêndice F. Amostra de 10.07.2007.

A **Figura 7.6** mostra a remoção de turbidez em função do pH. Pode ser observado que a maior remoção de turbidez ocorreu no pH 8,5.

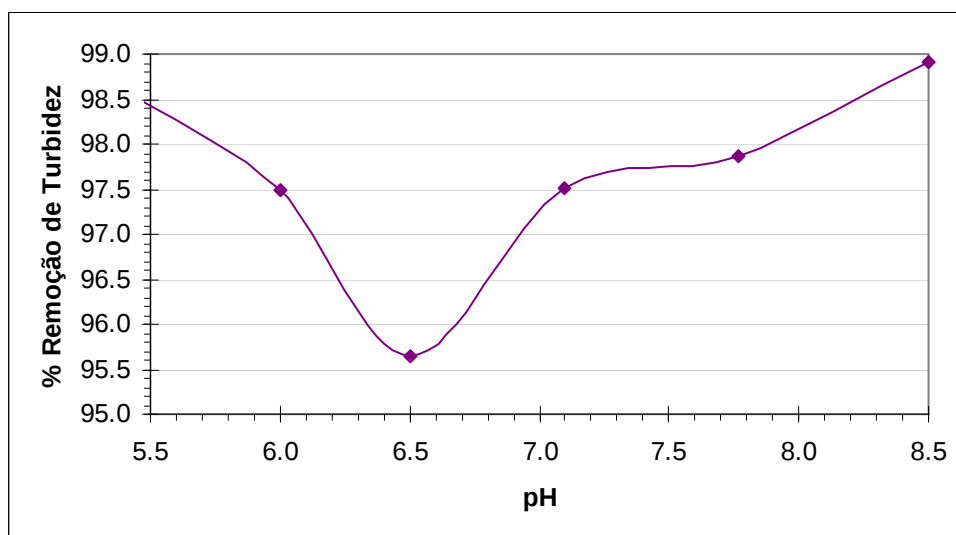


Figura 7.6 – Remoção de turbidez em função do pH (Condições iniciais: Turbidez = 168 UNT; Concentração de Al = 0,081 g/L). Dados: Tabela F.1 e F.2, Apêndice F. Amostra de 10.07.2007.

Como o objetivo principal era observar a remoção de matéria orgânica, expressa em termos de DQO, e, a remoção de turbidez para essa amostra foi muito irregular em relação ao pH, o pH utilizado na determinação da concentração ótima de coagulante foi o encontrado na maior remoção de DQO, ou seja, o pH ótimo foi de 7,1.

7.1.2.2 Determinação da dosagem ótima de coagulante

A **Figura 7.7** mostra a remoção de DQO com diferentes valores de dosagem do coagulante no pH ótimo (7,1) encontrado no item anterior. Os dados podem ser encontrados nas Tabelas F.3 e F.4 do Apêndice F.

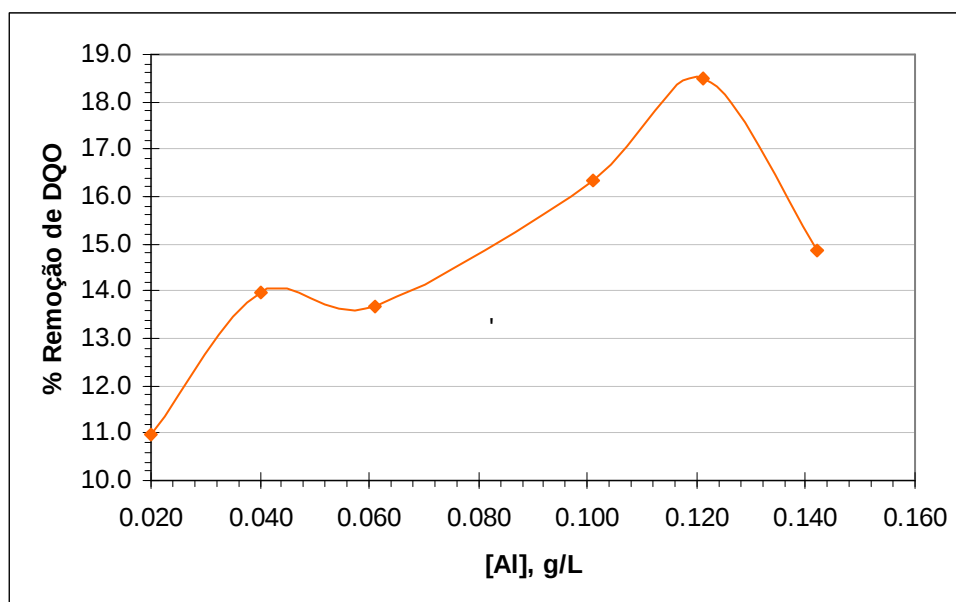


Figura 7.7 – Determinação da dosagem ótima de coagulante (Condições iniciais: pH = 7,1; Turbidez = 168 UNT). Dados: Tabela F.3 e F.4, Apêndice F. Amostra de 10.07.2007.

Ao analisar a remoção de DQO (**Figura 7.7**) para diferentes dosagens de alumínio, observa-se que a maior remoção se obtém com a dosagem de 0,121 g Al/L (ou 1,5 g $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$).

Pode ser observado na **Figura 7.8**, que a remoção de turbidez em função da dosagem de coagulante foi muito irregular, onde não se pode afirmar exatamente qual a dosagem ótima de coagulante. Como também o objetivo principal era observar a remoção de matéria orgânica, expressa em termos de DQO, então a dosagem ótima de coagulante foi de 0,121 g Al/L (ou 1,5 g $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$).

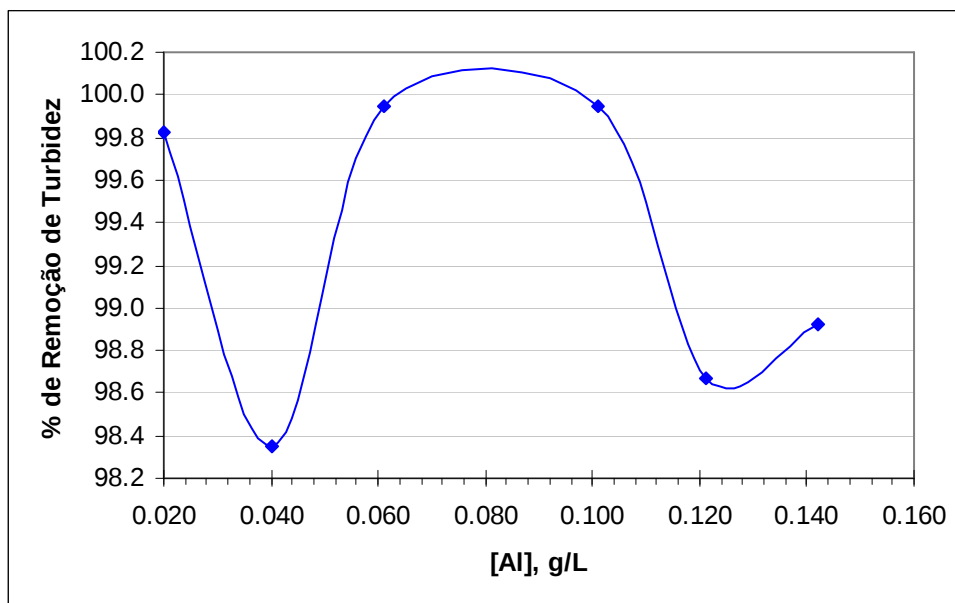


Figura 7.8 – Remoção de turbidez em função da concentração de alumínio no pH ótimo de coagulação (Condições iniciais: pH = 7,1; Turbidez = 168 UNT). Dados: Tabela F.3 e F.4, Apêndice F. Amostra de 10.07.2007.

7.2

Processo eletrolítico

7.2.1

Resultados preliminares

Estes testes, de caráter meramente exploratório, foram realizados com o objetivo de se conhecer um pouco o efluente de forma a dar início à investigação sistemática dos efeitos estudados. Os dados referentes a estes ensaios podem ser encontrados no Apêndice G.

Inicialmente, foram realizados experimentos com a finalidade de se verificar o efeito do potencial aplicado (E) na remoção de carga orgânica (através da DQO) do efluente em estudo. Foram estudadas quatro diferenças de potencial: 4,0; 5,0; 6,0 e 7,0 V. O pH inicial utilizado nos testes foi o pH original da amostra, com tempo de eletrólise de 15 minutos, distância entre eletrodos de 1,5 cm e utilizando um anodo e um catodo (novos). Os dados podem ser encontrados no item G.1 do Apêndice G. A **Figura 7.9** mostra o efeito do potencial aplicado na remoção de carga orgânica. Observa-se que no potencial aplicado de 5 V, obteve-se a melhor remoção, da ordem de 31%. Em consequência, este potencial foi utilizado nos experimentos subseqüentes.

