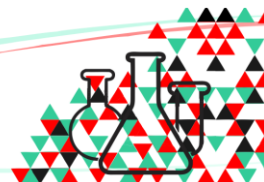




CONGRESSO BRASILEIRO  
DE ENGENHARIA QUÍMICA EM  
INICIAÇÃO CIENTÍFICA

21-24 Julho de 2019  
Uberlândia/MG



# CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE SOLUÇÕES AQUOSAS DE SULFATO DE SÓDIO E CARBONATO DE SÓDIO

G. S. PROENÇA<sup>1</sup>, V. M. V. CRUZ<sup>1</sup>, L. C. MAGALHÃES<sup>1</sup> e J. V. H. DANGELO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química  
E-mail para contato: g198066@dac.unicamp.br

**RESUMO** – O estudo realizado visa complementar a literatura, já que há poucos trabalhos com enfoque nas medições de massa específica, sólidos totais e viscosidade dinâmica de soluções aquosas de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sob pressão atmosférica. As temperaturas estudadas são 25 °C, 50 °C e 80 °C e a variação da composição das soluções está entre água pura e próximo à saturação. Os dados foram correlacionados com o auxílio de regressão múltipla, obtendo valores em concordância com a literatura.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo *Kraft* de polpação da madeira para produção de celulose e papel utiliza uma solução aquosa de sulfato e sulfeto de sódio, determinada licor branco, na etapa de cozimento da madeira. O licor negro é um subproduto desta etapa de cozimento e contém, além de lignina, sais de sódio dissolvidos, como o carbonato de sódio e o próprio sulfato de sódio. Esse licor é posteriormente processado em uma unidade de recuperação, sendo os sais recuperados e reciclados no processo. No setor de recuperação, os sais de sódio encontram-se presentes em várias correntes do processo. Cardoso *et. al.*, (2008) afirmaram que as características físico-químicas do licor negro são influenciadas, principalmente, pela sua composição química e condição de operação industrial, assim como as correntes derivadas desse licor. Portanto, compreender como a composição influencia algumas propriedades físico-químicas de interesse, é importante para compreender melhor o processo e propor melhorias visando maior controle e eficiência.

Os compostos inorgânicos tratados neste estudo têm propriedades que se relacionam com a concentração destes sais em meio aquoso. Segundo Gonçalves e Kestin (1981), a viscosidade relativa da solução aquosa de carbonato de sódio aumenta de acordo com a elevação da concentração, e diminui de acordo com o aquecimento da solução. Isto é o esperado devido ao forte efeito da temperatura na viscosidade, uma vez que o aumento da temperatura reduz a viscosidade dinâmica dos líquidos. Além disso, demonstraram que a massa específica da solução de carbonato de sódio tem o mesmo comportamento que a viscosidade dinâmica quando alteradas as concentrações e temperaturas.

O objetivo deste estudo é realizar medidas experimentais de viscosidade, massa específica e sólidos totais de soluções aquosas de sulfato de sódio e de carbonato de sódio, visando

analisar o impacto destes sais sobre a água e verificar a existência de correlações entre essas propriedades e a concentração dos sais.

## 2. METODOLOGIA

As soluções de sulfato de sódio e carbonato de sódio foram preparadas utilizando um balão volumétrico (250 mL), com concentrações de 2,5; 5,0; 10,0; 12,5; 15,0 e 20,0 g.L<sup>-1</sup> (para o carbonato de sódio foram ainda preparadas soluções de 30, 50 e 70 g.L<sup>-1</sup> além dessas). As soluções foram aquecidas em banho termostático a três temperaturas, 25 °C, 50 °C e 80 °C, após esse procedimento foram determinados os valores da massa específica e viscosidade para as temperaturas supracitadas, além da determinação dos sólidos totais.

Para a determinação da massa específica, foi utilizada a técnica da picnometria utilizando picnômetros de 50 mL, os quais foram previamente calibrados a partir da relação da massa de água que ocupa o volume do picnômetro e sua massa específica na temperatura determinada, obtida do banco de dados do NIST (*National Institute of Standards and Technology* - <https://www.nist.gov>). Feito isto, realizou-se o cálculo do valor da massa específica a partir da relação da massa de solução que ocupa o volume do picnômetro real na temperatura de interesse, conforme a Equação 1.

$$\rho_{\text{Amostra}(T,c)}^* = \frac{m_{\text{Amostra}}}{v_{\text{Real}(T)}^*} \quad (1)$$

no qual,  $m_{\text{Amostra}}$  é a massa da amostra (kg) obtida pela diferença entre a massa do picnômetro vazio e cheio e  $\rho_{\text{Amostra}(T,c)}^*$  (kg.m<sup>-3</sup>) é a massa específica da amostra na temperatura de medição.

