

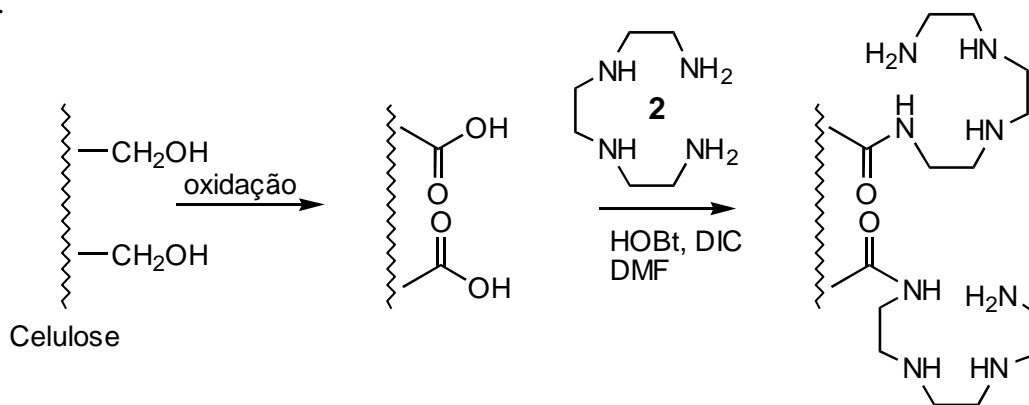
4- METODOLOGIA E RESULTADOS:

A primeira parte deste trabalho foi constituída da modificação inicial da celulose para obter funções ácido carboxílico e utilização dessas funções para ancorar aminas comerciais como a etilendiamina e a trietilenotetramina *via* formação de uma função amida. Em uma segunda parte do trabalho, foi realizado um estudo sobre a complexação dos íons Cu^{2+} em solução aquosa pelos novos materiais preparados.

4.1-Introdução de funções ácidos carboxílicos na celulose

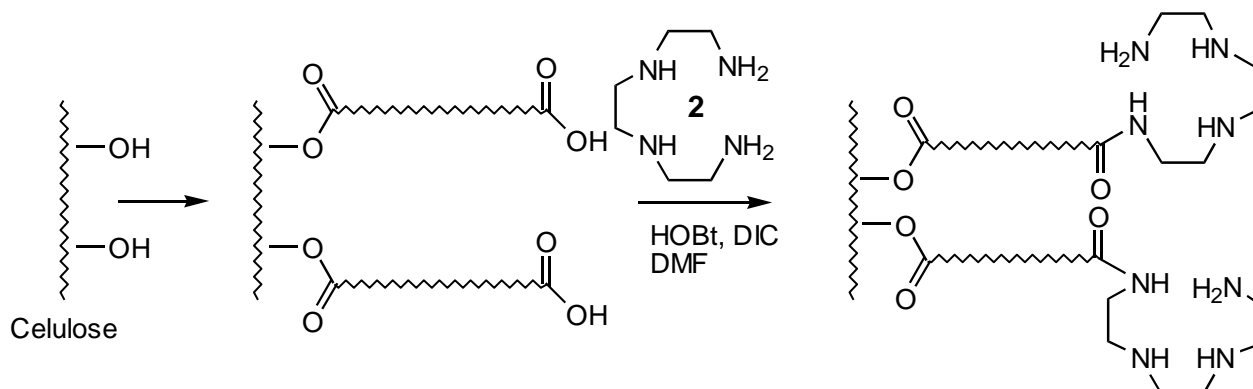
Segundo a literatura, dois tipos de modificação da celulose para introdução de funções ácidos carboxílicos (necessárias para a fixação posterior de aminas), podem ser propostas.

A primeira rota sintética (Esquema 5) seria a oxidação direta da celulose usando por exemplo, a metodologia descrita por PAGLIARO e colaboradores (1998), seguida da formação de uma função amida entre a poliamina **2** e as funções ácidos carboxílicos produzidas na celulose. Esta reação poderia ainda ser realizada de acordo com FRANK (1992), usando hidrato de 1-hidroxibenzotriazol (HOBt) e diisopropilcarbodiimida (DIC) em dimetilformamida (DMF).



Esquema 5: Primeira rota proposta para a modificação da celulose

A segunda rota sintética possível (Esquema 6) necessitaria da introdução de um "linker" (ligante) funcionalizado *via* formação de uma ligação éster com as hidroxilas primárias da celulose. Os ácidos carboxílicos do "linker" poderiam reagir como anteriormente com a amina de tipo **2** para produzir a celulose modificada contendo tais aminas.

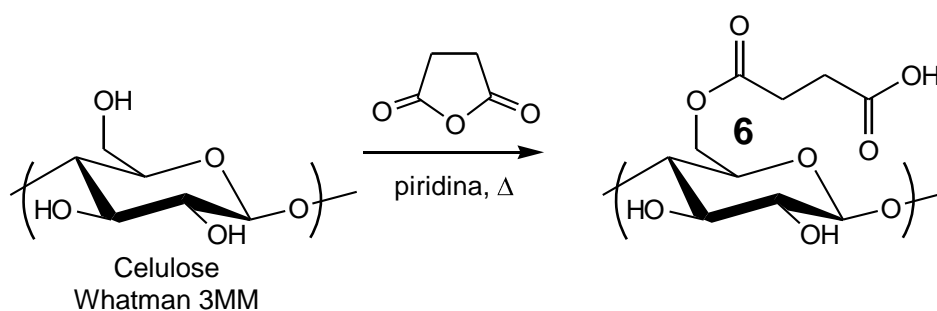


Esquema 6 : Segunda rota proposta para a modificação da celulose

Em nosso trabalho optamos pela segunda rota usando como reagente, para introduzir o linker funcionalizado, o anidrido succínico. Tal reagente já foi usado para modificar suportes sólidos como a resina de tipo Wang (STROCKER, 1996), lignina (SUN, 2001), celulose (GELLERSTEDT, 1999) e também a madeira (HILL, 2002).

4.1.1) Introdução do anidrido succínico na celulose 3 MM Whatman

Neste trabalho, a celulose comercialmente disponível (3MM Whatman) foi tratada com anidrido succínico sob refluxo de piridina para esterificação de suas hidroxilas primárias segundo mostrado no Esquema 7.



Esquema 7: Introdução de funções ácidos carboxílicos na celulose comercial

Inicialmente foram realizados vários experimentos com o intuito de se verificar quais as melhores condições de reação (temperatura, quantidade de anidrido succínico utilizada e tempo de reação). A tabela 7 abaixo mostra os resultados encontrados para cada experimento realizado.

Tabela 7 - Reações para introdução de grupos ácidos carboxílicos na celulose comercial

Experimento	Nº de equivalentes de anidrido succínico	Tempo de reação	Temperatura	Ganho de massa
1	3	5 dias	Refluxo da piridina	16,5 %
2	3	6 horas	Refluxo da piridina	39,6 %
3	6	4 horas	Refluxo da piridina	17,7 %
4	3	24 horas	Temp. ambiente	14,6 %
5	3	6 horas	Refluxo da piridina	39,9 %
6	3	24 horas	Refluxo da piridina	40,2 %
7	3	2 horas	Refluxo da piridina	28,7 %
8	3	4 horas	Refluxo da piridina	45,0 %
9	1,5	4 horas	Refluxo da piridina	16,1 %
10	2	4 horas	Refluxo da piridina	18,0 %
11	2	4 horas	Refluxo da piridina	33,0 %
12	4	2 horas	Refluxo da piridina	60,0 %

Pôde-se concluir que as melhores condições de reação foram as do experimento 12. Neste experimento, a celulose 3 MM Whatman (10,40g, 0,0642 mol) foi tratada com anidrido succínico (30,0 g, 0,3 mol, 4 eq.) em refluxo da piridina anidra (210 mL) durante 2 horas. Depois do resfriamento, o material foi filtrado, lavado com solução 1 mol/L de ácido acético em diclorometano, etanol 95%, água destilada e finalmente com etanol 95%. O material foi secado durante 30 minutos a 70 °C na estufa e deixado uma noite no dessecador. Após pesagem, a **celulose modificada 6** (16,67 g) foi obtida com um ganho de massa de 60%. O cálculo do ganho de massa é realizado com base na relação entre a massa final do produto e a massa inicial de celulose 3 MM Whatman conforme descrito abaixo:

$$\text{Ganho de massa} = (\text{massa final} - \text{massa inicial}) / \text{massa inicial} \times 100$$

$$\text{Ganho de massa} = (16,67\text{g} - 10,40\text{g}) / 10,40\text{g} \times 100 = 60 \%$$

4.1.2) Quantificação das funções ácido carboxílico

O procedimento utilizado para se verificar a quantidade de funções ácido carboxílico introduzida na celulose foi a retrotitulação de um excesso (50 mL) de NaOH padronizado (0,0385 mol/L) adicionado à celulose modificada **6**, com HCl padronizado (0,0375 mol/L). Este procedimento foi realizado em duplicata para duas diferentes massas de celulose modificada **6**. Assim, à duas amostras de celulose modificada **6** (252 mg e 352 mg), adicionaram-se 50 mL de solução de NaOH em excesso para neutralizar as funções ácido carboxílico do material. O material foi deixado sob agitação magnética durante 20 minutos. Após filtração e lavagem com água destilada, o excesso de NaOH foi titulado com HCl. Após a retrotitulação foram gastos os seguintes volumes de HCl:

Experimento 1 (252 mg de celulose modificada 6):

Volume de HCl (média) gasto na titulação = 27,8 mL

Cálculos:

Quantidade em matéria de NaOH = 0,0500 L x 0,0385 mol/L = 1,92x10⁻³ mol

Quantidade em matéria de HCl = 0,0290 L x 0,0375 mol/L = 1,04x10⁻³ mol

**Quantidade em matéria de COOH = Quantidade em matéria de NaOH –
Quantidade em matéria de HCl = 8,82x10⁻⁴ mol/ 252 mg
⇒ 3,50x10⁻⁶ mol/mg**

Experimento 2 (352 mg de celulose modificada 6):

Volume de HCl (média) = 20,4 mL

Cálculos:

Quantidade em matéria de NaOH = 0,05 L x 0,0385 mol/L = 1,925x10⁻³ mol

Quantidade em matéria de HCl = 0,0204 L x 0,0375 mol/L = 7,65x10⁻⁴ mol

**Quantidade em matéria de COOH = Quantidade em matéria de NaOH –
Quantidade em matéria de HCl = 1,16x10⁻³ mol/ 352 mg
⇒ 3,30x10⁻⁶ mol/mg**

Tabela

Quantidade de celulose modificada 6 (mg)	Volume de HCl (mL)	Quantidade em matéria de NaOH (mol)	Quantidade em matéria de HCl (mol)	Quantidade em matéria de COOH (mol)
252	27,8	$1,92 \times 10^{-3}$	$1,04 \times 10^{-3}$	$3,50 \times 10^{-6}$
352	20,4	$1,92 \times 10^{-3}$	$7,65 \times 10^{-4}$	$3,30 \times 10^{-6}$

Com base nos volumes de HCl gastos na titulação dos dois experimentos determinou-se quantitativamente o número de funções ácido carboxílico inseridas na celulose: **$3,40 \times 10^{-6}$ mol por mg de celulose modificada 6.**

Comparando esse resultado com os dados da literatura descritos na revisão bibliográfica deste manuscrito ($1,00 \times 10^{-6}$ mol/mg no trabalho de GELLERSTED e colaboradores (1999) para uma celulose modificada, página 13), podemos concluir que conseguiu-se neste trabalho o aumento do rendimento de introdução do número de funções ácido carboxílicos na celulose modificando as condições experimentais em relação àqueles autores.