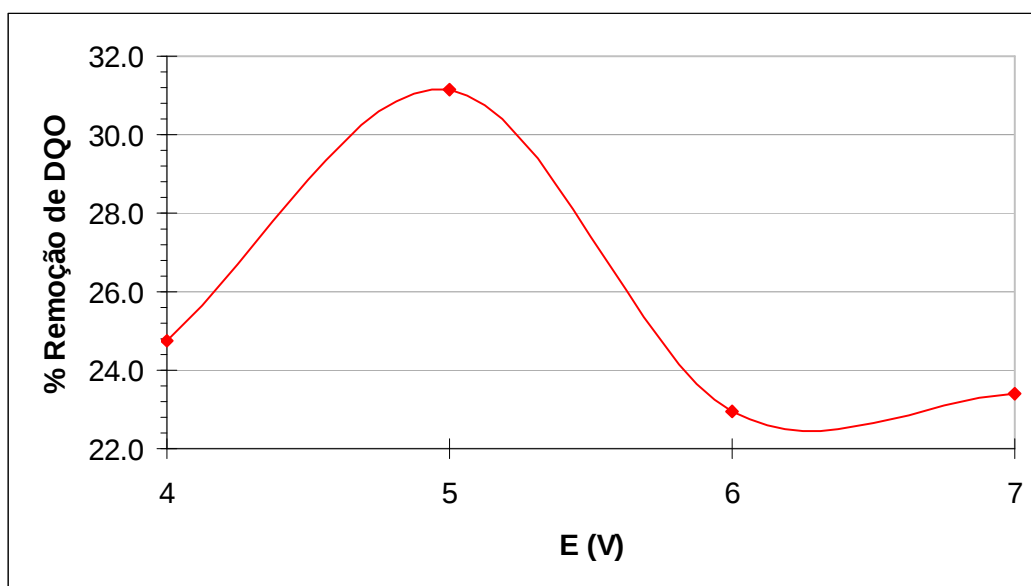


Figura 7.9 – Efeito da diferença de potencial aplicada na remoção de matéria orgânica (Condições experimentais: pH inicial = 3,9; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,5 cm; 2 eletrodos). Dados: Item G.1, Apêndice G. Amostra de 23.08.2007.

Foi verificado também nestes experimentos que o pH final da amostra tratada era mais elevado que o inicial, como pode ser verificado na **Figura 7.10**. O incremento do pH em condições ácidas é atribuído à evolução de hidrogênio no catodo.

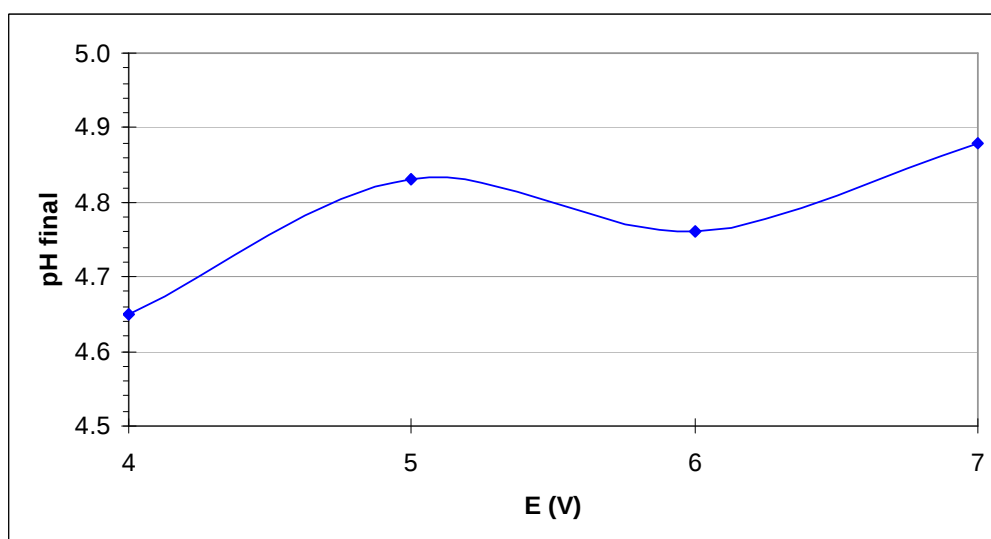


Figura 7.10 – Efeito da diferença de potencial aplicado no pH final (Condições experimentais: pH inicial = 3,9; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,5 cm; 2 eletrodos). Dados: Item G.1, Apêndice G. Amostra de 23.08.2007.

Nesses experimentos também foi acompanhada a densidade de corrente durante cada teste. A **Figura 7.11** mostra que a densidade de corrente aumenta com o aumento da diferença de potencial aplicada.

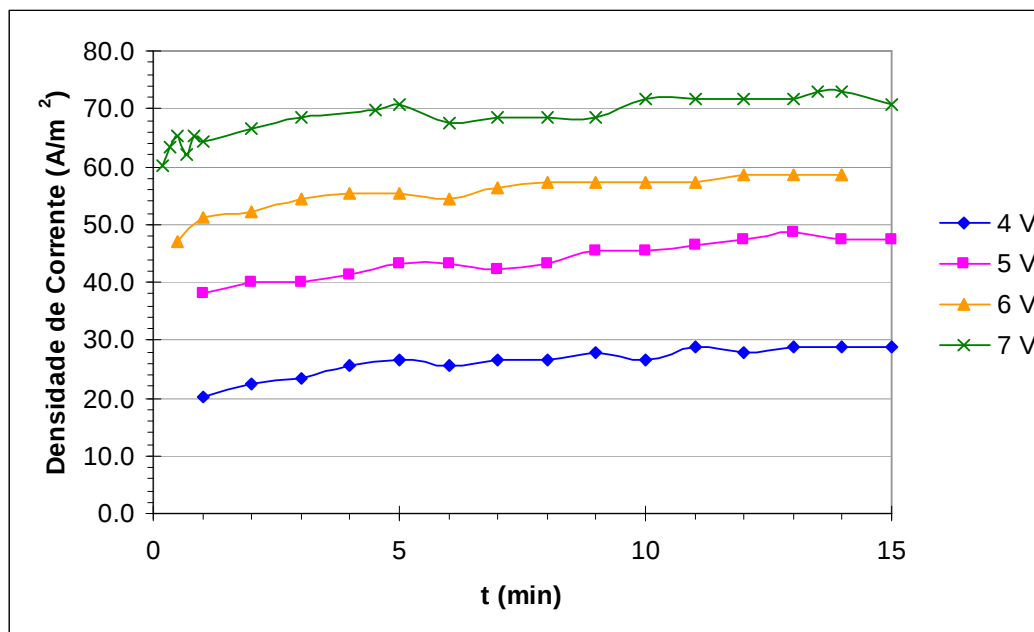


Figura 7.11 – Variação da densidade de corrente em relação ao tempo de eletrólise para diferentes valores de ddp (Condições experimentais: pH inicial = 3,9; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,5 cm; 2 eletrodos). Dados: Item G.1, Apêndice G. Amostra de 23.08.2007.

Também foram testados valores de pH inicial de 3,9, original da amostra, e 6,9, que foi ajustado com NaOH 2 mol/L. Nos dois casos foi verificado o aumento de pH após o processo eletrolítico (4,7 para o pH inicial de 3,9, e 7,5 para o pH inicial de 6,9).

A **Figura 7.16** mostra o gráfico do efeito do pH inicial na remoção de carga orgânica, na qual pode ser observado que no pH próximo ao neutro a remoção de carga orgânica é maior.

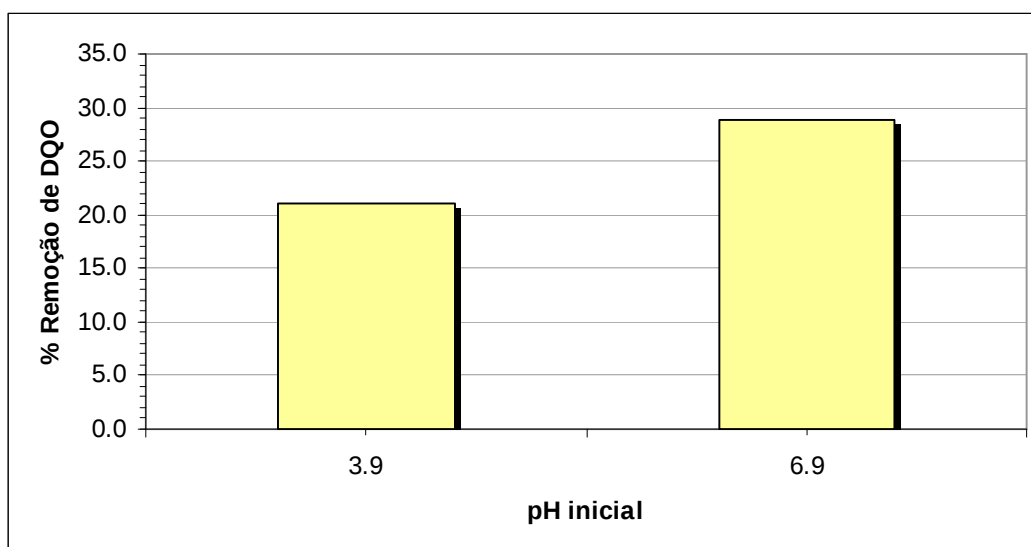


Figura 7.12– Efeito da variação do pH inicial na remoção de carga orgânica (Condições experimentais: E = 5V; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item G.2, Apêndice G. Amostra de 23.08.2007.

7.2.2

Resultados do programa experimental principal

Com base nos ensaios preliminares e na revisão bibliográfica, foram selecionados parâmetros a serem investigados no processo eletrolítico. Foram estudados temperatura, pH inicial, potencial aplicado (diferença de potencial), tempo de eletrólise e distância entre as mesmas. Foi estudado ainda o uso de eletrodos novos e usados.

A partir dos testes realizados foram verificados seus efeitos sobre os sólidos sedimentáveis e o consumo dos eletrodos. Os dados podem ser encontrados no Apêndice H.