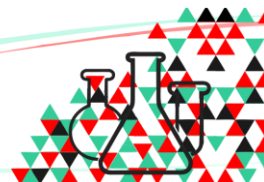
As análises de viscosidade dinâmica foram feitas a partir do viscosímetro de Ostwald. Seu funcionamento baseia-se na contagem de tempo que um fluido percorre a distância entre dois meniscos dentro de um capilar. Com este tempo, é possível calcular a viscosidade dinâmica das amostras pela Equação 2, utilizando-se do valor da massa específica da amostra, que fora previamente determinada.

$$\eta_{\text{Amostra}(T,c)}^* = \frac{\eta_{\text{Água}(T,0)}^* \cdot \rho_{\text{Amostra}(T,c)}^* \cdot t_{\text{Amostra}(T,c)}}{\rho_{\text{Água}(T,0)}^* \cdot t_{\text{Água}(T,0)}} \quad (2)$$

no qual,  $\eta_{\text{Água}(T,0)}^*$  é a viscosidade dinâmica (cP) da água na temperatura de referência obtida no NIST,  $t_{\text{Amostra}(T,c)}$  é o tempo (s) decorrido para a amostra percorrer a distância entre os dois meniscos do capilar,  $t_{\text{Água}(T,0)}$  é o tempo (s) decorrido para a água percorrer a distância entre os dois meniscos do capilar e  $\eta_{\text{Amostra}(T,c)}^*$  é a viscosidade dinâmica (cP) da amostra na temperatura de medição. Para a análise dos dados de massa específica e viscosidade dinâmica, foi feito o uso de propriedade relativas. As mesmas podem ser calculadas pelas Equação 3.

$$G_{\text{Relativa}(T,c)}^* = \frac{G_{\text{Amostra}(T,c)}^*}{G_{\text{Água}(T,0)}^*} \quad (3)$$

no qual,  $G_{\text{Relativa}(T,c)}^*$  é a propriedade relativa da amostra a ser calculada na temperatura desejada,  $G_{\text{Amostra}(T,c)}^*$  é o valor empírico da propriedade e  $G_{\text{Água}(T,0)}^*$  é o valor da propriedade



da água na temperatura inicial de referência. Os valores obtidos do NIST e utilizados como referência são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores Utilizados para o Cálculo das Propriedades Relativas

Propriedade	Temperatura (°C)		
	25	50	80
Massa específica (kg.m <sup>-3</sup> )	997,05	988,03	971,78
Viscosidade Dinâmica (cP)	0,8899	0,5468	0,3543

Fonte: National Institute of Standards and Technology  
(<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir5078.pdf>)

### 3. RESULTADOS

A Tabela 2 contém os dados de massa específica relativa e viscosidade dinâmica relativa das concentrações da solução de sulfato de sódio. A Tabela 3 fornece os valores de massa específica relativa e viscosidade dinâmica relativa das concentrações da solução de carbonato de sódio. As colunas  $\rho^*_{\text{Relativa}}$  e  $\eta^*_{\text{Relativa}}$ , representam, respectivamente a massa específica relativa e a viscosidade dinâmica relativa da solução, determinadas a uma dada temperatura, calculadas pela Equação 3.

Tabela 2 – Relação das Propriedades Relativas Estudadas da Solução de Sulfato de Sódio

Número da Solução	Concentração (kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)	$\rho^*_{\text{Relativa}}$	$\eta^*_{\text{Relativa}}$
1S	2,5	25	1,0022	1,0238
		50	0,9946	1,0152
		80	0,9988	0,9204
2S	5,0	25	1,0066	1,0306
		50	0,9979	1,0422
		80	1,0022	0,9266
3S	10,0	25	1,0079	1,0534
		50	1,0031	1,0812
		80	1,0059	0,9389
4S	12,5	25	1,0122	1,0792
		50	1,0082	1,0842
		80	1,0083	0,9423
5S	15,0	25	1,0132	1,0937
		50	1,0101	1,1080
		80	1,0089	0,9506
6S	20,0	25	1,0192	1,1074
		50	1,0170	1,1338
		80	1,0173	0,9804

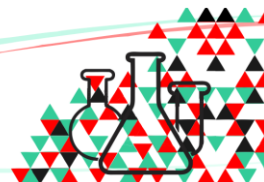


Tabela 3 – Relação das Propriedades Relativas Estudadas da Solução de Carbonato de Sódio