4.1.3) Estudo da cinética da reação

Um estudo da cinética da reação para se observar qual a proporção de introdução das funções ácido carboxílico em função do tempo foi realizado. A celulose foi tratada com anidrido succínico (3 eq.) sob refluxo de piridina e alíquotas da mistura reagente foram recolhidas nos seguintes intervalos de tempo: 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 3 horas, 4 horas e 6 horas. Após filtração, lavagem e secagem das alíquotas recolhidas, foi realizada uma retrotitulação com NaOH 0,0145 mol/l em excesso e HCl 0,0132 mol/l para verificar a quantidade de funções ácido carboxílico que foram introduzidas na celulose modificada. Este procedimento foi realizado em duplicata para cada intervalo de tempo em que foram coletadas alíquotas da celulose modificada 2. O procedimento padrão foi: à celulose modificada 6 (30 mg), adicionou-se 20 mL NaOH em excesso para neutralizar as funções ácido carboxílico do material. O excesso de NaOH foi titulado com HCl padronizado. A tabela 8 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 8 - Resultados obtidos no estudo da cinética da reação de obtenção da celulose modificada 6.

Tempo (horas)	Quantidade em matéria de NaOH (mol)	Volume de HCl gasto (mL)	Quantidade em matéria de HCl (mol)	Quantidade em matéria de funções COOH (mol) por mg de celulose modificada 6
0,5	$2,90 \times 10^{-4}$	20,1	$2,65 \times 10^{-4}$	$8,22 \times 10^{-7}$
1	$2,90 \times 10^{-4}$	19,7	$2,60 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-6}$
2	$2,90 \times 10^{-4}$	19,2	$2,53 \times 10^{-4}$	$1,23 \times 10^{-6}$
3	$2,90 \times 10^{-4}$	17,2	$2,27 \times 10^{-4}$	$2,10 \times 10^{-6}$
4	$2,90 \times 10^{-4}$	15,0	$1,99 \times 10^{-4}$	$3,03 \times 10^{-6}$
6	$2,90 \times 10^{-4}$	14,7	$1,95 \times 10^{-4}$	$3,17 \times 10^{-6}$

A Figura 12 mostra a evolução na quantidade de funções ácido carboxílico introduzidas em função do tempo de reação.

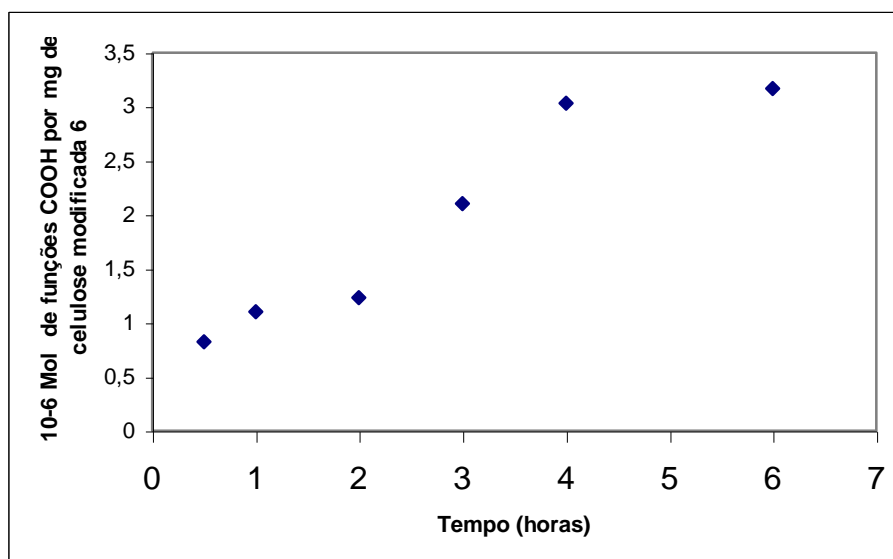


Figura 12 - Quantidade de funções ácido carboxílico introduzidas por mg de celulose modificada 6 em função do tempo de reação.

Verificou-se que, com o passar do tempo, ocorre um aumento na quantidade de funções ácido carboxílico introduzidas na celulose 3 MM Whatman. Os primeiros resultados indicam que depois de 4 horas um patamar é atingido. Entretanto, um estudo envolvendo tempos de reação superiores deveria ser efetuado para confirmar esse resultado. De qualquer maneira, um máximo de $3,0\text{-}3,5 \times 10^{-6}$ mol de funções ácido carboxílico introduzidas foi sempre obtido nos nossos estudos.

4.1.4) Análise por espectrometria na região do infravermelho (FTIR)

A caracterização da celulose modificada **6** com funções ácidos carboxílicos foi realizada usando-se a espectrometria no infravermelho. O espectro da celulose pura (Whatman 3MM) é apresentado na Figura 13. O espectro da celulose modificada **6** (Figura 14) mostrou o aparecimento de duas bandas fortes em 1738 e 1722 cm^{-1} (Figura 15), comprovando a presença de dois tipos de carbonilas, uma relativa à ácido carboxílico e uma relativa à éster. Assim, a análise do espectro de infravermelho da celulose modificada **6** comprovou a introdução na celulose do anidrido succínico e a liberação da função ácido carboxílico.

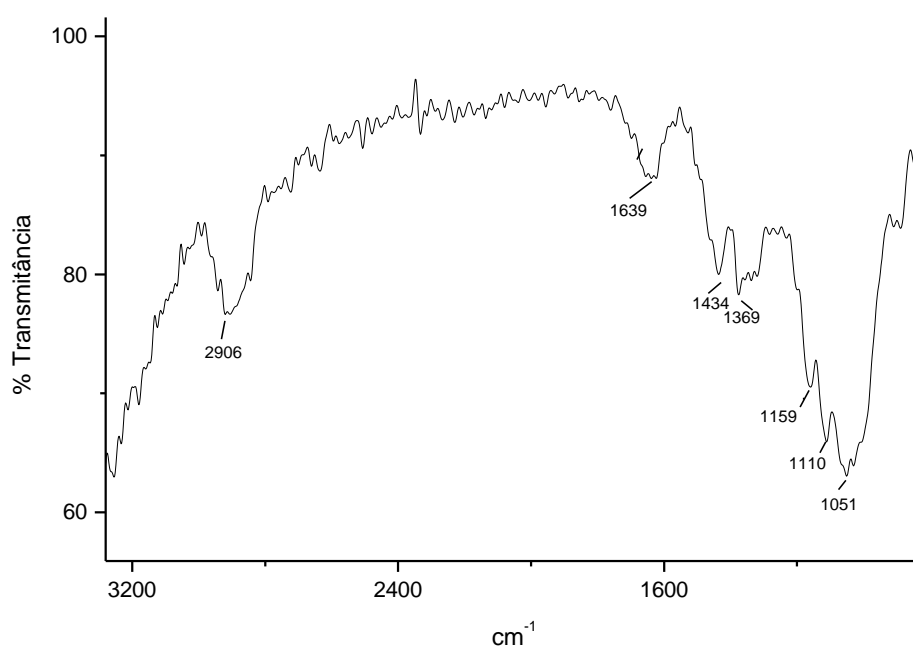


Figura 13 : Espectro na região do infravermelho (KBr) da celulose pura (Whatman 3MM)

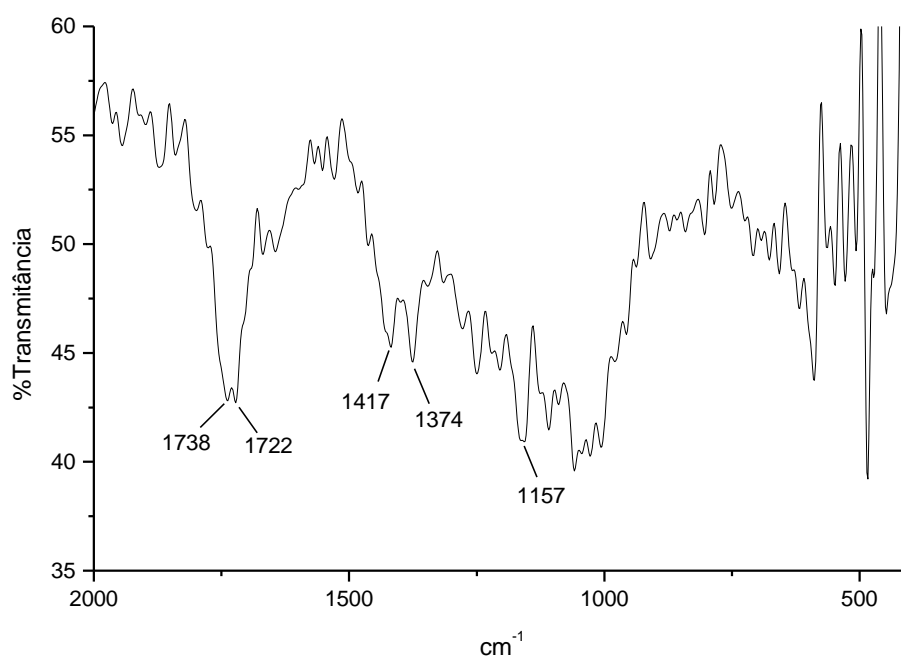


Figura 14 : Espectro no infravermelho (KBr) da celulose modificada **6** .



Figura 15 : Espectro na região do infravermelho (KBr) da celulose modificada **6**.