7.2.2.1

Efeito da temperatura

Estes experimentos foram realizados visando avaliar o efeito da temperatura na remoção de matéria orgânica (através da DQO) do efluente em estudo. Foram estudadas quatro temperaturas: 41,7; 35,0; 30,0 e 23,9°C. O pH utilizado nos testes foi o pH ótimo de 7,1, encontrado nos ensaios de coagulação química, com tempo de eletrólise de 15 minutos, distância entre eletrodos de 1,0 cm, potencial aplicado de 5,0 V e 2 eletrodos (novos). Os dados podem ser obtidos no Apêndice H, item H.1. A **Figura 7.13** mostra o efeito da temperatura

na remoção de carga orgânica. Observa-se que na temperatura de 41,7°C obteve-se a melhor remoção, da ordem de 22%. Em consequência, esta temperatura foi utilizada nos experimentos subseqüentes. No caso de uma aplicação na indústria estudada, esse parâmetro seria de fácil aplicação já que a temperatura real do efluente varia entre 40 e 45°C, não havendo necessidade de aquecimento extra, o que evitaria gastos extras de energia e custo.

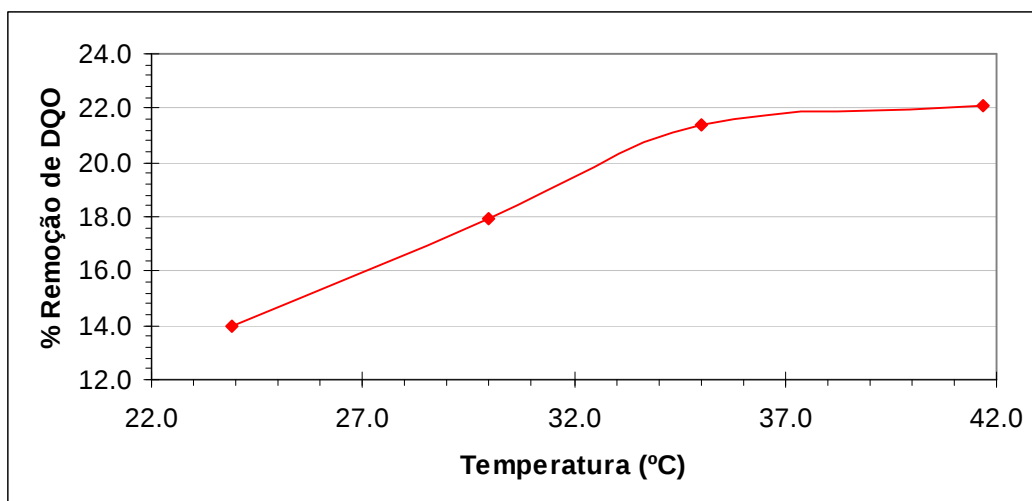


Figura 7.13 – Efeito da temperatura na remoção de carga orgânica (Condições experimentais: pH inicial = 7,1; E = 5V; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.1, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

O aumento da remoção da carga orgânica aumentou provavelmente devido ao aumento da taxa de reação, o que pode ser explicado pelo aumento da corrente, como pode ser notado na **Figura 7.14**, que por sua vez aumenta devido ao aumento da atividade das moléculas na solução com o aumento da temperatura.

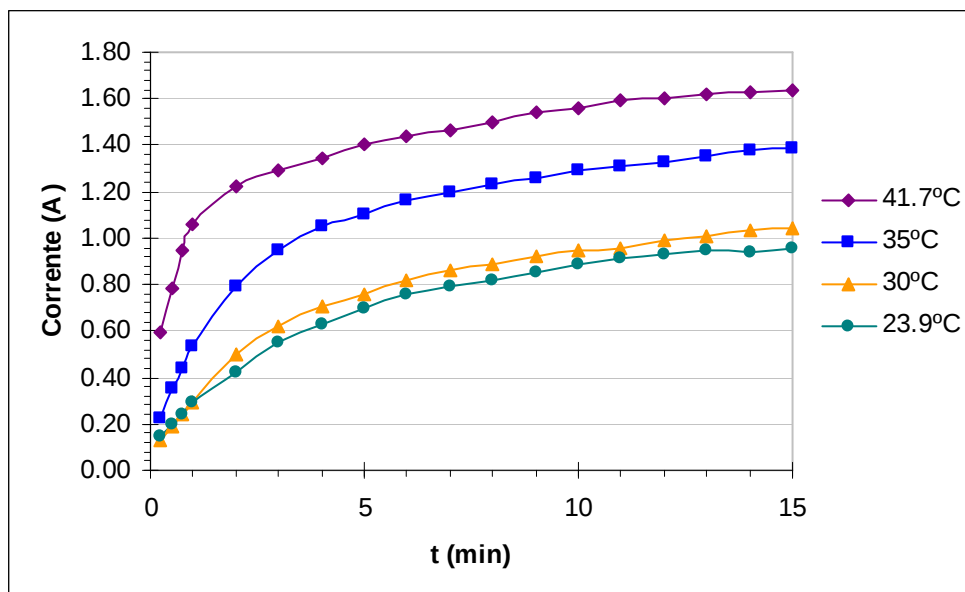


Figura 7.14 – Efeito da temperatura na corrente (Condições experimentais: pH inicial = 7,1; E = 5V; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.1, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

Conforme mencionado no Capítulo 5 (item 5.9.1), o que pouco se estuda é o aumento da temperatura da solução no período de aplicação da eletrocoagulação, que é ocasionado pelo efeito Joule. O que é comumente estudado é a influência da temperatura inicial do efluente na eficiência de remoção. A seguir (**Figura 7.15**) é mostrada a variação da temperatura em relação ao tempo de eletrocoagulação.

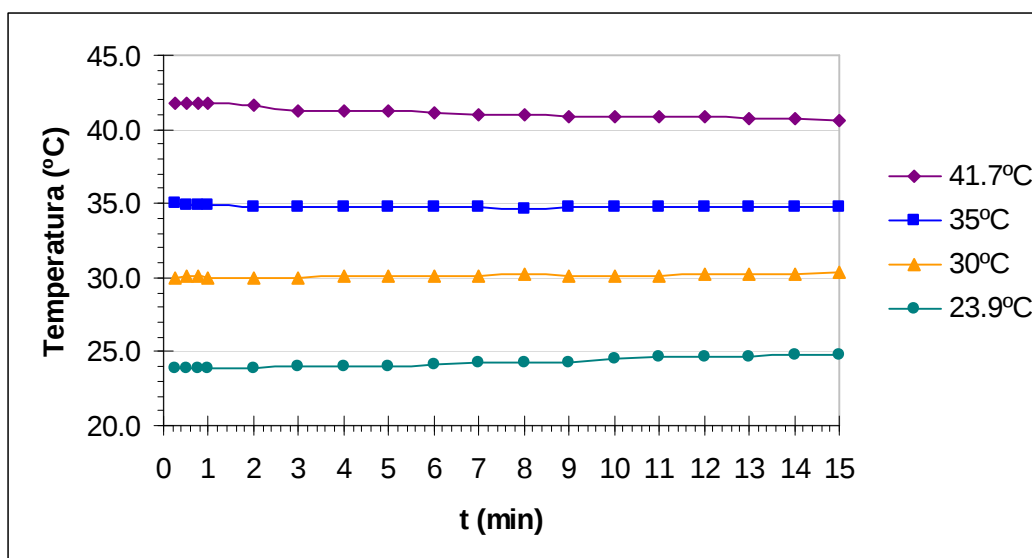


Figura 7.15 – Variação da temperatura ao longo do tempo (Condições experimentais: pH inicial = 7,1; E = 5V; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.1, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

A **Figura 7.15** mostra que a temperatura manteve-se quase constante durante a realização do experimento com o potencial aplicado de 5V. No item relacionado ao efeito do potencial aplicado (7.2.2.3) a variação de temperatura ao longo da eletrocoagulação é mais evidenciada.

7.2.2.2 Efeito do pH inicial

A variação do pH inicial da solução foi investigada para verificar se efeito na remoção de carga orgânica. Foram utilizados os mesmos pHs do ensaio de coagulação química. O efeito do pH inicial na remoção de carga orgânica e no pH final é apresentado na **Figura 7.16**.