Número da Solução	Concentração (kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)	$\rho^*$ Relativa	$\eta^*$ Relativa
1C	2,5	25	1,0013	1,0766
		50	1,0060	0,7104
		80	1,0036	0,8782
2C	5,0	25	1,0059	1,0579
		50	1,0072	0,7130
		80	1,0059	0,8786
3C	10,0	25	1,0090	1,0637
		50	1,0084	0,7363
		80	1,0099	0,9825
4C	12,5	25	1,0117	1,1177
		50	1,0117	0,7827
		80	1,0105	0,9919
5C	15,0	25	1,0144	1,1069
		50	1,0125	0,8047
		80	1,0122	1,0056
6C	20,0	25	1,0191	1,1675
		50	1,0150	0,8815
		80	1,0134	1,0087
7C	25,0	25	1,0235	1,1521
		50	1,0166	0,8868
		80	1,0182	1,0270
8C	30,0	25	1,0282	1,2087
		50	1,0207	1,1145
		80	1,0200	1,0317
9C	50,0	25	1,0448	1,3116
		50	1,0441	1,1459
		80	1,0382	1,0601
10C	70,0	25	1,0748	1,4572
		50	1,0681	1,2457
		80	1,0636	1,1542

Ao observar as Tabelas 2 e 3, nota-se que as propriedades relativas têm um comportamento linear quando analisadas sob uma mesma temperatura, em que os valores das propriedades aumentam conforme se aumenta a concentração da solução. Além disso, percebe-se e que os valores de uma propriedade a uma dada concentração diminuem conforme aumenta-se a temperatura. As conclusões obtidas, quando comparadas com a literatura demonstrada por Gonçalves e Kestin (1981), estão em concordância, confirmando a confiabilidade dos resultados.

### 3.1 Correlações

As correlações para prever o comportamento dos sais em soluções aquosas foram feitas por meio do software Minitab® v.8. A regressão múltipla modela a relação entre a propriedade relativa, a temperatura e a concentração da solução. A Equação 4 representa este ajuste, em que se obteve, no mínimo, 90% da variação da propriedade relativa sendo explicada por tal modelo de regressão, quando estudado todos os casos esta análise se propõe a fazer.

$$G_{Relativa(T,c)}^* = A + B \cdot T + C \cdot c + D \cdot T^2 + E \cdot c^2 + F \cdot T \cdot c \quad (4)$$

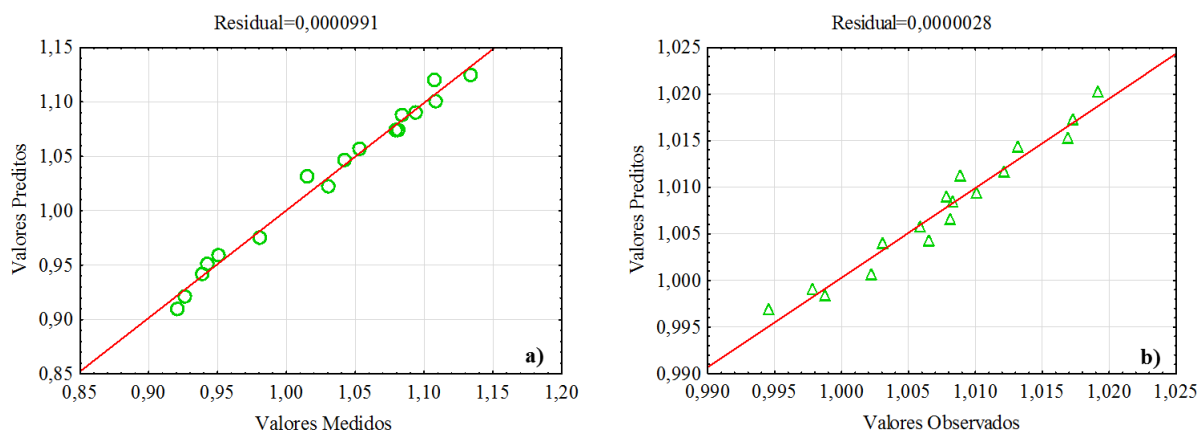
no qual,  $T$  é a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em que se quer analisar a propriedade,  $c$  é a concentração ( $\text{g.L}^{-1}$ ) da solução de sulfato de sódio ou de carbonato de sódio, dependendo do enfoque do estudo, e  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  e  $F$  são os coeficientes das soluções de sulfato de sódio e carbonato de sódio fornecidos pela Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes das Propriedades Relativas das Soluções de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

Propriedade	Coeficientes Sulfato de Sódio					
	A	B	C	D	E	F
$\rho^*_{\text{Relativa}}$	1,518	-0,00316	0,001049	0,000005	0	0
$\eta^*_{\text{Relativa}}$	-8,011	0,05724	0,01784	-0,000091	0	-0,00004
Propriedade	Coeficientes do Carbonato de Sódio					
	A	B	C	D	E	F
$\rho^*_{\text{Relativa}}$	0,99978	0,000012	0,001534	0	0,000007	-0,000003
$\eta^*_{\text{Relativa}}$	28,6	-0,1691	0,02175	0,000257	0	-0,000048

Deste modo, a Equação 4 e os coeficientes presentes na Tabela 4 podem ser utilizados para prever as propriedades relativas para valores específicos da temperatura e da concentração das soluções, ou para encontrar as configurações para a temperatura e concentração que correspondem a um valor desejado ou a uma amplitude de valores para as propriedades relativas. A análise estatística dos valores preditos e medidos, ou seja, a distribuição dos resíduos gerados pelo modelo, estão presentes nas Figuras 1 e 2.