4.1.5) Análise Elementar

A análise elementar da celulose modificada **6** foi realizada no Departamento de Química da UFMG e os valores dos elementos C e H em comparação com os valores teóricos da celulose pura (monômero) $(C_6H_{10}O_5)(H_2O)$ encontram-se listados na tabela abaixo.

Tabela 9 - Valores da análise elementar para a celulose pura e para a celulose modificada **6**.

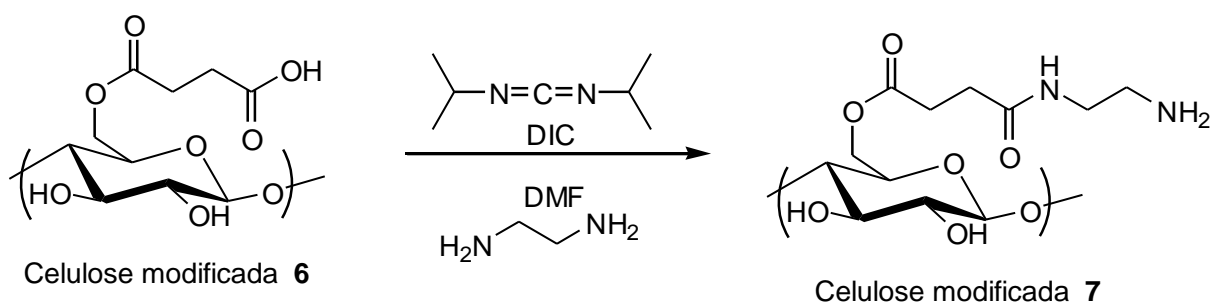
	C(%)	H(%)
Celulose (valores teóricos)	40,0	6,71
Celulose modificada 6	43,6	5,31

4.2- Introdução das funções amina na celulose modificada 6

Para a introdução de funções amina na celulose é necessário utilizar um reagente com, no mínimo, duas funções aminas primárias (ou secundárias). Uma função amina deve reagir com a função ácido carboxílico da celulose modificada **6** levando à formação de uma ligação amida. A(s) outra(s) função(ões) amina(s) deve(m) ficar livre para poder interagir com os metais pesados. A etilenodiamina, a trietilenotetramina e um polímero de etilenodiamina (poliamina de alto peso molecular) foram as aminas escolhidas por causa de seu baixo custo e fácil acessibilidade.

4.2.1) Introdução da etilenodiamina

A celulose modificada **6** (Esquema 8) foi tratada com 1,8 equivalentes de 1,3 diisopropilcarbodiimida (DIC) e um excesso de etilenodiamina (4 equivalentes) em dimetilformamida (DMF) anidra à temperatura ambiente. O excesso de etilenodiamina tem como objetivo evitar ou minimizar a reação intramolecular (“crosslinking”). Após a filtração, lavagem e secagem do material, a celulose modificada **7** foi obtida com um ganho de massa de **21%** em relação ao material de partida.



Esquema 8 – Introdução da etilenodiamina na celulose modificada **6**.

4.2.2) Quantificação das funções amina da celulose modificada 7

O procedimento utilizado para se verificar a quantidade de funções amina introduzidas na celulose modificada 6 foi a retrotitulação de um excesso de HCl 0,0135 mol/L adicionado à celulose modificada 6 com NaOH 0,03325 mol/L. Assim, à celulose modificada 6 (255 mg e 356 mg), adicionaram-se 100 mL de HCl em excesso para neutralizar as funções amina do material que foi deixado sob agitação durante 30 minutos. Após filtração, o excesso de HCl foi titulado com NaOH usando a fenolftaleína como indicador. Os volumes de NaOH gastos nas titulações foram 20,5 mL (amostra de 255 mg) e de 14,90 mL (amostra de 356 mg).

Com base nos volumes de NaOH gastos na retrotitulação determinou-se quantitativamente o número de funções amina inseridas na celulose modificada 3: **$2,51 \times 10^{-6}$ mol/mg.**

4.2.3) Análise por espectrometria na região do infravermelho (FTIR) da celulose modificada 7

A caracterização da celulose modificada 7 com funções amina foi realizada usando a espectrometria no infravermelho. O espectro da celulose modificada 7 (Figura 16) mostrou o aparecimento de duas bandas fortes em 1628 cm^{-1} e 1571 cm^{-1} . Tais bandas poderiam corresponder à presença de uma função amida. A banda em 1628 cm^{-1} corresponde à deformação axial da carbonila da função amida também chamada de banda de amida I. A banda em 1571 cm^{-1} corresponde à deformação angular da ligação N-H da função amida também chamada de banda de amida II.

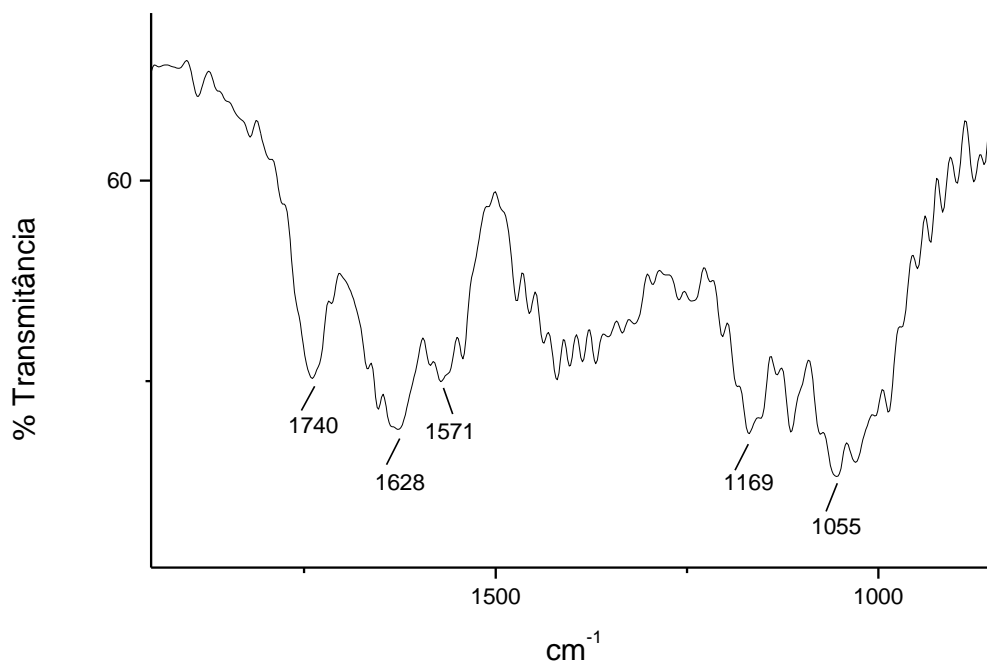


Figura 16: Espectro na região do infravermelho (KBr) da celulose modificada 7.

4.2.4) Análise elementar da celulose modificada 7

A análise elementar da celulose modificada 7 foi realizada no Departamento de Química da UFMG e os valores dos elementos C, H e N em comparação com os valores do material de partida (celulose modificada 6) encontram-se listados na tabela abaixo.

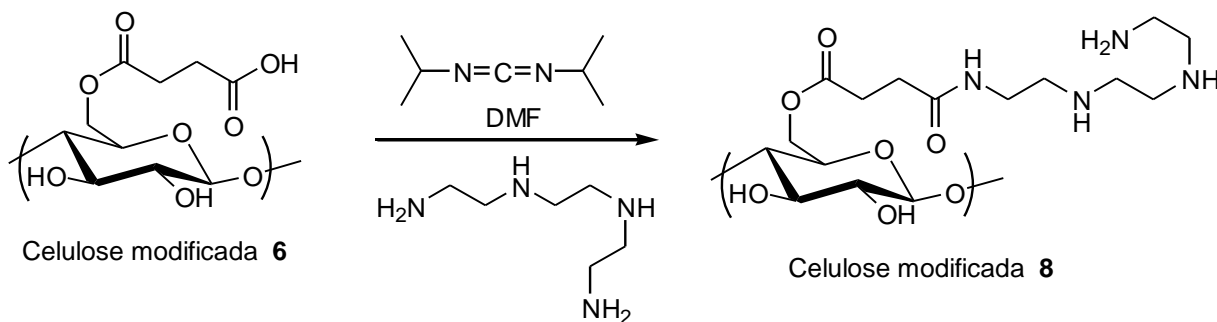
Tabela 10 - Valores de análise elementar para celulose modificada 6 e para a celulose modificada 7.

	C(%)	H(%)	N (%)
Celulose modificada 6	43,65	5,31	0,12
Celulose modificada 7	43,96	6,75	5,53

A análise desta tabela mostra que houve uma incorporação da etilenodiamina na celulose modificada 6. O resultado da porcentagem de nitrogênio igual à 5,53 % evidencia a introdução da função amina na celulose.

4.2.5) Introdução da trietilenotetramina

A celulose modificada **6** (esquema 9) foi tratada com 1,8 equivalentes de 1,3 diisopropilcarbodiimida (DIC) e um excesso de trietilenotetramina (4 equivalentes) em dimetilformamida (DMF) anidra à temperatura ambiente. Após a filtração, lavagem e secagem do material, a celulose modificada **8** foi obtida e o ganho de massa da reação foi de **31%** em relação o material de partida.



Esquema 9 – Introdução da trietilenotetramina na celulose modificada **6**.

4.2.6) Quantificação das funções amina da celulose modificada **8**

O procedimento utilizado para se verificar a quantidade de funções amina introduzidas na celulose modificada **8** foi a retrotitulação de um excesso de HCl 0,00757 mol/L adicionado à celulose modificada **8** com NaOH 0,00984 mol/L. À celulose modificada **8** (130 mg e 132 mg), adicionou-se 100 mL HCl em excesso para neutralizar as funções amina do material durante 30 minutos. Após filtração, o excesso de HCl foi titulado com NaOH usando a fenolftaleína como indicador. Os volumes de NaOH gastos nas titulações foram 52,7 mL (amostra de 130 mg) e de 52,60 mL (amostra de 132 mg).

Com base nos volumes de NaOH gastos na retrotitulação determinou-se quantitativamente o número de funções amina inseridas na celulose modificada **8**: **$1,82 \times 10^{-6}$ mol/mg**.

4.2.7) Análise elementar da celulose modificada **8**

A análise elementar da celulose modificada **8** foi realizada no Departamento de Química da UFMG e os valores dos elementos C, H e N em comparação com os valores da celulose modificada **7** encontram-se listados na tabela abaixo.

Tabela 11 - Valores da análise elementar para a celulose modificada **7** e para a celulose modificada **8**.