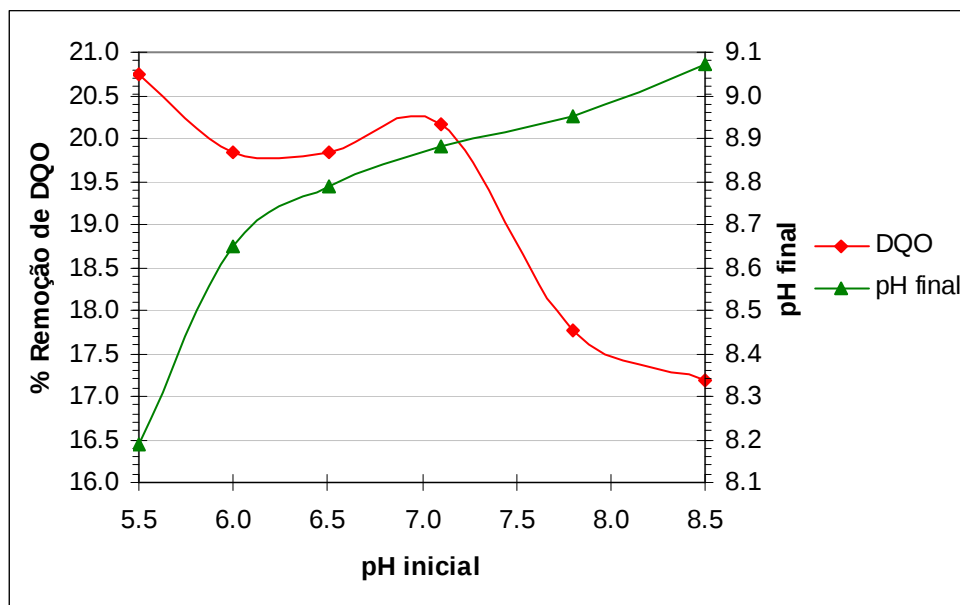


Figura 7.16 – Efeito do pH inicial na remoção de DQO e no pH final (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; E = 5V; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.2, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

Observa-se que a máxima remoção de carga orgânica foi obtida no pH inicial de 5,5, o que corresponde a um pH final de aproximadamente 8,2. À medida que o pH inicial se eleva, o pH final também se eleva. A partir do pH inicial neutro, remoção de matéria orgânica diminui mais intensamente, provavelmente devido ao pH final corresponder a aproximadamente 9, onde há uma diminuição da predominância do $\text{Al}(\text{OH})_3$ e o Al-coagulante pode se dissolver e restaurar uma parcela adsorvida na solução.

7.2.2.3 Efeito do potencial aplicado

O aumento da tensão pode aumentar o efeito de degradação. Nota-se na **Figura 7.17** que o aumento do potencial de 2 para 3 V realça o efeito de remoção de carga orgânica com o pH inicial de 5,5. Após esse valor, a remoção declina, enquanto sua corrente continua aumentando. Provavelmente, em potenciais mais elevados a maioria da corrente é consumida por reações laterais como a evolução de oxigênio e efeito Joule. Os dados podem ser encontrados no Apêndice H, item H.3.

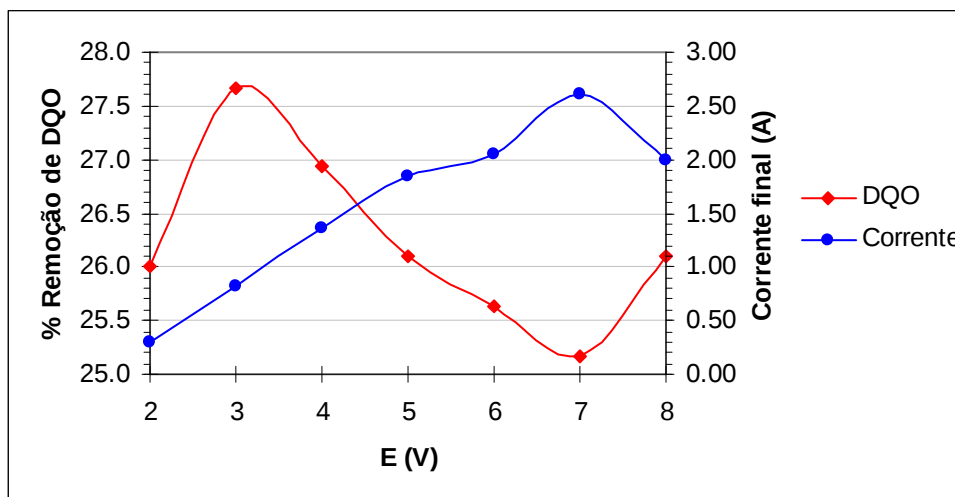


Figura 7.17 – Efeito do potencial aplicado na remoção de DQO (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; pH inicial = 5,5; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.3, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

O efeito Joule, conforme mencionado no item 7.2.2.1, é mais evidente na **Figura 7.18**, a qual mostra a variação da temperatura em relação ao tempo de eletrocoagulação. À medida que o potencial aumenta, a temperatura tende a permanecer mais constante até que começa a aumentar a partir do potencial de 7V. O fato da temperatura diminuir na maioria dos experimentos ao longo do tempo não prejudicou a remoção devido a mesma não chegar a atingir 35°C, pois entre as temperaturas de 35 e 41,7°C a remoção foi praticamente a mesma como pode ser visto na **Figura 7.13**.

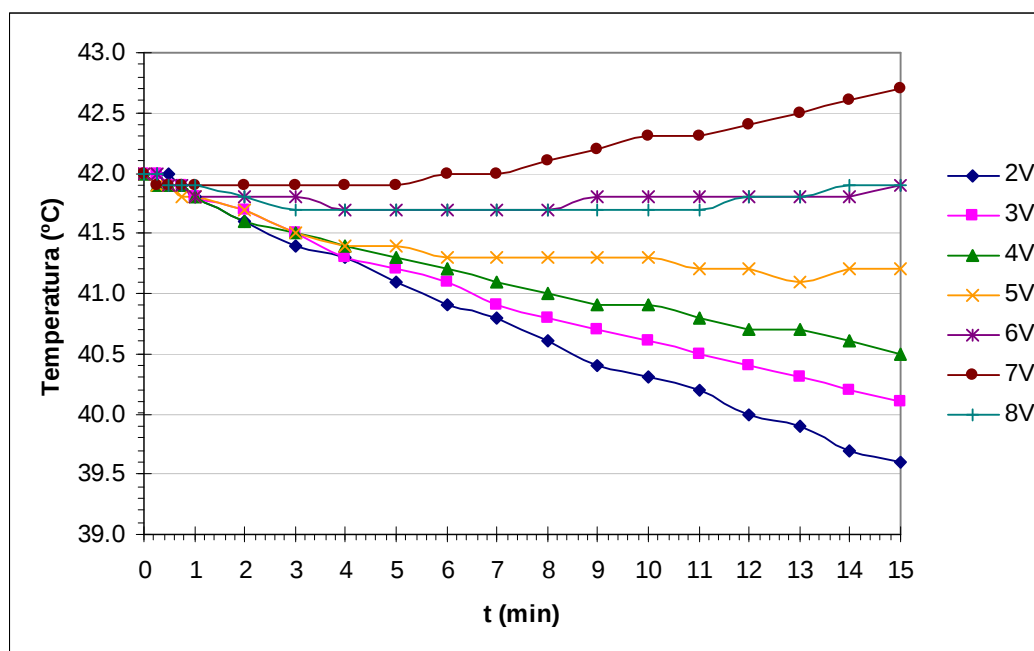


Figura 7.18 – Variação da temperatura ao longo do tempo para diferentes potenciais aplicados (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; , pH inicial = 5,5; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.3, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

7.2.2.4 Efeito do tempo de eletrocoagulação

O efeito do tempo de operação foi estudado como é mostrado na **Figura 7.19**. Os dados podem ser encontrados no Apêndice H, item H.4.

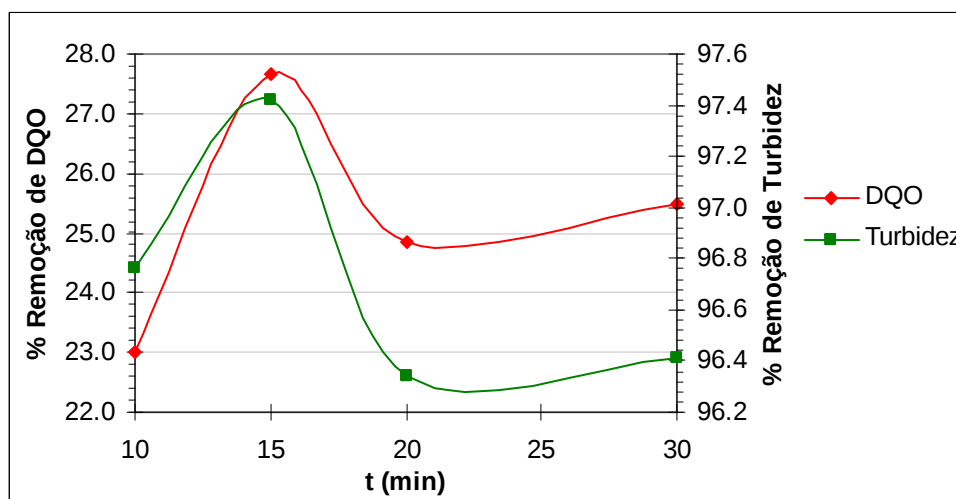


Figura 7.19 – Efeito do tempo de operação na remoção de matéria orgânica e turbidez (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; pH inicial = 5,5; E = 3V; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.4, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

Observa-se que o tempo de operação ótimo foi determinado como sendo de 15 minutos, tanto para a remoção de carga orgânica quanto para a remoção de turbidez. Tempos maiores que estes podem conduzir a uma possível camada de passivação, prejudicando maior remoção de carga orgânica.

7.2.2.5

Efeito da distância entre eletrodos

A distância entre o anodo e o catodo foi ajustada em 1, 1,5 e 2 cm. É mostrada na **Figura 7.20** a eficiência de remoção de DQO com o aumento na distância entre os eletrodos. Os dados podem ser obtidos no Apêndice H, item H.5.