Figura 1 – Resíduos do modelo obtido para viscosidade (a) e massa específica (b) do  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .



Para validar o modelo obtido foram preparadas mais duas soluções de diferentes concentrações, sendo realizadas as medições da massa específica e viscosidade em outra temperatura que não as medidas. Os dados experimentais e preditos, bem como os parâmetros utilizados nas soluções estão presentes na Tabela 5.

Figura 2 – Resíduos do modelo obtido para viscosidade (a) e massa específica (b) do  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

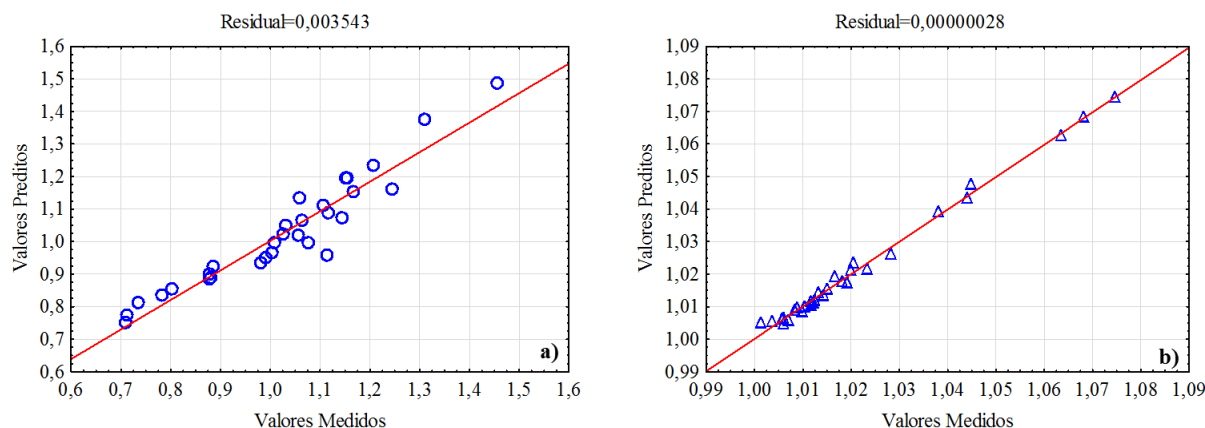


Tabela 5 – Dados da validação do modelo estatístico obtido de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

Parâmetros		$\rho_{\text{Exp.}} (\text{kg.m}^{-3})$	$\rho_{\text{Prevista}} (\text{kg.m}^{-3})$	Desvio	$\eta_{\text{Exp.}} (\text{cP})$	$\eta_{\text{Prevista}} (\text{cP})$	Desvio
Temperatura	40 °C	1,05	1,0385	0,7%	1,0955	1,1173	2,0%
Concentração $\text{Na}_2\text{CO}_3$	40 g.L <sup>-1</sup>						
Temperatura	40 °C	1,05	1,0272	2,3%	1,0115	1,0325	2,1%
Concentração $\text{Na}_2\text{SO}_4$	8 g.L <sup>-1</sup>						

Com a validação do modelo é possível não só prever o comportamento das propriedades com a sua composição e temperatura, mas também utilizar esses dados para entender como os sais em solução aquosa afetam intensivamente o valor das mesmas, podendo ser aplicadas em diversos processos industriais, entre eles o de celulose e papel.

## 5. CONCLUSÃO

As correlações para massa específica relativa e viscosidade dinâmica relativa em soluções de sulfato de sódio e carbonato de sódio, em função da temperatura e concentração desses sais, foram consideradas satisfatórias por apresentar resultados compatíveis com os valores experimentais e dados relatados na literatura.

## 6. REFERÊNCIAS

CARDOSO, M.; PASSOS, M. L.; OLIVEIRA, E. D. de. Licor negro de eucalipto Kraft proveniente de indústrias brasileiras: características químicas, físicas e seu processamento na unidade de recuperação. *O Papel*, São Paulo, v. 67, n. 2, p. 57-83, mai. 2008.

GONÇALVES, F. A.; KESTIN, J. *The Viscosity of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  and  $\text{K}_2\text{CO}_3$  Aqueous Solutions in the Range 20-60°C*. 1981.

NIST - National Institute of Standards and Technology. Disponível em: <<https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Name=benzene&Units=SI>>. Acesso em 09 de abril de 2019.