	C(%)	H(%)	N (%)
Celulose modificada 7	43,96	6,75	5,53
Celulose modificada 8	46,20	6,75	7,54

A análise desse resultado mostrou a maior percentagem de nitrogênio para o composto **8** que para o material **7**. Isso é devido ao maior número de funções aminas presentes na trietilenotetramina que na etilenodiamina.

4.2.8) Análise no infravermelho (IV) da celulose modificada **8**

A caracterização da celulose modificada **8** com funções amina foi realizada usando a espectrometria no infravermelho. O espectro da celulose modificada **8** (Figura 17) mostrou o aparecimento de três bandas fortes em 1656, 1631 e 1558 cm^{-1} . Tais bandas correspondem à presença de uma função amida e de funções aminas. As bandas em 1656 e 1631 cm^{-1} correspondem à deformação axial da carbonila da função amida também chamada de banda de amida I e à deformação angular da ligação N-H das funções aminas. A banda em 1558 cm^{-1} corresponde à deformação angular da ligação N-H da função amida também chamada de banda de amida II.

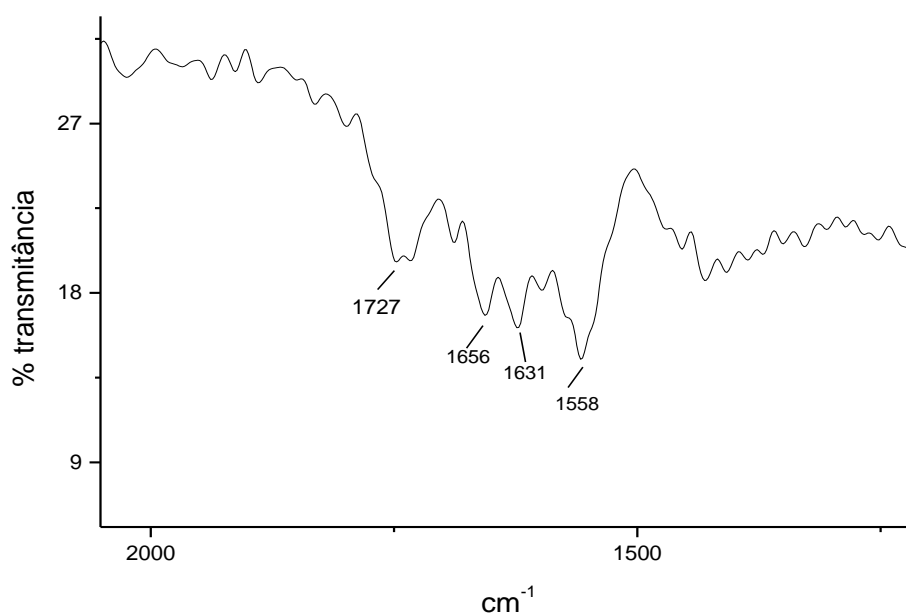
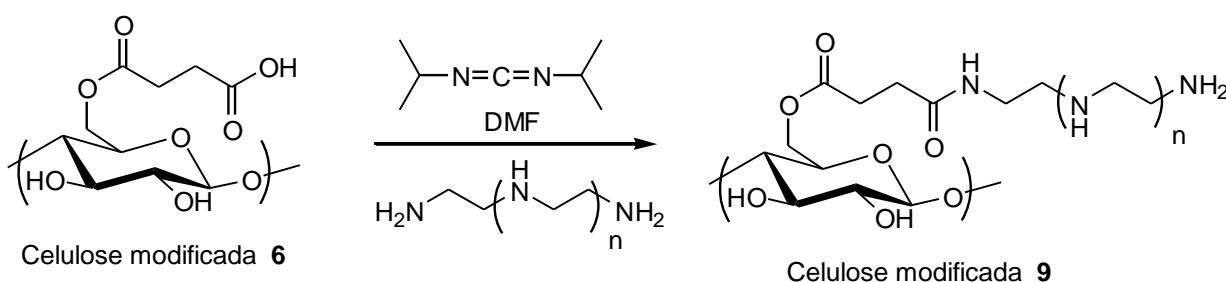


Figura 17 - Espectro no infravermelho(KBr) da celulose modificada **8**.

4.2.9) Introdução de uma poliamina de alto peso molecular

A celulose modificada **9** (esquema 10) foi obtida usando a mesma metodologia já descrita mas utilizando dessa vez uma poliamina comercial de alto peso molecular igual àquela usado por Navarro e colaboradores, (NAVARRO et al, 1996). Trata-se da polietilenimina (Ref. Aldrich 40,872-7 Mn ca. 10,000 (GPC). Mw ca. 25,000 (LS). Polímero ramificado), um polímero de poliaminas do tipo $(-\text{NHCH}_2\text{CH}_2-)_x[-\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2)\text{CH}_2\text{CH}_2-]_y$. Assim, 1 grama de celulose modificada **6** foi tratada com 1,8 equivalentes de 1,3 diisopropilcarbodiimida (DIC) e 5 g da poliamina em dimetilformamida (DMF) anidra e a mistura foi deixada sob agitação magnética, à temperatura ambiente, durante 22 horas. Após a filtração, lavagem e secagem do material, a celulose modificada **9** foi obtida e o ganho de massa da reação foi de **70%** em relação o material de partida.



Esquema 10 – Introdução da polietilenimina na celulose modificada **6**.

4.2.10) Quantificação das funções amina da celulose modificada **9**

Para se verificar qual a quantidade de aminas que foram introduzidos na celulose modificada **9**, o método utilizado foi a titulação volumétrica. Foram utilizados os seguintes reagentes: 152 mg e 153 mg de celulose modificada 5, NaOH 0,00984 mol/L padronizado e HCl 0,00757 mol/L padronizado.

Cada amostra de celulose foi misturada à 100 ml de HCl 0,00757 mol/L durante 30 minutos. Em seguida as amostras foram filtradas por filtração simples e lavadas com 50 ml de água destilada. Os filtrados foram então titulados com NaOH 0,00984 mol/L, usando-se como indicador a fenolftaleína. Os volumes de NaOH gastos nas titulações foram 24,50 mL (amostra de 152 mg) e de 23,70 mL (amostra de 153 mg).

Com base nos volumes de NaOH gastos na retrotitulação determinou-se quantitativamente o número de funções amina inseridas na celulose modificada **9**: $3,41 \times 10^{-6}$ mol/mg

4.2.11) Análise no infravermelho (IV) da celulose modificada **9**

A caracterização da celulose modificada **9** com funções amina foi realizada usando a espectrometria no infravermelho. O espectro da celulose modificada **9** (Figura 18) mostrou o aparecimento de duas bandas fortes em 1644 e 1555 cm^{-1} . Tais bandas foram atribuídas à presença de uma função amida e de funções aminas. Essas bandas correspondem à deformação axial da carbonila da função amida também chamada de banda de amida I, à deformação angular da ligação N-H das funções aminas e à deformação angular da ligação N-H da função amida também chamada de banda de amida II.

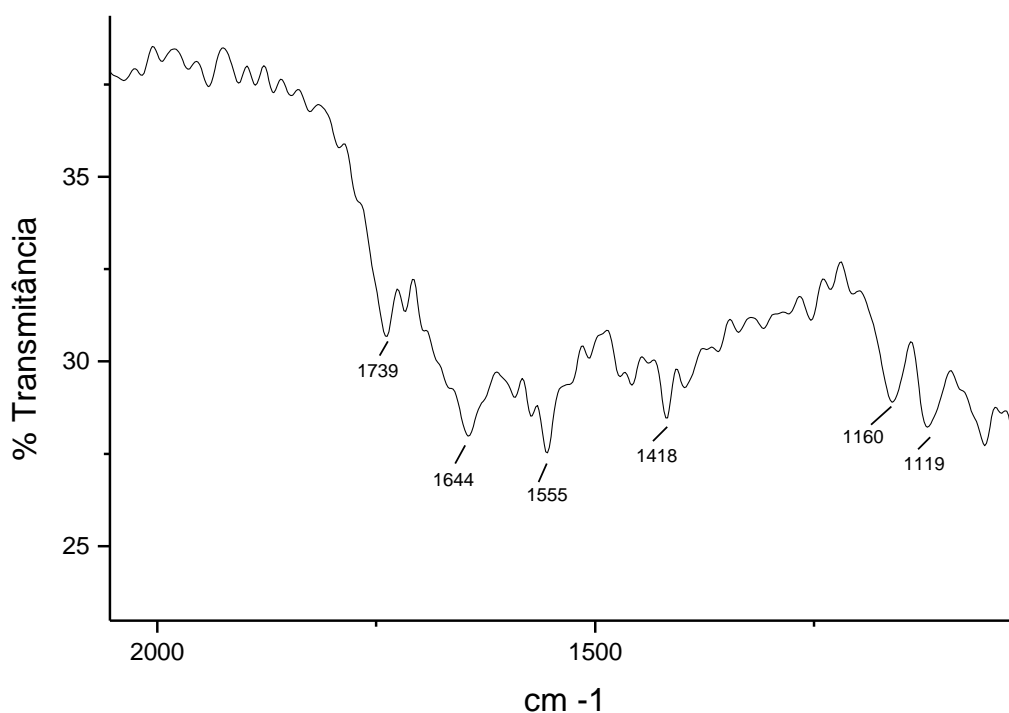


Figura 18 – Espectro no Infravermelho (KBr) da celulose modificada **9**.

4.3) Estudo das propriedades “quelantes” das celulosas modificadas.

A adsorção é o fenômeno no qual moléculas de um fluido se concentram espontaneamente sobre uma superfície sólida. O adsorvente é o sólido sobre o qual ocorre o fenômeno de adsorção, o adsorbato é a espécie química retida pelo adsorvente e o adsorvivo é o fluido em contato com o adsorvente.

O fenômeno de adsorção é conhecido desde o século XVIII sendo atualmente considerado uma operação unitária importante na engenharia química. A adsorção pode ser utilizada em processos de purificação e separação, sendo uma alternativa importante e economicamente viável em vários casos. A distribuição do adsorbato entre a fase fluida e a fase adsorviva envolve um equilíbrio de fases, que é governado pelos princípios da termodinâmica. Dados de equilíbrio são geralmente registrados na forma de isotermas (ZANON, 2003).

As isotermas são diagramas que mostram a variação da concentração de equilíbrio da solução no sólido adsorvente com a pressão parcial ou concentração da fase fluida, em uma temperatura específica. A determinação experimental das isotermas foi o primeiro passo no estudo da adsorção das celulosas modificadas em presença de íons metálicos. Com a análise dos dados da isoterma desenvolve-se uma equação que representa realmente os resultados.