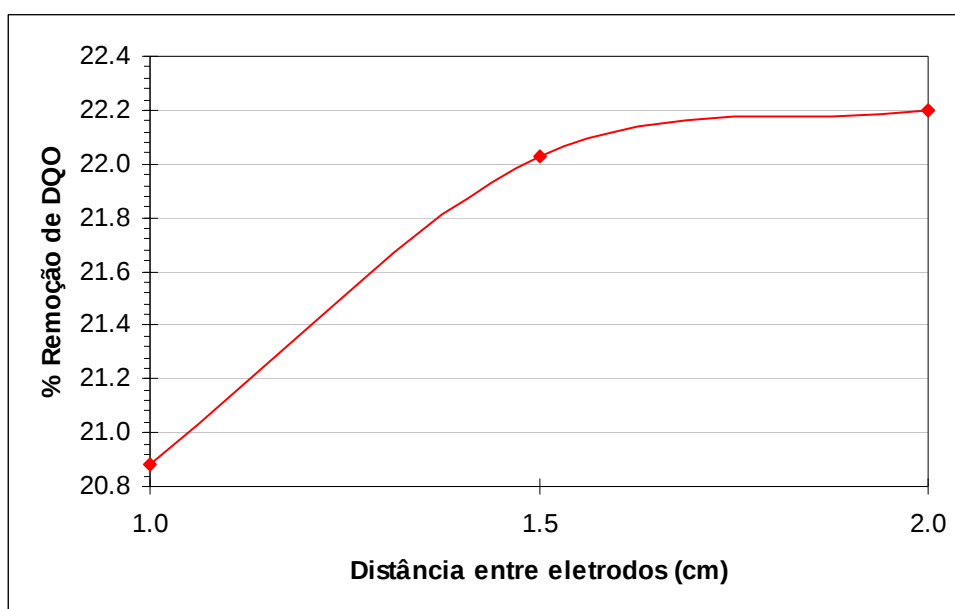


Figura 7.20 – Efeito da distância entre eletrodos na remoção de matéria orgânica (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; pH inicial = 5,5; E = 3V; Tempo de eletrólise = 15 min; 2 eletrodos). Dados: Item H.5, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

Observa-se que à medida que aumenta a distância entre os eletrodos de 1,0 para 1,5 cm ocorre um aumento na remoção de DQO, estabilizando em um patamar a partir de então.

Esse aumento da remoção provavelmente ocorre porque os efeitos eletrostáticos dependem da distância entre eletrodos. Então, quando a distância aumenta, o movimento dos íons produzidos seria mais lento e teriam maior

oportunidade de produzir e agregar flocos. Além disso, estes flocos poderiam ser capazes de adsorver mais moléculas. Então, uma distância ótima poderia ser de 2,0 cm.

7.2.2.6 Sólidos sedimentáveis

Pode-se observar na **Figura 7.21** que a formação do lodo aumentou do pH inicial 5,5 até o 6,5, o qual corresponde a um pH final de 8,8. Provavelmente, a partir deste pH o Al-coagulante se dissolve e restaura uma parcela adsorvida na solução, fazendo com que haja uma queda na formação de lodo.

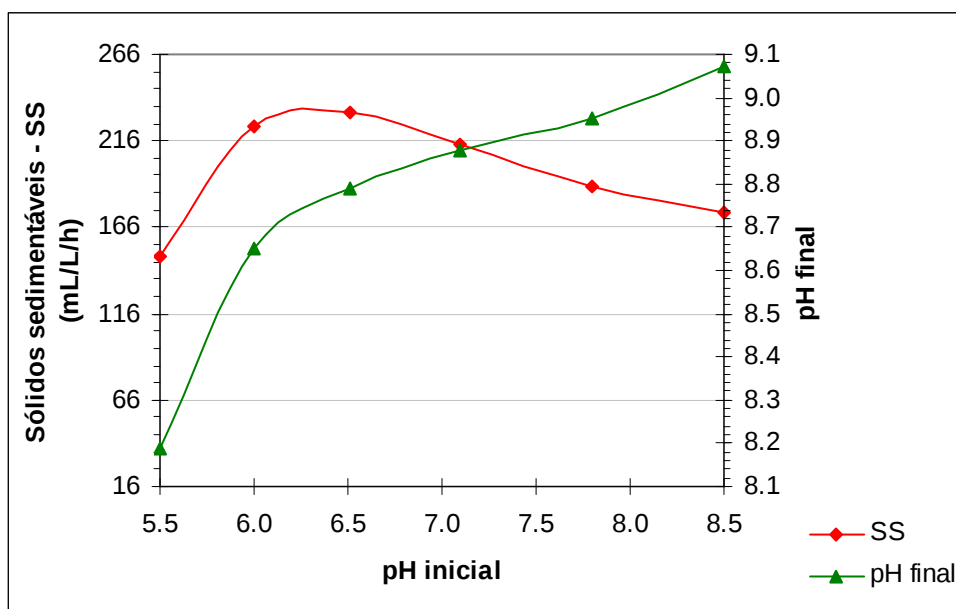


Figura 7.21 – Efeito do pH inicial na remoção nos sólidos sedimentáveis e no pH final (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; E = 5V; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.2, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

Na **Figura 7.22** é apresentada a quantidade de sólidos sedimentáveis em relação à variação do potencial aplicado. Pode-se observar que quanto maior a diferença de potencial aplicada, maiores foram os sólidos sedimentáveis. Como a corrente aumentou com o aumento do potencial aplicado, provavelmente a maioria da corrente é consumida por reações laterais como a evolução de oxigênio e efeito Joule, como explicado no item 7.3. A evolução de gás facilita a

remoção de sólidos sedimentáveis. Os dados podem ser encontrados no Apêndice H, item H.3.

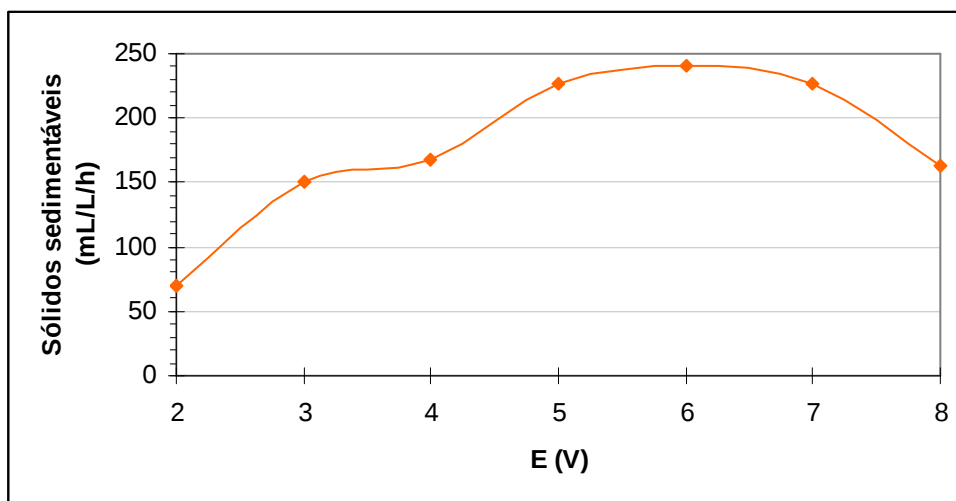


Figura 7.22 – Efeito do potencial aplicado nos sólidos sedimentáveis (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; pH inicial = 5,5; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.3, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

Na **Figuras 7.23** pode-se observar a análise de sólidos sedimentáveis em cone de Imhoff, após 1 hora de sedimentação. A partir da **Figura 7.23 (a)** é notada claramente a turbidez da amostra sem tratamento. Após o tratamento eletrolítico, a turbidez é diminuída devido à sedimentação de partículas coloidais que causam a turbidez, o que pode ser visto nas **Figuras 7.23 (b) a (g)**.