Existem vários modelos publicados na literatura para descrever os dados experimentais das isotermas de adsorção SPOSITO (1984). De acordo com LOPES (2002), dentre os modelos de isotermas mais utilizados, destacam-se as de Langmuir, mais freqüentemente utilizadas para descrever isotermas para aplicações em tratamento de águas e efluentes e as de Freundlich mais usadas para o sistema solo-agrotóxico.

O modelo da isoterma de Langmuir foi originalmente desenvolvido para representar a adsorção em monocamada sobre uma superfície ideal, onde o calor de adsorção deve ser independente da cobertura da fase sólida. Entretanto, por sua simplicidade e versatilidade, este modelo é amplamente empregado para determinar a quantidade do íon metálico adsorvido, N_f , por grama do material adsorvente utilizado e pode ser calculada pela equação:

$$N_f = \frac{(N_a - N_s)}{m}$$

onde:

N_a = quantidade de matéria em mol de X inicial na solução;

N_s = quantidade de matéria em mol de X na solução em equilíbrio com a fase sólida;

m = massa de resina ou fase sólida utilizada (g).

A equação que descreve a adsorção segundo o modelo de Langmuir é:

$$q = \frac{KCM}{1 + KC}$$

onde:

C = concentração do metal no equilíbrio (mg/L);

q = quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g);

K = constante de Langmuir (L/mg);

M = capacidade máxima de adsorção (mg/g)

Invertendo a equação acima e separando os valores do segundo termo da equação

temos:

$$\frac{1}{q} = \frac{1 + KC}{KCM} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{1}{q} = \frac{1}{KCM} + \frac{KC}{KCM}$$

A expressão linear de Langmuir é:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{KCM} + \frac{1}{M}C$$

O gráfico linear de 1/q versus 1/C confirma a validade do modelo de Langmuir para o processo. A equação da reta obtida apresentará coeficiente angular correspondente a 1/KM e coeficiente linear correspondente a 1/M.

Muitos dos casos de adsorção por sólidos de substâncias em solução podem ser descritos pela isoterma de Freundlich:

$$\frac{x}{m} = k c^{1/n} \quad (1)$$

onde x = massa da substância adsorvida, em g,

m = massa do adsorvente, em g,

c = concentração em g/L da solução no equilíbrio,

k e n = constantes do adsorvente e do soluto a uma dada temperatura.

Quando a adsorção, medida por (x/m), é dada em função da concentração de equilíbrio a uma dada temperatura, tem-se uma curva denominada isoterma de adsorção. As constantes k e n podem ser determinadas tomando-se o logaritmo da equação (1) onde obtém-se a equação (2).

$$\ln\left(\frac{x}{m}\right) = \frac{1}{n} \ln c + \ln k \quad (2)$$

De acordo a equação (2) o gráfico de $\ln(x/m)$ versus $\ln c$ deve ser uma reta e a partir dos seus coeficientes angular e linear pode calcular as constantes n e k .

4.3.1) Estudo das propriedades quelantes da celulose 3 MM Whatman para os íons Cu^{2+} em solução aquosa.

Antes de começar o nosso estudo com os novos materiais preparados, teve-se que avaliar as propriedades da celulose não modificada para que a mesma servisse de referência neste trabalho. Este experimento foi realizado em duplicata para cada concentração do íon metálico a ser analisado.

Inicialmente preparou-se uma solução contendo 2 g/L de íons Cu^{2+} usando-se como sal o $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ comercial. Partindo-se desta solução, foram preparadas soluções de Cu^{2+} nas concentrações de 50, 80, 100, 200, 300, 400 e 500 mg/L. Em erlenmeyers de 250 mL foram colocados 50 mL de cada solução de Cu^{2+} e 200 mg de celulose 3 MM Whatman e a mistura foi agitada durante 1 hora. Todos os experimentos foram feitos em pH entre 4,0 – 6,0 (pH natural da solução de cobre).

Em seguida separou-se a celulose da solução de Cu^{2+} por filtração simples. Os filtrados foram titulados com uma solução de EDTA padronizado para se determinar a quantidade final de Cu^{2+} presente em cada solução. Em função da quantidade de cobre que ficou em solução e aquela inicial podemos deduzir a quantidade de cobre complexada pela celulose 3 MM Whatman. Os resultados do estudo estão representados na tabela 12 e na figura 20. A fim de poder utilizar o modelo de Langmuir foram calculados os valores de $1/q$ versus $1/C$ onde C representa a concentração no equilíbrio (mg/L) de cobre e q a quantidade (mg) de cobre complexada por grama de celulose 3 MM Whatman. Os valores estão apresentados na tabela 12 e a figura 19 representa o gráfico de $1/q$ versus $1/C$.

Tabela 12 – Resultados obtidos na reação de complexação da celulose 3 MM Whatman com o cobre.

Concentração inicial de Cu^{2+} (mg/L)	C = Concentração de Cu^{2+} no equilíbrio (mg/L)	q = Quantidade de Cu^{2+} complexada (mg para 1 g de celulose)	1/C (L/mg)	1/q (g de celulose por mg de Cu^{2+})
80	67,99	3,000	0,01471	0,3331
200	176,82	5,801	0,005655	0,1724
300	268,32	7,914	0,003727	0,1264
500	456,27	10,84	0,002192	0,09228

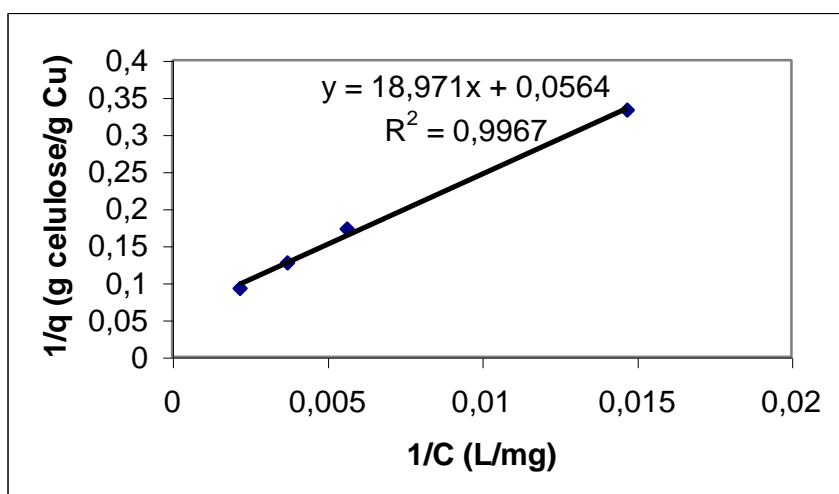


Figura 19: Inverso da concentração no equilíbrio de cobre 1/C (L/mg) versus inverso da quantidade de cobre complexada 1/q (g/mg) para a celulose 3 MM Whatman

Através do gráfico da figura 19 conseguiu-se obter a seguinte expressão matemática:

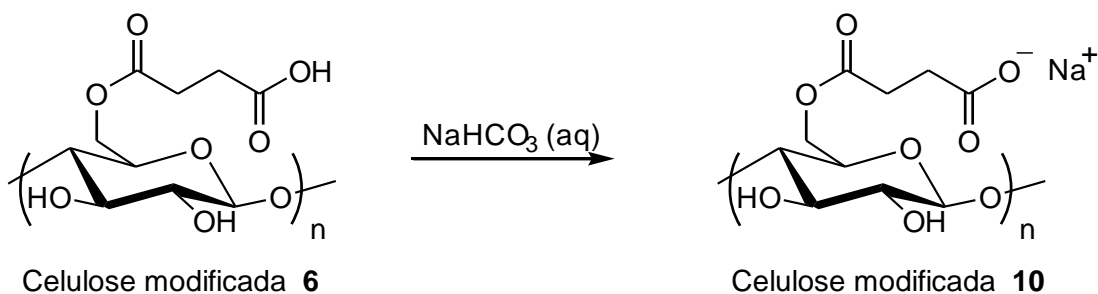
$$1/q = 18,971(1/C) + 0,0564 \text{ com um coeficiente de correlação } R^2 = 0,9967$$

O valor 0,0564 representa o inverso da capacidade máxima de complexação da celulose 3 MM Whatman com os íons Cu^{2+} . Assim, a capacidade máxima de complexação = $1/0,0564 = 18 \text{ mg de } \text{Cu}^{2+} \text{ por grama de celulose 3 MM Whatman}$.

4.3.2) Estudo das propriedades quelantes da celulose modificada 6 para os íons Cu^{2+} em solução aquosa.

Para esse estudo a celulose modificada 6 sofreu inicialmente um tratamento básico para liberar as funções carboxilatos, como mostrado no esquema 11. Tais funções têm uma

melhor afinidade com os metais por causa da carga iônica negativa. Assim, a celulose modificada **6** foi tratada com uma solução saturada de NaHCO_3 e lavada com água destilada ajustado a $\text{pH}=9$ com uma solução de NaOH (0,1 M). Após lavagem com MeOH e secagem em estufa (70 °C), a celulose modificada **10** ficou pronta para os estudos de descontaminação.



Esquema 11 – Tratamento básico da celulose modificada **6** para a liberação de funções carboxilatos.

4.3.3) Estudo de complexação do cobre com a celulose modificada **10** em função do tempo (cinética)

Foram realizados vários experimentos em função do tempo usando-se 150 mg de celulose modificada **10** e 100 mL de uma solução de sulfato de cobre (Cu^{2+}) 200 mg/L. Todos os experimentos foram feitos a pH igual a 5,8. Após filtração, a concentração em cobre do filtrado foi avaliada por titulometria usando a iodometria (tiosulfato / iodeto). Em função da quantidade de cobre que ficou em solução e aquela inicial pôde-se deduzir a quantidade de cobre complexada na celulose modificada **10**. Os resultados do estudo estão apresentados na tabela 13 e na figura 20.

Tabela 13 – Resultados obtidos na reação de complexação da celulose modificada **10** com o cobre em função do tempo (cinética).

Tempo (minutos)	Quantidade de Cu^{2+} complexada (mmol para 150 mg de material)
10	0,1956
20	0,2117
30	0,2253
45	0,2397
60	0,2266
105	0,2170
120	0,2168
180	0,2118

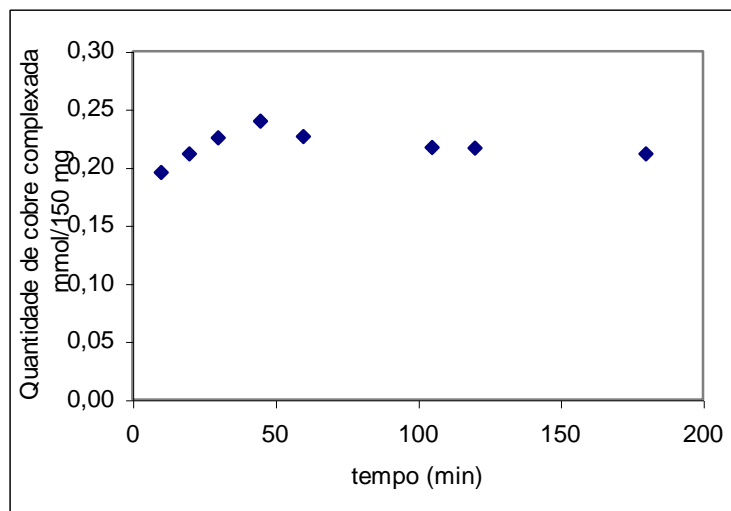


Figura 20 : Quantidade de Cu^{2+} complexada (mmol para 150 mg de celulose modificada **10**) em função do tempo

Por estes experimentos, pôde-se concluir que o tempo necessário para atingir o equilíbrio da adsorção dos íons Cu^{2+} pela celulose modificada **10** é de 20 minutos. A partir deste resultado, optou-se então por realizar os experimentos que se seguiriam usando a celulose modificada **10** com um tempo de 30 minutos para garantir o estabelecimento do equilíbrio.

4.3.4) Estudo de complexação do cobre com a celulose modificada **10** em função do pH.

Foram realizados vários experimentos em função do pH usando 150 mg de celulose modificada **10** e 100 mL de uma solução de sulfato de cobre (Cu^{2+}) 200 mg/L. Todos os experimentos foram com tempo de reação de 30 minutos. Após filtração, a concentração em cobre do filtrado foi avaliada por titulometria usando a iodometria (tiosulfato / iodeto). Em função da quantidade de cobre que ficou em solução e aquela inicial podemos deduzir a quantidade de cobre complexada na celulose modificada **10**. Os resultados deste estudo estão representados na tabela 14 e na figura 21.

Tabela 14 - Resultados obtidos na reação de complexação da celulose modificada **10** com o cobre em função do pH.

pH	Quantidade de Cu ²⁺ complexada 10 ⁻⁶ mol/mg de celulose modificada 10
1,07	0,00
3,12	1,25
4,95	1,59
6,01	1,50

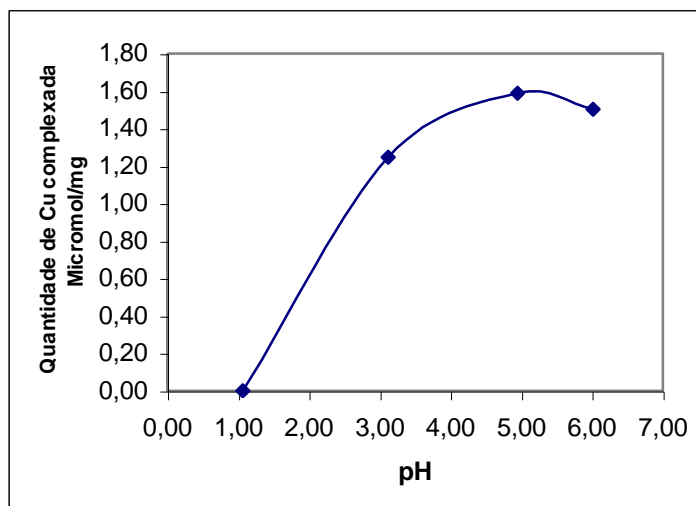


Figura 21 : Quantidade de Cu²⁺ complexada (10⁻⁶ mol para mg de celulose modificada 10) em função do pH

Pôde-se observar um aumento da complexação de Cu²⁺ em função do aumento do pH até atingir um patamar. Podemos concluir que a complexação máxima ocorre em uma faixa de pH entre 5 e 6 . Após este resultado decidiu-se realizar o estudo da complexação em função da concentração inicial de cobre em um valor de pH próximo a 6 para garantir o máximo de adsorção.

4.3.5) Estudo de complexação do cobre com a celulose modificada 10 em função da concentração inicial de cobre.

Para este estudo, preparou-se inicialmente uma solução de Cu²⁺ de 1,000 g/l. Com esta solução fez-se soluções nas seguintes concentrações: 100 mg/l; 150mg/l; 200mg/l; 300mg/l; 400mg/l. Cada experimento em função de uma concentração foi realizado em duplicata.

Uma amostra de 150 mg de celulose modificada 10 foi colocada em contato com 100 mL das soluções acima preparadas (de concentrações diferentes) e a mistura foi deixada sob agitação por 30 minutos. Todos os experimentos foram feitos em pH entre 5,8 – 6,0. Após

filtração, a concentração em cobre do filtrado foi avaliada por titulometria usando a iodometria (tiosulfato / iodeto). Os resultados do estudo foram tratados usando os modelos de Langmuir e Freundlich.

- Modelo de Langmuir.

A fim de se poder utilizar o modelo de Langmuir, foram calculados os valores de $1/q$ e $1/C$ onde q representa a quantidade de cobre adsorvida no equilíbrio (mg/g) e C a concentração de cobre no equilíbrio (mg/L). Os valores estão apresentados na tabela 15 e a figura 22 representa o gráfico de $1/q$ versus $1/C$.

Tabela 15 - Valores calculados de $1/C$ e de $1/q$ para a celulose modificada **10**

Concentração inicial de Cu^{2+} (mg/L)	C = Concentração de Cu^{2+} no equilíbrio (mg/L)	q = Quantidade de Cu^{2+} complexada (mg para 1 g de celulose 10)	1/C (L/mg)	1/q (g de celulose 10 /mg Cu^{2+})
150	17,33	88,45	0,05771	0,01131
200	56,84	95,44	0,017592	0,010478
300	124,50	117,0	0,008032	0,008547
400	219,67	120,2	0,004552	0,008318

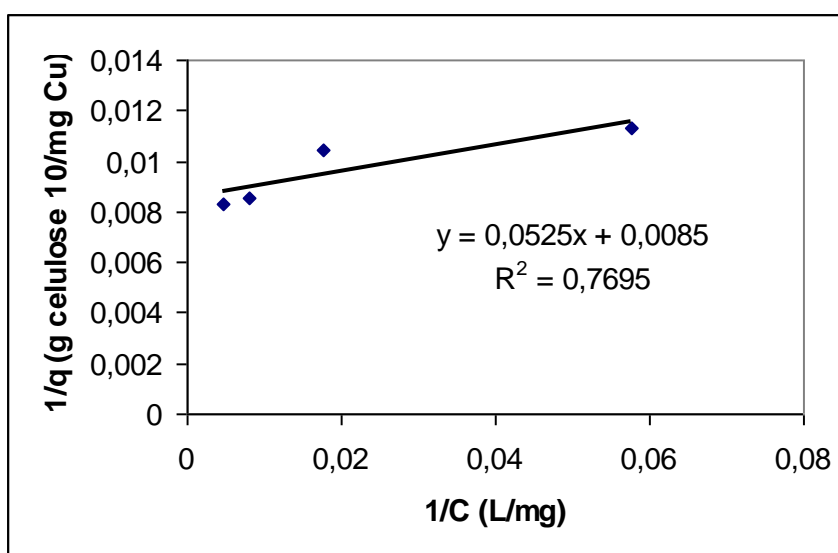


Figura 22: Inverso da concentração no equilíbrio de cobre $1/C$ (L/mg) *versus* inverso da quantidade de cobre complexada $1/q$ (g/mg) para a celulose modificada **10**

Através do gráfico da figura 22 conseguiu-se obter a seguinte expressão matemática:

$$1/q=0,0525(1/C) + 0,0085 \text{ com um coeficiente de correlação } R^2 = 0,7695$$

O valor 0,0085 representa o inverso da capacidade máxima de complexação da celulose modificada **10** com os íons Cu^{2+} . Assim, a capacidade máxima de complexação = $1/0,0085 = 118 \text{ mg de Cu}^{2+}$ por grama de celulose modificada **10**..

- Modelo de Freundlich.

A fim de se poder utilizar o modelo de Freundlich foram calculados os valores de $\ln(x/m)$ e $\ln(C)$ onde x representa a massa (g) de cobre adsorvida, m a massa (g) do adsorvente (celulose modificada **10**) e C a concentração de cobre no equilíbrio (g/L). Os valores estão apresentados na tabela 16 e a figura 23 representa o gráfico de $\ln(x/m)$ versus $\ln(C)$.

Tabela 16 - Valores calculados de $\ln(x/m)$ e de $\ln C$ para a celulose modificada **10**

Concentração inicial de Cu^{2+} (mg/L)	C = Concentração de Cu^{2+} no equilíbrio (mg/L)	Ln C	Ln (x/m)
150	17,33	-4,055	-2,425
200	56,84	-2,867	-2,350
300	124,50	-2,083	-2,146
400	219,67	-1,516	-2,118

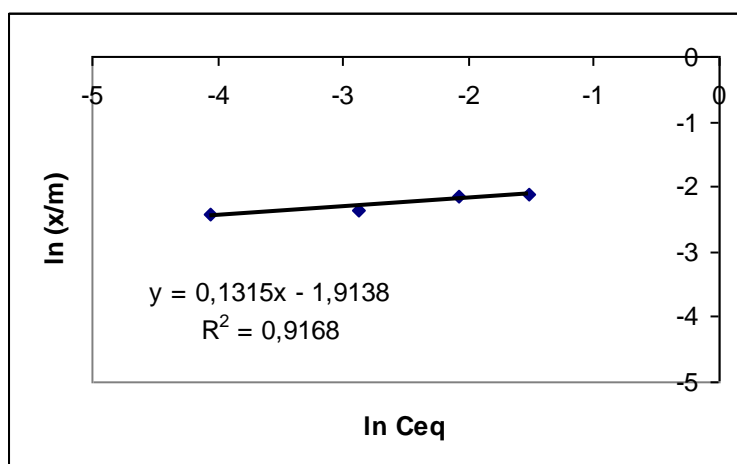


Figura 23: Ln da concentração no equilíbrio de cobre *versus* inverso o Ln de x/m para a celulose modificada **10**

Parece que o modelo de Freundlich é de melhor aplicação para se avaliar a adsorção do cobre pela celulose modificada **10** por apresentar um melhor coeficiente de correlação $R^2 = 0,9168$.