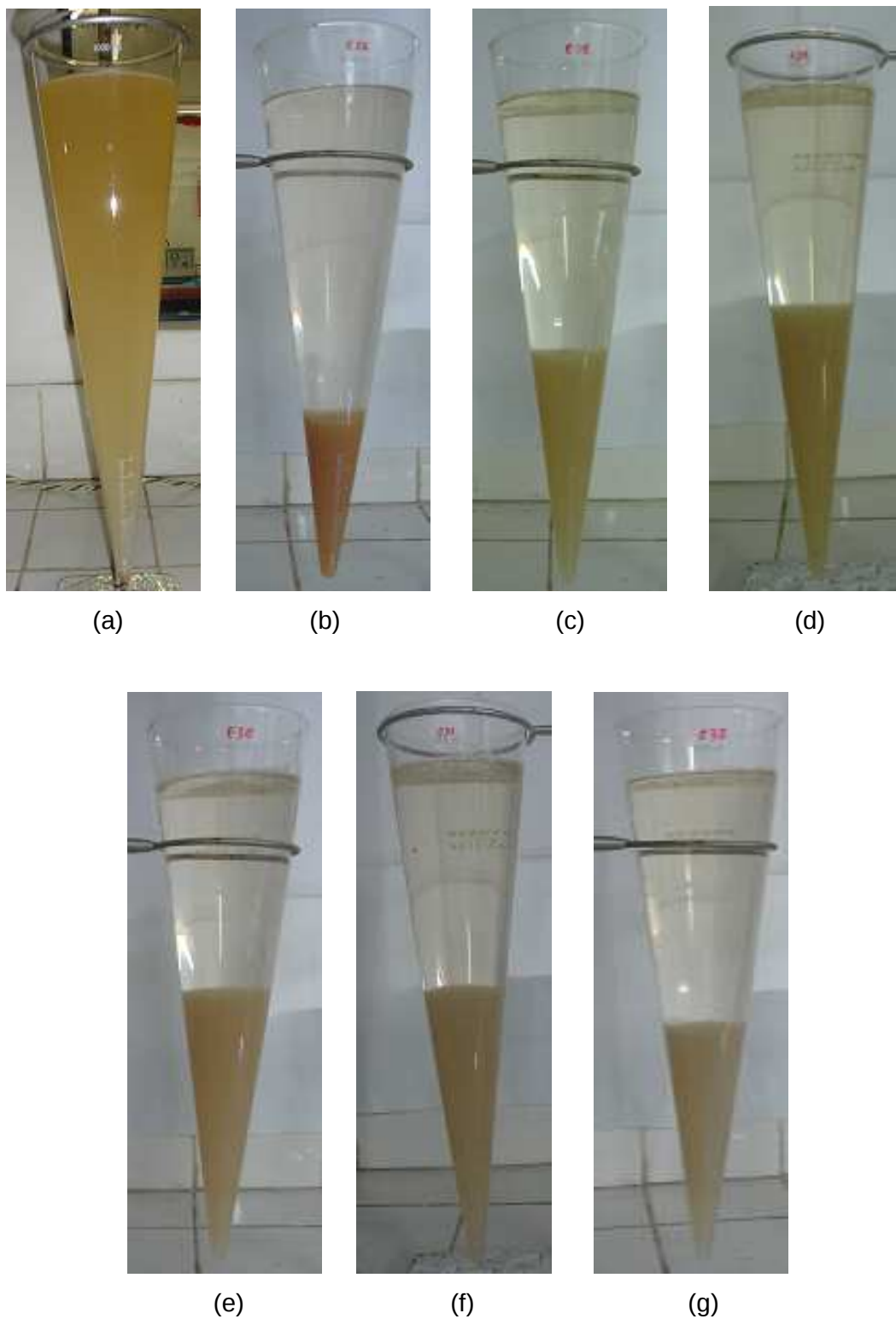


Figura 7.23 – Sólidos sedimentáveis vistos no Cone de Imhoff após tempo de sedimentação de 1h, com diferentes potenciais aplicados (Amostra de 10.07.2007): (a) Efluente a ser tratado; (b) $E = 2 \text{ V}$; (c) $E = 4 \text{ V}$; (d) $E = 5 \text{ V}$; (e) $E = 6 \text{ V}$; (f) $E = 7 \text{ V}$; (g) $E = 8 \text{ V}$.

7.2.2.7

Corrosão e perda de massa dos eletrodos

Como no processo eletrolítico envolve corrosão do eletrodo, de acordo com as leis de Faraday, há perda de massa dos eletrodos. Portanto, foi feito o cálculo matemático desta perda através da lei de Faraday de acordo com a **Equação 5.12** (Capítulo 5). Além disso, a verificação dessa perda foi feita por diferença de peso antes e após cada teste.

Pode ser observado na **Figura 7.24**, que o aumento da temperatura aumentou a corrosão dos eletrodos, o que poderia confirmar que o aumento da temperatura aumenta a taxa de reação, o que fez aumentar a remoção de carga orgânica (**Figura 7.13**). Os dados podem ser encontrados no Apêndice H, item H.1.

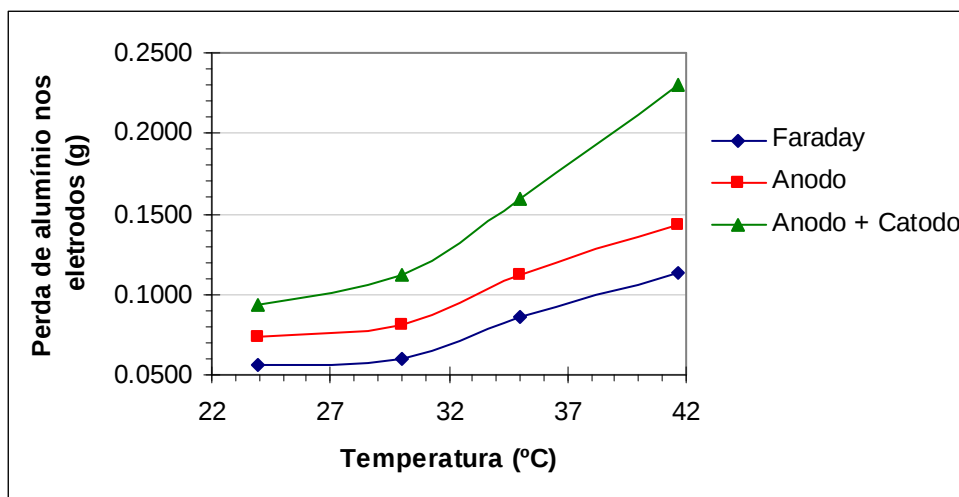


Figura 7.24 – Efeito da temperatura no consumo dos eletrodos (Condições experimentais: pH inicial = 7,1; E = 5V; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.1, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

Já a **Figura 7.25** representa a quantidade de alumínio adicionado ao efluente, em relação ao potencial aplicado, medida através da perda de peso dos eletrodos. A quantidade de alumínio referente à lei de Faraday foi menor do que a quantidade total referente ao anodo e ao catodo, e também em relação somente ao anodo. Isso pode ser atribuído ao fato do alumínio total ser a soma do alumínio dissolvido eletricamente (Faraday) e quimicamente, como citado por Donini *et al.* (1994), e pela dissolução do catodo, devido ao ataque químico pelos íons hidroxila gerados durante a redução da água, como provado por Picard *et*

al. (2000), o que pode ser observado pela perda de peso do catodo nos experimentos. Os dados podem ser encontrados no Apêndice H, item H.3.

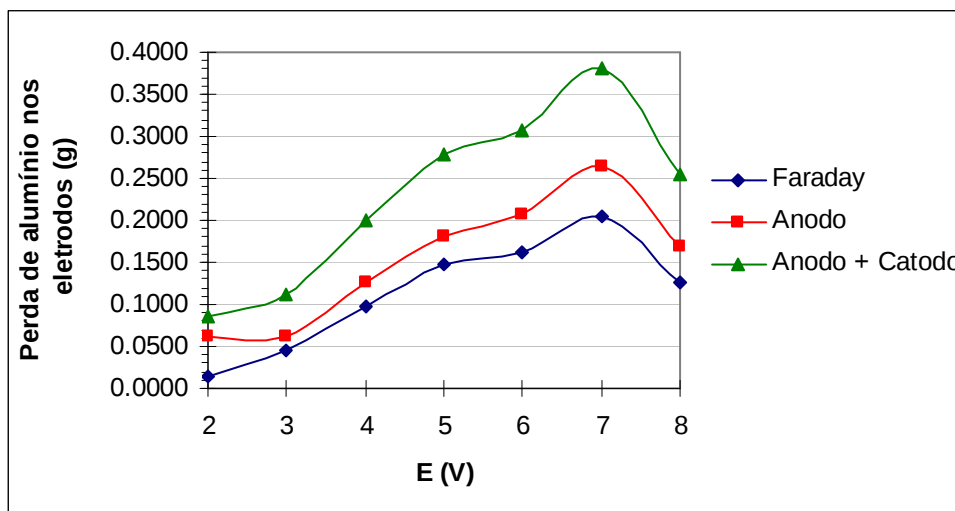


Figura 7.25 – Efeito do potencial aplicado no consumo dos eletrodos (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; pH inicial = 5,5; E = 3V; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.3, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

A **Figura 7.26** representa a quantidade de alumínio adicionado ao efluente em relação ao tempo através da perda de peso dos eletrodos. Nota-se que o consumo dos eletrodos foi maior com o aumento do tempo de operação. Os dados podem ser encontrados no Apêndice H, item H.4.

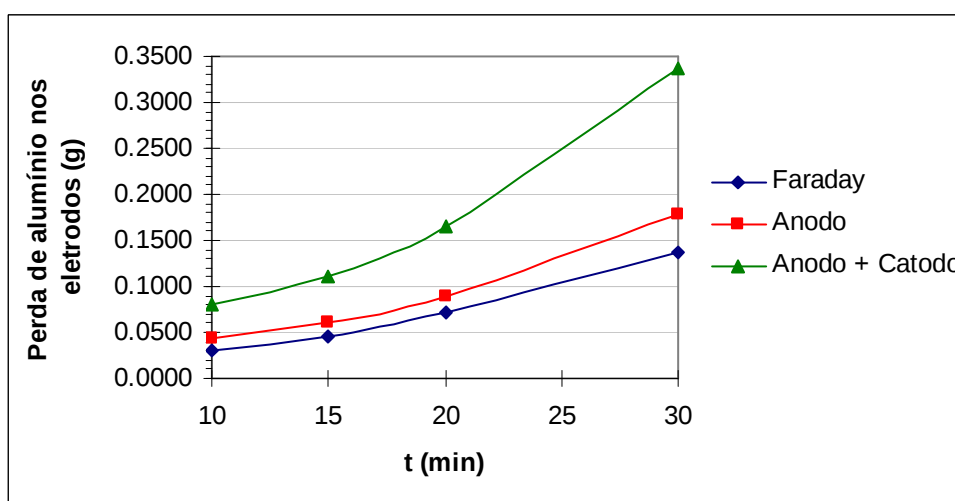


Figura 7.26 – Efeito do tempo de eletrólise no consumo dos eletrodos (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; pH inicial = 5,5; E = 3V; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.4, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

7.2.2.8

Consumo de energia e custo de operação

O custo de operação de um processo eletrolítico está diretamente relacionado ao consumo de energia e ao consumo do eletrodo. O consumo de energia, por sua vez, é dependente do potencial aplicado, da corrente que atravessa o sistema e do tempo de aplicação do potencial. Para fins de avaliação do custo operacional, neste trabalho somente foram levados em consideração, para efeito de cálculo, o efeito do potencial aplicado e o efeito do tempo de operação.