Através da expressão matemática da figura 23 podemos calcular as constantes n e k (equação 2):

$$\ln k = -1,9138$$

$$k = 0,1475$$

$$1/n = 0,1315$$

$$n = 7,605$$

4.3.6) Estudo das propriedades quelantes da celulose modificada 7 para os íons Cu^{2+} em solução aquosa.

Como já descrito anteriormente, inicialmente foi realizado um estudo cinético para a determinação do tempo necessário para se atingir o equilíbrio com a celulose modificada **7**, que neste caso foi bem mais rápido que no caso da celulose modificada **10**. Os resultados obtidos após 5, 10 ou 30 minutos de reação foram similares. Assim, usou-se um tempo de 10 minutos de reação para se realizar os estudos com a celulose modificada **7**, já que este tempo garantiria o alcance do equilíbrio.

Novamente foi preparada uma solução de íons Cu^{2+} de concentração igual a 1,000 g/l. A partir desta solução foram preparadas soluções de concentração de 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160 mg/L. Para cada solução de diferentes concentrações de Cu^{2+} foram realizados experimentos em duplicata. Foram adicionados 50 mL de cada solução à 50 mg de celulose modificada **7** e a mistura foi deixada sob agitação por 10 minutos. Todos os experimentos foram feitos a pH entre 5,0 – 6,0 (pH natural da solução de cobre). Em seguida separou-se a celulose da solução de Cu^{2+} por filtração simples. Os filtrados foram titulados com uma solução de EDTA padronizado para se determinar a quantidade final de Cu^{2+} presente em cada solução. Os resultados do estudo foram tratados usando os modelos de Langmuir e Freundlich.

- Modelo de Langmuir.

Tabela 17 - Valores calculados de 1/C e de 1/q para a celulose modificada 7

Concentração inicial de Cu ²⁺ (mg/L)	C = Concentração de Cu ²⁺ no equilíbrio (mg/L)	q= Quantidade de Cu ²⁺ complexada (mg para 1 g de celulose 7)	1/C (L/mg)	1/q (g de celulose 7/mg Cu ²⁺)
50	6,666	43,33	0,1500	0,02308
60	7,884	52,11	0,1268	0,01919
80	13,93	66,07	0,07178	0,01514
100	18,03	81,97	0,05545	0,01220
120	28,84	91,15	0,03467	0,01097
140	38,51	101,5	0,02596	0,009854
160	48,65	111,3	0,02055	0,008981

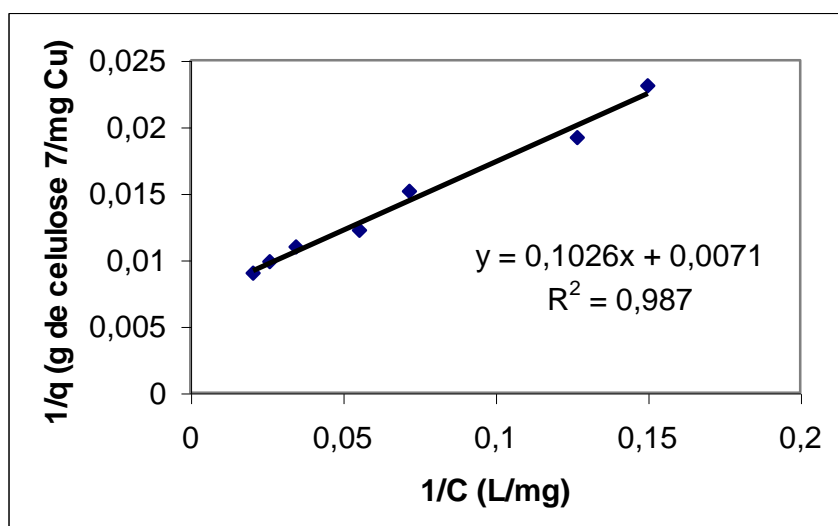


Figura 24: Inverso da concentração no equilíbrio de cobre 1/C (L/mg) *versus* inverso da quantidade de cobre complexada 1/q (g/mg) para a celulose modificada 7.

Através do gráfico da figura 24 conseguiu-se obter a seguinte expressão matemática:

$$1/q = 0,1026(1/C) + 0,0071 \text{ com um coeficiente de correlação } R^2 = 0,987$$

O valor 0,0071 representa o inverso da capacidade máxima de complexação da celulose modificada 7 com os íons Cu²⁺. Assim, a capacidade máxima de complexação = $1/0,0071 = 141$ mg de Cu²⁺ por grama de celulose modificada 7..

- Modelo de Freundlich.

Tabela 18 - Valores calculados de $\ln(x/m)$ e de $\ln C$ para a celulose modificada.

Concentração inicial de Cu^{2+} (mg/L)	C = concentração de Cu^{2+} no equilíbrio (mg/L)	$\ln C$	$\ln(x/m)$
50	6,6667	-5,011	-3,139
60	7,884	-4,843	-2,954
80	13,93	-4,274	-2,717
100	18,03	-4,015	-2,501
120	28,84	-3,546	-2,395
140	38,51	-3,257	-2,288
160	48,65	-3,023	-2,195

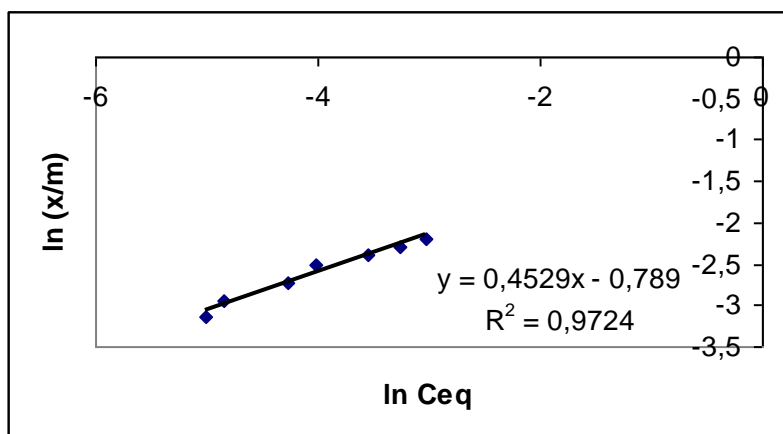


Figura 25: \ln da concentração no equilíbrio de cobre *versus* inverso o \ln de x/m para a celulose modificada 7.

Dessa vez o modelo de Langmuir se mostrou melhor que o modelo de Freundlich para avaliar a adsorção do cobre pela celulose modificada 7 por apresentar um melhor coeficiente de correlação $R^2 = 0,987$ (Langmuir), $R^2 = 0,9724$ (Freundlich).

Através da expressão matemática da figura 25 podemos calcular as constantes n e k (equação 2):

$$\ln k = -0,789$$

$$k = 0,4543$$

$$1/n = 0,4529$$

$$n = 2,208$$

4.3.7) Estudo das propriedades quelantes da celulose modificada **8** para os íons Cu^{2+} em solução aquosa.

Inicialmente foi realizado um estudo cinético e foi determinado que o tempo necessário para se atingir o equilíbrio é semelhante àquele obtido para a celulose modificada **7**. Assim, os resultados obtidos após 5, 10 ou 30 minutos foram iguais. Em decorrência deste fato, foi usado um tempo de 10 minutos para se fazer o estudo com a celulose modificada **8** garantindo assim o alcance do equilíbrio.

Inicialmente preparou-se uma solução de Cu^{2+} na concentração de 1,000 g/L. À partir desta solução preparou-se as soluções de concentração de 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180 e 200 mg/L. Para cada solução de diferentes concentrações de Cu^{2+} foram realizados experimentos em duplicata. Foram adicionados 50 mL de cada solução à 50 mg de celulose modificada **8** a mistura foi deixada sob agitação por 10 minutos. Todos os experimentos foram feitos a pH entre 5,0 – 6,0 (pH natural da solução de cobre). Em seguida separou-se a celulose da solução de Cu^{2+} por filtração simples. Os filtrados foram titulados com uma solução de EDTA padronizado para se determinar a quantidade final de Cu^{2+} presente em cada solução de diferentes concentrações iniciais. Em função da quantidade de cobre que ficou em solução e aquela inicial podemos deduzir a quantidade de cobre complexada na celulose modificada **8**.

Os resultados do estudo foram tratados usando os modelos de Langmuir e Freundlich.

- Modelo de Langmuir.

Tabela 19 - Valores calculados de $1/C$ e de $1/q$ para a celulose modificada **8**

Concentração inicial de Cu^{2+} (mg/L)	C = Concentração de Cu^{2+} no equilíbrio (mg/L)	q= Quantidade de Cu^{2+} complexada (mg para 1 g de celulose 8)	$1/C$ (L/mg)	$1/q$ (g de celulose 8 /mg Cu^{2+})
60	12,53	47,46	0,7977	0,02107
80	19,62	60,37	0,05096	0,01656
100	27,32	72,68	0,03660	0,01376
120	31,91	88,09	0,03134	0,01135
150	48,41	101,6	0,02066	0,009844
180	59,41	120,6	0,01683	0,008293
200	61,00	139,0	0,01639	0,007194

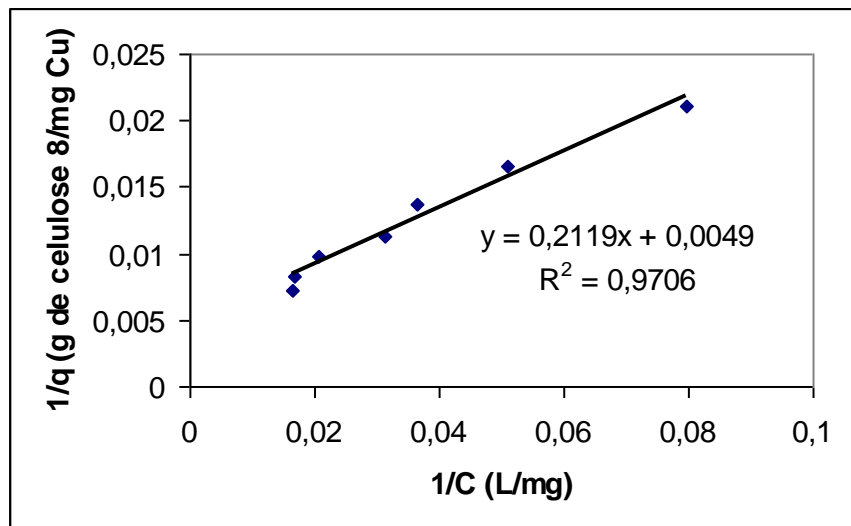


Figura 26: Inverso da concentração no equilíbrio de cobre $1/C$ (L/mg) versus inverso da quantidade de cobre complexada $1/q$ (g/mg) para a celulose modificada **8**.