Assim, pode-se observar que quanto maior o potencial aplicado maior o consumo de energia, como pode ser visto na **Figura 7.27**. O consumo de energia foi calculado a partir da **Equação 5.9**. Portanto, o consumo de energia a partir do potencial de 3V, a partir de onde a remoção de DQO diminui, é gasto de outras maneiras senão pela remoção de DQO.

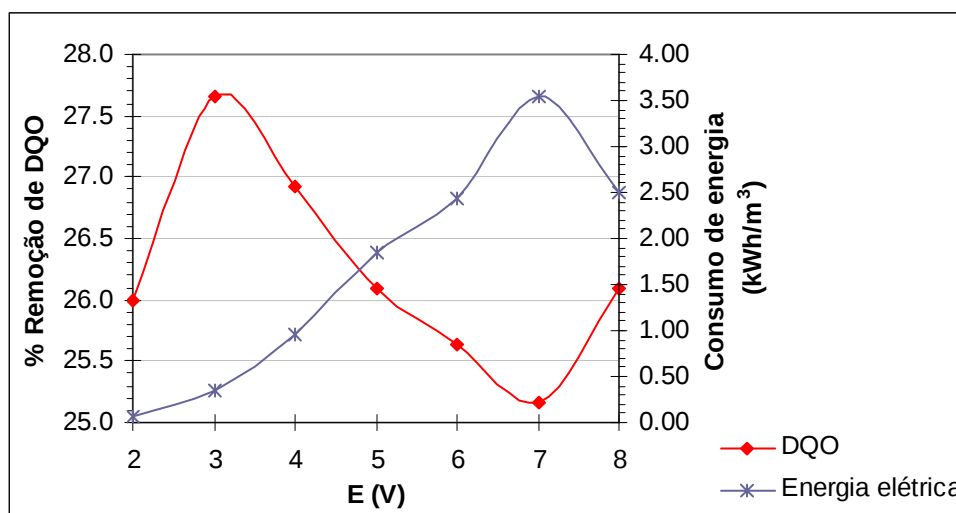


Figura 7.27 – Variação do consumo de energia em função do potencial aplicado e respectiva remoção de matéria orgânica (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; pH inicial = 5,5; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.3, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

O custo de operação para este processo, pode ser calculado pela **Equação 5.10** e a base de cálculo pode ser obtida no Apêndice I. Os dados podem ser encontrados no Apêndice H, item H.3. Assumindo o custo (tarifa) de energia fornecido pela ANEEL, para a região sudeste no mês de abril de 2007 para a classe de consumo industrial, de R\$215,20/MWh ou R\$0,2152/kWh, e o custo do eletrodo destes experimentos, de R\$ 111,00 para uma placa de

alumínio de 2×1 m de área e 1 mm de espessura, o custo de operação, considerando o consumo do eletrodo utilizando a lei de Faraday, pode ser observado na **Figura 7.28**.

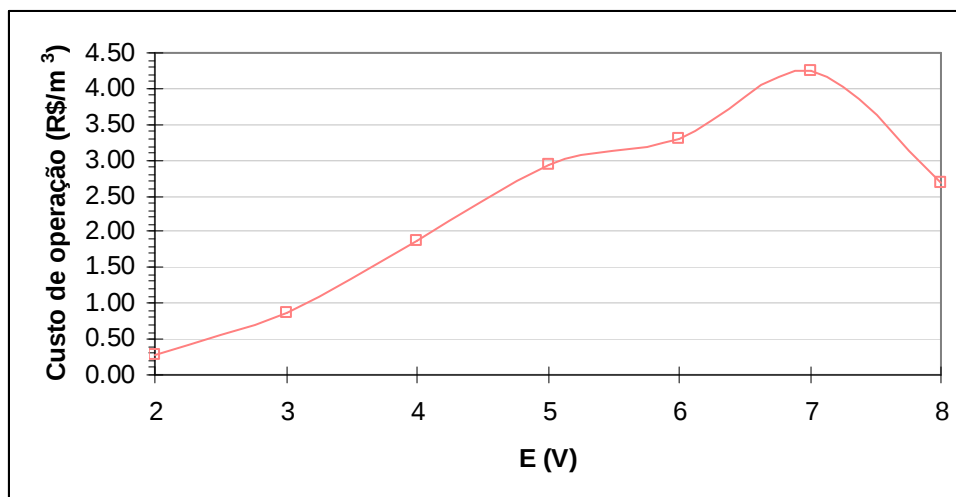


Figura 7.28 – Custo de operação em relação ao potencial aplicado (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; pH inicial = 5,5; tempo de eletrólise = 15 min; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.3, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

Portanto, quando aumenta-se o potencial, o custo de operação também aumenta, mesmo sem um aumento da eficiência de remoção de carga orgânica.

O consumo dos eletrodos e de energia elétrica aumentou com o aumento do tempo de eletrólise (**Figura 7.26 e 7.29**). Essa conclusão mostra que o tempo é um importante parâmetro devido à aplicabilidade econômica do processo eletrolítico, já que com um tempo maior que 15 minutos há um maior consumo desnecessário do eletrodo e de energia sem que haja uma maior remoção de carga orgânica e turbidez. Conseqüentemente, o custo de operação é maior, tanto para o consumo de eletrodo calculado pela lei de Faraday quanto para o desgaste real de anodo + catodo (**Figura 7.30**).

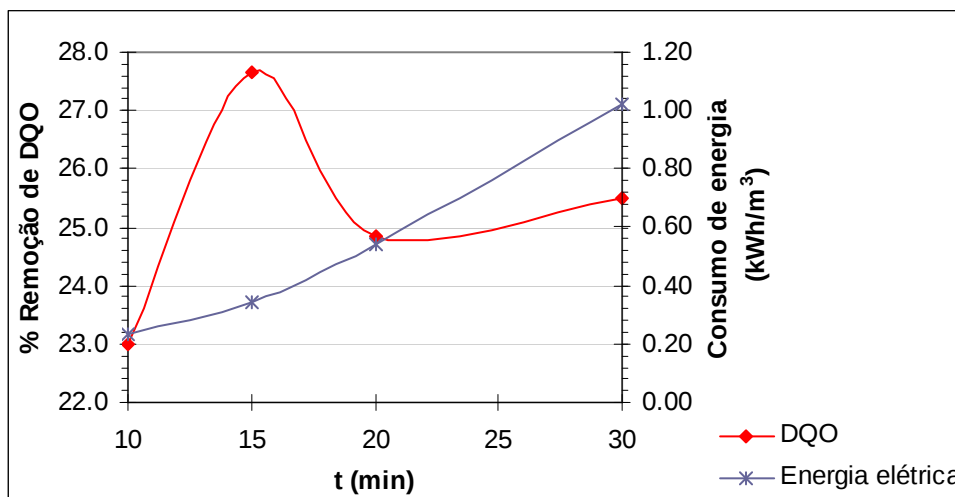


Figura 7.29 – Efeito do tempo de eletrólise no consumo de energia calculados pela lei de Faraday e respectiva remoção de carga orgânica (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; pH inicial = 5,5; E = 3V; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.4, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

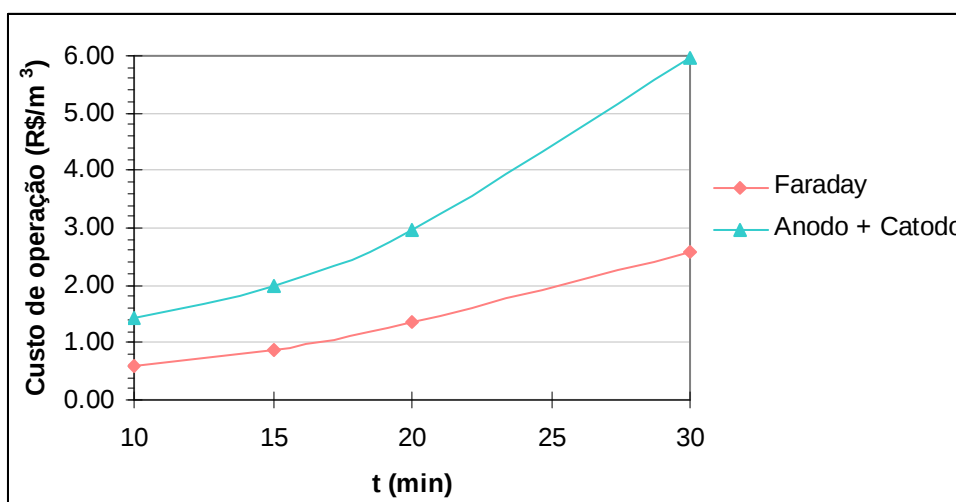


Figura 7.30 – Custo de operação em relação ao tempo (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; pH inicial = 5,5; E = 3V; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.4, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

7.2.2.9 Eletrodos novos e usados

O efeito do número de vezes que cada eletrodo é utilizado pode ser visto na **Figura 7.31**. Cada eletrodo foi avaliado separadamente, ou seja, o eletrodo usado pela segunda e terceira vez foi utilizado com seus respectivos pares

novos. Assim, o anodo utilizado pela segunda vez foi utilizado com um catodo novo, assim como o anodo usado pela terceira vez foi utilizado com outro catodo novo. O mesmo foi feito quando se avaliou o uso do catodo.