Através do gráfico da figura 26 conseguiu-se obter a seguinte expressão matemática:

$$1/q = 0,2119(1/C) + 0,0049 \text{ com um coeficiente de correlação } R^2 = 0,9706$$

O valor 0,0049 representa o inverso da capacidade máxima de complexação da celulose modificada **8** com os íons Cu^{2+} . Assim, a capacidade máxima de complexação = $1/0,0049 = 204$ mg de Cu^{2+} por grama de celulose modificada **8**.

- Modelo de Freundlich.

Tabela 20 - Valores calculados de $\ln(x/m)$ e de $\ln C$ para a celulose modificada **8**

Concentração inicial de Cu^{2+} (mg/L)	C = concentração de Cu^{2+} no equilíbrio (mg/L)	$\ln C$	$\ln(x/m)$
60	12,53	-4,379	-3,048
80	19,62	-3,931	-2,807
100	27,32	-3,600	-2,622
120	31,91	-3,445	-2,429
150	48,41	-3,028	-2,287
180	59,41	-2,823	-2,115
200	61,00	-2,797	-1,973

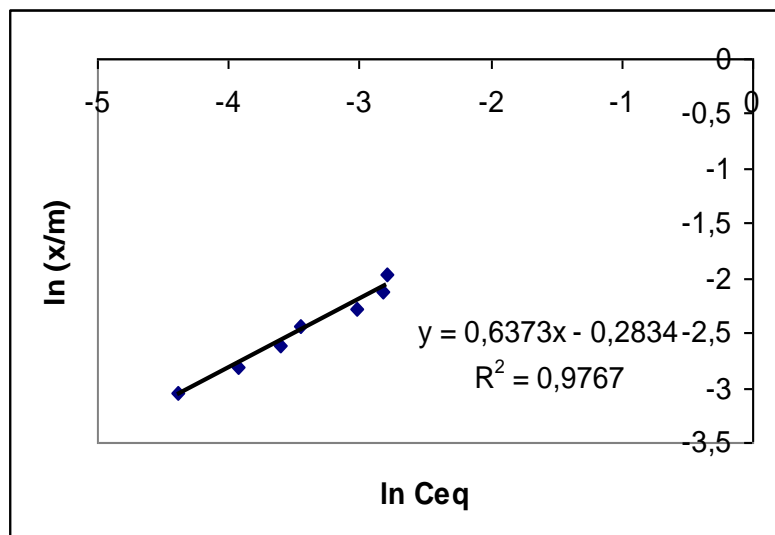


Figura 27: Ln da concentração no equilíbrio de cobre versus inverso o Ln de x/m para a celulose modificada **8**.

Dessa vez o modelo de Langmuir se mostrou quase igual ao modelo de Freundlich para avaliar a adsorção do cobre pela celulose modificada **8** (coeficiente de correlação $R^2 = 0,9706$ (Langmuir), $R^2 = 0,9767$ (Freundlich)).

Através da expressão matemática da figura 27 podemos calcular as constantes n e k (equação 2):

$$\text{Ln } k = -0,2834$$

$$k = 0,7532$$

$$1/n = 0,6373$$

$$n = 1,569$$

4.3.8) Estudo das propriedades quelantes da celulose modificada **9** para os íons Cu^{2+} em solução aquosa.

Inicialmente foi realizado um estudo cinético e foi determinado que o tempo necessário para atingir o equilíbrio é semelhante àquele encontrado para as celulosas modificadas **7** e **8**. Os resultados obtidos após 5, 10 ou 30 minutos foram iguais. Por isso usou-se um tempo de 10 minutos para ser fazer o estudo com a celulose modificada **9** garantindo assim o alcance do equilíbrio.

Inicialmente preparou-se uma solução de Cu^{2+} de 2,000 g/L. Partindo-se desta solução forma preparadas soluções de concentração de Cu^{2+} de 50, 100, 200, 300, 400 e 500 mg/L. Para cada solução de diferentes concentrações de Cu^{2+} foram realizados experimentos em duplicata. Foram adicionados 50 mL de cada solução à 50 mg de celulose modificada **9** a mistura foi deixada sob agitação por 10 minutos. Todos os experimentos foram feitos a pH entre 4,0 – 6,0

(pH natural da solução de cobre). Em seguida separou-se a celulose da solução de Cu^{2+} por filtração simples. Os filtrados foram titulados com uma solução de EDTA padronizado para se determinar a quantidade final de Cu^{2+} presente em cada solução de diferentes concentrações iniciais.

Em função da quantidade de cobre que ficou em solução e aquela inicial podemos deduzir a quantidade de cobre complexada na celulose modificada **9**.

Os resultados do estudo foram tratados usando os modelos de Langmuir e Freundlich.

- Modelo de Langmuir.

Tabela 21 - Valores calculados de $1/C$ e de $1/q$ para a celulose modificada **9**

Concentração inicial de Cu^{2+} (mg/L)	C = Concentração de Cu^{2+} no equilíbrio (mg/L)	q= Quantidade de Cu^{2+} complexada (mg para 1 g de celulose 9)	1/C (L/mg)	1/q (g de celulose 9/mg Cu^{2+})
50	19,93	30,06	0,05017	0,03326
100	49,84	50,16	0,02006	0,01994
200	98,42	101,6	0,01016	0,009845
300	174,4	125,6	0,005733	0,007963
400	201,8	198,2	0,004955	0,005046
500	289,0	210,9	0,003460	0,004740

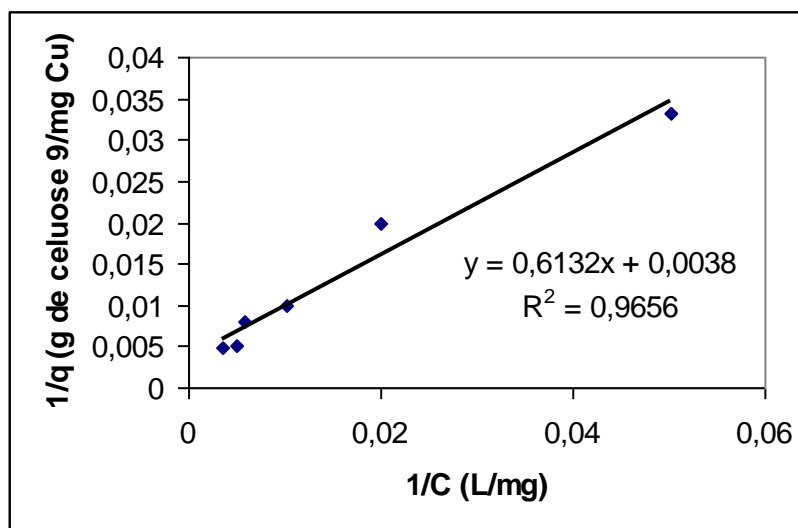


Figura 28: Inverso da concentração no equilíbrio de cobre $1/C$ (L/mg) versus inverso da quantidade de cobre complexada $1/q$ (g/mg) para a celulose modificada **9**

Através do gráfico da figura 28 conseguiu-se obter a seguinte expressão matemática:

$$1/q = 0,6132(1/C) + 0,0038 \text{ com um coeficiente de correlação } R^2 = 0,9656$$

O valor 0,0038 representa o inverso da capacidade máxima de complexação da celulose modificada **9** com os íons Cu^{2+} . Assim, a capacidade máxima de complexação = $1/0,0038 = 263 \text{ mg de Cu}^{2+} \text{ por grama de celulose modificada 9.}$

- Modelo de Freundlich.

Tabela 22 - Valores calculados de $\ln(x/m)$ e de $\ln C$ para a celulose modificada **9**

Concentração inicial de Cu^{2+} (mg/L)	C = concentração de Cu^{2+} no equilíbrio (mg/L)	$\ln C$	$\ln(x/m)$
50	19,93	-3,915	-3,504
100	49,84	-2,999	-2,992
200	98,42	-2,318	-2,287
300	174,4	-1,746	-2,075
400	201,8	-1,600	-1,619
500	289,0	-1,241	-1,556

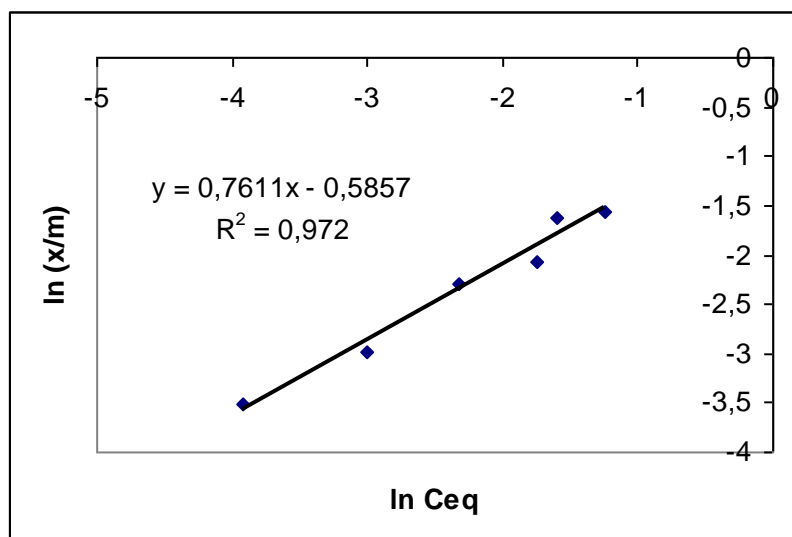


Figura 29: \ln da concentração no equilíbrio de cobre versus inverso o \ln de x/m para a celulose modificada **9**.

Parece que o modelo de Freundlich é melhor para avaliar a adsorção do cobre pela celulose modificada **9** por apresentar um melhor coeficiente de correlação ($R^2 = 0,9656$ (Langmuir), $R^2 = 0,972$ (Freundlich)).

Através da expressão matemática da figura 29 podemos calcular as constantes n e k (equação 2):

$$\ln k = -0,5857$$

$$k = 0,5567$$

$$1/n = 0,7611$$

$$n = 1,3139$$

4.4- Recuperação dos materiais (celuloses modificadas 10, 7, 8 e 9)

Uma vez saturados com os íons metálicos, os vários materiais podem ser recuperados através da lavagem com uma solução ácida (HCl 0,1M), o que promove a desorção e a eliminação dos metais de sua superfície, podendo o material filtrante ser reutilizado em futuras descontaminações. Após eliminação do cobre por exemplo, a celulose modificada **10** mostrou a mesma eficiência para adsorver os íons Cu^{2+} em solução comprovando a viabilidade do procedimento para recuperação dos materiais.