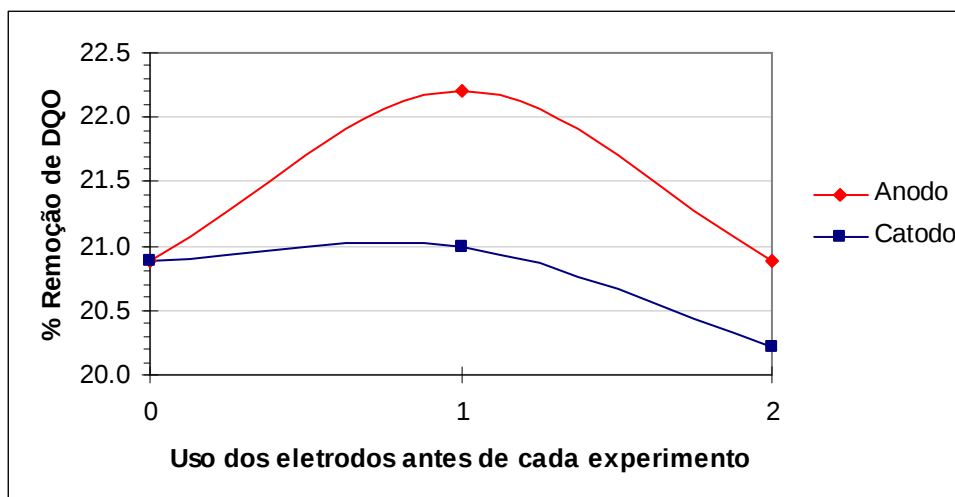


Figura 7.31 – Efeito do desgaste dos eletrodos (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; pH inicial = 5,5; E = 3V; Tempo de eletrólise = 15 min; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.7, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

Observa-se na **Figura 7.31** que o anodo utilizado pela segunda vez aumenta a remoção de DQO. O mesmo acontece com o catodo, porém em menor escala. Provavelmente isso se deve ao aumento da área superficial do eletrodo. Já quando os utiliza pela terceira vez a remoção decresce, provavelmente pela formação de uma camada de passivação. A passivação poderia ser prevenida fazendo-se a mudança da polaridade dos eletrodos ou limpando-se periodicamente os eletrodos por meios mecânicos, conforme citado no Capítulo 5.

Pela **Figura 7.32** nota-se que a utilização de anodos e catodos novos e usados leva a um aumento da corrente para as mesmas condições de operação. A resposta da corrente sugere que há um aumento da área superficial de cada eletrodo quando se aumenta o número de utilizações dos mesmos.

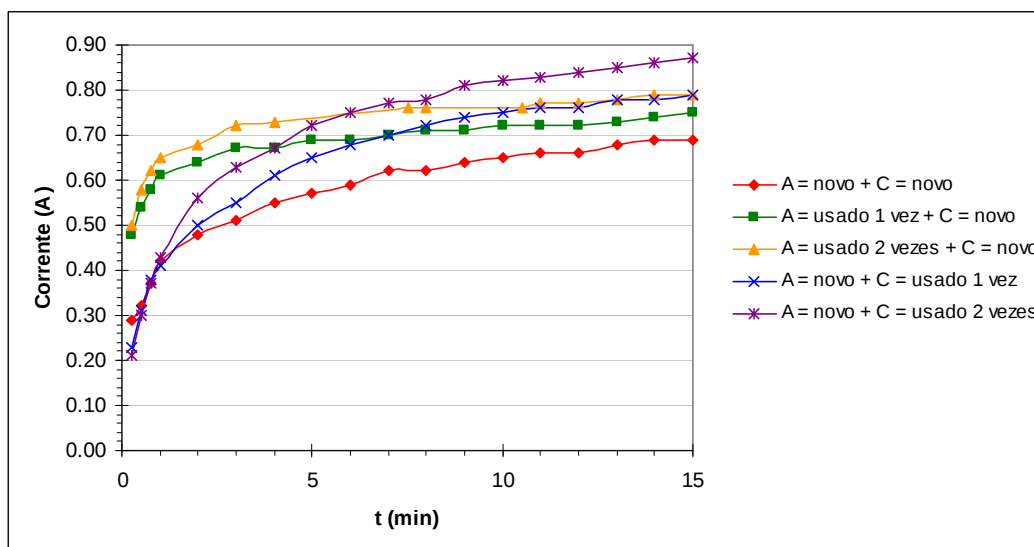


Figura 7.32 – Resposta da corrente para eletrodos novos e usados (Condições experimentais: Temperatura inicial = 42°C; pH inicial = 5,5; E = 3V; Tempo de eletrólise = 15 min; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos). Dados: Item H.7, Apêndice H. Amostra de 10.07.2007.

7.2.3

Comparação entre coagulação química e eletrocoagulação

Utilizando uma aproximação, comparou-se através do pH inicial o processo eletrolítico (EC) com a coagulação química (CQ), como é mostrado na **Figura 7.33**. Observa-se que a remoção de DQO pelo processo eletrolítico é muito diferente da remoção por coagulação química, sendo a remoção pelo processo eletrolítico muito maior.

Sugere-se que a eletrocoagulação não é apenas um processo de coagulação química secundário à dissolução do eletrodo por corrosão. Os resultados sugerem que a coagulação química é um dos mecanismos envolvidos, mas não o único. De fato os resultados sugerem uma interação eletroquímica (transferência de elétrons) entre as partículas em suspensão e os eletrodos, conforme item 5.4 do Capítulo 5.

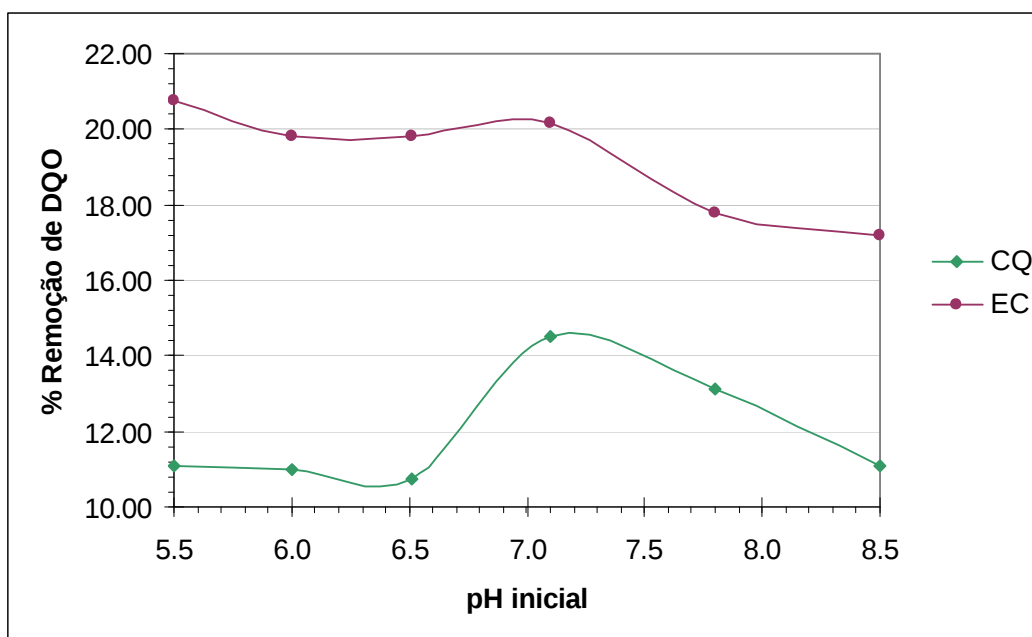


Figura 7.33 – Comparação entre os experimentos de *Jar Test* (Condições iniciais: Turbidez = 168 UNT; Concentração de Al = 0,081 g/L. Dados: Tabela F.1 e F.2, Apêndice F) e de eletrocoagulação (Condições experimentais: E = 5V; Tempo de eletrólise = 15 minutos; Distância entre eletrodos = 1,0 cm; 2 eletrodos. Dados: Item H.2, Apêndice H). Amostra de 10.07.2007.

Pode-se notar que a maior remoção de DQO foi no pH inicial de 5,5 na eletrocoagulação, enquanto que na coagulação química a maior remoção foi no pH 7,1. Essa diferença de resultados pode ser explicada pelo fato de que na coagulação química o pH ficar constante durante o processo, enquanto que na eletrocoagulação o pH varia de acordo com o tempo de eletrólise, como explicado no item 7.2.2.2. No pH ótimo da coagulação química, onde há uma melhor remoção de DQO, a espécie predominante é o $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$. Observa-se também na **Figura 7.33** que em ambos os processos a remoção de carga orgânica diminui a partir do pH inicial 7,1, devido às espécies predominantes a partir destes pHs.

Porém, uma comparação direta entre a coagulação química e eletrocoagulação não é praticável. Os sistemas não operam sobre uma base equivalente. Na coagulação química, a adição do coagulante é um evento discreto com o equilíbrio determinando a especiação do alumínio e o pH. Na eletrocoagulação, a adição do coagulante é uma função da corrente e do tempo. Os gradientes de concentração se deslocam continuamente enquanto o eletrodo de alumínio se corrói, com a adição de alumínio e hidroxila (com multi-etapas de

hidrólise do último), resultando em um estado de não-equilíbrio. Os processos de separação do poluente são também diferentes, com a sedimentação sendo o único trajeto de remoção para o coagulante químico enquanto uma combinação flotação/sedimentação pode ser empregada pela eletrocoagulação.